

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Donatas Balčiūnas

ROBOTIZUOTOS MATAVIMO SISTEMOS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
prof. Vytenis Sinkevičius

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas doc. Arūnas Tautkus

(parašas)

(data)

Robotizuotos matavimo sistemos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas prof. Vytenis Sinkevičius

(parašas)

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko Donatas Balčiūnas

(parašas)

(data)

PANEVĖŽYS, 2015

Balčiūnas, D. Robotizuotos matavimo sistemos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. 71 psl.

SANTRAUKA

Magistrinio darbo tikslas išnagrinėti robotizuotos matavimo sistemos panaudojimo galimybes, kuri būtų skirta laminuotų medžio drožlių plokščių apdirbimo kokybės tikrinimui. Eksperimentams naudojamas pramoninis robotas ABB IRB1400 ir Logitech C615 vaizdo kamera. Tyrimams skirtos sistemos valdymas atliekamas C++ kalba, kompiuterinei regai naudojama atviro kodo biblioteka *OpenCV*. Tyrimų objektu pasirinktos laminuotos medžio drožlių plokštės su paviršiuje suformuotomis įvairaus skersmens skylėmis. Darbe apžvelgiamos esamos matavimo sistemos, taikomi apšvietimo būdai, naudojami matavimo metodai, nustatomos vaizdo iškraipymo priežastys ir jų korekcijos metodai. Sukuriama ryšio sąsaja tarp pramoninio roboto ir vaizdus apdorojančio kompiuterio. Apžvelgiamas ir patikrinamas sukurtas metodas vaizdo taškų vertėms perskaičiuoti į metrinės sistemos vienetus. Eksperimentiniu būdu parenkami geriausi būdai detalės ir skylių matmenims nustatyti, atliekami jų tikslumo tyrimai. Taip pat tyrimų pagalba sukuriamas metodas skylių briaunų defektams aptikti ir atliekamas jo patikimumo nustatymas. Apibrėžiami pagrindiniai veiksniai įtakoiantys sistemos matavimo paklaidas.

Raktiniai žodžiai: robotizuota matavimo sistema, pramoninis robotas, kompiuterinė rega, apšvietimo sistema, vaizdo kalibravimas, *Hough* transformacija, skylės.

Balčiūnas, D. Research of the robotized measurement system. Masters final project / supervisor Prof. Vytenis Sinkevičius; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2015. 71 p.

SUMMARY

Aim of this master degree work is to analyze usage possibility of this robotic measurement system in measuring quality of a laminated chipboard processing. Equipment used for the experiments: Industrial robot ABB IRB1400 and Logitech C615 webcam. Application written in C++ is used for controlling all the experiments. *OpenCV* libraries are used for computer vision. Research object is laminated chipboard panels with different diameter holes formed on the surface. At this Master paperwork report there is a survey of current measuring systems, used lighting techniques, used measuring methods, finding what causes visual distortions and how to correct them. For exchanging information between industrial robot and personal computer communication interface is created. Created method for converting pixels to real life metric system dimensions is analyzed and tested. Best ways to detect parts and holes dimensions is found using experiments. For detecting defects in hole edge method is created and finding reliability of this method using research. And main factors influencing of system measuring tolerance is described.

Keywords: robotized measurement system, industrial robot, computer vision, lighting system, viseo calibration, Hough transform, holes.

TURINYS

TURINYS	5
ĮVADAS	7
1. ANALITINĖ DALIS	8
1.1 Matavimo sistemų apžvalga.....	8
1.1.1 CMM koordinačių matavimo sistemos	8
1.1.2 Lazerinės matavimo sistemos.....	9
1.1.3 Matavimo sistemos naudojančios vaizdų atpažinimą.....	10
1.2 Baldams skirtų plokščių paruošimo defektai	11
1.3 Baldų plokščių kokybės tikrinimo sistemos	12
1.4 Tyrimai atliekami skylių atpažinimo srityje	13
1.5 Apšvietimo sistemos	15
1.6 Detalės matmenų nustatymas.....	17
1.6.1 Hough apskritimų radimo metodas	19
1.6.2 Apskritimo radimas ieškant kontūro taškų tarpusavio požymių	20
1.7 Vaizdų iškraipymai	21
1.7.1 Radialiniai ir tangentiniai iškraipymai	21
1.7.2 Homografinės matricos gavimas	23
1.8 Skyriaus išvados	24
2. METODOLOGINĖ DALIS	25
2.1 Techninės dalies apžvalga	25
2.1.1 Tiesioginio apšvietimo sistema	25
2.1.2 Šoninio apšvietimo sistema	26
2.2 Sistemos judesių valdymas	28
2.3 Kameros kalibravimas	30
2.3.1 Vidinių kameros parametrų radimas standartinėmis funkcijomis	30
2.3.2 Paukščio skrydžio vaizdas	31
2.4 Matavimo sistemos taškų pervedimas į SI sistemos vienetus.....	34
2.5 Stačiakampių detalių aptikimas	35
2.5.1 Pirminis vaizdo apdorojimas	35
2.5.2 Kampų nustatymas naudojant Hough linijų radimo metodą	36
2.5.3 Kampų nustatymas naudojant segmentavimo metodą	38
2.5.4 Stačiakampio kraštinių matmenų radimas	39
2.6 Skylių aptikimas detalėje	40
2.6.1 Vaizdo apdorojimas skylių radimui.....	40
2.6.2 Skylių radimas ieškant kontūro taškų tarpusavio požymių	42
2.6.3 RANSAC metodas apskritimams rasti	44

2.7	Brokuotų skylės briaunų aptikimas.....	45
2.8	Koordinačių sistemos perskaičiavimas detalės atžvilgiu.....	46
2.8.1	Skylių pozicijų nustatymas detalės paviršiuje.....	48
2.9	Tyrimams naudojamos medžiagos.....	49
2.10	Skyriaus išvados	49
3.	TIRIAMOJI DALIS	50
3.1	Matavimo sistemos apšvietimo tyrimas.....	50
3.2	Pasikartojančios matavimo pozicijos tyrimas.....	52
3.3	Matavimo sistemos tikslumo tyrimas	54
3.4	Detalės matmenų aptikimo metodų tyrimas	56
3.4.1	Patobulinto Hough linijų aptikimo metodo tyrimas	59
3.5	Skylių aptikimo metodų tyrimas.....	60
3.6	Skylių aptikimo patikimumo tyrimas	62
3.7	Skirtingo gylio skylių aptikimo tyrimas	64
3.8	Skylių padėties vaizde tyrimas	65
3.9	Atstumo tarp skylių nustatymo tyrimas	66
3.10	Brokuotų skylės briaunų aptikimo metodo tyrimas.....	67
3.11	Skylių pozicijos detalėje aptikimo tyrimas.....	68
3.12	Skyriaus išvados	70
	IŠVADOS	72
	LITERATŪRA	73
	PRIEDAI	76

IVADAS

Automatinėmis staklėmis pjaustant medžio drožlių plokštes ir jų paviršiuje gręžiant tvirtinimo skylės susiduriama su problema, kai apdirbti gaminiai neatitinka brėžiniuose nurodytų dydžių ar yra brokuoti. Pavyzdžiui išsikalibravus staklėms ar sujudinus apdirbamą gaminį jo paviršiuje suformuotos skylės gali būti netinkamo skersmens, pasislinkusios į vieną ar kitą pusę nei buvo numatyta. Gręžiant skylės pažeidžiami jų kraštai, aprupa laminuota danga. Tai įtakoja prasta grąžto būklė, per mažas jo sukimosi greitis, prasta plokštės gamybos technologija. Šie defektai ne tik suteikia blogą vaizdą gaminiui, tačiau dažnai atvejais sumažina būsimos konstrukcijos tvirtumą. Problemoms spręsti naudojamos specializuotos matavimo sistemos. Tačiau pagrindinis veiksnys ribojantis platesnę jų panaudą yra kaina, be to jos būna pritaikytos tik tam tikro dydžio plokštėms matuoti, nėra lanksčios naudoti kitur. Dažniausiai veikia konvejeriniu principu, todėl reikalinga visa gamybinė linija, kuri neprieinama mažiems gamintojams.

Darbe siekiama atlikti tyrimus ir sudaryti pagrindus robotizuotos matavimo sistemos kūrimui, kuri neužimtų daug vietos, būtų pritaikyta įvairių dydžių gaminiams, galėtų greitai ir efektyviai keisti matavimo poziciją, atlikti žinomų elementų plokštumoje patikrą. Nagrinėjama matavimo sistema, kurią sudaro pramoninis robotas su prie jo pritvirtinta vaizdo kamera. Siekiama nustatyti kiek efektyviai ir tiksliai taikant šią sistemą galima išmatuoti detales, jose esančių skylių skersmenis, jų pažeidimus. Išsiaiškinti pagrindinės problemos naudojant tokio tipo sistemą.

Tyrimo objektas: plokščių matmenys su paviršiuje suformuotų skylių diametrais, eksperimentams naudojamas pramoninis ABB IRB1400 robotas, Logitech C615 vaizdo kamera.

Darbo tikslas: ištirti robotizuotos matavimo sistemos panaudojimo galimybes, eksperimentiniu būdu parinkti geriausius vaizdų atpažinimo metodus ir nustatyti sistemos matavimo paklaidas.

Darbo uždaviniai:

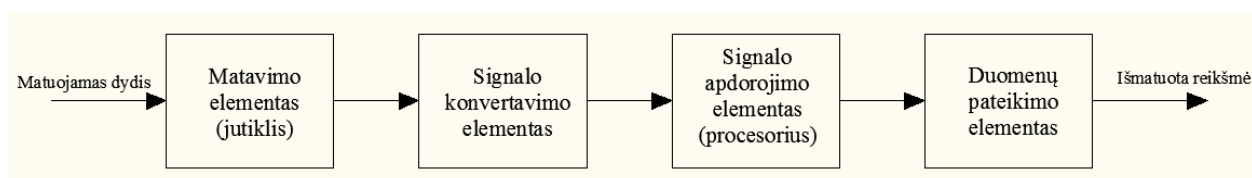
1. Išanalizuoti literatūrą apie matavimams skirtas sistemas, nustatyti geriausius vaizdų apdorojimo metodus, apžvelgti apšvietimo būdus naudojamus matavimo sistemose.
2. Išsiaiškinti vaizdų iškraipymo priežastis, nustatyti ir pritaikyti jų pašalinimo metodus.
3. Sukurti ryšio sąsają tarp vaizdus apdorojančio kompiuterio ir pramoninio roboto.
4. Sukurti metodą vaizdo taškų vertėms perskaičiuoti į metrinės sistemos vienetus.
5. Eksperimentiniu būdu parinkti geriausius metodus detalės matmenims ir skylių skersmenims rasti, nustatyti jų tikslumą. Rasti veiksnius įtakančius matavimo paklaidas.
6. Sukurti metodus skylių pozicijoms detalėje rasti, gręžimo defektams aptikti, atlikti jų eksperimentinius tyrimus ir nustatyti matavimo paklaidas.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, eksperimentai.

1. ANALITINĖ DALIS

1.1 Matavimo sistemų apžvalga

Matavimo sistema susideda iš kelių elementų ar blokų, tačiau lengviausia identifikuoti keturis pagrindinius matavimo sistemos struktūrinius elementus. Nors kai kurios iš sistemų jų gali turėti ir daugiau. Keturių pagrindinių elementų struktūra pavaizduota paveikslėlyje (1 pav.).



1 pav. Matavimo sistemos struktūra

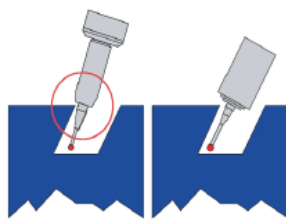
Sistemoje naudojamo jutiklio pasirinkimas priklauso nuo poreikių konkrečiam atvejui. Paprastai jis apibrėžia visos sistemos veikimo principą. Matavimo elementas objektų dydžiui paviršiuje matuoti gali būti: vaizdo kamera, lazeris, ultragarsinis jutiklis, pneumatinės sistemos jutiklis, speciali matavimo galvutė (liestukas). Gautas signalas gali būti apdorojamas specialaus procesorinio elemento (integruoto į matavimo sistemą), atskiro funkcinio bloko, personalinio kompiuterio ir kt. Tai priklauso nuo sistemos sudėtingumo, kainos, matavimo poreikių ir kitų keliamų tikslų. Apdorota algoritmų ir gauta matavimo reikšmė (išmatuotas dydis) išvedama į ekraną arba naudojama tolimesniems sistemos veiksams ir nematoma operatoriui. Toliau detaliau aptariamos atskiros paviršiaus elementų matavimo sistemos, kurios gali būti pritvirtintos prie roboto manipulatoriaus, išskiriami jų trūkumai ir privalumai.

1.1.1 CMM koordinačių matavimo sistemos

Viena iš tiksliausiai savo darbą atliekančių matavimo sistemų – koordinačių matavimo mašinos (CMM), matavimo tikslumas siekia iki $1\mu\text{m}$ [1]. Objektų koordinatės matuojamos trijose dimensijose, o didžiausias efektyvumas pasiekiamas susiejus matavimo sistemą su žinomais matuojamo objekto parametrais. Sistemoje naudojamas matavimo elementas – specialus liestukas, kuris kontaktuodamas su paviršiumi perduoda poslinkio koordinatas procesoriniam elementui.

Taikant šį metodą, dažniausiai tiriami objektai: apskritimai, skylės, sferos, cilindrai, kūgiai ir t.t. Tai gana sudėtingas matavimo būdas, reikalaujantis pasiruošiamųjų darbų, t.y. objektai turi būti stabiliai įtvirtinti. Reikia iš anksto kiekvienam objektui parinkti matuojamus taškus, liestuko galvutės judėjimas turi sutapti su viena iš matuojamo objekto ašių, norint tiksliai įvertinti duomenis reikia gauti mažiausiai trisdešimt liestuko koordinačių taškų matuojamame paviršiuje [2].

Didžiausios matavimo paklaidos pasiekiamos, kai matuojamas objektas paliečiamas liestuko galvutės laikikliu, o kompiuteris šį tašką užfiksuoja kaip matavimo rezultatą (2 pav.) [2].



2 pav. Matavimo galvutės teisingo ir neteisingo lietimosi pavyzdys [2]

1.1.2 Lazerinės matavimo sistemos

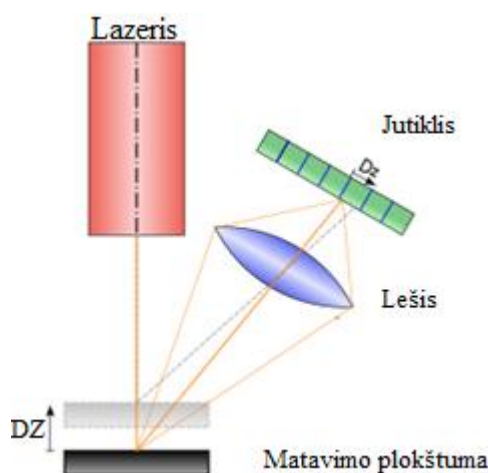
Lazeriniai skeneriai, plačiai naudojami trimatės aplinkos skenavimui (pvz. autonomiškai veikiantiems automobiliams), taip pat dažnai pritaikomi 3D/2D paviršiaus reljefo nuskaitymui, skaitmenizavimui, ar tiesiog BAR kodų aptikimui cechuose ar parduotuvėse.

Lazerinės matavimo sistemos dirba greitai, tiksliai ir svarbiausia neliesdamos matuojamo objekto, todėl užkertamas kelias bet kokiems mechaniniams objektų pažeidimams. Lazerio spindulys krinta ant matuojamo objekto, todėl išmatuojamos tik tos dalys, kurias kerta jo šviesos srautas. Kai reikalingas visas tiriamo objekto vaizdas, skenuojama iš kelių pusių ir gauti duomenys apjungiami į visumą. Toki skenavimą galima pasiekti rankiniu būdu perslenkant detalę, perstatant skenerį ar naudojant specialius sukamuosius stalus, kurie leidžia tiksliai perslinkti objektą pro lazerio spindulių kertamą plotą [3]. Sunkiausia išmatuoti spindžius ir skaidrius paviršius. Taip pat sistemos blogai veikia skenuojant tamsius matinius paviršius, nes dažniausiai sugeriami beveik visi lazerio spinduliai [3]. Tokiais atvejais tiriami objektai dažnai nudažomi šviesiai arba padengiami baltais milteliais [3].

Lazeriniai paviršiaus reljefo skeneriai paplitę metalo gamyklose, taip pat kur reikia tikrinti siaurus paviršius, nustatyti ar jie taisyklingų matmenų. Pavyzdžiui ar gerai išlieti geležinkelio bėgiai, ar ant jų nėra įtrūkimų, kitų paviršiaus defektų [4]. Veikimas pagrįstas lazerio šviesos projektavimu ant matuojamo paviršiaus specialaus lęšio pagalba. Difuziškai atspindėta nuo paviršiaus šviesa aukštos kokybės optiniais lęšiais suformuojama ant itin jautrios matricos paviršiaus. Gauti duomenys apdorojami jutiklyje integruotame procesoriuje (gali būti išvestas atskirame prijunginyje), galiausiai matavimo duomenys pateikiami kaip (z, x) koordinatės [4]. Matavimo principo vizualizacija pateikta paveikslėlyje (3 pav.).

Naudojant lazerinius paviršiaus skenerius pasiekiamas itin didelis tikslumas, pavyzdžiui „Keyence“ firmos jutiklių tikslumas – $0,01\mu\text{m}$, „Micro-Epsilon“ prietaisų tikslumas – $4\mu\text{m}$. Šiais jutikliais galima matuoti klijų padengimą ant paviršiaus, inspektuoti daiktų kraštus, matuoti suvedimo kampą, virinimo siūles. Pagrindinis veiksnys stabdantis lazerių paplitimą yra itin didelė

kaina. Be to šia sistema sudėtinga išmatuoti paviršiuje įleistus (išfrezuotus), netaisyklingos formos objektus, kadangi duomenys dažnai klaidingai interpretuoti sistemos ir perteikiami vartotojui [5].



3 pav. Lazerinio paviršiaus skenavimo įrenginio veikimo principas [4]

1.1.3 Matavimo sistemos naudojančios vaizdų atpažinimą

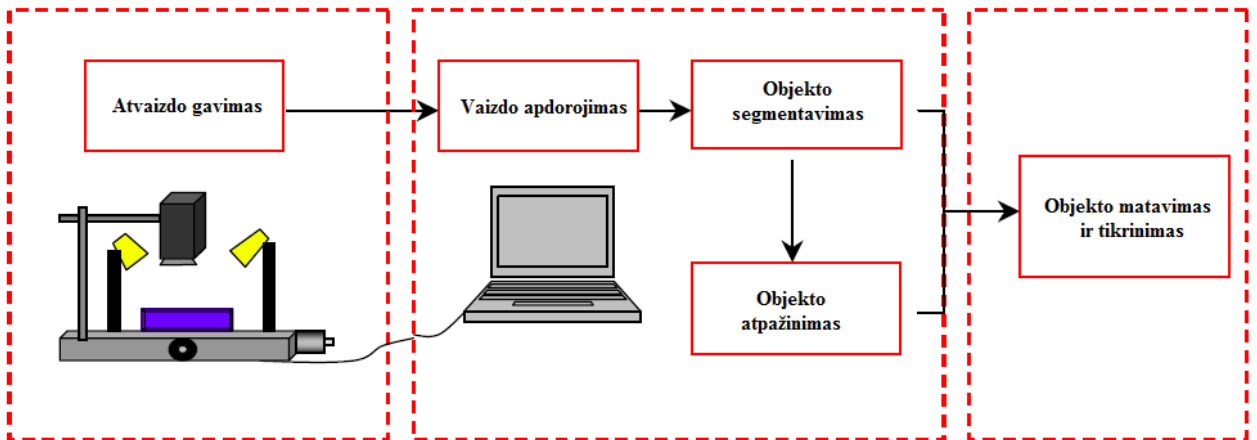
Tai pažangesnis matavimo būdas palyginus su kontaktiniu matavimu, kadangi nereikalingas sąlytis su matuojamu paviršiumi, taip pat pigesnis ir paprastesnis už lazerines sistemas. Viskas atliekama per atstumą, matuojamam paviršiui ištirti naudojama vaizdų atpažinimo sistema (kompiuterinė rega). Vaizdų atpažinimo sistemų veikimas apima atvaizdų charakteristikų išgavimą ir gebėjimą atskirti tam tikrą daiktą ar objektą. Taikant kompiuterinę regą pagrindinis tikslas nėra išgauti tikslią matuojamo objekto reikšmę [6]. Todėl matavimo/inspektavimo sistemas paremtas vaizdais, papildomai galima apibūdinti kaip metrologijos sritį paremtą vaizdų atpažinimu (*Metrology based on image*).

Galima pažymėti kelis pramonėje pritaikytas sritis: sistemos identifikuojančio pažeistus objektus kokybės tikrinime, sistemos vedančios robotus, sistemos identifikuojančios BAR kodus ir tekstus, ir žinoma sistemos matuojančios dalių matmenis, paviršiuje esančius objektus. Matavimo privalumas, kad patalpinus jutiklinį elementą (vaizdo kamerą) ant pramoninio roboto rankos, galima objektą apžiūrėti ir išmatuoti elementų matmenis skirtingose jo pusėse, jei tai leidžia techninės galimybės (objekto patalpinimas, matmenys). Nepaisant didelės technologijų pažangos, naudojant kompiuterinės regos matavimo sistemas vis dar sudėtinga išgauti didelį tikslumą, todėl visada galimos paklaidos, kurios apibrėžiamos sistemos specifikacijose. Pramoninių matavimo sistemų naudojančių vaizdų atpažinimą tikslumas siekia 0,1 – 0,2mm [6].

Kompiuterinio matavimo sistemos veikimo principas gali būti suskaidytas į penkis pagrindinius žingsnius (4 pav.):

- vaizdo gavimas;
- vaizdo paruošimas;

- objekto suskaidymas sritimis;
- matuojamo objekto atpažinimas;
- objekto dydžio, skersmens matavimas [6].



4 pav. Matavimo sistemos naudojantis vaizdus funkcinė schema [6]

1.2 Baldams skirtų plokščių paruošimo defektai

Gaminant baldus vienas iš svarbiausių etapų, taisyklingai išpjauti plokštes ir išgręžti surinkimui skirtas skylės. Nuo to priklauso būsimas gaminių estetiškas vaizdas, tvirtumas. Pjovimo staklėse naudojami diskai dyla, dėl to prastėja netik plokščių kraštų vaizdas, bet nukenčia ir jų matmenys, kampų statumas. Be disko būklės matmenys taip pat įtakoja ir pjovimo staklių veikimo principas, ypač jei jos rankinės. Šiuo atveju kiekvienas plokštės kraštas pjaunamas atskirai, todėl didesnė tikimybė ją pastatyti kreivai pjovimo disko atžvilgiu.



5 pav. Pažeista laminuota danga aplink skylę

Ne ką mažesnės problemos kyla gręžiant tvirtinimo skylės. Pasitaiko atvejų, kai skylės turinčios būti vienoje tiesėje, gręžiant nuo jos nutolsta. Taip pat visa eilė išgręžiama keliais milimetrais per aukštai arba per žemai. Skylių pozicijos neatitinka numatytos, jų gylis per didelis arba per mažas. Šios gręžimo paklaidos gaunamos, kuomet sujudinama gręžimo plokštuma arba automatinės gręžimo staklės išsikalibruoja. Galimi atvejai kuomet numatyto skersmens skylė išgręžiama su kitokio skersmens grąžtu, arba grąžtas lūžta.

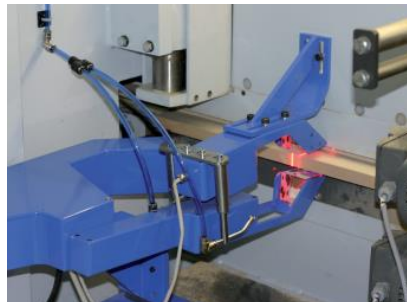
Dažnai pasitaiko, kad LMDP (laminuotos medžio drožlių plokštės) gręžiant skylės pažeidžiami jų kraštai, aprupa laminuota danga (5 pav.). Tai įtakoja prasta grąžto padėtis plokštės atžvilgiu, prasta grąžto būklė, per mažas gręžimo greitis ar prasta plokštės gamybos technologija. Šie defektai ne tik suteikia prastą estetinį vaizdą gaminiams, tačiau ir sumažina būsimos konstrukcijos tvirtumą, priklausomai nuo pažeidimų dydžio. Surenkant baldus tampa sudėtinga sunerti numatytose vietose, susukti tvirtinimo varžtus, baldai gali būti kreivi.

1.3 Baldų plokščių kokybės tikrinimo sistemos

Baldų plokščių defektams aptikti gamyklose dažnai taikomos konvejerinės stebėjimo sistemos, kuomet pro jas nestabdomai juda gamybinė žaliava. Sistemose naudojami lazeriniai skeneriai arba kombinuotos lazerinės – optinės paviršiaus stebėjimo sistemos. Priklausomai nuo komplektacijos šios sistemos tikrina skylių poziciją plokštėje, skersmenį, gylį, plokštės matmenis, paviršiaus ir kampų defektus.



a)



b)

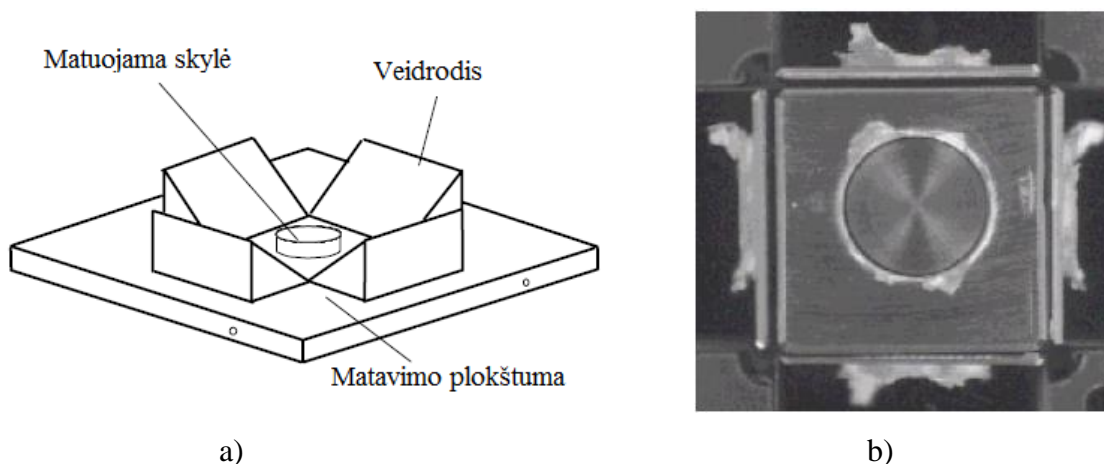
6 pav. Pramoninės stebėjimo sistemos: a) „*QI-Station*“ kombinuota stebėjimo sistema; b) „*ColourBrain*“ sistema plokštės kraštams stebėti [7]

Pavyzdžiui „*Optonova*“ firmos sistemoje „*QI-Station*“ naudojama kombinuota kokybės kontrolės sistema (6 pav. a). Lazerinė sistema aptinka paviršiuje esančių skylių padėtis ir gylius. Naudojamas paverstas veidrodis (žr. 1.1.2 punktą), skirtas paviršiaus nelygumams fiksuoti. Taip pat tikrinama detalėse esantys grioveliai, plokštės matmenys, ar ji taisyklingai išpjauta. Be ankščiau paminėtų funkcijų papildomai yra galimybė įdiegti kraštų būklės stebėjimo posistemę (3 pav. b), bei paviršiaus spalvos tolygumo fiksavimo galimybę. Tam naudojama statmenai plokštei įtaisyta kamera, kuri stebi nuo paviršiaus atsispindėjusią šviesą ir fiksuoja vaizdo histogramos pokyčius. Per minutę galima patikrinti iki 5000 skylių pozicijas ir iki 100 metrų plokščių. Sistemos tikslumas matuojant plokštės matmenis, skylių skersmenis ir poziciją siekia $\pm 0,2\text{mm}$, gylio matavimo paklaida $\pm 1\text{mm}$ [7]. Analogiška „*Baumer*“ firmos sistema „*ColoursBrain*“, kurios tikslumas taip pat $\pm 0,2\text{mm}$. Per minutę gali patikrinti iki 150 metrų plokštės [8]. Galimos ir stacionarios kokybės kontrolės sistemos, į kurias operatorius rankiniu būdu turi įstatyti gaminį.

Nors šios sistemos yra gana tikslios ir greitai apdorojančios matuojamo objekto duomenis, tačiau užima daug vietos, reikalingas konvejeris kuriuo judės plokštės, taip pat reikalingas techninis personalas priežiūrai. Todėl mažiems gamintojams jų pritaikymas saviems poreikiams sukelia rūpesčių, nes reikalingos atskiros patalpos, papildomas personalas. Be to dažnu atveju jų kaina neprieinama, kuri siekia kelis šimtus tūkstančių eurų.

1.4 Tyrimai atliekami skylių atpažinimo srityje

Analizuojant mokslinę literatūrą pastebėta, kad daug tyrimų atliekama siekiant nustatyti gręžtų ar kitaip suformuotų skylių, apskritimų defektus, skersmenis, poziciją vaizde. Skylių nustatymui taikomos skirtingos technikos ir metodai.

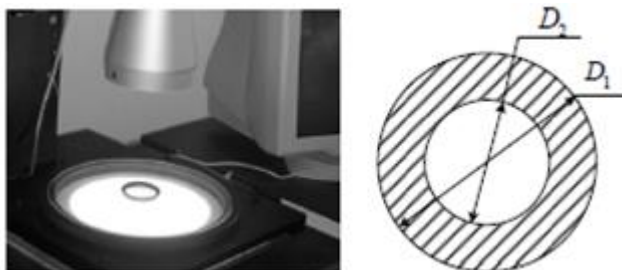


7 pav. Veidrodinė skylių matavimo sistema: a) sistemos modelis; b) vaizdas matomas per kamerą [9]

Vienas iš įdomesnių siūlomų būdų aptariamas Japonijos mokslininkų. Skylių inspektavimui naudojama speciali veidrodinė matavimo sistema, kurią sudaro keturi vienas prieš kitą sustatyti maži veidrodžiai link matuojamo objekto pakreipti 45 laipsnių kampu (7 pav.) [9]. Kamera patalpinama virš skylės taip, kad į jos matomumo lauką pakliūtų nuo visų veidrodžių atsispindėjęs skylės vaizdas. Atliekant skylės savybių analizę, pirma tiriama neatsispindėjęs vaizdas ir gaunamas skylės skersmuo, po to tiriama atsispindėjęs nuo veidrodžių vaizdas. Tokiu būdu galima nustatyti kokiam aukštyje yra gręžmo atplaišos ir kokio dydžio. Šiame metode taikoma tiesioginio apšvietimo sistema, pritvirtinta šalia kameros. Vaizdo vieno taško rezoliucija 40 mikrometrų. Taikant šį metodą pasiekti rezultatai: skylės skersmens matavimo tikslumas $\pm 0,254\text{mm}$, skylės nutrupėjimų aukštis $\pm 0,057\text{mm}$ [9]. Pagrindinis šios sistemos trūkumas, kad matavimai atliekami stacionarioje pozicijoje vienu metu tik vienai skylėi. Reikia keisti arba perstumti matuojamą objektą, nes sistema nepaslanki plokštumoje [9].

Jei matuojamas objektas tuščiaviduris, galima taikyti galinį apšvietimą. Pavyzdžiui matuojant apskritų tarpinių skersmenį, jos patalpinamos ant matavimo plokštumos turinčios galinį

šviesos diodų apšvietimą (8 pav.) [10]. Tokiu būdu gaunamas labai kontrastingas matuojamas vaizdas, tarpinių kontūrų labai aiškiai išskiriami, kameroje gaunamas tiesioginis detalės šešėlis. Galima tiksliai nustatyti tarpinės vidinį iš išorinį skersmenį. Metodo vidutinis tikslumas siekia $\pm 0,0051\text{mm}$, tai geresnis rezultatas nei veidrodinio matavimo metodo metu. Pagrindinę įtaką susidariusioms paklaidoms turi kameros skiriamoji geba, matavimo metu vieno pikselio vertė atitiko $0,003\text{mm}$ [10]. Pagrindinis trūkumas, kad matuojamas detales reikia keisti, sistema negeba pati aptikti detalės padėties ir virš jos pozicionuoti.

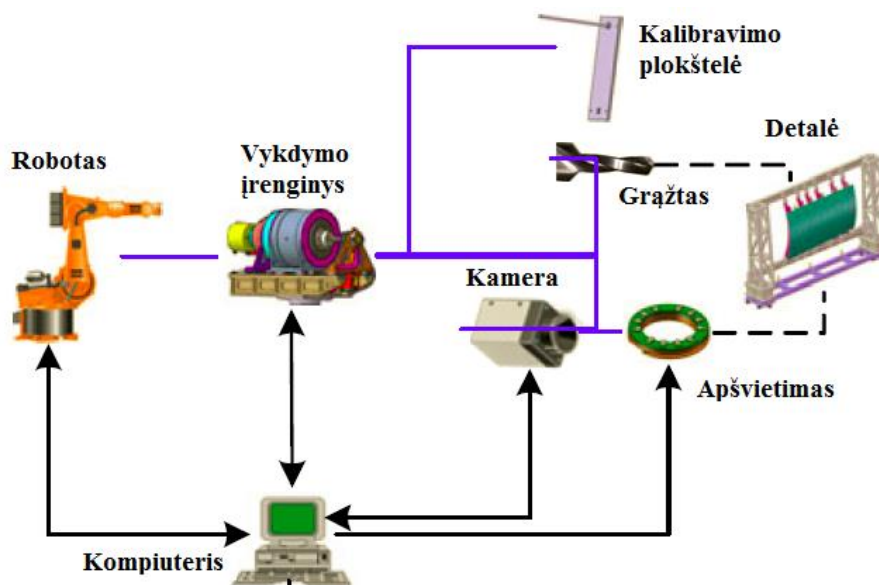


8 pav. Vaizdų atpažinimo sistema su galinių apšvietimu [10]

Dar vienas būdas matuoti skylių skersmenį ir gylį, taikyti SFF metodą (Shape from Focus), kurį plėtoja „Zhejiang“ universiteto mokslininkai. Šiuo atveju matuojamos skylės, kurių skersmuo kinta nuo 5 iki 500 mikronų. Didesniam kontrastui gauti naudojama skaidri platforma su galiniu apšvietimu, ant kurios patalpinama matuojama plokštelė, o dar labiau kontrastui išryškinti pritaikomas koaksialinis halogeninis apšvietimas iš viršaus. Keičiant fokusavimo nuotolį po 8 mikrometrus gaunami skirtingi išgręžtos skylės atvaizdai skirtingose vaizdo plokštumose [11]. Tyrimo metu siekiama tiksliai nustatyti gręžimo broką, t.y. rasti įvairių atsiradusių atplaišų dydį ir jų gylį. Gauti atvaizdai vienu atveju apdoroti pritaikant Laplaso transformacijos funkciją, kitu atveju Gauso interpoliacija. Atlikus matavimus ir palyginus rezultatus nustatyta, kad pritaikius Laplaso suminę transformaciją tikslumas $\pm 2,1 \mu\text{m}$, o Gauso interpoliacijos atveju padidėja iki $\pm 1,7 \mu\text{m}$. [11].

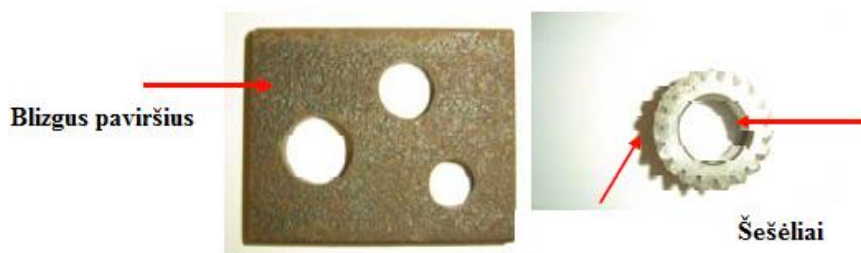
Paviršiaus matavimams taip pat gali būti naudojami pramoniniai robotai su specialiomis matavimo sistemomis, nes jie gali išmatuoti didelius plotus, kurių neapėmia įprasti matavimo automatai. Jie yra universalūs, lankstūs ir plačiai naudojami gamyboje įvairioms sritims, pavyzdžiui objektų pernešimui, dažymui, virinimui ar surinkimui. Esant gerai sukalibruotam robotui atkartojama pozicija svyruoja nuo $0,01\text{mm}$ iki $0,2\text{mm}$. Pavyzdžiui Kinijos mokslininkai plėtoja robotizuotą sistemą lėktuvų kniedžių skylėms gręžti. Kaip teigiama, vien žinoti numatomą skylės poziciją apdorojamoje detalėje nepakanka, nes žinomos roboto koordinatės ne visada sutampa su detalės koordinatėmis, todėl galima išgręžti skylę ne vietoje ir sugadinti gaminį [12]. Šiai problemai spręsti taikomas paviršinis skylių žymėjimas ruošinyje, pagal kurį robotas pasitelkęs kompiuterinės regos sistemą kiekvienu atveju perskaičiuoja skylės poziciją. Sistemoje

naudojama specialus vykdymo įrenginys pritvirtintas prie roboto rankos (9 pav.). Jame sumontuota vaizdo kamera, apšvietimo sistema ir grąžtas. Visą sistemą kontroliuoja personalinis kompiuteris, kuriame vaizdų atpažinimo programa parašyta remiantis *OpenCV* bibliotekos funkcijomis [12]. Prieš atliekant matavimą vaizdo kamera yra sukalibruojama specialų matricių pagalba, po to nustatoma skylės pozicija vaizde ir atliekamas grėžimas. Taip pat pakartotinai patikrinama išgręžta skylė. Naudojantis šia sistema pasiekiamas $\pm 0,15\text{mm}$ grėžimo tikslumas [12].



9 pav. Robotizuotos skylių grėžimo sistemos struktūrinė schema [12]

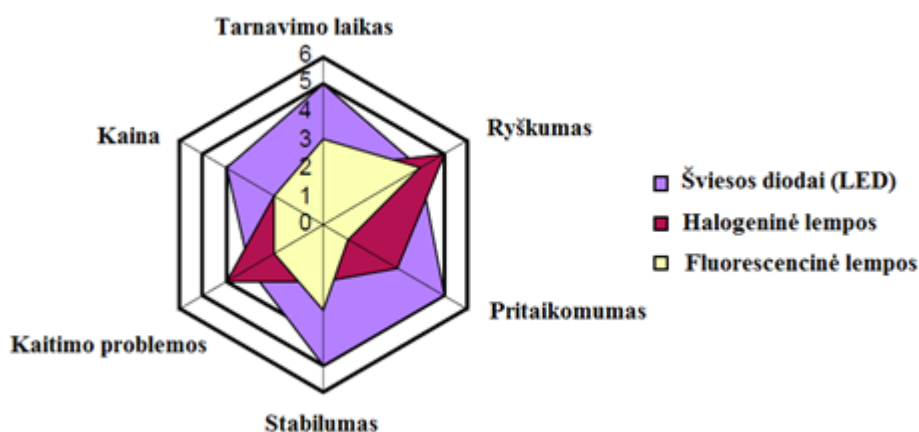
1.5 Apšvietimo sistemos



10 pav. Netinkamo apšvietimo sukeltos problemos

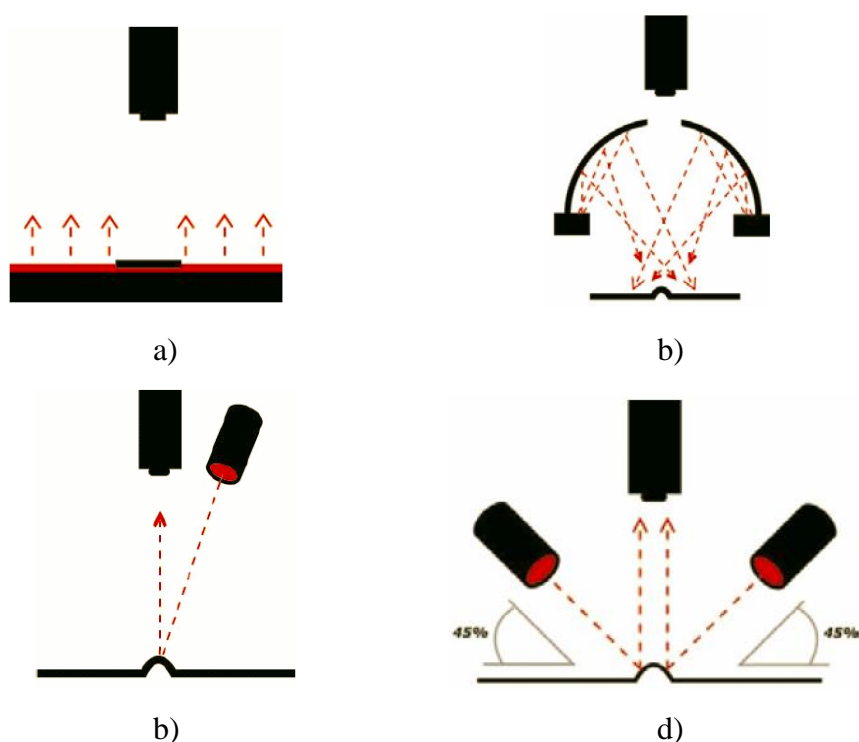
Kokybiškas ir tinkamas apšvietimas yra kritinis aspektas kuriant kokybišką, tikslią ir greitą vaizdų atpažinimo sistemą. Nuo pat pradžių, kai buvo pradėtos naudoti optinės atpažinimo sistemos, tinkamo apšvietimo pasirinkimas kelia daugiausiai klausimų, nes jis įtakoja detalės kontūrą, jos paviršiaus struktūrą, joje esančių objektų atpažinimo kokybę. Dažniausios problemos sukeliančios įtaką galutiniam matavimo rezultatui, tai nuo blizgių paviršių atsispindinti šviesa į kameros objektyvą, detalių kuriame šešėliai, netolygus apšvietimo sudaromi šviesūs – tamsūs plotai vaizde (10 pav.). Taip pat tiriamas paviršius gali būti grublėtas, nelygus tekstūros, tuomet apšviečiant iš bet kurio kampo matomi atsispindėję vaizdas. Jei objekte yra paslėptų vietų

ir jas reikia ištirti (pvz. skardinės dugnas), tuomet šoninis apšvietimas netinkamas, nes nebus įmanoma jų apšviesti.



11 pav. Šviesos šaltinių palyginimo diagrama [13]

Šiuo metu labiausiai paplitusios apšvietimo sistemos, kurių pagrindą sudaro: fluorescencinės lempos, halogeninės lempos, šviesolaidžiu skleidžiama šviesa, ksenono lanko lempos, šviesos diodų sistemos.



12 pav. Apšvietimo sistemų tipai: a) galinis apšvietimas; b) pilno ryškumo apšvietimas; c) tiesioginis apšvietimas; d) tamsaus lauko apšvietimas (kraštinis) [14]

Iš šių šviesos šaltinių labiausiai naudojamos halogeninės, fluorescencinės ir LED apšvietimo sistemos. Kaip matyti iš palyginamojo grafiko (11 pav.), LED šviesos šaltiniai pasižymi daug ilgesniu tarnavimo laiku, stabilumu ir pritaikomumu palyginus su kitomis aptartomis sistemomis [13]. Pagrindinis trūkumas vis dar gana aukšta kaina, kadangi tai jauna

technologija, dideli gamybos kaštai. Tačiau kaip pažymi daugelis mokslininkų, kol kas nei vienas šviesos šaltinis negali išspręsti visų su apšvietimu susijusių problemų.

Šviesos šaltiniai gali būti montuojami įvairiais būdais, populiariausi naudojami:

- galinis apšvietimas, tiriamas objektas patalpinamas ant šviesos šaltinio (12 pav. a).
- pilno ryškumo lauko apšvietimas, objektas apšviečiamas iš sferos sklindančia šviesa (12 pav. b), dažniausiai naudojamas išgaubtiems, apvaliems objektams tirti.
- tiesioginis apšvietimas, objektas apšviečiamas iš viršaus, šviesos šaltinis montuojamas panašiu kampu kaip ir kamera (12 pav. c), dažniausiai taikomas matiniams, plokštiems paviršiams.;
- tamsaus lauko apšvietimas (kraštinis), objektas apšviečiamas iš kampų, po paviršiuje krenta mažesnis šviesos srautas (12 pav. d)., taikomas įvairiems paviršiams.
- Žiedinis apšvietimas, apšviečiamas visas objektas iš visų pusių [14].

Galima išskirti du geriausius apšvietimo metodus: tiesioginis detalės apšvietimas ir tamsaus lauko apšvietimas. Naudojant tiesioginį apšvietimą, detalė dažnai yra per ryškiai apšviečiama, be to esant blizgiam paviršiui, jis atspindi šviesos šaltinio kontūrus į objektyvą. Naudojant tamsaus lauko apšvietimą mažėja nenumatyti atspindžiai, gerėja detalės kontūro išskyrimas. Galima tiksliau nustatyti medžiagos paviršiaus struktūrą, nes apšviečiami visi iškilimai, nesudaromi atspindžiai į kamerą, tačiau galimi šešėliai susidarę nuo apšviečiamos detalės.

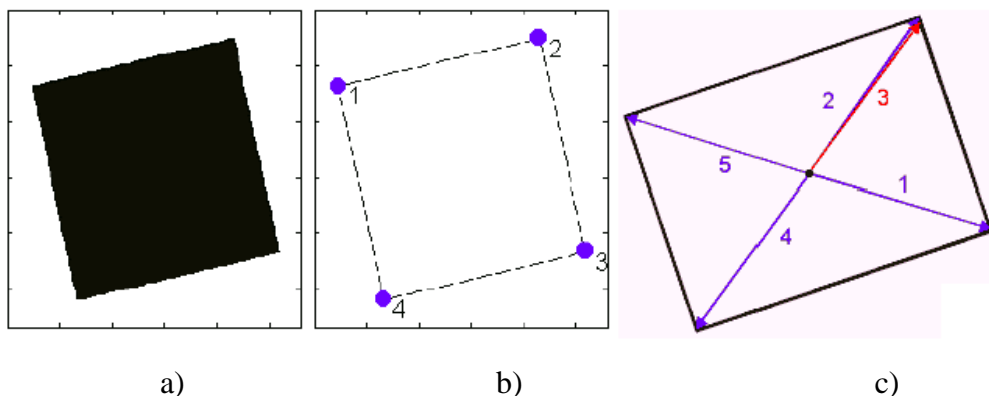
1.6 Detalės matmenų nustatymas

Sekantis labai svarbu žingsnis, tai dominuojančių vaizde regionų išskyrimas, kuriuos numatyta matuoti. Tam dažnai taikomas vienas iš labiausiai paplitusių metodų – segmentavimas, vaizdo skaidymas į atskiras sritis, turinčias prasmę vaizdų atpažinime [15]. Segmentavimas atliekamas prieš atvaizde esančių detalių atpažinimą, vaizdas pirmiausia segmentuojamas, po to apdorojami gauti rezultatai [15]. Segmentavimo algoritmus galima suskirstyti į 3 grupes:

1. Segmentavimas analizuojant tiriamo šablono histogramą;
2. Segmentavimas dalinant tiriamą šabloną į atskirus plotus, turinčius panašias savybes. Nagrinėjama apibrėžta vaizdo taško aplinka, sritis aplink tašką auginama, kol šalia esančių taškų savybės tampa panašios.
3. Segmentavimas remiantis briaunų padėtimi šablone, t.y. naudojantis kraštų radimo algoritmais (pvz. *Canny*) randama uždara srities briauna, kuri apibrėžia tiriamos srities vidų ir išorę [15].

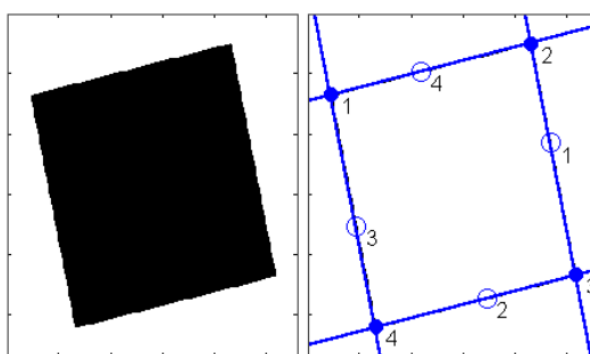
Toliau seka objekto padėties nustatymas paveiksle ir jo kampų bei formos radimas. Vienas iš galimų metodų yra nustatyti tolimiausius taškus nuo segmentuoto objekto centro, kurie

priskiriami objekto viršūnėms (13 pav. a, b). Svarbu pažymėti, kad reikia nustatyti mažiausią atstumą tarp galimų objekto viršūnių, taip pat apibrėžti maksimalų kampų kiekį segmente, tokiu būdu išvengiant galimų matavimo klaidų, viena iš jų pavaizduota paveikslėlyje (13 pav. c). Kaip matyti paveiksle nustatytos dvi viena kitos esančios viršūnės, 2 ir 3, nutolusios per kelis pikselius, kurios atsirado dėl kampo netolygumo.



13 pav. Kvadrato viršūnių nustatymas: a) originalus paveikslas; b) nustatytos viršūnės; c) galimos viršūnių nustatymo paklaidos [16]

Kitas būdas rasti objekto viršūnes, tai išskirti tiesias atvaizde esančias linijas, kurios sudaro objekto kraštus (14 pav.). Objektas pirmiausiai gali būti susegmentuojamas ir randami visi jo kraštai. Žinant detalės kraštus galima pritaikyti „Hough“ linijų radimo transformaciją. Radus visas linijas vaizde, joms priskiriami konkretūs numeriai. Po to ieškoma linijų sankirtų, toliausiai nuo objekto centro nutolusių taškų, jie ir bus tiriamos detalės kampai. Skirtingai nei prieš tai aptartame metode, nereikia rasti tam tikro kampų kiekio, todėl šį metodą patogiu naudoti ir netiesinių objektų atpažinimui [17].



14 pav. Kvadrato viršūnių nustatymas panaudojant rastas linijas [16]

Žinant visas kampų koordinatas (x,y) , galima rasti detalės matmenis, tam naudojama formulė pateikta žemiau (1):

$$AB = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (1)$$

čia AB – atstumas tarp dviejų taškų; x, y – taškų koordinatės. Apskritimų aptikimo metodai

Išgręžtas skyles lentose ar kitose medžiagose paprasčiausia apibūdinti kaip apskritimus. Praktikoje naudojamos vaizdų atpažinimo sistemos taiko skirtingus jų aptikimo metodus, tačiau galima išskirti pagrindinius, pasitaikančius dažniausiai. Vienas iš jų tai „*Hough*“ apskritiminė transformacija. Galimi du jo panaudojimo atvejai, kai apskritimo spindulys žinomas, arba nežinomas [18]. Taip pat dažnai sutinkamas metodas, kuomet pirma aptinkami atvaizdo kraštai, pagal kurių požymius nustatoma ar tai gali būti apskritimas.

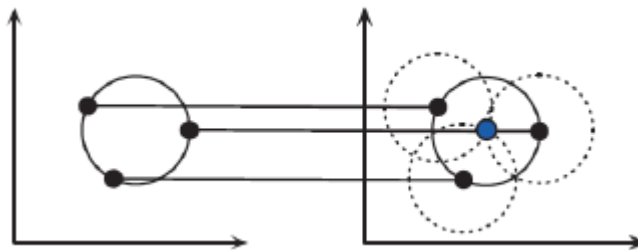
1.6.1 Hough apskritimų radimo metodas

Apskritiminė *Hough* transformacija gali būti naudojama skilių parametrus išskirti iš turimo atvaizdo. *Hough* transformaciją galima pavaizduoti grafiškai, kai yra pradinis taškų išsisklaidymas, pagal kuri norime rasti apskritimą (15 pav.). Ieškomą apskritimą su žinomu spinduliu ir centro koordinatėmis galima apibrėžti sekančia lygtimi (2) [18]:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=R^2, \quad (2)$$

čia a, b – apskritimo centro koordinatės; x, y – taškų, gautų po briaunų radimo koordinatės, kurios sudarys apskritimą; R – apskritimo spindulys [18].

Jei tiriamame vaizde yra žinomas apskritimo spindulys, jo paieškai naudojamas dvimatis akumulatorius. Tokiu atveju apskritimo centro koordinatės aprašomos (a, b) , jo koordinačių erdvė aprašoma (x, y) . Taikant formulę (2) paeiliui iš (x, y) koeficientų erdvės imamas kiekvienas taškas ir išbrėžiamas žinomo spindulio r apskritimas. Kiekvienas turimo akumulatoriaus elementas, kuris atitinkantis naujo apskritimo koordinatės padidinamas vienetu [18]. Vieta kurioje susikerta visi išbrėžti nauji apskritimai (akumulatoriaus maksimalaus elemento indeksai) laikoma ieškomo objekto centro koordinatėmis [18].



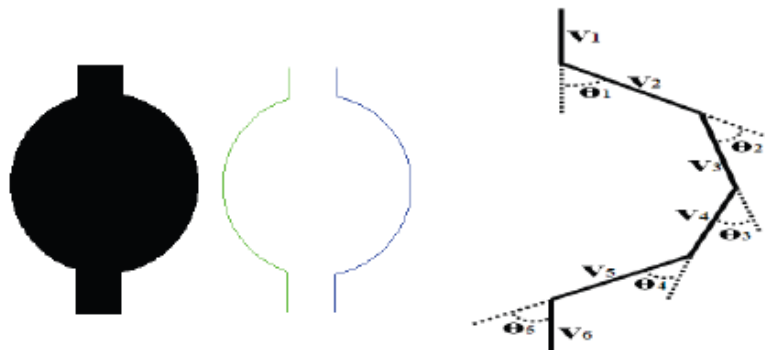
15 pav. Apskritimo parametrų aptikimas *Hough* metodu [18]

Šis metodas plačiausiai naudojamas ieškant skylių su žinomais spinduliais, nes kitu atveju labai apkraunamas kompiuterio procesorius skaičiavimais, kadangi reikia patikrinti visų galimų apskritimų sankirtas, tokiu atveju naudojamas trimatis akumulatorius (a, b, R) [18].

1.6.2 Apskritimo radimas ieškant kontūro taškų tarpusavio požymių

Naudojant šį apskritimų radimo metodą pirma atvaizde išskiriamos briaunos naudojant *Canny*, *Sobel* ar kitą būdą, priklausomai nuo atvaizdo kokybės ir taškų tankumo [19]. Šio metodo autorių siūloma kiekvieną išskirtą briauną nuosekliai imant taškus tikrinti, ar tai gali būti apskritimas ar ne. Siūloma gautuose taškų segmentuose nuo pradinio taško nuosekliai kraštui per pasirinktą atstumą brėžti menamas linijas ir tikrinti jų sankirtos kampus (16 pav.)

Pavyzdžiui imamas linijų V5-V4 sankirtos kampas ir lyginamas su linijų V4-V3 kampu, jei šis kampas yra panašus priskiriama, kad šios linijos gali sudaryti apskritimą, jei ne praleidžiamos pirmos dvi linijos ir tikrinamos sekančios. Tokiu būdu patikrinamos visos menamų linijų sankirtos. Visi gauti kampai surašomi į masyvą ir po to tikrinami bendrai, ar visos linijos buvo vienos krypties ir ar kampai nenukrypo [19]. Jei kampas labai mažas priimam kad linijos segmentas yra kolinearūs, todėl negali būti dalis apskritimo. Jei kažkuris kampas staigiai padidėja, vadinasi taškų segmentas daro statų posūkį ir jis nebegali būti apskritimu. Taip pat įvedamas minimalus ir maksimalus galimas apskritimo susidarymo kampas [19]. Toliau šio segmento taškams pritaikomas mažiausių kvadratų metodas apskritimams brėžti. Iš kurio galima gauti tikslų apskritimo centrą ir spindulį. Svarbu paminėti, kad šis būdas nereikalauja didelių kompiuterio resursų, o tai sistemą daro greitesne [19].



16 pav. Arkų radimas brėžiant menamas linijas tarp atskirų segmento taškų [19]

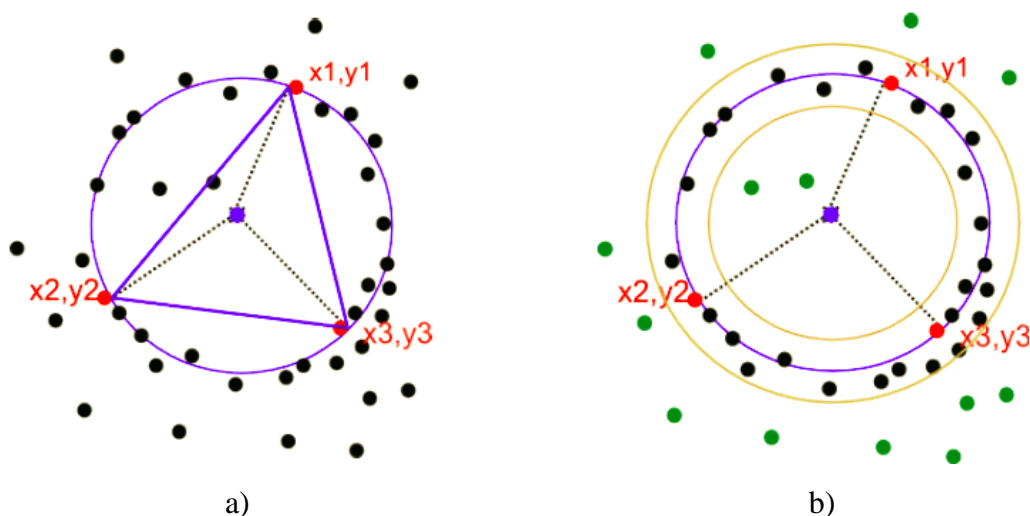
1.7.3. RANSAC metodas

RANSAC metodas – atsitiktinės atrankos konsensuso metodas (angl. Random sample consensus). Tai vienas iš labiausiai paplitusių apskritimų aptikimo metodų naudojamų vaizdų atpažinimo matavimo sistemose [20]. Kaip ir prieš tai aptartame metode, pirma apdorojame vaizde reikia išskirti briaunas ir tik po to taikyti atpažinimo metodą.

RANSAC algoritmą galima suskaidyti į penkis dalis:

1. Iš šablone aptiktų briaunų masyvo atsitiktinai pasirenkami trys taškai ($s=3$). Išbrėžiamas apskritimas einantis per šiuos tris taškus (17 pav. a).

2. Apskaičiuojami visų kitų šablone esančių taškų atstumai iki išbrėžto apskritimo išorinės linijos ir nustatoma, kurie iš jų priklauso apskritimui, o kurie ne (17 pav. b). Paveikslėlyje priklausančius ieškomam apskritimui taškus žymi du menami apskritimai.
3. Apskaičiuojamas konsensuso dydis S_i (priklausantys taškai apskritimui) ir palyginamas su iš anksto numatytu slenksčiu T . Jei S_i didesnis už T , priimama jog vaizde išbrėžtas apskritimas gali egzistuoti.
4. Jei S_i dydis mažesnis už T , imami nauji trys atsitiktiniai taškai ir algoritmas kartojamas iš naujo.
5. Po iš anksto numatytų N bandymų nustatomas didžiausias iš rastų S_i konsensuso dydis, tai ir yra ieškomas apskritimas[21].



17 pav. RANSAC algoritmo veikimas: a) apskritimas einantis per tris atsitiktinius taškus; b) taškų paskirstymas į priklausančius ir nepriklausančius apskritimui [21]

1.7 Vaizdų iškraipymai

Visose vaizdo kameroje pasireiškia didesni ar mažesni gaunamų vaizdų iškraipymai, kuriuos sukelia lęšio forma ar gamybinės technologijos nesilaikymas. Šie iškraipymai vadinami vidiniais, atitinkamai radialiniais ir tangentiniais, dažniau pasireiškia pigiose vaizdo kameroje. Radialiniai iškraipymai atsiranda dėl sferos formos kameros lęšio [22]. Tangentiniai iškraipymai pasireiškia dėl vidinių kameros konstrukcijos trūkumų [22]. Taip pat analizuojant vaizdus didelę įtaką turi išoriniai iškraipymai, kai kameros matricos ir matuojamo objekto plokštumos nesutampa. Tiek vidiniai, tiek išoriniai kamerų parametrai gali būti programiškai ištaisomi.

1.7.1 Radialiniai ir tangentiniai iškraipymai

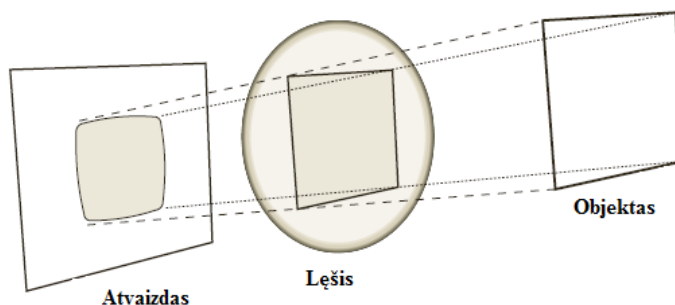
Kameroje dažnai pastebimi radialiniai vaizdo iškraipymai, kitaip dar vadinami žuvies akies (*fish-eye*) efektu. Dėl lęšio išgaubtumo spinduliai kurie praeina arčiau objektyvo centro yra

sulenkiama mažiau nei tie kurie praeina toliau nuo jo centro (18 pav.). Radialinė distorcija optiniame centre lygi 0 ir didėja artėjant link atvaizdo kraštų [23].

Šie iškreipimai gali būti ištaisomi naudojantis sekančiomis formulėmis (3) [23]:

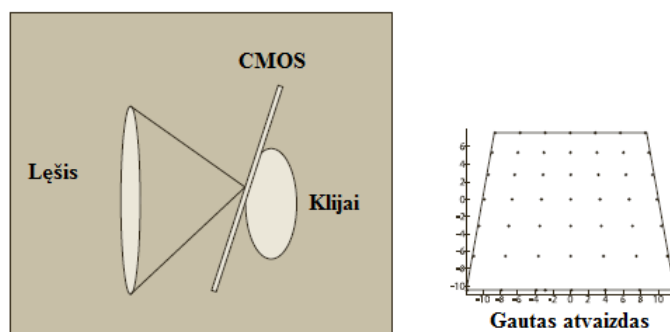
$$\begin{aligned} x_{taisytas} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{taisytas} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \end{aligned} \quad (3)$$

čia $x_{taisytas}$, $y_{taisytas}$ – koreguoti taškai; x, y – nekoreguoti taškai; r, k – radialinio iškreipimo koeficientai.



18 pav. Radialiniai iškreipimai sukelti lęšio formos [23]

Kitas taip pat labai svarbus aspektas – tangentiniai iškreipimai. Šie vaizdo iškreipimai susidaro dėl gamybinės technologijos netobulumo, t.y. kameros lęšis nėra vienodoje plokštumoje su kameros matrica (19 pav.) [23]. Šis kamerų trūkumas dažniausiai pasireiškia pigiose kamerose, pavyzdžiui kai matrica klijuojama klijuojama.



19 pav. Tangentinių vaizdo iškreipimų atsiradimas [23]

Ištaisyti tangentinius iškreipimus plokštumoje užtenka dviejų papildomų parametru p_1 ir p_2 tuomet gaunama išraiška (4) [23]:

$$\begin{aligned} x_{taisytas} &= x + [2p_1 y + p_2 (r^2 + 2x^2)] \\ y_{taisytas} &= y + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 x], \end{aligned} \quad (4)$$

čia p_1, p_2 – tangentinės distorcijos koeficientai.

Taigi norint pašalinti pagrindinius vaizdo iškraipymus reikia rasti penkis parametrus, kuriuos galima aprašyti vienoje 5x1 matricoje (5) [23]:

$$D_{koef} = (k_1 k_2 p_1 p_2 k_3), \quad (5)$$

čia D_{koef} – iškraipymų koregavimo matrica.

1.7.2 Homografinės matricos gavimas

Kitas labai svarbus momentas homografinės matricos radimas ir jos panaudojimas atvaizdui, t.y. pasaulio koordinačių perkėlimui ant objekto atvaizdo, tokiu būdu virtualiai sulygiagretinant kameros matricos ir gaunamo objekto plokštumas. Tarkime objekto plokštumoje koordinatės yra Q , o jo atvaizdo q , tarp jų galima gauti tokią homografinę išraišką (6) [23]:

$$\tilde{q} = sH\tilde{Q}, \quad (6)$$

čia H – homografinė matrica; s – skalės faktorius.

Pažymima, kad rotacijos koeficientas R ir perdavimo (suvertimo) koeficientas t apibrėžiamas vienmate matrica W . Tuomet turimą išraišką (6) galima perrašyti taip (7) [23]:

$$\tilde{q} = sMW\tilde{Q}, \quad (7)$$

čia M - kameros korekcijos matrica.

Toliau priėmus, kad $Z=0$ galima supaprastinti (7) lygtį, tai galima atlikti susistačius likusius žinomus kintamuosius, kaip parodyta sekančiai (8) [23]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

čia x, y – kameros plokštumos koordinatės; X, Y – matuojamo objekto plokštumos koordinatės.

Tuomet homografinė matrica H , kuri perkelia objekto plokštumos koordinatas ant atvaizdo koordinačių plokštumos aprašoma sekančiai (9) [23]:

$$H = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Pritaikius šią išraišką (6) formulėje, gaunamas taip vadinamas paukščio skrydžio vaizdas, kuris yra lygiagretus kameros fotografuotai plokštumai.

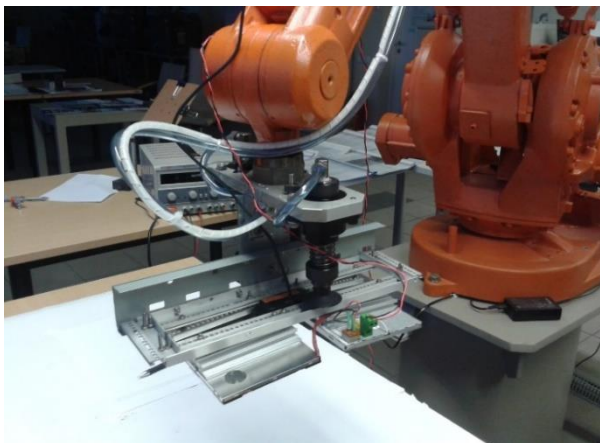
1.8 Skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad baldinių plokščių paviršiaus matavimo sistemos pasiekia $\pm 0,2\text{mm}$ tikslumą.
2. Išsiaiškinta, kad naudojant vaizdų atpažinimo sistemas paviršiams tirti, objektus geriausia apšviesti tiesioginiu arba kraštiniu apšvietimu.
3. Išsiaiškinta, kad detalės matmenims nustatyti geriausiai tinka segmentavimo arba *Hough* linijų sankirtos radimo metodas.
4. Išsiaiškinta, kad skylių matavimui geriausiai tinkami metodai yra: *Hough* apskritimų radimo metodas, *RANSAC* metodas, kontūro taškų tarpusavio požymių analizavimo metodas.
5. Išanalizavus vaizdo kamerų sandarą nustatyta, kad pagrindiniai atvaizdų iškraipymai susidaro dėl netobulos lęšio formos ir nelygiagrečios lęšio ir kameros matricos padėties. Šie iškraipymai vadinami radialiniais ir tangentiniais, juos galima kompensuoti specialiomis matricomis.
6. Nustatyta, kad norint gauti teisingus duomenis apie matuojamo objekto savybes, reikia pasaulio koordinačių sistemą perkelti ant atvaizdo koordinačių sistemos. Tam naudojama homografinė matrica, kurios dėka gaunamas paukščio skrydžio vaizdas.

2. METODOLOGINĖ DALIS

2.1 Techninės dalies apžvalga

Tyrimams skirtą robotizuotą matavimo sistemą sudaro pramoninis robotas ABB IRB 1400 su valdymo spinta M94, jo manipulatorius turi šešis judrumo laipsnius. Vienas iš galimų matavimo sistemos variantų pateiktas paveikslėlyje, šiuo atveju prie roboto rankos pritvirtinama tyrimams sukurta kameros sistema su tiesioginiu vaizdo apšvietimu (20 pav.).



20 pav. Speciali kameros ir tiesioginio apšvietimo sistema

Pramoninio roboto IRB 1400 tikslumas judant visoms ašims 1m/s greičiu yra:

- vienkrypčio judėjimo pasikartojamumas 0.05mm;
- linijinio kelio tikslumas 0.45 – 1.0mm;
- linijinio kelio pasikartojamumas 0.14 – 0.25mm;
- mažiausias pozicionavimo atstumas 0.2 – 0.35mm [24].

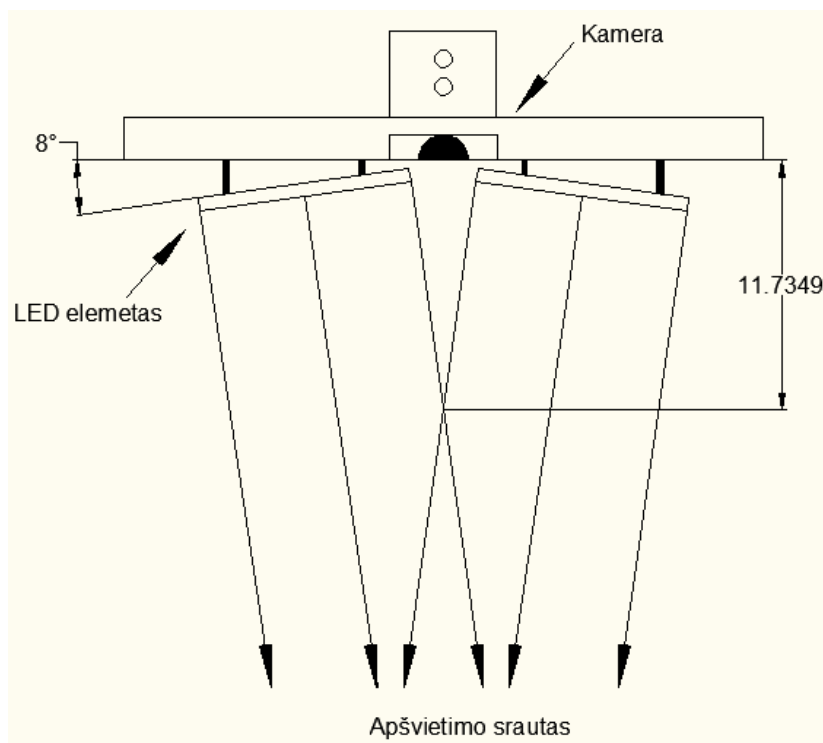
Instrukcijos rašomos *Basic* programavimo kalba, jas galima surinkti naudojant valdymo pultą (*Teach pendant*) ar parašius programą kompiuteryje plėtiniu *.prg ir ją perkėlus „*Floppy*“ disku į valdymo spintos sistemą. Valdymo spinta turi numatytus išorinių sąsajų kanalus, tris RS232 ir vieną RS485, tačiau norint jais naudotis reikia įdiegti programinius papildymus.

Prie roboto manipulatorius pritvirtintai sistemai pasirinkta aukštos skiriamosios rezoliucijos WEB vaizdo kamera Logitech C615, turinti automatinį fokusavimą ir galinti įrašyti iki 1920 x 1080 taškų skiriamosios gebos vaizdą.

2.1.1 Tiesioginio apšvietimo sistema

Sistemai sudaryti parinkti du LCD ekranuose naudojami 7 colių foninio apšvietimo elementai šviesos diodų pagrindu, kurie turi puikias tolygaus apšviestumo paskirstymo plote galimybes. Kad apšviečiant nesusidarytu du atskiri apšviesti plotai, platformoje varžtų

konstrukcijos pagalba yra galimybė reguliuoti jų suvertumą ± 8 laipsnių diapazone (21 pav.). Kamera patalpinta tarp šių dviejų elementų esančiame 30mm tarpe. Apšvietumo intensyvumas reguliuojamas laboratoriniu maitinimo šaltiniu keičiant srovės dydį 0 – 200mA ribose.



21 pav. Apšvietimo sistemos konstrukcija ir suvertimo kampas

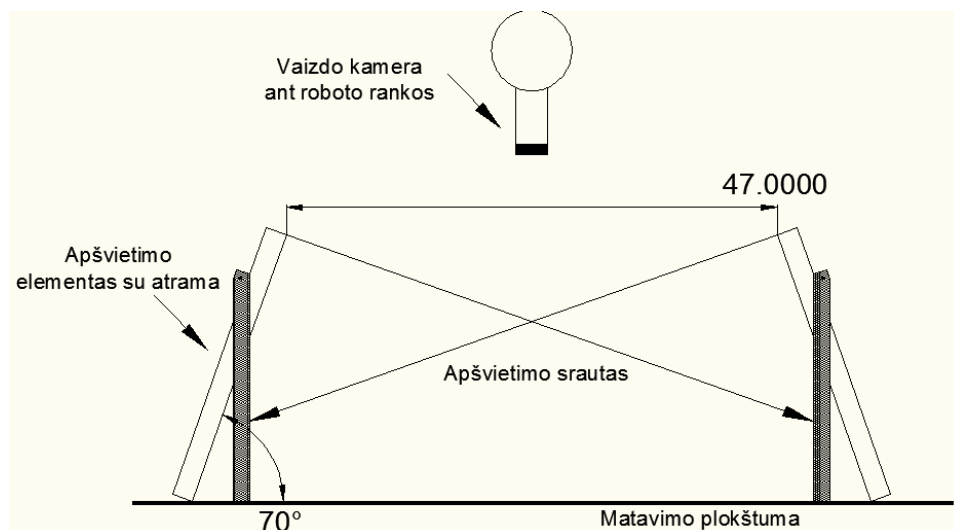
Žinant tikslus matmenis ir nusibraižius apšvietimo sistemos brėžinį AutoCAD programoje, galima sumodeliuoti koku kampu reikia paversti LED elementus ir nustatyti minimalų, optimalų ir maksimalų darbinį sistemos atstumą, t.y. atstumą tarp kameros matricos ir matavimo plokštumos.

Kameros apšvietimo elementus kameros centro atžvilgiu suvertus maksimaliu galimu 8 laipsnių kampu (21 pav.), minimalus darbinis atstumas be tamsių zonų matavimo centre turėtų būti apytiksliai lygus 117,3mm, optimalus – 450mm. Nustatytas maksimalus galimas apšvietimo sistemos darbinis atstumas apie 900mm atstumu nuo kameros, tačiau jam pasiekti naudojami LED elementai yra per silpni, paviršius būtų neapšviestas. Optimaliame atstume abiejų matavimo elementų dengiamas šviesos srautas matavimo plokštumoje yra apie 100mm. Minimaliame matavimo atstume šviesos srauto plotas matavimo plokštumoje – apie 200mm.

2.1.2 Šoninio apšvietimo sistema

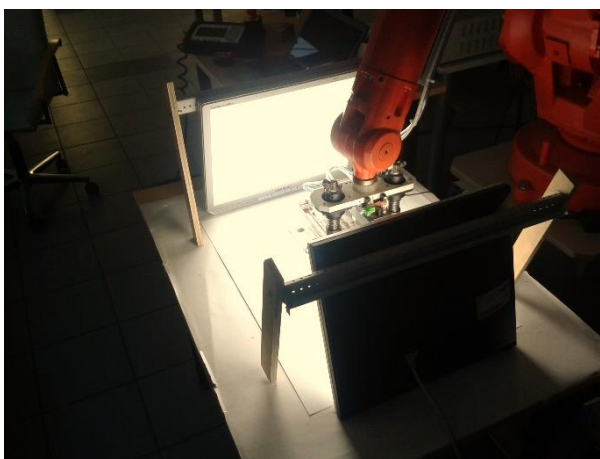
Remiantis analitinėje dalyje nagrinėtais apšvietimo metodais, darbe atliekamiems tyrimams taip pat sudaroma kraštinio apšvietimo sistema, kurioje objektas apšviečiamas iš šonų, tokiu atveju apšvietimas tampa nepriklausomas nuo kameros padėties. Šiai sistemai sukurti

pasirenkami du naudojami nebetinkami kompiuterio monitoriai Samsung 720N, kurių įstrižainė – 17 colių. Iš šių monitorių pašalinamos LCD matricos, paliekami tik galiniai liuminescencinių lempų pagrindu sudaryti apšvietimo elementai. Nuardomos ekranų laikančiosios platformos, jų vietoje pritvirtinamos sukurtos atramos sistemos, kurios leidžia monitorių korpusus suversti link matavimo plokštumos centro. Suvertimo lygį galima reguliuoti sukiojant pritvirtintas medines atramas. Apšvietimui nėra galimybės elektriškai reguliuoti šviesos intensyvumo lygio, tai galima atlikti nebent keičiant tarpą tarp elementų. Vaizdo kamera pritvirtinama prie roboto manipulatoriaus rankos. Apšvietimo sistemos eskizas pateiktas paveikslėlyje (22 pav.)



22 pav. Šoninio apšvietimo sistema tyrimams

Esant 70 laipsnių kampui tarp matavimo plokštumos ir apšvietimo elemento, šviesos srautas krinta visame plote, todėl apšvietimas yra tolygus. Šiuo atveju matavimo plokštumos apšvietimo plotas nepriklauso nuo kameros aukščio, apšviestas darbinis plotas siekia 470mm.



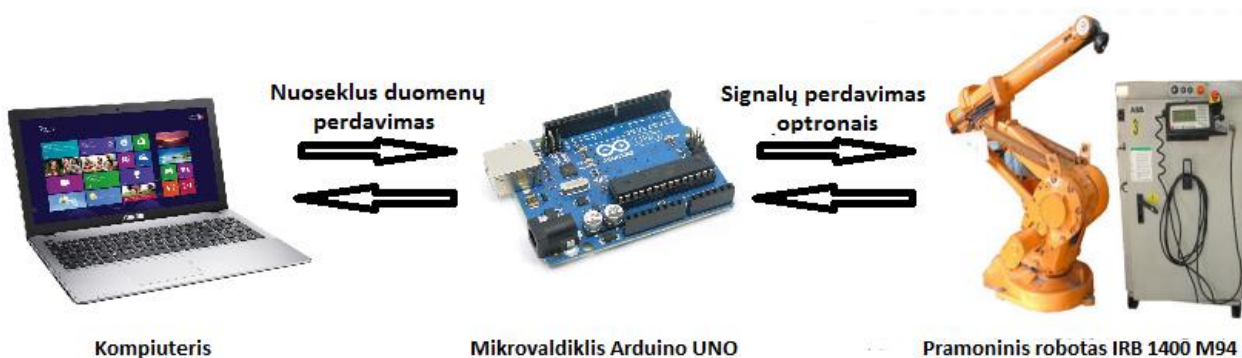
23 pav. Sukurta šoninio apšvietimo sistema

Kamerai esant apšviestame sraute, matavimo plokštumos paviršiuje nesusidaro jos šešėlis, nes po kamera pilnai patenka apšvietimo spinduliai. Maksimalų darbinį plotą galima didinti

tolinant apšvietimo elementus, tačiau tai gali turėti įtakos bendram apšvietimo ryškumui, nes monitorių elementai turi ribotas šviesos srauto intensyvumo galimybes. Paveikslėlyje pateiktas realus sistemos vaizdas (23 pav.)

2.2 Sistemos judesių valdymas

Bandydams atlikti pasirinkta pramoninio roboto ABB IRB1400 valdymo spinta M94 neturi reikalingos programinės įrangos nuosekliai duomenų perdavimo sąsajai palaikyti. Tačiau tyrimams atlikti nebūtinai grįžtamasis ryšys į valdantįjį kompiuterį, manipuliatoriui pakanka pozicionuoti į iš anksto nustatytas koordinates. Valdymo sistema kuriama naudojant roboto spintoje esančius įėjimo išėjimo modulius. Sistemoje numatyta naudoti tris skirtingus matavimo aukščius, keturiasdešimt devynias skirtingas pozicionavimo plokštumoje padėtis, taip pat keturias pozicijas kalibravimui atlikti. Tokiu būdu galima iš arti atskirai išmatuoti detalių kampus ir nuskenuoti detalės plokštumą skirtinguose aukščiuose. Iš viso reikalingos 56 skirtingos pozicijos, įskaitant ir pozicionavimo aukščius.



24 pav. Pramoninio roboto valdymo sistemos grafinis atvaizdavimas

S4 spintos įėjimų ir išėjimų moduliai maitinami 24V įtampa. Pasirenkama naudoti Arduino UNO mikrovaldiklį kaip tarpinį signalų konvertavimo įrenginį, kuris su kompiuteriu ryšį palaikytų naudojant nuoseklaus duomenų perdavimo sąsają. Mikrovaldiklio darbinė įtampa 5V, iš viso turi 6 analoginius įėjimus ir 14 skaitmeninių įėjimų/išėjimų jungčių. Roboto valdymo principas pavaizduotas paveikslėlyje (24 pav.). Kadangi mikrovaldiklio išėjimų/įėjimų įtampa 5V, reikia juos atskirti nuo roboto maitinimo įtampos. Šiuo atveju pasirenkami 4N32 optronai, kurie elektriškai izoluoja vieną įtampą nuo kitos. Šeši optronai skirti perduoti valdymo komandą robotui, ir du ryšio sinchronizavimui. Iš jų vienas naudojamas patvirtinimui iš roboto apie įvykdytą komandą, kitas ryšiui su robotu užmegzti, pranešant apie siunčiamą pozicionavimo komandą iš mikrovaldiklio. Optrono tranzistorinio elemento emiteris per žemę (*GND*) pajungiamas prie roboto įėjimų. Padavus valdymo srovę į optroną, robotas gauna signalą. Siekiant apsaugoti optroną nuo sugadinimo valdymo srovė apribojama 100 omų varža. Taip pat norint išvengti klaidingų

signalų į roboto sistemą jo naudojami įėjimai per 10 kiloomų varžas pajungiami prie 0V poliaus, kol nepaduota valdymo įtampa roboto įėjimai visada gauna žemą signalą.

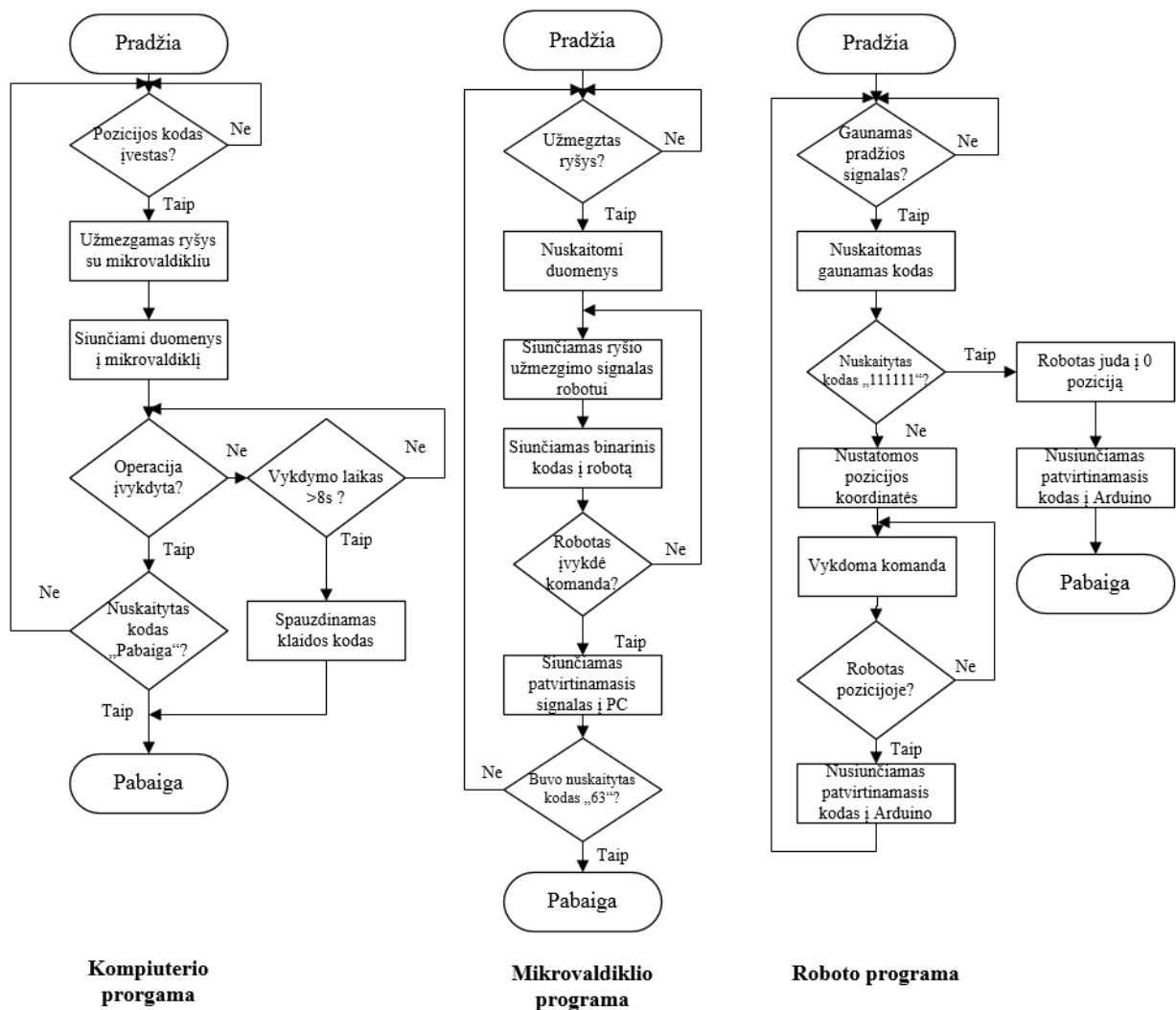
Pozicionavimo komandos iš mikrovaldiklio siunčiamos dvejetainiais kodais per optronus į roboto įėjimus, kurie pateikiami lentelėje, taip pat nurodoma kokią poziciją komanda atitinka (1 lentelė). Naudojami šeši ženklai, kurie gali įgauti tik dvi reikšmes: 1 – aukštas signalas, 0 – žemas signalas. Tokiu būdu iš viso yra galimybė nusiųsti 64 komandas roboto valdymui.

1 lentelė

Valdymo komandos ir pozicionavimo padėty

Komandos pavadinimas	Komanda iš kompiuterio į mikrovaldiklį	Mikrovaldiklio siunčiama komanda
0 pozicija	„0“	000000
1 pozicija	„1“	000001
2 pozicija	„2“	000010
...
49 pozicija	„49“	110001
1 aukštis	„50“	110010
2 aukštis	„51“	110011
3 aukštis	„52“	110100
1 kalibravimo aukštis	„53“	110101
2 kalibravimo aukštis	„54“	110110
3 kalibravimo aukštis	„55“	110111
4 kalibravimo aukštis	„56“	111000
Pabaiga	„63“	111111

Kompiuteryje roboto valdymo programa rašoma C++ kalba, *Visual Studio* programavimo aplinkoje. Ryšys tarp kompiuterio ir mikrovaldiklio atliekamas 9600 bitų nuosekliu greičiu. Supaprastintas bendras roboto valdymo sistemos algoritmas pateiktas paveikslėlyje (25 pav.). Užmezgus ryšį su mikrovaldikliu, jam siunčiamos valdymo komandos eilute *string*, kurios sunumeruotos atitinkamai nuo „0“ iki „63“. Gavęs šią komandą mikrovaldiklis paverčia į dvejetainį kodą ir perduoda roboto valdymo spintai, papildomu optrono signalu inicializuoja jos vykdymą. Roboto pusėje programa atpažįsta komandą ir ją vykdo, atlikus pozicionavimą į nurodytą tašką, išsiunčiamas signalas atgal į mikrovaldiklį apie jo įvykdymą. Mikrovaldiklis nustoja siųsti komandą į robotą ir išsiunčia *string* duomenų tipu signalą „1“ į kompiuterį apie sėkmingą komandą. Ją gavusi kompiuterio programa pereina į laukimo režimą naujai komandai vykdyti. Toliau valdymo algoritmas kartojamas nuo pradžių. Jei robotas per 8 sekundes nuo ciklo pradžios neįvykdo komandos, fiksuojamas sistemos gedimas ir darbas baigiamas. Taip pat sistemos darbas baigiamas į komandų eilute įvedus skaičių „63“.



25 pav. Supaprastintas roboto valdymo algoritmo atvaizdavimas

2.3 Kameros kalibravimas

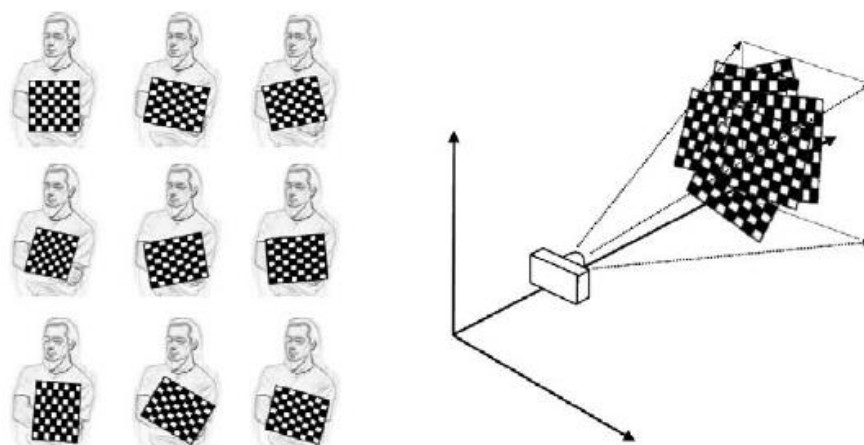
Darbiui su vaizdais pasirinkta C++ programavimo kalba. Toks programavimo būdas leidžia vienu metu bendrauti su robotu ir tuo pačiu apdoroti vaizdus, t.y. nereikia kelių skirtingų programų darbui. Taip pat naudojama *OpenCV* biblioteka, kuri leidžia paprasčiau dirbti su atvaizdų matricomis, išskirti iš jų norimus objektus.

2.3.1 Vidinių kameros parametrų radimas standartinėmis funkcijomis

Iš principo bet koks tinkamai apibūdinamas objektas gali būti naudojamas kaip atskaitos taškas kalibravimui, tačiau praktiškiausias pasirinkimas dėl skaičiavimų supaprastinimo yra šachmatų lenta, kadangi ji turi taisyklingas formas ir aiškiai išsiskiriamus kontūrus.

Kameros kalibravimui naudojamos *OpenCV* esančios bibliotekos, sukurtos remiantis *Zhang* ir *Sturm* atliktais moksliniais tyrimais [25]. Šachmatų lenta yra fotografuojama įvairiais rakursais, kad būtų gauta pakankamai informacijos spręsti apie tangentinių ir radialinių iškreipimų

dydį ir paskaičiuoti teisingus koeficientus reikalingus vaizdo perskaičiavimo matricoms sudaryti (26 pav.).



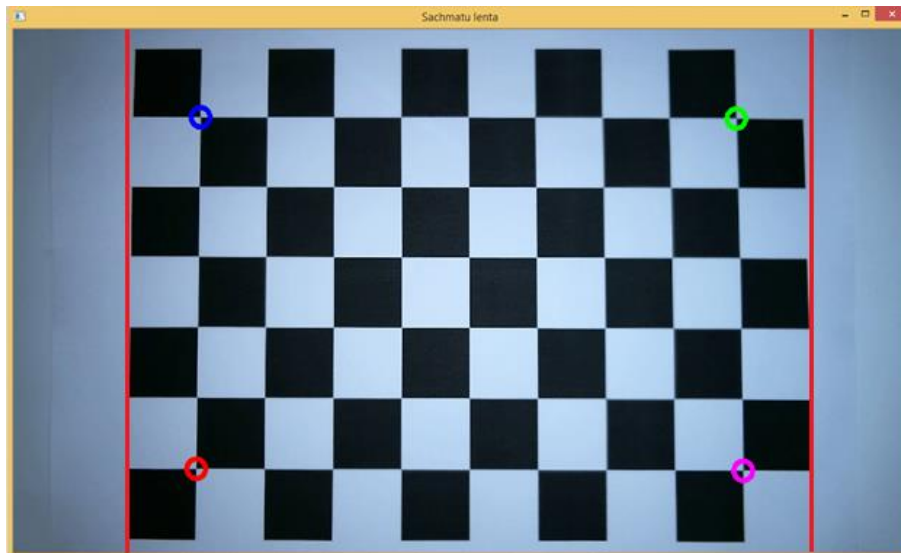
26 pav. Kameros kalibravimas naudojant šachmatų lentą

Kalibravimo programos kodas sudarytas pasiremta pavyzdžiu iš internete laisvai prieinamos Gary Bradski ir Adrian Kaehler knygos „*Learning OpenCV*“. Šio darbo metu naudojama lenta turinti 10x7 juodo-balto kvadratų, kurių vieno kraštinės ilgis lygus 25mm. Daroma 30 kadru, kurių raiška 1920 x 1080 taškų ir iš programinio kodo suformuojamos dvi matricos, kurių duomenys surašomi į XML failus, atitinkamai *Intrinsics.xml* ir *Distortion.xml*, kad būtų galima naudoti tolimesniuose tyrimuose kameros vaizdo išorinių ir vidinių kameros parametrų taisymui. Tyrimams naudojama kamera Logitech C615 yra gana kokybiškai surinkta, gauto atvaizdo taisymai yra nežymūs.

2.3.2 Paukščio skrydžio vaizdas

Viena iš pagrindinių ir svarbiausių užduočių siekiant atlikti teisingus matavimus su robotizuota sistema yra suderinti kameros matricos ir matuojamo objekto plokštumas į lygiagrečią padėtį. Kad tai būtų atlikta teisingai reikia pasirinkti mažiausiai keturis žinomus atvaizdo taškus, tai yra bet kuriuos keturis šachmatų lentos kvadratų sankirtos taškus.

OpenCV bibliotekos pagalba sudarytas algoritmas pateiktas prieduose (1 priedas). Pirma nuskaitomas homografinės matricos radimui reikalingas atvaizdas su 10 x 7 šachmatų lenta. Įkeliamos tangentiųjų ir radialinių iškraipymų koregavimo matricos. Kad būtų pašalinti šie iškraipymai sukuriama dvi papildomos matricos *mapx* ir *mapy*, kurių dydis atitinka pirminio atvaizdo dydį. Viena matrica skirta x ašiai koreguoti, kita y. Šioms matricoms pritaikomi iškraipymų koregavimai su funkcija *cvInitUndistortMap()* ir sudaromos vaizdo koregavimo matricos (angl. *map*). Ant pirminio įkelto vaizdo užnešamos su funkcija *cvRemap()*.



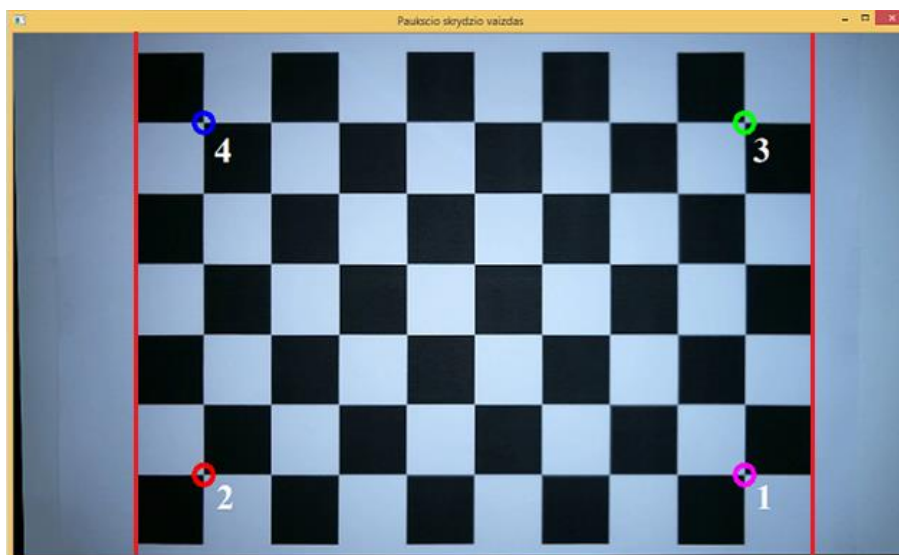
27 pav. Vaizdas prieš paukščio skrydžio kalibravimą

Gavus sukalibruotą pirminį vaizdo šabloną sukuriama jo pilkų atspalvių (angl. *gray image*) kopija. Randami visi šachmatų lentos kampai pirminiame atvaizde *cvFindChessboardCorners()* ir naudojantis pilkų atspalvių šablonu pritaikius funkciją *cvFindCornerSubPix()* patikslinamos kampų koordinatės tūkstantosiomis vaizdo taškų dalimis. Toliau pasirenkami keturi šachmatų lentos kampai pagal kuriuos bus ieškoma homografinės matricos. Pritaikius funkciją *cvGetPerspectiveTransform()* naudojant pasirinktus taškus gaunama šablono perspektyvos transformacijos matrica, taip vadinama homografinė matrica, kuri įrašoma į failą *H.xml* tolimesniam naudojimui. Pritaikius šią matricą vaizdui galima gauti paukščio skrydžio transformaciją, jos užnešimui naudojama funkcija *cvWarpPerspective()*.

Kalibravimui naudotas maksimalios 1920 x 1080 taškų rezoliucijos atvaizdas (27 pav.), vaizdo iš viršaus kalibravimo rezultatus galima pamatyti kitame paveiksle (28 pav.). Pasirinkti 4 šachmatų lentos taškai pažymėti spalvotais apskritimais. Vaizduose išbrėžta po dvi papildomas raudonas linijas. Nekalibruotame vaizde linijos nėra lygiagrečios kvadratams, o kalibruotame glaudžiasi prie kvadratų ir yra jiems lygiagrečios. Papildomai galima patikrinti kalibravimo tikslumą išmatuojant naudotų keturių taškų atstūmus vaizde taškais, t.y. išbrėžus menamas linijas tarp taškų ir pamatavus lygiagrečių ilgius atstumas turi būti vienodas. Taip pat tikslinga pamatuoti įstrižainių ilgius. Naudojama formulė atstumui tarp dviejų taškų rasti (10):

$$Distancija = \sqrt{(B_x - A_x)^2 + (B_y - A_y)^2}, \quad (10)$$

čia A_x, B_x – pirmo taško koordinatės; A_y, B_y – antro taško koordinatės.



28 pav. Sukalibruotas paukščio skrydžio vaizdas

Matavimo rezultatai prieš paukščio skrydžio kalibravimą pateikti lentelėje (2 lentelė).

2 lentelė

Matavimo rezultatai prieš vaizdo kalibravimą

Taškai	Atstumas	Taškai	Atstumas	Taškai	Atstumas
1-2	1174,23	1-3	724,82	2-3	1365,77
3-4	1149,9	2-4	726,24	1-4	1374,03
Skirtumas	24,33	Skirtumas	1,42	Skirtumas	8,26

Matyti, kad tarp nekalibruoto atvaizdo dviejų lygiagrečių 1-2 ir 3-4 tiesių skirtumas – 24,33 pikselio, nes kameros matrica ir matuojamas atvaizdas yra ne lygiagrečioje plokštumoje, o pasikreipę vienas kito atžvilgiu. Šį vaizdą būtina kalibruoti.

3 lentelė

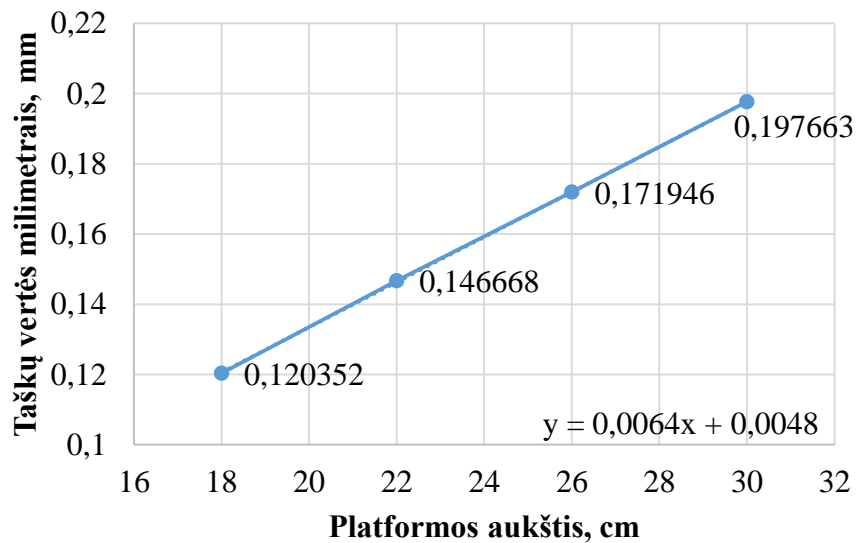
Matavimo rezultatai po kalibravimo

Taškai	Atstumas	Taškai	Atstumas	Taškai	Atstumas
1-2	1161,24	1-3	725,75	2-3	1369,33
3-4	1161,16	2-4	725,74	1-4	1369,35
Skirtumas	0,08	Skirtumas	0,01	Skirtumas	0,02

Kaip matyti iš gautų duomenų (3 lentelė), kalibravimas pavyko sėkmingai, nes didžiausias skirtumas tarp lygiagrečių linijų siekia 0,08 pikselio, o tarp įstrižainių skirtumas tik 0,01 pikselio. Norint dar labiau padidinti tikslumą galima pasirinkti daugiau taškų homografinės matricos radimui.

2.4 Matavimo sistemos taškų pervedimas į SI sistemos vienetus

Didžiojoje dalyje matavimo sistemų galutinai išmatuotų objektų dydžiai vartotojui pateikiami ne taškinėmis vertėmis, bet SI sistemos metriniais vienetais. Todėl prieš pradėdant atlikti tyrimus reikia surasti kiek milimetrų atitinka vienas vaizdo taškas. Keičiant atstumą tarp matavimo sistemos ir matuojamos plokštumos vieno pikselio vertė keičiasi, todėl reikia rasti perdavimo funkciją, pagal kurią galima būtų perskaičiuoti pikselius į milimetrus, matavimo platformai būnant bet kokiame žinomame aukštyje. Reikia nustatyti ar keičiant aukštį pikselių vertės kinta proporcingai, t.y. ar nedaro įtakos iškraipymų ir paukščio skrydžio kalibravimo paklaidos, kitos nenumatytos aplinkybės.



29 pav. Pikselių vertės milimetrais skirtinguose matavimo platformos aukščiuose

Šis kalibravimas atliekamas su 1980 x 1080 taškų raiškos atvaizdais, matavimui kadrai paaimami keturiuose skirtinguose aukščiuose: 18cm, 22cm, 26cm, 30cm. Žinoma, kad viena šachmatų lentos kvadrato kraštinė lygi 25mm. Matuojama viena ir ta pati kvadrato kraštinė keturiuose skirtinguose atvaizduose ir pagal formulę (11) randama vieno taško vertė milimetrais.

$$D_{mm} = \frac{L_{kvad}}{Px_{sk}}, \quad (11)$$

čia D_{mm} – pikselio vertė milimetrais; L_{kvad} – kvadrato kraštinės ilgis milimetrais; Px_{sk} – pikselių skaičius kvadrato kraštinės ilgyje.

Gauti rezultatai perkeliama į grafiką (29 pav.), kurį išanalizavus galima teigti, kad keičiant atstumą tarp kameros ir paviršiaus, vaizdo taškų vertės kinta proporcingai. Iš gautų duomenų galima išvesti funkciją $f(x)$, pagal kurią apskaičiuojamos pikselių vertės milimetrais bet kokiame platformos aukštyje. Kadangi taškai nėra visiškai tiksliai išsidėstę tiesėje, reikia pritaikyti

mažiausių kvadratų metodą funkcijos $f(x)$ koeficientams a ir b rasti. Tai atliekama turimus duomenis susistačius į dalinių išvestinių lygčių sistemą (12).

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}, \quad (12)$$

čia a, b – funkcijos koeficientai; x, y – koordinačių sistemos taškai.

Iš (12) lygčių sistemos gauti koeficientai sustatomi į funkciją $f(x)$ (13):

$$f(x) = ax + b, \quad (13)$$

čia x – matavimo platformos aukštis.

2.5 Stačiakampių detalių aptikimas

Matavimo sistemos tikslumo tyrimams atlikti tikslinga naudoti nesudėtingus objektus, todėl pasirinktos stačiakampės įvairių paviršiaus tekstūrų detalės (1 priedas). Paprasčiausias būdas jų matmenims rasti, aptikti visus keturis kampus ir nustatyti jų koordinates (x, y) . Po to rasti matuojamo objekto kampų išsidėstymą gautame atvaizde, nustatant kur kuris kampas, ir galiausiai apskaičiuoti objekto kraštinių ilgius. Darbe tiriami du metodai, skirti detalės kampams aptikti:

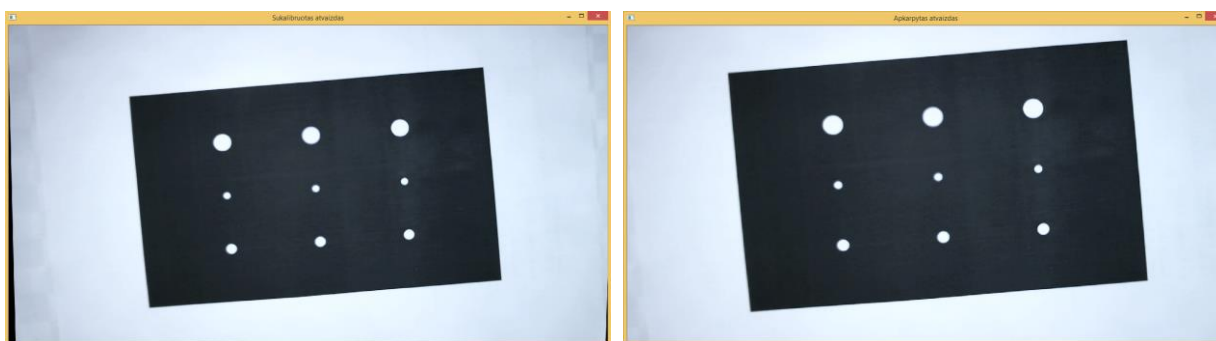
- matmenų nustatymas panaudojant segmentavimo metodą;
- matmenų nustatymas naudojant *Hough* transformaciją linijų radimui.

2.5.1 Pirminis vaizdo apdorojimas

Norint taikyti tolimesnius metodus stačiakampio kampų išskyrimui, iš pradžių tikslinga atlikti bendrą pirminį gauto detalės atvaizdo apdorojimą. Pašalinami kameros tangentiniai ir radialiniai iškraipymai naudojant kalibravimo matricas, taip pat atliekamas atvaizdo paukščio skrydžio kalibravimas su jau turima homografinė matrica. Pilnai sukalibruotas vaizdas pateiktas paveikslėlyje (30 pav. a).

Gautas naujas šablonas po kalibravimo turi juodus plotus kraštuose, kurie matyti paveikslėlyje (29 pav. a). Šie kraštai trukdo atliekant detalės paiešką objekte, nes gali būti fiksuojami kaip stačiakampio kraštinės, todėl juos reikia pašalinti. Atliekant paukščio skrydžio kalibravimą esant skirtingiems kameros ir matuojamos plokštumos posvyriams juodos kraštinės plotis atvaizde svyruoja, atlikus kelis bandymus nuspręsta objektus apkarpyti iš visų pusių. Tam naudojama *OpenCV* bibliotekos funkcija *Rect myROI()*. Gautas atvaizdas pateiktas paveikslėlyje (29 pav. b). Po šios operacijos seka pirminis vaizdo apdorojimas filtrais, kurie pašalina atvaizdo

netolygumus ir padeda tiksliau išskirti kraštines. Kiekvieno tiriamo metodo atveju atvaizdų filtravimas individualus ir pritaikytas tik jam.



a)

b)

30 pav. Vaizdo kalibravimas: a) šablonas po kalibravimo b) pašalintos atvaizdo kraštines

2.5.2 Kampų nustatymas naudojant Hough linijų radimo metodą

Šiuo metodu kampai nustatomi ant tiriamo objekto kraštinių išbrėžiant menamas linijas ir randant jų sankirtos taškus. Atlikus bendrą atvaizdo kalibravimą jis perverčiamas į pustonį vaizdą (pilku atspalvių). Toliau atliekama filtracija, vaizdo šablonas blukinamas naudojant homogeninę blukinimo funkciją *blur()*. Blukinimo metu paskaičiuojamas gretimų pikselių verčių vidurkis ir gauta vertė pritaikoma pasirinktam pikseliui. Blukinimo branduolio dydis 9x9.

Sekantis etapas objekto briaunų radimas. Vaizde ieškant linijų *Hough* metodu, geriausiai tinka *Canny* briaunų aptikimo algoritmas. Naudojama funkcija *canny()*, gautas šablono vaizdas pateiktas paveikslėlyje (31 pav. a).

Iš šio šablono išskiriamos linijos naudojant *Hough* metodą, pritaikoma funkcija *HoughLines()*, bandymų metodu pasirenkamas minimalus randamų linijų ilgis – 150 vaizdo taškų. *HoughLines()* funkcija pateikia kampą radianais tarp vaizdo X ašies ir statmens, taip pat statmens atstumą taškais iki rastos linijos. Ši funkcija linijų duomenys surašo į masyvą *lines*. Kraštines nėra idealiai lygios ir turi mažų nukrypimų, ant jų randama po kelias linijas (31 pav. b). Iš šių linijų sunku nustatyti tiksliai keturias sankirtas, kuriose yra stačiakampio kampai, todėl sudaroma paprogramė, kuri išveda panašių linijų vidurkį [26]. Pateikiama sudaryta paprogramė:

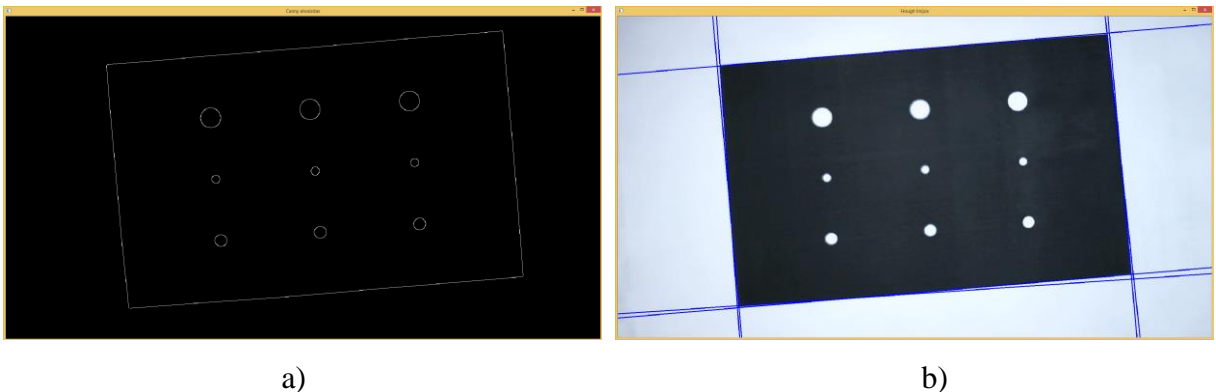
```
void liniju_suliejimas(vector<Vec2f> *lines, Mat &dst){
    vector<Vec2f>::iterator esama;
    for(esama=lines->begin();esama!=lines->end();esama++){
        if((*esama)[0]==0 && (*esama)[1]==-100) continue;
        vector<Vec2f>::iterator pos;
        for(pos=lines->begin();pos!=lines->end();pos++){
            if(*esama==*pos) continue;
            if(fabs((*pos)[0]-(*esama)[0])<50 &&
                fabs((*pos)[1]-(*esama)[1])<CV_PI*20/180){
                (*esama)[0] = ((*esama)[0]+(*pos)[0])/2;
                (*esama)[1] = ((*esama)[1]+(*pos)[1])/2;
            }
        }
    }
}
```

```

        (*pos) [0]=0;
        (*pos) [1]=-100;
    }
}
}

```

Imami kiekvienos linijos duomenys iš masyvo *lines* ir priskiriama kintamajam *esama*, tikrinama ar tai nėra klaidinga linija, t.y. linijos ilgis nėra 0 taškų ir kampas -100 radianų. Toliau imama kita linija iš masyvo *lines* ir priskiriama kintamajam *pos*, patikrinama ar tai ne ta pati linija kaip ir kintamajame *esama*. Tikrinama ar linijų statmenų atstumas nedidesnis kaip 50 taškų ir kampas tarp linijų 20 laipsnių. Jei sąlyga tenkinama, išvedama linijų parametrų vidurkiai. Jei netenkinama, į kintamąjį *pos* priskiriami sekančios linijos duomenys ir vėl tikrinami. Taip atliekama su visomis linijomis. Kai šiame cikle patikrinamos visos linijos su kintamuoju *esama*, jam priskiriama sekančios linijos duomenys. Taip patikrinamos visos linijos tarpusavyje ir gaunami gretimų linijų vidurkiai, galutiniame rezultate turima keturios linijos (32 pav.).



31 pav. Vaizdo apdorojimas linijų radimui: a) šablonas pritaikius *Canny* operatorių objekto briaunų radimui; b) *Hough* transformacijos metodu rastos linijos objekte

Toliau programoje imama po dvi linijas ir nustatius, kad jos ne lygiagrečios, ieškoma sankirtos taško. Laikoma, kad lygiagrečios linijos tos, kurių kampų skirtumas mažesnis nei 5,6 laipsnio. Sankirtai rasti reikia žinoti bent du tiesės taškus. Panaudojama paprogramė randanti taškus iš žinomų koeficientų, jos sudarymas remiasi *Hough* transformacijos lygtimi (14).

$$\delta = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta, \quad (14)$$

čia δ – statmens ilgis; θ – kampas tarp statmens ir koordinačių ašies; x, y – taškai, kuriuose kertamos koordinačių ašys.

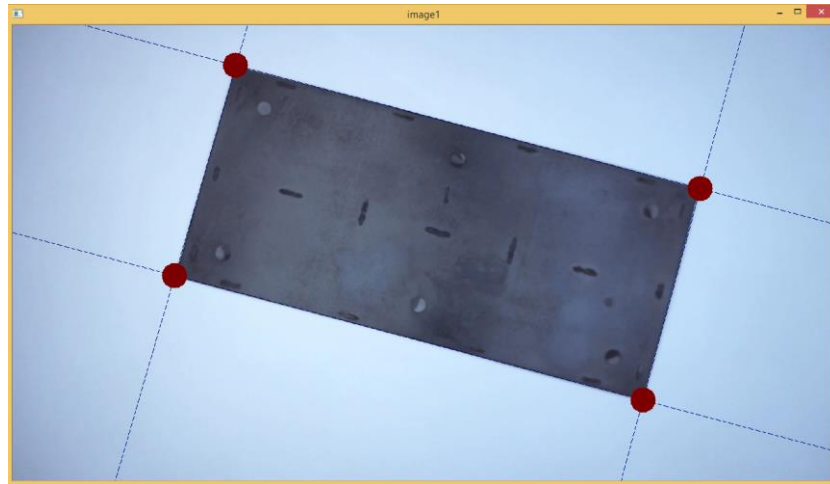
Žinant du susikertančių linijų taškus, sankirta gali būti užrašyta naudojantis determinantu, kurio sprendinys pateiktas sekančioje lygtyje (15) [27].

$$(P_x, P_y) = \left(\frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2) \cdot (x_3 - x_4) - (x_1 - x_2) \cdot (x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_4)} \right) / \quad (15)$$

$$\left(\frac{(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 \cdot y_4 - y_3 \cdot x_4)}{(x_1 - x_2) \cdot (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \cdot (x_3 - x_4)} \right),$$

čia P_x, P_y – sankirtos taškai; x_1, y_1 – pirmos linijos pirmo taško koordinatės; x_2, y_2 – pirmos linijos antro taško koordinatės; x_3, y_3 – antros linijos pirmo taško koordinatės; x_4, y_4 – antros linijos antro taško koordinatės.

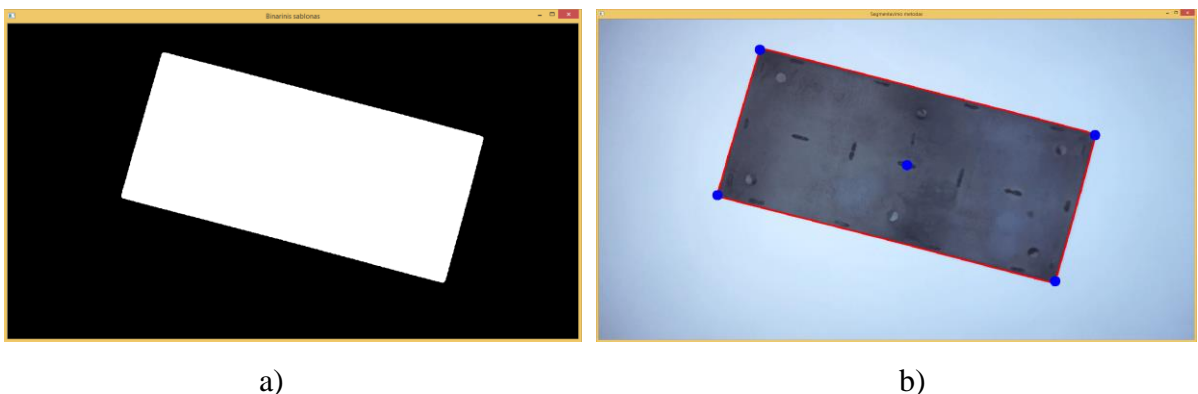
Pritaikius sankirtos radimo lygtį (15), gauti keturi taškai, kurie yra stačiakampio kampai, gauti rezultatai pavaizduoti paveikslėlyje, sankirtos pažymėtos raudonais taškais (32 pav.).



32 pav. *Hough* transformacijos metodu rasti sankirtų taškai

2.5.3 Kampų nustatymas naudojant segmentavimo metodą

Matmenų nustatymui taikant segmentavimo metodą pakanka rasti detalės kontūrą. Po pirminio vaizdo apdorojimo šablonas perverčiamas į pustonį vaizdą ir pritaikius slenkstį paverčiamas į juodo – balto vaizdą, binarinį šabloną. Gautame šablone aiškiai išsiskiria detalės kontūras nuo likusios baltos atvaizdo dalies, tai matyti paveikslėlyje (33 pav. a).



33 pav. Detalės kampų radimas taikant segmentavimo metodą: a) binarinis vaizdo šablonas; b) nustatyti detalės kampai

Toliau naudojama funkcija *findContours()*, kuri iš gauto šablono randa detalės kontūrą ir jo taškus surašo į masyvą *contours*. Randamas didžiausias kontūras, tai reikalinga, nes kartais gali

būti mažesnių kontūrų detalės viduje, pavyzdžiui skylės ar kitokie objektai. Radus detalės kontūrą galima nustatyti visų jo taškų masės centrą, kurio koordinatės įrašomos į masyvą $mc[]$. Naudojantis lygtimi atstumams rasti (10), apskaičiuojamas kiekvieno kontūro taško atstumas iki jo masės centro ir įrašomas į masyvą.

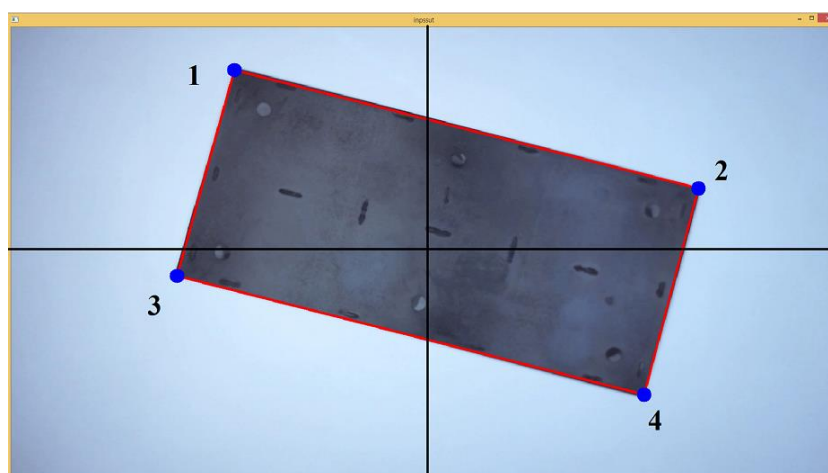
Tuomet atliekama svarbiausia šio metodo dalis, ieškoma didžiausių keturių atstumų nuo masės centro, jie žymi stačiakampio viršūnes. Radus atstumus tikrinama ar jie nėra labai arti vienas kito, kad nebūtų užfiksuota ta pati viršūnė, tik per kelis taškus pasislinkusi į vieną ar kitą pusę. Bandymų būdu nustatytas minimalus atstumas tarp viršūnių 50 vaizdo taškų. Atlikus šiuos veiksmus gaunamos keturių detalės kampų koordinatės (33 pav. b).

Paveikslėlyje raudonomis linijomis žymimas didžiausias rastas kontūras (33 pav. b), iš kurio taškų išskirti keturi kampai pažymėti mėlyna spalva. Taip pat mėlyna spalva detalės viduryje pažymėtas rasto kontūro masės centras.

2.5.4 Stačiakampio kraštinių matmenų radimas

Kraštinių matmenų radimas abiem metodams pasirinktas vienodas. Turimi kampų duomenys surašyti į masyvus, tačiau nėra aišku kuris detalės kampas kurią vektoriaus masyvo dalį atitinka, nes kampai juose surikiuoti atsitiktine tvarka. Tai sukelia keblumų matuojant detalės matmenis ar kitų objektų padėtis joje (pvz. skylių koordinatės detalėje).

Tyrimų metu sudarytose programose duomenys iš masyvų priskiriami konkreitiems kampams, tam naudojama paprogramė. Priimama, kad detalės neturi konkrečių požymių, todėl matavimo sistemoje jos visada turi būti pozicionuojamos vaizdo centre ir negali būti persuktos, ilgoji kraštinė turi pozicionuoti vaizdo X ašies atžvilgiu, o trumpoji Y.



34 pav. Kampų priskyrimas pagal ketvirčius

Menamomis linijomis vaizdas sudalijamas į keturias dalis, t.y. keturis ketvirčius (34 pav.). Vadinasi viename ketvirtyje gali būti tik vienas kampas. Pirmo ketvirčio detalės kampas bus, kai

kampo x koordinatė pakliūs į intervalą $0 < x < 850$, y koordinatė $0 < y < 425$. Antras kampas, kai x koordinatė intervale $850 < x < 1700$, y koordinatė $0 < y < 425$. Trečias kampas, kai x koordinatė $0 < x < 850$, y koordinatė $425 < y < 850$. Ketvirtas kampas, kai x koordinatė $850 < x < 1700$, y koordinatė $425 < y < 850$.

Žinant kampų koordinates ir priskyrus jas konkrečioms stačiakampio kampams galima apskaičiuoti detalės kraštinių ilgius. Jų skaičiavimui naudojamas formulė (10). Gautos ilgių vertės vaizdo taškais perverčiamos į SI sistemos venetus.

2.6 Skylių aptikimas detalėje

Tyrimams pasirenkamos detalės, kuriose išgręžiamos įvairaus skermens skylės. Grežiant laminuotos medienos drožlių plokštėse skylių kraštai aprupa dėl susidėvėjusių įrankių ar kitų priežasčių, dėl to skylės apskritimas nėra vientisas. Taip pat atpažinimą apsunkina skirtingos paviršiaus tekstūros ir spalvos, skylių išgręžimo gylis, kadangi giliose skylėse gali susidaryti šešėlis nuo jos kraštų. Kiauryminę skylę pozicionuojant ne kameros vaizdo centre, galimi atvejai fiksuoti du apskritimus, dėl persidengiančių vaizde viršutinių ir apatinių detalės sluoksnių.

Dažnai atvejais skylių tekstūra gali būti panaši į detalės paviršiaus, todėl svarbu tinkamai išfiltruoti vaizdą, kad aiškiai išsiskirtų skylių kraštai. Šiame darbe tiriami trys atpažinimo metodai, skirti detalėje esančių skylių aptikimui ir jų koordinačių, bei skersmenų radimui:

- *Hough* transformacijos metodas apskritimams rasti;
- *RANSAC* metodas apskritimams rasti;
- Skylių apskritimų radimo metodas ieškant kontūro taškų tarpusavio požymių.

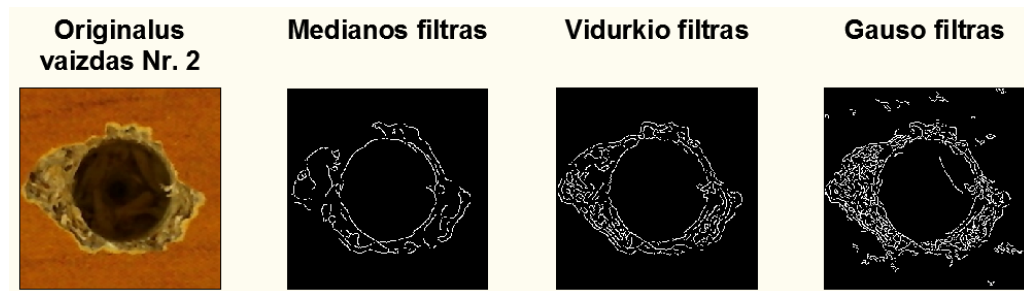
2.6.1 Vaizdo apdorojimas skylių radimui

Priešingai nei detalės aptikimo tyrimuose, skylės vaizdo šablonuose nėra taip aiškiai išreikštos. Jų vidinėje išgręžtoje dalyje (dugnuose) matoma medžio drožlių tekstūra. Todėl vien pritaikyti blukinimo filtrą ir briaunų radimo metodą nepakanka. Kaip pavyzdys pateikiami šablonai pritaikius *Canny* briaunų radimo metodą ir skirtingus blukinimo filtrus (35 pav.).

Kaip matyti iš paveikslėlių (35 pav.), tiek pirmos skylės, tiek antros skylės atveju briauna išskirta nelygiai skylės perimetrui, matyti jos pertrūkimai, statūs posūkiai, dalyje vaizdų matomas skylės dugno kontūras, ypač tiriant pirmą skylę (35 pav. a). Taikant Gauso filtrą fone liko daug pašalinių triukšmų nuo paviršiaus tekstūros. Filtruojant vaizdą papildomai be blukinimo filtro nuspęsta taikyti skaitmeninio auginimo ir erozijos filtrus. Jie turėtų sumažinti ar visai panaikinti dugno tekstūrą, taip pat rasta skylės brauna turėtų tapti apvalesnė, vientisesnė.



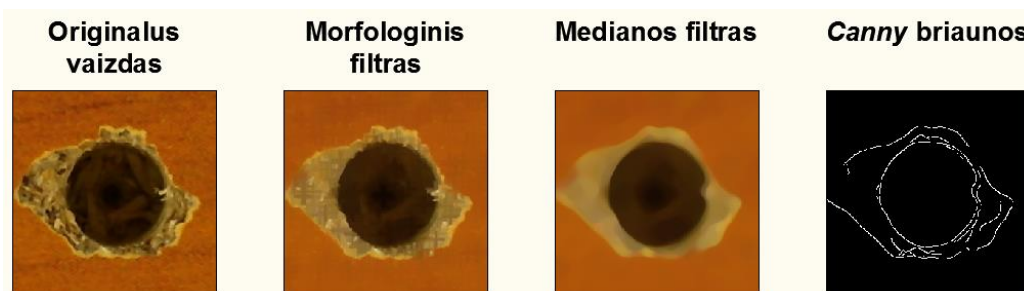
a)



b)

35 pav. *Canny* briaunų radimas pritaikius skirtingus filtrus: a) detalė su aiškiai matomu dugnu; b) detalė su aiškiai nematomu dugnu

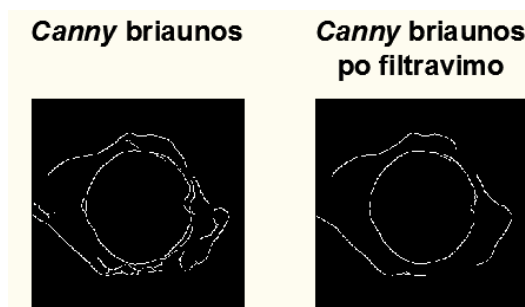
Morfologiniu elementu pasirinktas kryžius, tiek skaitmeninio auginimo, tiek erozijos branduolio dydis parinktas (21, 21) taškų. Po šio morfologinio elemento taikymo atlikus briaunų paiešką rasta gana daug mažų segmentų, todėl papildomai dar pritaikomas 15 taškų dydžio medianos filtras. Transformacija pavaizduota paveikslėlyje (36 pav.). Kaip matyti iš paveikslėlio, dingo dalis mažų taškų sancaupų, skylės briaunos apskritimas tapo apvalesnis ir vientisas.



36 pav. *Canny* briaunų radimas po auginimo – erozijos filtrų panaudojimo

Dėl geresnio metodų veikimo, reikia iš vaizdo pašalinti triukšmus, t.y. mažas briaunas kurios liko po morfologinio ir medianos filtro pritaikymo. Paprasčiausias metodas tai atlikti, rasti visus kontūrus vaizde. Rasti kontūrai surašomi į masyvą ir imant po viena tikrinama, ar jį sudaro 100 vaizdo taškų. Jei sąlyga netenkinama, šis kontūras vaizde išbrėžiamas juoda spalva, tokiu būdu pašalinamas iš tolimesnio šablono apdorojimo. Svarbu pažymėti, jei atliekamas mažiausių kvadratų metodo tyrimas, kontūrai neišbrėžiami, o tiesiog perrašomi į naują masyvą.

Vaizdas po mažų kontūrų filtracijos pateiktas paveikslėlyje (37 pav.). Kaip matyti didžioji dalis smulkių nekryptingų briaunų dinga, apskritimo briauna tapo aiškiau išreikšta. Taip pat matomas skylės broko kraštas, nes jo kontūrą sudaro keli šimtai taškų, todėl jis nepašalintas.



37 pav. Šablonas po smulkių briaunų filtravimo

2.6.2 Skylių radimas ieškant kontūro taškų tarpusavio požymių

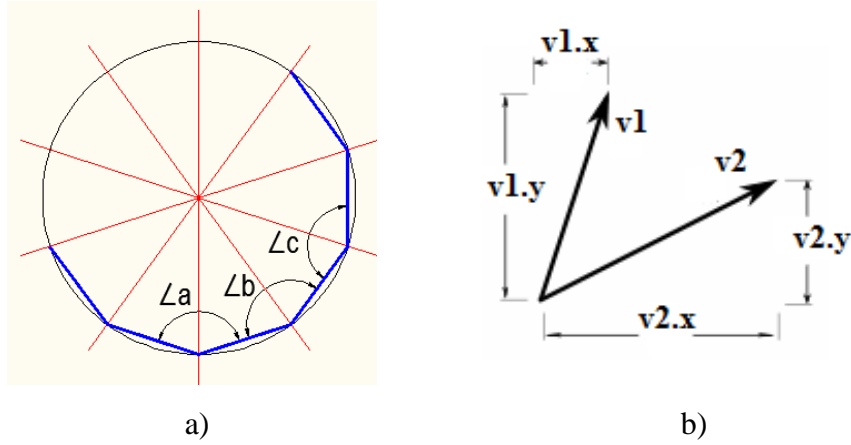
Naudojant šį metodą randami visi kontūrai esantys vaizde ir surašomi į masyvą. Po to kontūrai imamas vienas po kito ir tiriama, ar turi apskritimų požymių. Naudojantis mažiausių kvadratų metodu apskritimams iš visų į apskritimą panašaus kontūro taškų išskaičiuojamos jo centro koordinatės ir spindulys (38 pav.).

Pasirinkus rastą kontūrą iš masyvo, jis suskaidomas į 10 lygių dalių, tarp kurių galima išbrėžti menamas linijas, kurių visuma turėtų sudaryti apskritimą (38 pav. a). Menamos linijos pažymėtos mėlyna spalva. Suskaidžius kontūrą į linijas ieškoma kampų tarp gretimų dviejų linijų ir lyginama su sekantių linijų kampu. Kad būtų paprasčiau nustatyti kampą, priimama, kad rastos linijos yra vektoriai. Tuomet kampui tarp dviejų vektorių rasti naudojama formulė (16). Taškų sandauga randama sudauginus vektorių X ir Y koordinačių projekcijas (38 pav. b).

$$v1.v2 = |v1| \cdot |v2| \cdot \cos(\theta), \quad (16)$$

čia $v1.v2$ – vektorių koordinačių taškų skirtumų sandauga; $v1, v2$ – vektorių $v1$ ir $v2$ ilgai; θ – kampas tarp vektorių.

Sudarytoje programoje lyginami visi rasti kampai tarp linijų. Pavyzdžiui kampas a lyginamas su b (38 pav. a), tikrinama, ar tarp jų nėra didesnis skirtumas kaip 0,3 radiano ir kampas nėra didesnis už 3 radianus, t.y. įsitikinama, kad tai ne tiesi kraštinė. Kiekvienu atveju, kai rezultatas tenkinamas, tai užfiksuojama kintamajame. Tokie veiksmai atliekami su visomis linijomis gautomis suskaidžius apskritimo kontūrą. Visi duomenys surašomi į masyvą. Po to tikrinama kiekvieno kontūro tyrimo duomenys, ir jei iš 10 kampų daugiau kaip 6 turėjo panašumo į apskritimą, priimama, kad tai apskritimo kontūras.



38 pav. Apskritimo radimas tiriant kontūro taškus : a) apskritimo suskaidymas dalimis; b) kampo tarp vektorių radimas

Remiantis analizuoto straipsnio medžiaga, kontūro taškai aproksimuojami apskritimu naudojantis mažiausių kvadratų funkcijos išraiška (17) [28]:

$$\sum u_i [u_i^2 - 2u_i u_c + u_c^2 + v_i^2 - 2v_i v_c + v_c^2 - \alpha] = 0, \quad (17)$$

čia u_i, v_i – transformuotos kontūro taškų koordinatės; u_c, v_c – ieškomo apskritimo centro transformuotos koordinatės; α – ieškomo apskritimo spindulio dydis kvadratu.

Sprendžiant lygtį galima priimti, kad $S_u = \sum_i u_i, S_{uu} = \sum_i u_i^2$ ir t.t. Kai $S_u = 0$ (18) [28]:

$$u_c S_{uu} + v_c S_{uv} = \frac{1}{2} (S_{uuu} + S_{uvv}), \quad (18)$$

Taip pat, kai $S_v = 0$, gauname (19) [28]:

$$u_c S_{uv} + v_c S_{vv} = \frac{1}{2} (S_{vvv} + S_{vuu}), \quad (19)$$

Iš šių dviejų lygčių (18) (19) sudaroma sistema, kurią išsprendus gaunama transformuotos apskritimo centro koordinatės (u_c, v_c) .

Sudaroma paprogramė, kuri iš turimų kontūro taškų suranda visus nežinomus koeficientus šioms lygtims spręsti, apskaičiuojami koeficientai: $S_{uu}, S_{uv}, S_{vv}, S_{uuu}, S_{vvv}, S_{uvv}$ ir S_{vuu} . Turint šiuos koeficientus pasinaudojama Kramerio metodu lygčių sistemai spręsti. Gavus koordinates, jos transformuojamos į realias (x, y) koordinates. Randamas apskritimo spindulys (20) [28]:

$$\alpha = \sqrt{u_c^2 + v_c^2 + \frac{S_{uu} + S_{vv}}{N}}, \quad (20)$$

čia N – kontūro taškų skaičius.

Radus ieškomos skylės centro koordinates ir spindulį naudojant funkciją *circle()* išbrėžiamas rastas apskritimas. Metodo taikymo pavyzdys pateiktas paveikslėlyje (39 pav.). Kaip matyti, rastų apskritimų kraštinės tiksliai glaudžiasi prie skylių šonų.



39 pav. Taikant mažiausių kvadratų metodą rastos skylės detalėje

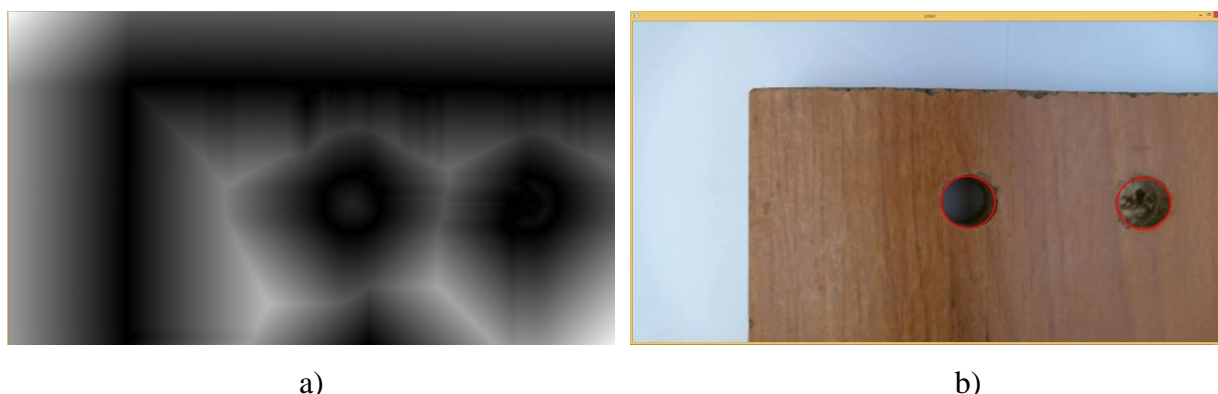
2.6.3 RANSAC metodas apskritimams rasti

Po pirminio vaizdo apdorojimo pritaikomas krašto išskyrimo *Canny* operatorius. Randamos visos detalės briaunos ir skylių kraštinės. Pagrindinis privalumas taikant *RANSAC* metodą, kad nebūtina rasti visą skylės kontūrą, pakanka tik 3 taškų iš objekto, kad būtų galima nustatyti ar tai apskritimas. Programoje vis imami nauji trys taškai ir tikrinama ar tai ne apskritimas, kad šis ciklas netrūktų per ilgai būtina pasirinkti kiek apskritimų norima rasti turimame šablone. Programoje naudinga pažymėti minimalų galimą skylių spindulį.

Sudaroma paprogramė, kuri randa visų rastų briaunų taškų koordinates. Tikrinamas kiekvienas vaizdo taškas pradedant koordinate (0;0), baigiant (1920;1080). Tikrinama ar pasirinktos koordinatės vertė didesnė už 0, t.y. ar ji balta (kontūro dalis). Jei taip, funkcija gražina koordinatės vertę į masyvą. Toliau turint visus galimus apskritimų taškus atsitiktinai 2000 kartų pasirenkama trys taškai iš naujojo masyvo, naudojama funkcija *rand()%*, ir patikrinama ar pasirinktos ne tos pačios koordinatės. Turint tris netapačias koordinates, iškviečiama paprogramė, kuri bando rasti šių trijų taškų galimo išbrėžti apskritimo centro koordinates, ir spindulį.

Sekantis etapas – rasto apskritimo parametrų tikrinimas. Pirmiausia įsitikinama ar jis nėra mažesnio spindulio nei numatyta. Jei mažesnio, ieškoma naujo apskritimo vaizde. Toliau turimam vaizdai su rastais kraštais atliekama distancijos transformaciją (angl. *Distance Transform*). Po šios transformacijos gaunamas pustonis vaizdas, panašus į pirminį, tačiau jame pustoniais tonais atvaizduojamas atstumas iki artimiausio kontūro ar ribos atvaizde (40 pav. a). *OpenCV* bibliotekos pateikiama funkcija *distanceTransform()* skaičiuoja atstumą iki artimiausių nulinės vertės (juodų) pikselių, todėl dar prieš atliekant transformaciją šablonas su rastomis briaunomis invertuojamas,

tokiu būdu rastų kraštų pikseliai tampa juodais (0), o fonas baltais (1), inversija atliekama pritaikant išraišką *255-sablonas*.



40 pav. RANSAC metodo taikymas: a) normalizuotas pustonis šablonas po distancijos transformacijos; b) naudojant RANSAC metodą rastos skylės

Iškvietus apskritimo tikrinimo funkciją, pirma nustatomas slenkstis, nuo kurio skaičiuojama ar tai gali būti apskritimas ar ne. Priimama, kad šis slenkstis yra 25-toji dalis rasto apskritimo spindulio. Bandymų metu nustatytos ribos, kad jei apskaičiuotas labai mažas slenkstis, nustatoma minimali vertė – 2, jei labai didelis slenkstis, nustatoma maksimali vertė – 100.

Toliau naudojantis trigonometrinėmis apskritimo kontūro skaičiavimo formulėmis, randamos naujo apskritimo (iš trijų taškų) koordinatės (21):

$$\begin{aligned} x &= a + r \cdot \cos t, \\ y &= b + r \cdot \sin t \end{aligned} \quad (21)$$

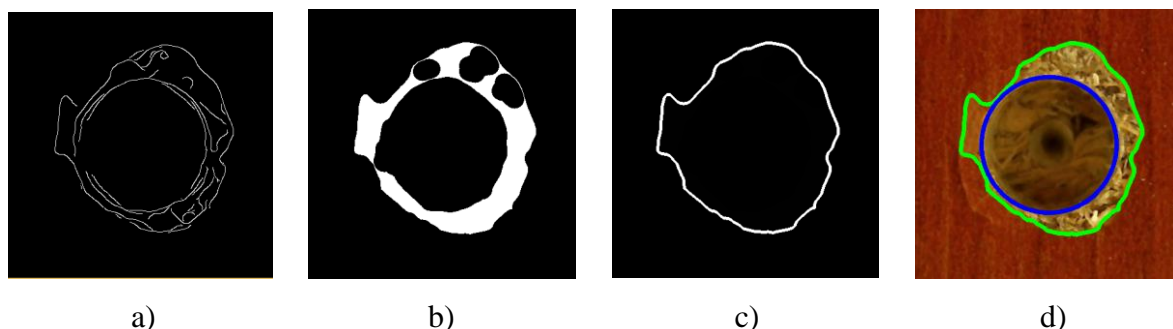
čia x, y – apskritimo kontūro koordinatės; a, b – apskritimo centro koordinatės; r – spindulys; t – kampas tarp x ašies ir tiesės einančios per koordinatės (x, y) ir (a, b) .

Kiekviename taške patikrinamas pustonio distancijos šablono vertės, ir jei ji tenkina užduotą dydį, priimama, kad tai apskritimo taškas. Procentaliai suskaičiuojama kiek taškų iš apskritimo atitinką distancijos šablono vertes. Jei skaičius siekia 40%, laikoma, kad vaizde rastas apskritimas. Galiausiai iš briaunų šablono vaizdo pašalinamas rastas apskritimas, išbrėžiant jį ant naudojamo šablono juoda spalva, pasirenkamas apskritimo linijos storis 30 pikselių, taip apsisaugant nuo mažesnių ar didesnių apskritimų radimo toje pačioje vietoje. Toliau algoritmas kartojamas nuo pradžių. Šio metodo taikymo pavyzdys pateiktas paveikslėlyje (40 pav. b).

2.7 Brokuotų skylės briaunų aptikimas

Dažnai pasitaiko, kad laminuotose medžio drožlių plokštėse gręžiant skylės pažeidžiami jų kraštai, sutrupa laminuota danga. Šiuos defektus galima aptikti tiriant nutrupėjusių paviršių briaunas, kurios randamos atliekant vaizdo apdorojimą prieš skylių aptikimo metodo taikymą.

Priešingai nei skylėms, šiuo atveju nereikia išfiltruoti mažų vaizde rastų kontūrų. Kad programa nebūtų labai apkrauta apdorojant vaizdą, nuspręsta naudoti tik atskirą briaunų radimo šablono dalį. Po skylės radimo, žinant jos centro koordinatas, iškerpama dalis tiriamo vaizdo aplink skylę, vaizdo dydis pasirenkamas keturis kartus didesnis nei rasto apskritimo spindulys (41 pav. a).



41 pav. Skylės defekto radimo etapai: a) briaunų radimo šablonas; b) šablonas pritaikius auginimo ir erozijos filtrus; c) skylės defekto išorinis kontūras d) broko atvaizdavimas pirminiame vaizde

Defektui aplink skylę rasti geriausiai tinka vaizdą suskaidyti į kontūrus, tačiau rastame šablone išorinis kontūras vietomis nutrūksta. Todėl nuspręsta pritaikyti skaitmeninio auginimo ir erozijos filtrus, morfologiniu struktūriniu elementu pasirenkama elipsė, branduolio dydis (31, 31) taškų. Šie filtrai pritaikomi su funkcijomis *dilate()* ir *erode()*. Po šių filtrų pritaikymo gaunamas šablonas su aiškiai išskirta pažeista zona (41 pav. b). Gautame šablone ieškoma išorinio kontūro, kuris atitiks brokuojamos zonos perimetrą, naudojama funkcija *findContours()* (41 pav. c).

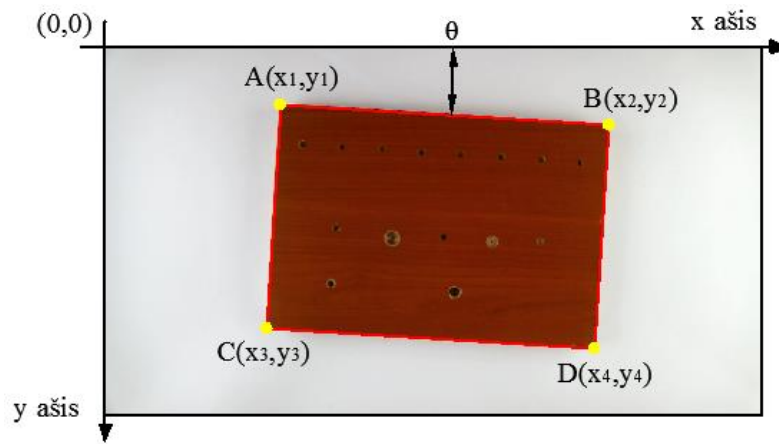
Nustatyti skylės pažeidimo laipsnį galima apskaičiuavus kontūro taškų plotą. Programoje pažeidimo laipsnis išreiškiamas procentais nuo skylės ploto, t.y. kiek procentų brokuotos zonos plotas atitinka skylės plotą (41 pav. d). Skaičiavimas atliekamas pagal sekančią formulę (22):

$$Broko_plotas = \frac{kontūro_plotas - \pi \cdot r^2}{\pi \cdot r^2} \cdot 100, \quad (22)$$

čia *Broko_plotas* – procentinė defekto išraiška; *kontūro_plotas* – rasto defekto kontūro taškų plotas; π – matematinė konstanta, išreiškianti apskritimo ilgio ir skersmens santykį; *r* – rastos skylės perimetras.

2.8 Koordinačių sistemos perskaičiavimas detalės atžvilgiu

Esminis matavimo sistemos tikslas nustatyti skylių koordinates detalės plokštumoje, ar jos nėra persistūmusios į šoną, ar visos skylės tiksliai išgręžtos kaip buvo numatyta. Kadangi detalė nėra specialiai pozicijuojama kažkurios ašies atžvilgiu, pirma reikia nustatyti koku kampu detalė pasvirusi vaizde *X* ašies atžvilgiu. Šį kampą galima apskaičiuoti iš viršutinės ir apatinės matuojamo stačiakampio kraštinių, kurias paprasčiau apibrėžti kaip tieses AB ir CD (42 pav.).

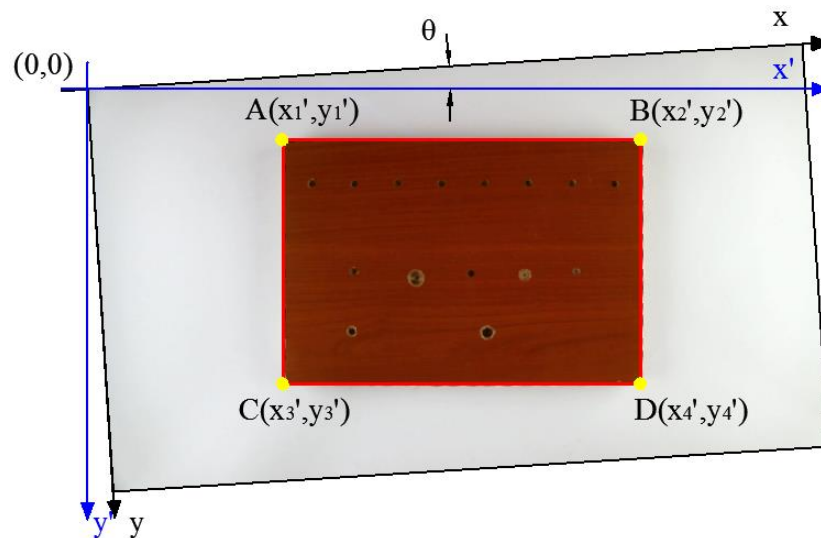


42 pav. Detalės posvyrio kampo nustatymas

Imami du tiesės AB taškai kurie atitinka detalės kampų koordinatės ir naudojantis trigonometrine išraiška apskaičiuojamas ieškomas kampas (23):

$$\tan \theta = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}, \quad (23)$$

čia θ – kampas tarp tiesės AB ir X ašies; x_1, y_1 – A taško koordinatės; x_2, y_2 – B taško koordinatės.



43 pav. Perskaičiuota koordinačių sistema

Rastas kampas išreiškiamas radianais, analogiškai veiksmai atliekami ir su tiese CD. Gavus abu dydžius išvedamas jų sumos vidurkis, tai ir bus etaloninis dydis perskaičiuojant pasirinktų taškų padėties koordinatės. Žinant posvyrio kampą, galima matematiškai vaizde esančio bet kurio taško koordinatės perkelti į detalės paviršiaus koordinačių sistemą, t.y. persukti visą koordinačių sistemą detalės atžvilgiu (43 pav.). Naujų taškų koordinatės randamos naudojant lygčių sistemą (24) [29]:

$$\begin{aligned}x' &= x \cos \theta - y \sin \theta \\y' &= x \sin \theta + y \cos \theta\end{aligned}\quad (24)$$

čia x', y' – persuktos koordinačių sistemos taškai.

Šią lygčių sistemą patogiau spręsti naudojantis Kramerio matricų sprendimo metodu.

2.8.1 Skylių pozicijų nustatymas detalės paviršiuje

Atliekant skylių pozicijos nustatymą, pirma randamas detalės posvyrio kampas vaizde X ašies atžvilgiu. Radus detalės kampų koordinates ir nustačius posvyrio kampą AB ir CD kraštinėms, randamas detalės posvyrio kampo vidurkis, kuris bus naudojamas skylių vaizde pozicijų perskaičiavimui.

Sekantis žingsnis žinomose detalės vietose patikrinti skylių buvimą. Matavimai atliekami iš arti pasirinktose vaizdo pozicijose. Matavimo metu skylių pozicijos tikrinamos pirmo kampo (A) atžvilgiu (43 pav.). Jo koordinatės nustatomas tame pačiame aukštyje kaip ir matuojamų skylių. Rastos koordinatės perskaičiuojamos atsižvelgiant į roboto rankos poziciją, naudojamos formulės (25):

$$\begin{aligned}X_{persk.} &= X_{orig.} + \left(\frac{D_{rob.x}}{x} \cdot (k_x - 1)\right), \\Y_{persk.} &= Y_{orig.} + \left(\frac{D_{rob.y}}{x} \cdot (k_y - 1)\right)\end{aligned}\quad (25)$$

čia $X_{persk.}, Y_{persk.}$ – perskaičiuotos x, y koordinatės padėtis; $X_{orig.}, Y_{orig.}$ – x, y koordinatės iš apdorojamo vaizdo; $D_{rob.x}, D_{rob.y}$ – roboto manipulatoriaus žingsnis x, y ašimis, mm; x – vieno vaizdo taško vertė, mm; k_x, k_y – pozicijos pasislinkimo žingsnis ašimi.

Radus koordinates pagal roboto pozicionavimo padėtį jos dar kartą perskaičiuojamos atsižvelgiant į detalės posvyrio kampą, naudojama anksčiau aptarta lygčių sistema (24). Norint rasti nustatytas skylių padėtis detalėje, pirma reikia detalės pasirinkto atskaitinio matavimo kampo padėties koordinates prilyginti sistemos koordinačių pradžiai. Rezultatai pateikiami SI sistemos vienetais, milimetrais. Galutiniams perskaičiavimams naudojamos formulės pateiktos žemiau (26):

$$\begin{aligned}X_{detal.} &= (X'_{persk.} - X'_{d.kamp.}) \cdot D_{mm}, \\Y_{detal.} &= (Y'_{persk.} - Y'_{d.kamp.}) \cdot D_{mm}\end{aligned}\quad (26)$$

čia $X_{detal.}, Y_{detal.}$ – perskaičiuotos koordinatės į detalės koordinačių sistemą, $X'_{d.kamp.}, Y'_{d.kamp.}$ – perskaičiuotos pagal posvirį x, y detalės kampo koordinatės, $X'_{persk.}, Y'_{persk.}$ – perskaičiuotos x, y koordinatės pagal detalės posvyrio kampą

2.9 Tyrimams naudojamos medžiagos

Sistema kuriama su tikslu baldų bei medienos plokštėse rasti išgręžtas skylės ir nustatyti jų skersmenį bei vietą. Tikslumo nustatymo tyrimams pasirinktos baldų gamyboje naudojamas laminuotos medžio drožlių plokštės, turinčios skirtingas paviršiaus tekstūras. Naudojamų plokščių tekstūros su kodiniais pavadinimais pateiktos prieduose (2 priedas). Iš viso naudojamos keturios matinės ir keturios blizgios plokštės. Visų plokščių matmenys vienodi, t.y. 249 x 169 x 18mm. Bandymų metu siekiama išsiaiškinti kokią įtaką aprašytiems vaizdų atpažinimo metodams turi paviršiaus spalva, lygumas, atspindėjimas, tekstūros netolygumas, pozicija vaizde, matavimo aukštis.

2.10 Skyriaus išvados

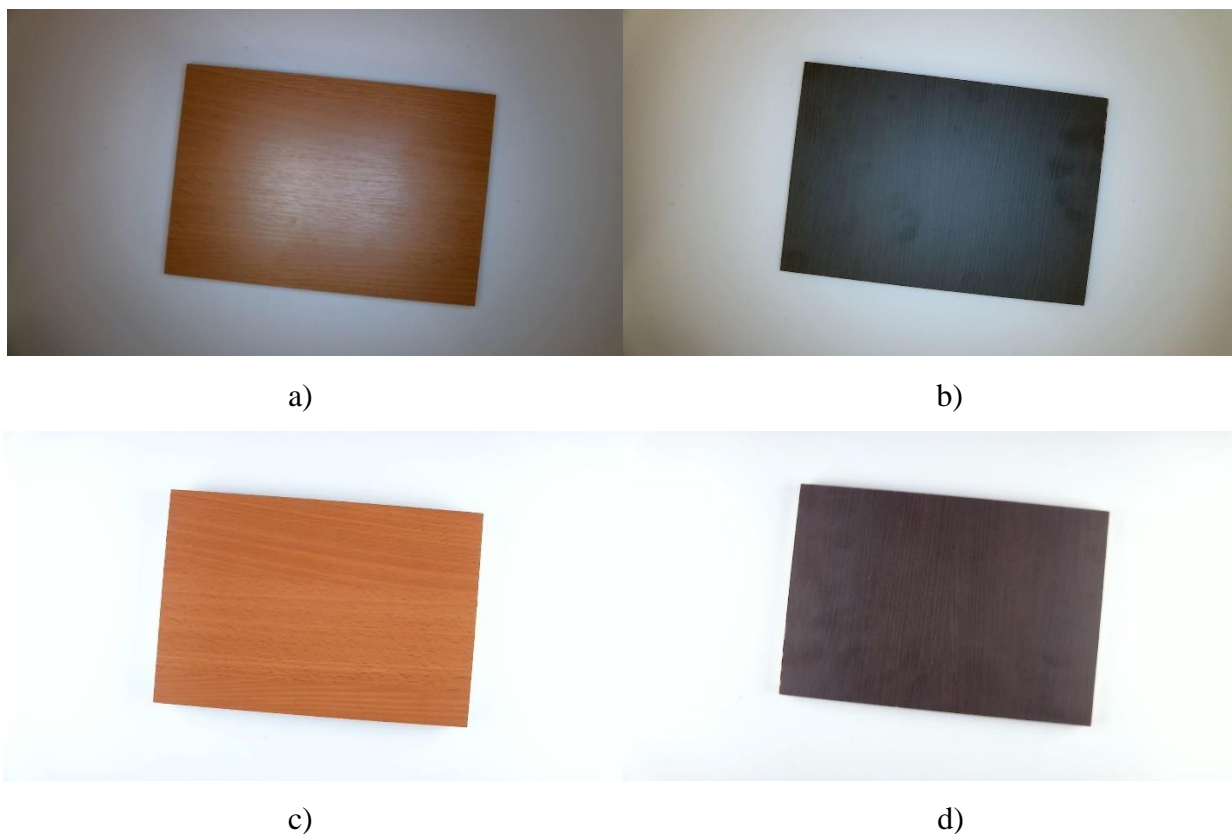
1. Išsiaiškinta, kad roboto valdymo spinta neturi programinės įrangos nuoseklaus ryšio sąsajoms palaikyti, todėl valdymo signalus į robotą nuspręsta perduoti optronais.
2. Nustatyta, kad po vaizdo kalibravimo šablono kraštuose atsiranda tamsūs plotai, todėl gautą šabloną reikia apkarpyti iš visų pusių.
3. Atlikus bandymus nustatyta, kad naudojant 1980x1080 rezoliucijos kamerą ir pritaikius paukščio skrydžio vaizdo korekciją, atlikus kalibruoto vaizdo patikrinimą didžiausia paklaida atvaizde $\pm 0,08$ taško.
4. Nustatyta, kad norint gauti kokybiška paukščio skrydžio korekciją vaizdui, homografinėi matricai rasti pakanka keturių gerai žinomų savybių taškų.
5. Nustatyta, kad vaizdo taško vertė milimetrais priklauso nuo matavimo plokštumos aukščio, šis ryšys aprašomas lygtimi $f(x)=ax+b$.
6. Nustatyta, kad skylių briaunoms aptikti, geriausia taikyti skaitmeninius auginimo ir erozijos filtrus.
7. Nustatyta, kad ieškant skylių broko, pakanka tirti vaizdą tik aplink rastas skylės, taip sumažinant kompiuterio resursų naudojimą.
8. Išsiaiškinta, kad norint rasti skylių pozicijas detalėje, reikia nustatyti jos posvyrio kampą vaizdo ašį atžvilgiu ir pagal jį perskaičiuoti matuojamų taškų koordinates.

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1 Matavimo sistemos apšvietimo tyrimas

Vienas iš pagrindinių faktorių įtakančių kompiuterinės regos sistemos darbo tikslumą yra matuojamų objektų apšvietimo intensyvumas ir tolygumas. Prieš pradėdant detaliau nagrinėti matavimo sistemos pritaikomumą ir paklaidas, būtina atlikti apšvietimo sistemų tyrimą ir išrinkti tinkamiausią iš aptartų. Tyrimams atlikti galima panaudoti paprastas histogramas, tačiau iš jų sunku spręsti ar plotas apšviestas tolygiai, nes jos parodo bendrą visų taškų intensyvumo pasiskirstymą, bet ne atskirų ploto taškų apšvietimo lygi.

Pirmiausia apšvietimo sistemos palyginamos realiomis sąlygomis, kameros atstumui nuo matavimo plokštumos esant 40cm aukštyje. Tyrimui pasirenkamos dvi detalės, viena atspindinčiu paviršiumi, kita matinė. Daromi kadrai ir analizuojami gauti vaizdai (44 pav.).

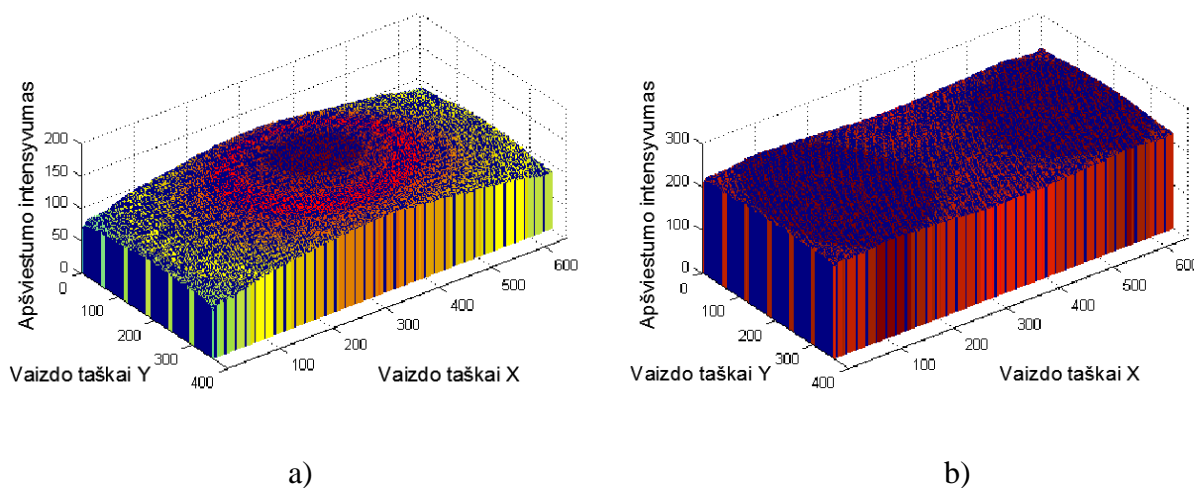


44 pav. Apšvietimo sistemų tyrimas realiomis sąlygomis: a) tiesioginis apšvietimas blizgiam paviršiui; b) tiesioginis apšvietimas matiniam paviršiui; c) šoninis apšvietimas blizgiam paviršiui; d) šoninis apšvietimas matiniam paviršiui

Gautuose vaizdo šablonuose matyti, kad tiesioginio apšvietimo sistema spindulį koncentruoja detalės centre, joje taip pat matomas atsispindėjęs LED matricių vaizdas. Esant blizgiam paviršiui (44 pav. a), tai pasireiškia itin ryškiai, matiniame paviršiuje taip pat šiek tiek ryškėja šviesesnis plotas (44 pav. b). Pastebėta, kad vaizdo šonai silpnai neapšviesti, todėl gali

prastėti detalių kontūro atpažinimo galimybės. Priešingai nei tiesioginio apšvietimo sistema, šoninis apšvietimas pilnai apšviečia matavimo plokštumą, todėl geriau išryškina matuojamų detalių kontūrus. Šoninio apšvietimo metu tiek blizgi detalė (44 pav. c), tiek matinė (44 pav. d) apšviestos vienodai ir nesimato jokių atspindžių susidariusių dėl apšvietimo elementų.

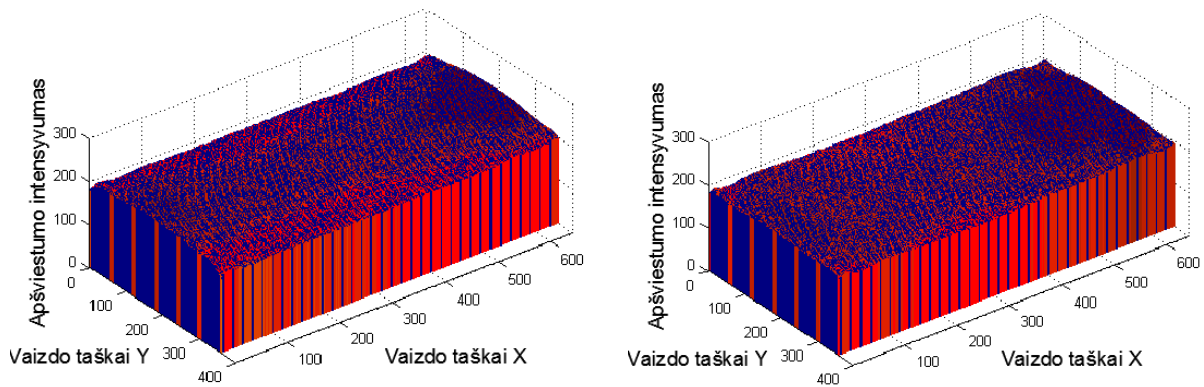
Apšvietimams detaliau ištirti naudojamos trimatės apšvietimo histogramos. Bandymai atliekami tamsioje patalpoje be išorinių apšvietimo šaltinių. Kameros parametruose išjungiamos visos vaizdo korekcijos funkcijos, paliekamas tik automatinis fokusavimas. Gauti vaizdai iš RGB perverčiami į pustonių atspalvių skalę. Turint gautą naują dvimatį masyvą sudaroma 3D viso paveikslėlio taškų apšviestumo ir intensyvumo histograma iš kurios matoma kaip pasiskirstęs apšviestumas, t.y. kuriose vietose krenta šešėlis, o kuriose ne. Sistemų palyginimui imami vaizdai iš 30cm ir 10cm aukščio. Tiesioginio apšvietimo histogramos pateiktos grafikuose (45 pav.), o kraštinio apšvietimo histogramos kituose grafikuose (46 pav.).



45 pav. Trimačiai apšviestumo tolygumo tyrimo grafikai tiesioginiam apšvietimui: a) atstumas 30cm; b) atstumas 10cm

Kaip matyti iš gautų tiesioginio apšvietimo grafikų, esant 30cm atstumui tarp matavimo platformos ir plokštumos, didžiausias apšviestumo intensyvumas yra vaizdo centre. Sumažinus atstumą iki 10cm, tamsios zonos iš vaizdo kraštų dingo, apšvietimas tapo beveik tolygus. Tai įtakoja apšvietimo elementų suvertimo kampas, kuo jis didesnis tuo apšvietimas tolygesnis esant mažiems atstumams. Dar labiau mažinant atstumą, apšvietimo elementai nebedengia vienas kito šviesos srauto ir tarpe jų išryškėja tamsi zona, apšvietimas intensyvėja vaizdo kraštuose.

Atlikus šoninio apšvietimo sistemos grafikų analizę nustatyta, kad apšvietimas pasiskirstęs beveik tolygiai visame matavimo plokštumos plote tiek 30cm aukštyje, tiek 10cm aukštyje, šviesos intensyvumas panašaus dydžio abiejuose aukščiuose, priešingai nei tiesioginio apšvietimo tyrimo metu. Tai įtakoja didesnis šviesos šaltinių plotas, be to jų šviesos srautas dengia visą fiksuojamą paviršių.



a)

b)

46 pav. Trimačiai apšviestumo tolygumo tyrimo grafikai šoniniam apšvietimui: a) atstumas 40cm; b) atstumas 10cm

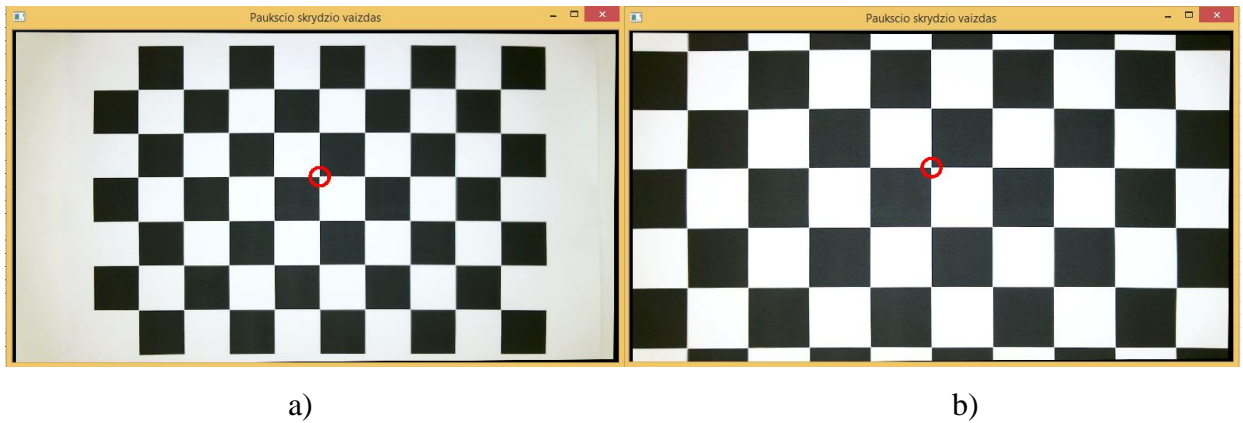
Galima daryti išvadą, kad šoninis apšvietimas pranašesnis už tiesioginį, nes nesukuria vieno apšviesto ploto centro, be to artinant link matavimo plokštumos vaizdo kamerą, nesusidaro patamsėjęs plotas centre, kuris trukdo kokybiškai atlikti kompiuterinės regos matavimus. Detalūs apšvietimo sistemų tyrimai pateikti prieduose (3 priedas).

3.2 Pasikartojančios matavimo pozicijos tyrimas

Svarbu nustatyti kaip tiksliai sistema fiksuoja tą patį tašką, roboto manipulatoriaus rankai kelis kartus grįžtant į tą pačią poziciją ir atliekant matavimą. Šie duomenys leis nustatyti ar roboto rankos pozicionavimas turi įtakos matavimams, kai jie atliekami ne vienoje pozicijoje, bet keliose tam pačiam objektui, matavimo platformai judant skirtingomis kryptimis roboto judėjimo greitis 100mm/s. Tyrimo metu fiksuojamos šachmatų lentos pasirinkto kvadrato kraštinės koordinatės (47 pav. a), pasirinktas roboto judėjimas taško atžvilgiu:

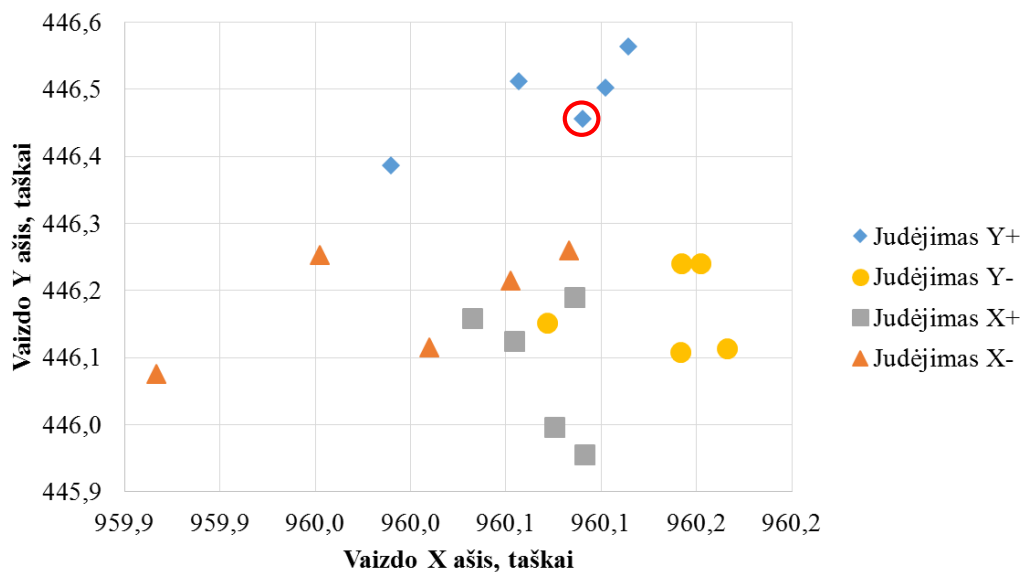
1. Judant aukštyn Y ašimi link matavimo pozicijos;
2. Judant žemyn Y ašimi link matavimo pozicijos;
3. Judant aukštyn X ašimi link matavimo pozicijos;
4. Judant žemyn X ašimi link matavimo pozicijos.

Matavimas atliekamas 190 mm ir 260 mm aukštyje nuo šachmatų lentos plokštumos, fiksuojami kampai pažymėti raudonai (47 pav.). Atliekama po 5 matavimus iš kiekvienos judėjimo pusės, sustojus pozicionavimo padėtyje. Gauti duomenys pateikti prieduose (4 priedas).



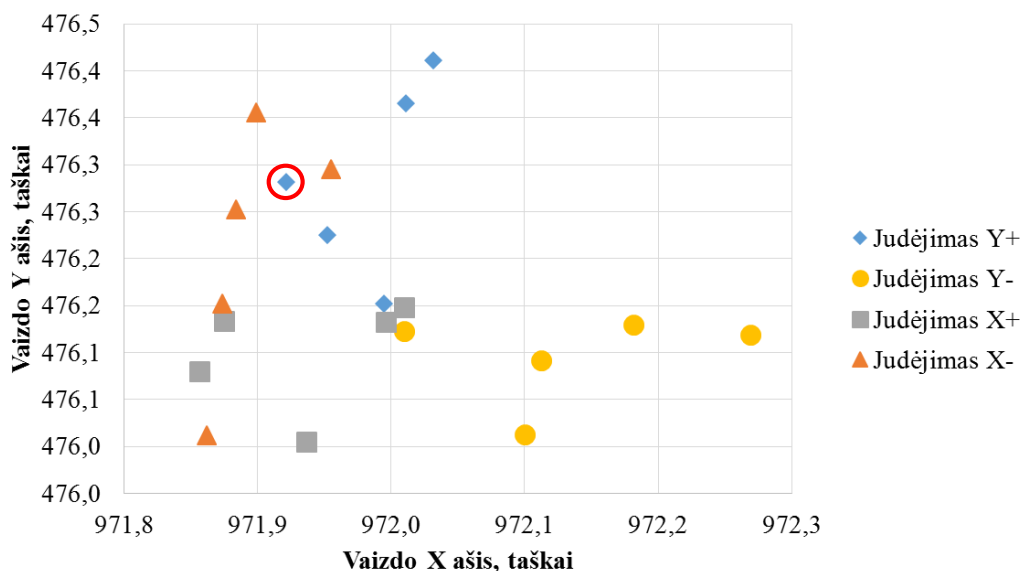
47 pav. Koordinatės išlaikymo tyrimui pasirinktas sankirtos taškas: a) 260 mm aukštyje; b) 190mm aukštyje

Gauti tyrimo duomenys atvaizduojami grafikuose, kiekvienos krypties matavimo duomenys pažymėti skirtingomis spalvomis, 190 mm aukštyje gauti rezultatai pateikti grafike (48 pav.), o 260 mm aukštyje kitame grafike (49 pav.). Raudonas apskritimas grafikuose žymi pirmą užfiksuotą koordinatę matavimų metu.



48 pav. Koordinatė išsidėstymo grafinis vaizdas 190mm aukštyje

Matyti, kad abiejuose grafikuose išmatuotos pasirinkto kampo pozicijos koordinatės susiskirsčiusios grupėmis pagal judėjimo kryptį. Pavyzdžiui matavimo platformai esant 190mm aukštyje (48 pav.), judant Y koordinate žemyn (geltona spalva), gautos taško koordinatės pasiskirsčiusios grafiko apatinėje dalyje, o judant Y koordinate aukštyn, koordinatės pasiskirsčiusios grafiko viršuje (mėlyna spalva). Tai rodo, kad robotui pozicionuojant iš bet kurios pusės, numatytoje pozicionavimo padėtyje robotas tiksliai nesustoja ir ją viršija. Rasti tikslią matavimo sistemos pozicionavimo paklaidą sudėtinga, nes skirtingais matavimo atvejais taškai grafike pasiskirstę netolygiai.



49 pav. Koordinačių išsidėstymo grafinis vaizdas 260 mm aukštyje

Išanalizavus duomenis, 190 mm aukštyje didžiausias skirtumas Y ašies atžvilgiu – 0,608 taško, X ašies atžvilgiu – 0,299 taško. Atitinkamai pervedus į SI matavimo vienetus, priėmus, kad vieno vaizdo taško vertė 0,1285mm, paklaida Y ašyje $\pm 0,038$ mm, X ašyje $\pm 0,078$ mm. Didžiausias skirtumas tarp skirtingų matavimų – 0,608 taško, tai atitinka $\pm 0,078$ mm.

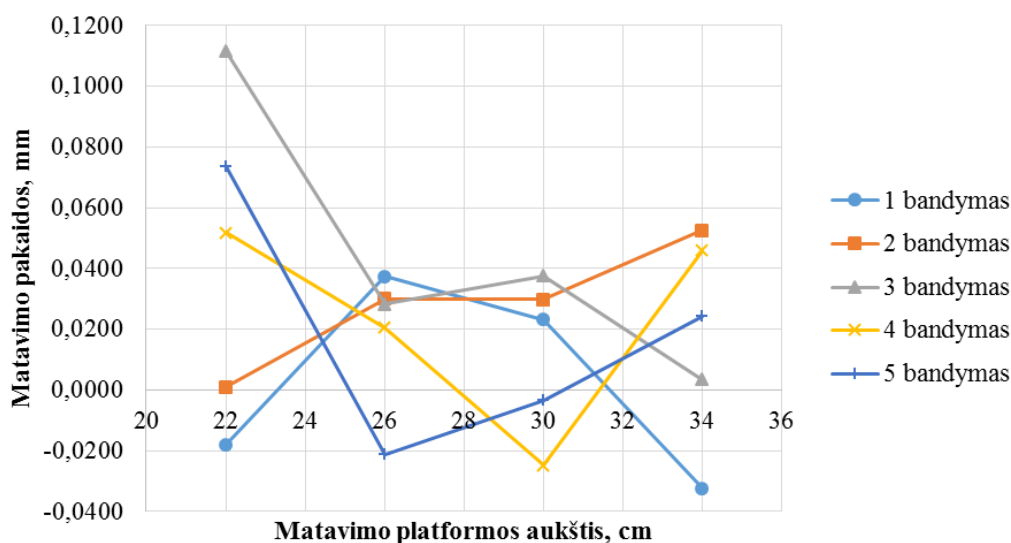
Analogiškai įvertinami antrojo bandymo matavimo duomenys, kai matavimo aukštis 260 mm. Didžiausias Y ašies skirtumas 0,407 taško, X ašies – 0,412 taško. Atitinkamai pervedus į SI sistemos vienetus, kai vieno taško vertė vaizde 0,1769mm, gaunamas Y ašies poslinkis – $\pm 0,072$ mm, X ašies – $\pm 0,071$ mm. Didžiausias skirtumas tarp skirtingų matavimų – 0,434 taško, tai atitinka $\pm 0,076$ mm paklaidą

Iš šių duomenų matyti, kad nepriklausomai nuo aukščio pozicionavimo paklaida išlieka, didžiausia abiem atvejams siekia $\pm 0,078$ mm. Šią paklaidą įtakoja roboto judėjimo mechanizmų susidėvimas, jo sisteminės paklaidos (dokumentacijoje vienkrypčiam judėjimui nurodomos paklaidos dydis 0,05mm), tai pat didelę įtaką turi kameros netobulumas, jai atliktas kalibravimas, matavimo programos skaičiavimo trūkumai.

3.3 Matavimo sistemos tikslumo tyrimas

Radus funkciją $f(x)$ su kuria apskaičiuojama vieno vaizdo taško vertė bet kokiame aukštyje, galima atlikti sistemos tikslumo tyrimą. Jo metu siekiama nustatyti kaip matavimo rezultatai priklauso nuo pauščio skrydžio vaizdo pervertimo, kaip kinta to pačio objekto matmenys skirtinguose aukščiuose. Tyrimas atliekamas matuojant tą patį objektą kelis kartus skirtinguose aukščiuose: 34cm, 30cm, 26cm, 22cm.

Tyrimui naudojama šachmatų lenta, kurios vienos kvadrato kraštinės ilgis lygus 25mm. Sistemos matavimo tikslumui nustatyti penkis kartus atliekamas pilnas kalibravimas, t.y. randama homografinė matrica H ir perdavimo funkcijos $f(x)$ koeficientai a ir b . Žinant matavimo aukštį randama vieno pikselio vertė milimetrais kiekvienu atveju. Pilnai sukalibravus sistemą keturiuose skirtinguose aukščiuose matuojamas atstumas tarp tų pačių kvadratų kampų, atstumas turi būti lygus 200mm. Kampų koordinatės randamos tūkstantųjų taško verčių tikslumu naudojant funkciją $cvFindCornerSubPix()$. Gauta išraiška taškų vertėmis įstačius į formulę perverčiama į SI sistemos vienetus. Eksperimento rezultatai pateikti lentelėje prieduose (5 priedas), matavimo paklaidos pateiktos sklaidos diagramoje (50 pav.).



50 pav. Matavimo paklaidų skirtinguose aukščiuose diagrama

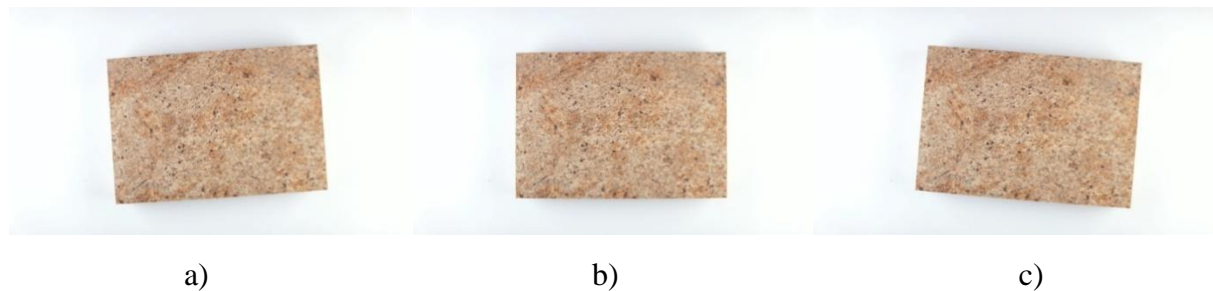
Išanalizavus matavimo duomenis pastebėta (50 pav.), kad matavimo tikslumas iš dalies priklauso nuo matavimo platformos aukščio. 26cm ir 30cm aukščiuose gautos panašios matavimo paklaidos, kurios svyruoja nuo -0,0248mm iki 0,0375mm. Šiek tiek didesnės paklaidos gautos 34cm aukštyje, kurias įtakojo grubesnė vieno taško vertė milimetrais. Matuojant 22cm aukštyje matavimo paklaidų intervalas padvigubėja, intervalas nuo -0,0179mm iki 0,1116mm. Tokie rezultatai gauti, nes matuojami kampai šiame aukštyje atsiduria tiriamo vaizdo pakraščiuose, kuriuos veikia vaizdo kameros lęšio iškraipymai. Didžiausia paklaida gauta atliekant trečią bandymą 22cm aukštyje, jos dydis 0,1115mm, mažiausia 5 bandymo metu 30cm aukštyje ir 3 bandymo metu 34cm aukštyje, dydis atitinkamai -0,0035mm ir 0,0035mm. Išvedus visų aukščių paklaidų vidurkį sistemai esant stacionarioje padėtyje, gaunama atsitiktinė paklaida, kurios dydis $\pm 0,0235mm$.

Apibendrinus duomenis prieita išvados, kad tikslesni matavimo rezultatai gaunami matuojamam objektui esant vaizdo centre. Taip pat rezultatai priklauso nuo vieno vaizdo taško

vertės milimetrais, kuri didėja matavimo platformai tolstant nuo matuojamos plokštumos. Pauščio skrydžio kalibravimas matavimo duomenis įtakoja nežymiai, nes vieno taško vertė matavimo aukščiuose skirtingais kalibravimo atvejais kinta tik per 0,001mm.

3.4 Detalės matmenų aptikimo metodų tyrimas

Tyrimo metu siekiama nustatyti, kuris iš aprašytų metodų yra tinkamiausias aptikti detalės matmenis. Detalės fiksuojamos trijose skirtingose pozicijose: pakreiptos į kairę pusę, lygiuojančios su kraštinėmis, pakreiptos į dešinę pusę (51 pav.).



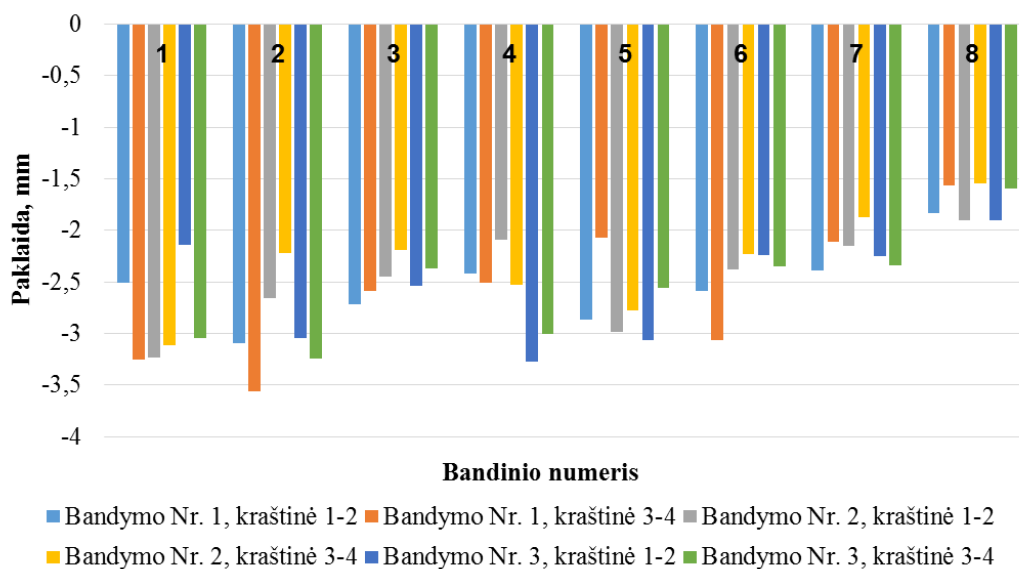
51 pav. Detalių padėtys tyrimų metu: a) pakreipta į kairę pusę; b) lygiuojanti su ašimis; c) pakreipta į dešinę pusę

Vaizdo kamera bandymo metu pakelta 40cm aukščiau nuo matavimo plokštumos. Bandymo rezultatuose pateikiami išmatuoti stačiakampių kraštinių ilgiai. Pagal aprašytą metodą surandami visi detalių kampai ir naudojantis formulėmis apskaičiuojami kraštinių ilgiai, duomenys išvedami milimetrais. Prieš atliekant matavimo vienetų konvertavimą taip pat įvertinamas detalės aukštis ir atimamas iš platformos aukščio. Vieno taško vertė bandymų metu – 0.262mm.

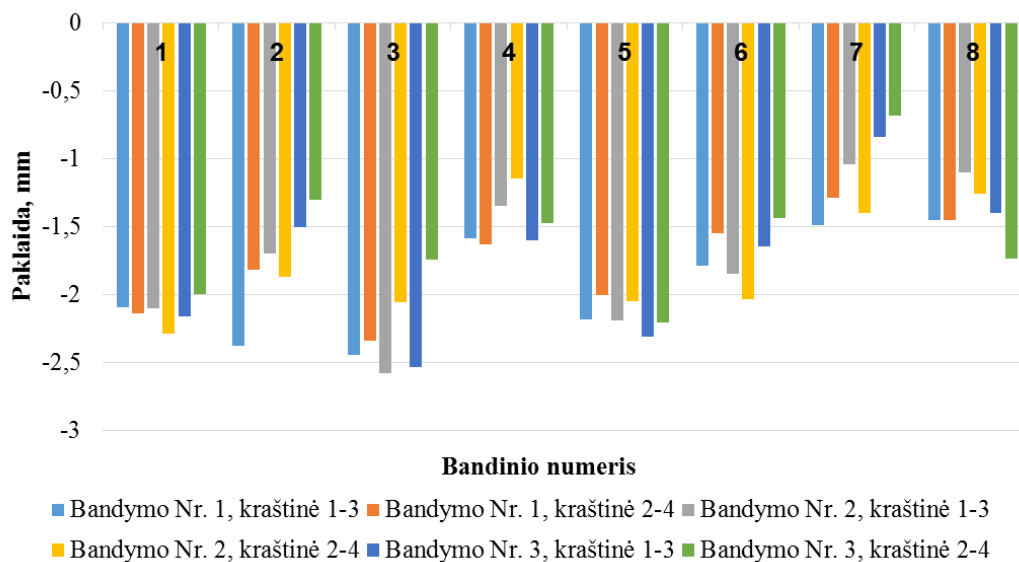
Pirmiausia bandymai atliekami naudojant *Hough* linijų aptikimo metodą, matavimai atlikti esant 40 cm atstumui tarp matavimo platformos ir matavimo plokštumos. Gautos matavimo paklaidos pateikiamos stulpelinėse diagramose, atskirai ilgajai kraštinei (52 pav. a) ir trumpajai (52 pav. b). Taip pat analogiškas tyrimas atliekamas naudojant segmentavimo metodą, duomenys taip pat pateikiami stulpelinėse diagramose (53 pav.). Visi matavimo duomenys pateikti lentelėje prieduose (6 priedas).

Atlikus *Hough* metodo tyrimo metu gautų duomenų analizę nustatyta, kad paklaidos pasiskirsčiusios panašiai tiek ilgajai, tiek trumpajai kraštinei. Nustatyta, kad didžiausia matavimo paklaida gauta tiriant 2 plokštę, siekia -3.56mm, santykinė paklaida -2,10%. Mažiausia matavimo paklaida gauta tiriant 7 plokštę, siekia -0,68mm, santykinė paklaida -0,40%. Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios paklaidos – 2,88mm. Vidutinė matavimo paklaida -2,13mm, vidutinė santykinė paklaida -0,12%. Pastebėta, kad 4, 7 ir 8 plokštės bandymo metu gautos mažiausios paklaidos. Galima teigti, kad tamsūs objektai šiuo metodu atpažįstami tiksliau, nes randama

tikslesnė briaunos padėtis vaizde. Taip pat pastebėta, kad visais atvejais detalė užfiksuota mažesnė nei yra iš tiesių. Iš duomenų matyti, kad trumposios kraštinės matmenų paklaidos mažesnės.



a)



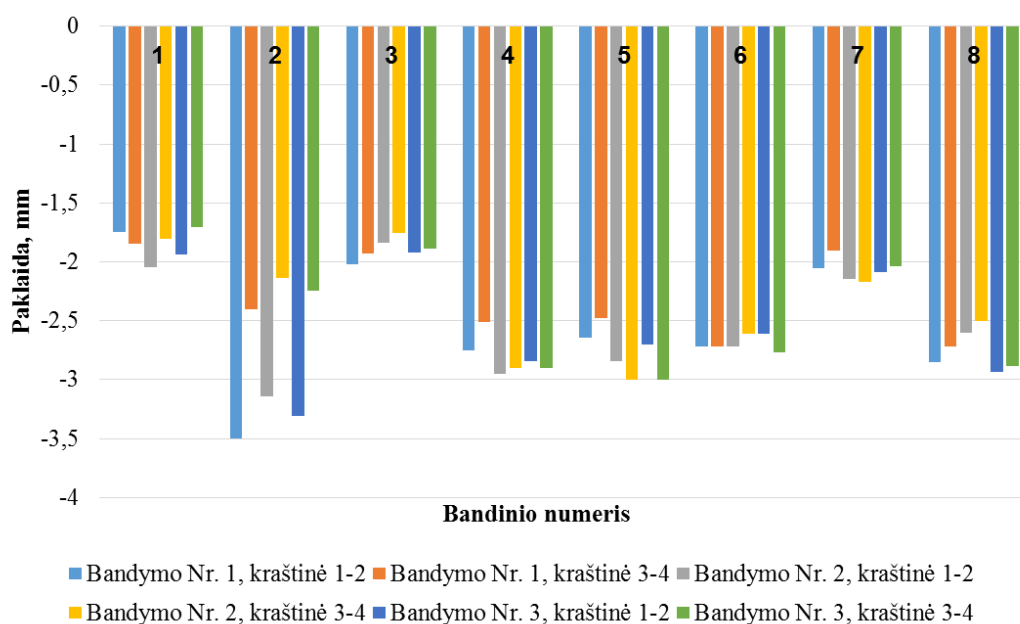
b)

52 pav. Matavimo paklaidos naudojant *Hough* linijų radimo metodą 40cm aukštyje: a) ilgosios kraštinės; b) trumposios kraštinės

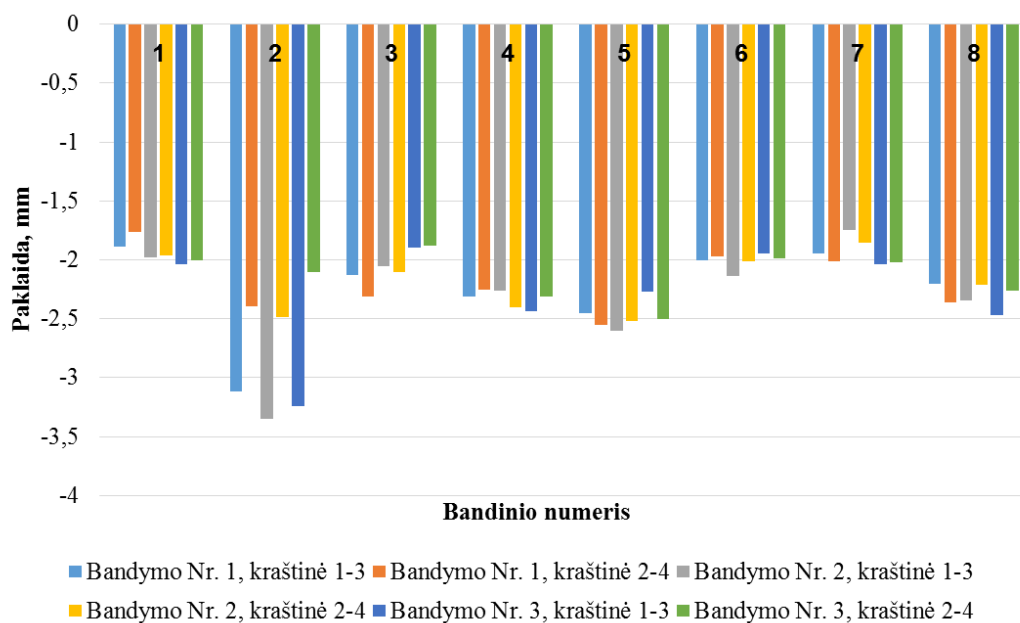
Analogiškai išnagrinėjus segmentavimo metu gautus duomenis, nustatyta, kad didžiausia paklaida -3,50mm, santykinė paklaida -2,07%. Mažiausia paklaida -1,70mm, mažiausia santykinė paklaida -1,00%. Didžiausias skirtumas tarp matavimo paklaidų -1,80mm. Vidutinė paklaida -2,34mm, vidutinė santykinė -1,38%. Nustatyta, kad šiuo atveju duomenys nepriklauso nuo paviršiaus tekstūros, kadangi matavimo rezultatai pasiskirstę tolygiai.

Pastebėta, kad antrosios plokštės duomenys pasiskirstę netolygiai, matuojant ilgąją kraštinę 1-2 tarp stačiakampio kampų, gautas didesnis nei vieno milimetro nesutapimas, palyginus

su to pačio stačiakampio 3-4 kraštine. Taip pat trumpoji kraštinė 1-3 gauta ilgiausia iš visų bandinių.



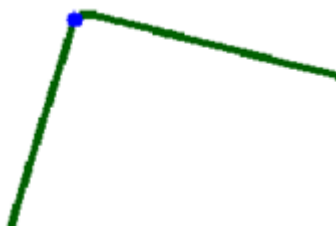
a)



b)

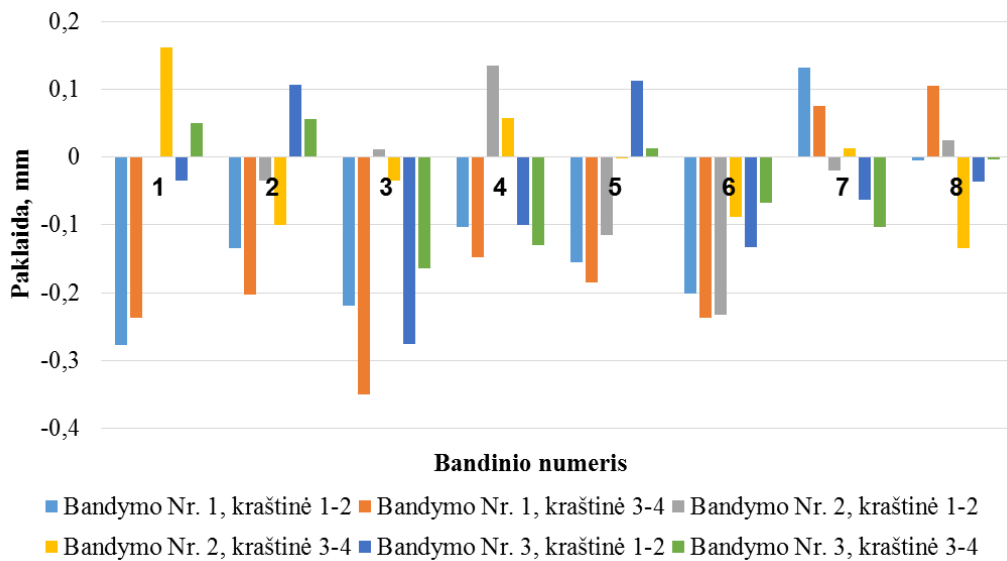
53 pav. Matavimo paklaidos naudojant segmentavimo metodą 40cm aukštyje: a) trumposios kraštinės; b) ilgosios kraštinės

Pakartojus tyrimą gauti tokie pat duomenys. Nustatyta, kad 2 plokštei pažeistas 1 kampas. Atlikus segmentavimo metodo analizę nustatyta, kad metodo tikslumas priklauso nuo matuojamo objekto kampų būklės, nes jei kampai suapvalėje, fiksuojama ne tikroji viršūnės vieta, bet užapvalėjusio kampo bet kuris sąlygas tenkinantis taškas (54 pav.). Tai yra pagrindinis šio metodo trūkumas. Vidutinė paklaida 0,21mm didesnė už *Hough* metodo paklaidą.

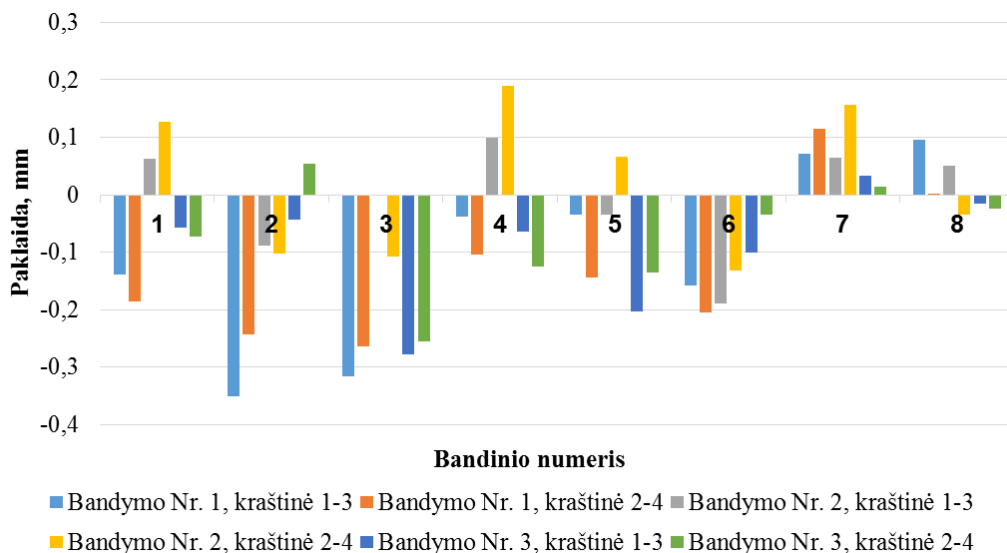


54 pav. Suapvalėjusio kampo fiksavimas segmentavimo metodu

3.4.1 Patobulinto Hough linijų aptikimo metodo tyrimas



a)



b)

55 pav. Matavimo paklaidos naudojant patobulintą *Hough* metodą 10cm aukštyje: a) ilgoji kraštinė; b) trumpoji kraštinė

Tiriant patobulintą *Hough* metodą fiksuojamas ne visas matuojamos detalės vaizdas, bet atskirai kiekvienas jos kampas. Matavimai atliekami 10cm aukštyje virš matavimo plokštumos. Roboto manipulatoriaus poslinkio žingsnis *X* ašimi – 40mm, *Y* ašimi – 25mm. Manipulatorius pozicionuoja 1, 7, 43, 49 pozicijose. Atstumai tarp kampų perskaičiuojami pritaikant formulę aptartą ankstesniame skyriuje (25) (žr. 2.8.1 punktą).

Tyrimo metu detalė pozicionuojama trejomis skirtingomis padėtimis (51 pav.). Gauti duomenys atvaizduojami matavimo paklaidomis stulpelinėse diagramose, pateikiamos ilgosios kraštinės (55 pav. a) ir trumposios (55 pav. b) kraštinių paklaidos.

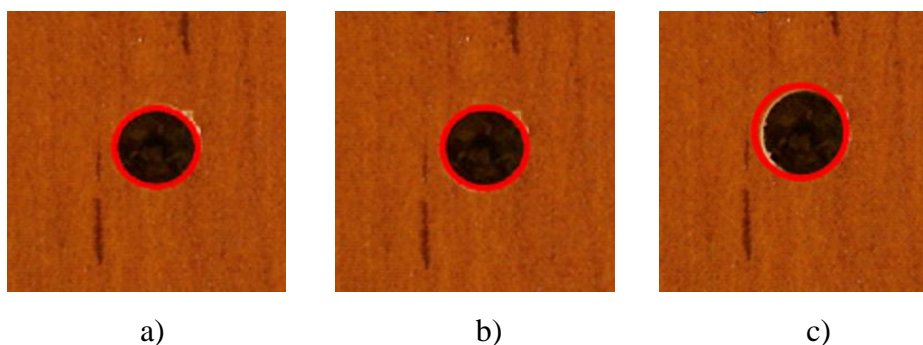
Nustatyta, kad sumažinus atstumą tarp kameros ir matavimo plokštumos iki 10cm ir matuojant kiekvieną kampą atskirai, matavimo paklaidos sumažėjo iki $\pm 0,3516\text{mm}$, santykinė paklaida $\pm 0,20\%$. Mažiausia paklaida siekia $-0,0001\text{mm}$, mažiausia santykinė paklaida $-0,00005\%$. Skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios paklaidos $0,3515\text{mm}$. Detaliau išnagrinėjus duomenis matyti, kad išliko tendencija kaip ir pirmame bandyme, jog 4, 7 ir 8 bandinių matmenys aptinkami tiksliau nei likusiųjų. Tai galima paaiškinti tamsesne šių detalių tekstūra, ko pasekoje gaunamas išraiškingesnis skirtumas tarp šviesaus matavimo plokštumos ir tamsaus detalės ploto, tai padeda tiksliau išskirti briaunas ir rasti viršūnes. Analizuojant paklaidų pasiskirstymą, gautas vienodas skaičius teigiamu, tiek neigiamų reikšmių, tačiau neigiamos paklaidos didesnės. Tai reiškia, kad detalė fiksuojama šiek tiek mažesnė jei yra iš tiesų. Vidutinė matavimo paklaida $-0,0662\text{mm}$, už gautą naudojant paprastą *Hough* metodą mažesnė $2,06\text{mm}$ arba apytiksliai 31 kartą.

3.5 Skylių aptikimo metodų tyrimas

Reikia nustatyti metodą, kuris tiksliausiai ir kokybiškiausiai aptinka išgręžtas skylės LM DP plokštėse. Šiame tyrime tai pačiai skylėi aptikti išbandomi aptarti metodai ir palyginus gautus rezultatus pasirenkamas geriausiai tinkantis. Tiriama metodai: „*Hough*“ transformacijos metodas apskritimams, „*RANSAC*“ metodas apskritimams rasti ir apskritimų radimo metodas, tiriant kontūro taškų tarpusavio požymius.

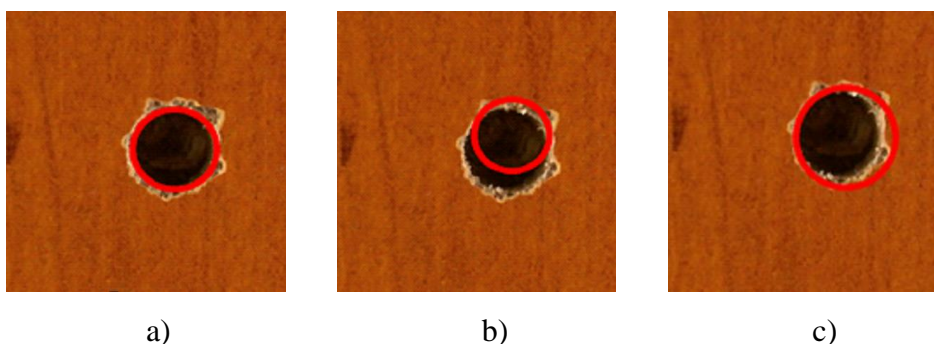
Bandymui pasirenkamos dvi skylės: viena išgręžta taisyklingai, kita su nutrupėjusiais laminato kraštais. Skylių skersmuo 5mm. Pirminiam vaizdų apdorojimui visais atvejais taikomas tas pats metodas su tais pačiais koeficientais. Matavimo platformos aukštis 7 cm, detalės aukštis 1,8cm, vaizdo taško vertė $0,0367\text{mm}$. *Hough* metodas taikomas naudojant standartinę *OpenCV* bibliotekos funkciją *HoughCircles()*. Pasirenkami funkcijos parametrai: atstumas tarp apskritimų – 100, lūžio taškas paieškoje – 30, mažiausias apskritimas – 30. „*RANSAC*“ programoje pasirenkamas minimalus apskritimo skersmuo 15 vaizdo taškų, ieškomų apskritimų skaičius 10. Mažiausių kvadratų metodo parametrai nekeičiami.

Atlikus vaizdo kalibravimą ir paeiliui pritaikius minėtus metodus taisyklingai skylėi, gauti rezultatai pateikti paveikslėlyje (56 pav.), netaisyklingai kitame paveikslėlyje (57 pav.).



56 pav. Skylių radimo metodų taikymas taisyklingai skylėi: a) *RANSAC* metodas; b) kontūro taškų tarpusavio požymių tyrimo metodas; c) *Hough* apskritimų metodas

Ieškant taisyklingos skylės, geriausias rezultatas gautas naudojant kontūro taškų požymio tyrimo metodą, nustatytas skylės skersmuo 5,0115mm, paklaida 0,0115mm, santykinė paklaida 0,23%. Taikant *RANSAC* metodą apskritimo centras nustatytas tiksliai, skersmuo – 5,0699mm, paklaida 0,0699mm, santykinė paklaida 1,4%. Prasčiausi rezultatai gauti pritaikius *Hough* metodą, kaip matyti iš paveikslėlio, netiksliai nustatytas apskritimo centras (56 pav. c), apskritimo skersmuo 5,5115mm, santykinė paklaida – 10,23%. Bandant parikti kitus standartinės *Hough* funkcijos parametrus rezultatai gauti dar blogesni.



57 pav. Skylių radimo metodų taikymas netaisyklingai skylėi: a) *RANSAC* metodas; b) kontūro taškų tarpusavio požymių tyrimo metodas; c) *Hough* metodas

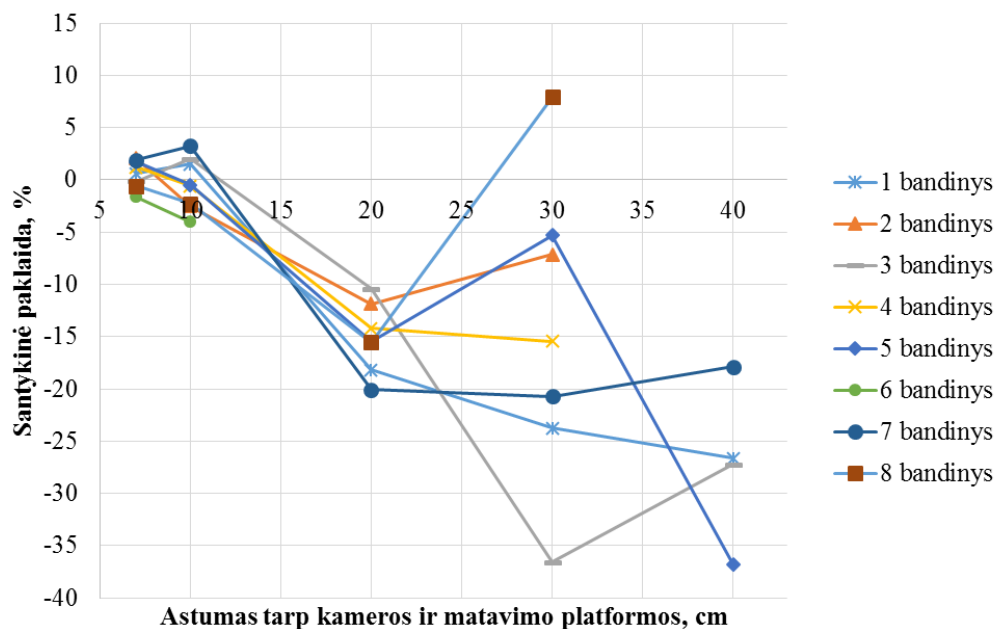
Ieškant skylės netaisyklingais kraštais, geriausias rezultatas gautas taikant *RANSAC* metodą, apskritimo centras nustatytas gana tiksliai, skylės skersmuo 5,0573mm, paklaida 0,0573mm, santykinė paklaida 1,146%, pasiektas geresnis rezultatas nei pirmu atveju. Taikant *Hough* ir mažiausių kvadratų metodus skylės centras nustatytas neteisingai (57 pav. a, c), gauti skersmenys atitinkamai 5,3645mm ir 5,9524mm. Santykinės paklaidos 7,29% ir 19,05%.

Atlikus gautų duomenų analizę nustatyta, kad geriausias metodas tirti skylėms yra *RANSAC*, kuriuo galima vienodai tiksliai nustatyti tiek taisyklingais, tiek aplaužytais kraštais skylės. Didžiausia gauta paklaida 0,0699mm, santykinė 1,4%. Vieno vaizdo taško vertė matavimo metu 0,0367mm.

3.6 Skylių aptikimo patikimumo tyrimas

Nustačius geriausių iš aptartų metodų skylėms aptikti, būtina atlikti patikimumo tyrimą. Nustatyti kaip tiksliai skylės aptinkamos skirtingų paviršiaus tekstūrų detalėse, kokia matavimo duomenų priklausomybė nuo aukščio. Tyrimui pasirenkamos 5mm ir 10mm skersmens, 8mm gylio skylės. Tiriama visuose turimuose bandinių paviršiuose (2 priedas). Tyrimas atliekamas 40, 30, 20, 10, 7cm aukščiuose virš matavimo plokštumos. Matavimų metu gauti skersmenys pateikti prieduose (7 priedas). Vieno vaizdo taško vertė matavimų metu 40cm aukštyje yra 0,255mm, 30cm – 0,189mm, 20 cm – 0,123mm, 10cm – 0,0567mm, 7cm – 0,0369mm

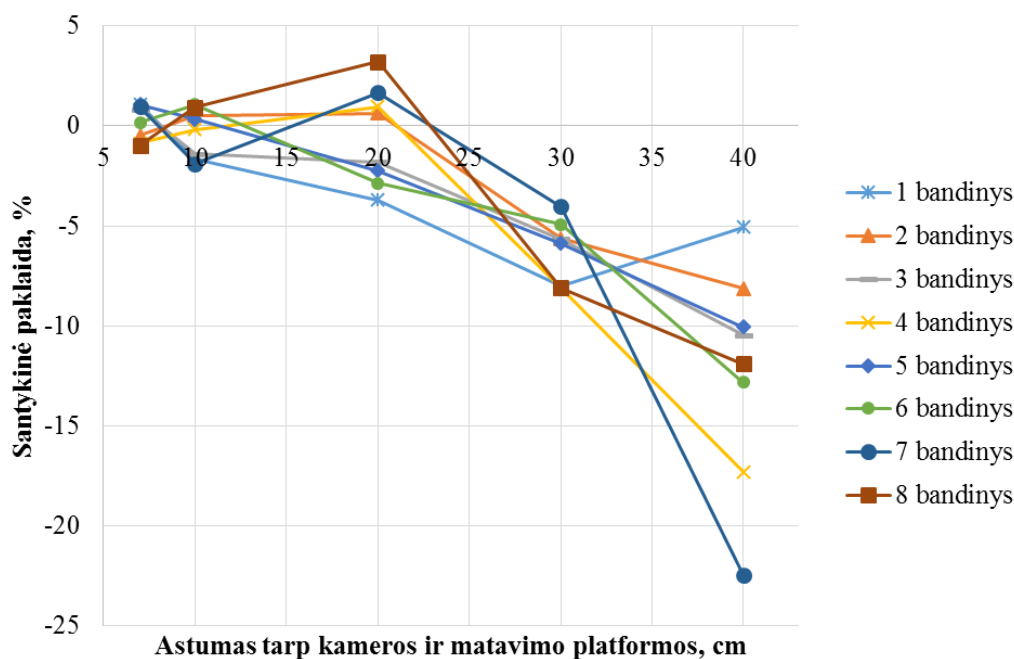
Atliekant 5mm skersmens skylės paiešką kamerai esant 40cm aukštyje virš matavimo plokštumos nustatyta, kad iš 8 naudotų bandinių tik keturiuose pavyko užfiksuoti skylę, išmatuoti skylių skersmenys apie 30 proc. mažesni nei yra iš tiesų. Nerastų skylių bandiniai neturi aiškaus išskirtinio požymio, kadangi visų paviršiaus tekstūros skirtingos. Tačiau analizuojant 6 bandinį, t.y. geltono marmuro spalvos plokštę, pastebėta kad skylė nerasta 40, 30 ir 20cm aukščiuose. To priežastis marga paviršiaus tekstūra, kurioje apstu panašaus dydžio objektų, todėl didesniuose aukščiuose nepavyko išfiltruoti ieškomos skylės, ji įsiliejo į plokštės tekstūrą. 10mm skersmens skylės priešingai nei 5mm skylės, rastos visuose bandiniuose, kadangi jos skersmuo dvigubai didesnis ir aiškiau išsiskiria iš bendro margos plokštės vaizdo. Gautų matavimo duomenų analizei patogiau naudoti santykinę paklaidą, jų priklausomybė nuo aukščio pateikta atskiruose grafikuose 5mm skersmens skylei (58 pav.) ir 10mm skylei (59 pav.).



58 pav. 5mm skersmens skylės santykinių matavimo paklaidų priklausomybė nuo aukščio

Tiriant 5mm skersmens skylę didžiausios paklaidų išsimėtymas gautas 40cm aukštyje, matuojant 5 bandinio paviršių užfiksuota -36% santykinė paklaida, mažiausia paklaida 7 plokštėje

– -17,86%. 30cm aukštyje visų matuotų skylių paklaidos išsibarsčiusios intervale nuo -23,75% iki 7,94%. 20cm aukštyje paklaidų išsibarstymas mažėja, intervalas nuo -20,09% iki -10,39%. 10cm aukštyje gautos paklaidos neviršija 5% ribos, paklaidų intervalas nuo -3,99% iki 3,26%. Minimaliaime 7 cm matavimo aukštyje gautų paklaidų dydžio intervalas dar labiau susitraukia, jo dydis siekia nuo -1,63% iki 2,06%, tai atitinka -0,0816mm ir 0,1029mm. Geriausias rezultatas gautas matuojant 3 plokštę, nuokrypis siekia -0,0064mm, prasčiausias rezultatas gautas matuojant 2 plokštę, paklaidos dydis 0,1029mm.



59 pav. 10mm skersmens skylės santykinų matavimo paklaidų priklausomybė nuo aukščio

Tiriant 10mm skylę gauti geresni rezultatai, šiuo atveju pavyko užfiksuoti visas skylės. Didžiausios paklaidos taip pat gautos 40cm aukštyje, paklaidų intervalas nuo -22,45% iki -5,06%. 30cm aukštyje paklaidų intervalas sumažėjo, dydis nuo -8,11% iki -4,04%. 20cm aukštyje matavimo paklaidų intervalas nuo -3,7% iki 3,22%. 10cm ir 7 cm aukščiuose matavimo rezultatai panašūs. 7cm aukštyje santykinų paklaidų intervalas nuo -0,96% iki 1,08%. Prasčiausias rezultatas gautas matuojant 5 plokštę – 1,08%, geriausias 6 plokštę – 0,18%, atitinkamai 0,1077mm ir 0,0182mm.

Nustatyta, kad matuojant 5mm skersmens skylę 40cm, 30cm ir 20cm aukščiuose, o 10mm skersmens skylę 40 ir 30cm aukščiuose, gauti skersmenys yra mažesni nei skylės. Tokius rezultatus įtakojo naudojamas filtravimo metodas, kai kuriose plokštėse skylės tekstūra susilieja su paviršiumi. Dėl šių priežasčių nepavyko tiksliai nustatyti matuojamos skylės briaunos. Nustatyta, kad geriausi rezultatai gauti tiriant skylės 10cm ir 7 cm aukščiuose. Nustatytos matavimo paklaida 7 cm aukštyje $\pm 0,1077$ mm.

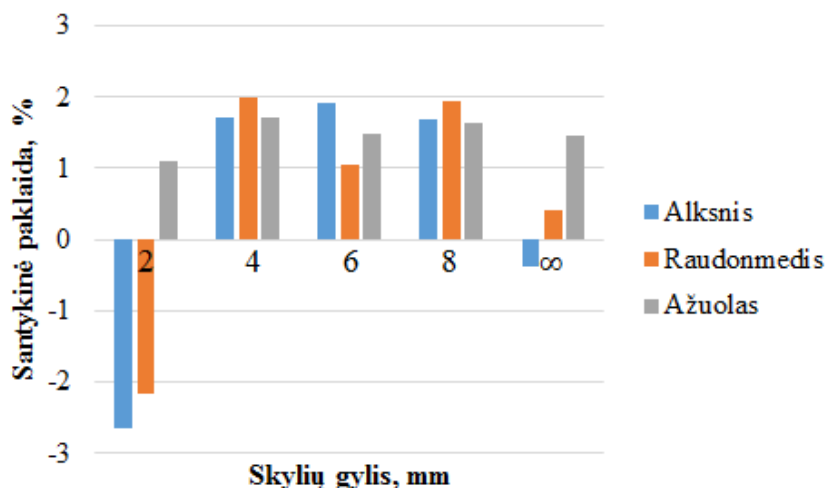
3.7 Skirtingo gylio skylių aptikimo tyrimas

Pasirinkus RANSAC metodą, svarbu nustatyti, ar jo veikimo patikimumui turi įtakos skylės išgręžimo gylis. Šiam eksperimentui pasirenkamos 3 skirtingas tekstūras turinčios plokštės, kurių spalvos: alksnis, raudonmedis, ažuolas (2 priedas). Skylės skersmuo matuojamas vaizdo centre, atstumas tarp kameros ir matavimo plokštumos 7cm. Skylių skersmuo bandymo metu 5mm, gylis: 2mm, 4mm, 6mm, 8mm ir kiaurai išgręžta skylė. Gauti matavimo rezultatai pateikti lentelėje (4 lentelė), santykinės matavimo paklaidos stulpelinėje diagramoje (60 pav.).

4 lentelė

Tekstūros spalva	Skylės skersmenys prie skirtingų gylių, mm				
	2mm	4mm	6mm	8mm	∞
Alksnis	4,8678	5,0857	5,0964	5,0845	4,9809
Raudonmedis	4,8926	5,0996	5,0526	5,0967	5,0211
Ažuolas	5,0548	5,0862	5,0748	5,0818	5,0729

Išnagrinėjus duomenis matyti, kad prasčiausi rezultatai gauti matuojant 2mm gylio skylę, didžiausia paklaida matuojant alksnio plokštę – -0,1322mm, santykinė paklaida -2,64% nuo matuojamo dydžio. Didesnių gylių skylės aptiktos panašiu tikslumu. Iš jų didžiausia paklaida gauta matuojant 2mm gylio skylę raudonmedžio spalvos plokštėje – 0,0996mm, santykinė paklaida 1,99%. Mažiausia paklaida matuojant kiaurymę – 0,019mm, santykinė paklaida -0,38%. Matavimų metu sistemos statinė paklaida $\pm 0,0372$ mm (vieno taško vertė milimetrais).



60 pav. Skylių skersmenų priklausomybės nuo gylio santykinės paklaidos

Išnagrinėjus 2mm gylio skylės matavimo rezultatus, nustatyta, kad paklaidos atsirado dėl vaizde matomų apšviestų skylių šonų ir netolygaus apšvietimo pasiskirstymo jų dugne. Šie apšvietimo defektai išryškėja po vaizdo apdorojimo, pritaikius briaunų radimo metodą nustatomi kaip tikrasis apskritimo kraštas. Geresni rezultatai gauti matuojant tamsios tekstūros plokštę, nes

yra didesnis slenkstis tarp tamsaus ir šviesaus paviršių. Geriausi rezultatai gauti matuojant kiauryminę skylę, nes visais atvejais dugnas buvo beveik juodas, į jį nepateko apšvietimo spinduliai, to pasėjo geriau išskirta skylės briauna.

3.8 Skylių padėties vaizde tyrimas

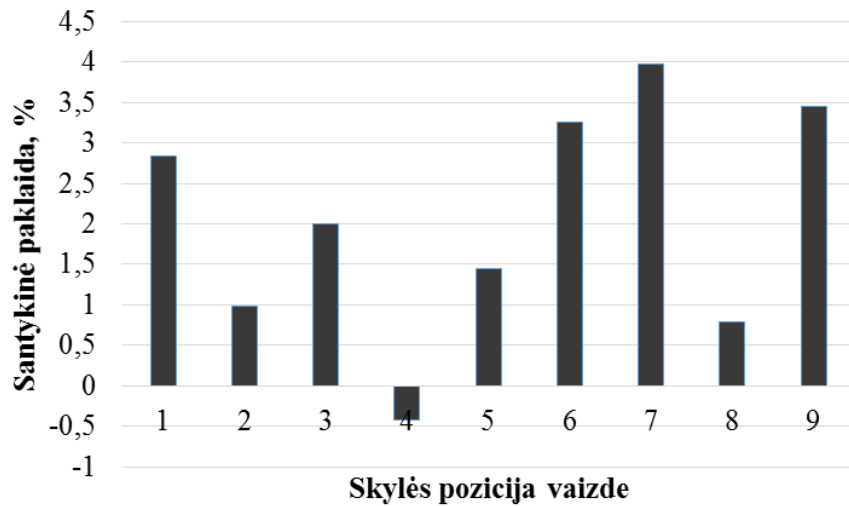
Sistemos vaizdas prieš apdorojant ir ieškant skylių yra kalibruojamas, todėl naudinga ištirti kaip skiriasi atpažinimas skylėi esant vaizdo centre ir tolstant nuo jo, ar nėra iškraipymų. Be to skylėi esant vaizdo krašte, nebematomas skylės dugnas, jo plotą matomame vaizde užima skylės kraštinė. Tyrimui atlikti vaizdas suskaidomas į devynias menamas dalis, kiekvienoje iš jų patalpinus tą pačią išgręžtą skylę, matuojamas jos skersmuo. Skylių matavimo pozicijos pavaizduotos paveikslėlyje (61 pav.).

Atstumas tarp kameros ir matavimo plokštumos bandymo metu – 7cm, skylės skersmuo bandymo metu – 5mm, gylis – 8mm. Tyrimui atlikti pasirenkama raudonmedžio spalvos laminuota medžio drožlių plokštelė (2 priedas). Vieno taško vaizde vertė matavimo metu 0,0372 mm. Kiekvienoje skylės pozicijoje gautiems dydžiams paskaičiuojamos santykinės paklaidos, kurios atvaizduojamas stulpeline diagrama paveikslėlyje (62 pav.).

• 1	• 2	• 3
• 4	• 5	• 6
• 7	• 8	• 9

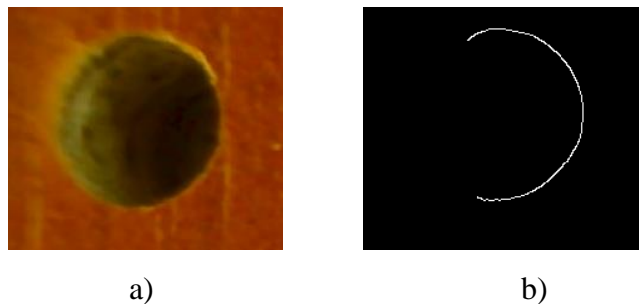
61 pav. Skylės padėtys vaizde matavimo metu

Tiksliausi rezultatai gauti 2, 4, 5 ir 8 pozicijose. Tiksliausias pasiektas rezultatas 4 pozicijoje, paklaidos dydis -0,0213mm, santykinė paklaida -0,43%. Prasčiausias rezultatas 7 pozicijoje, paklaidos dydis siekia 0,1984mm, santykinė paklaida 3,97%. Vidutinė visų matavimų paklaida – 0,1mm. Iš santykinų paklaidų diagramos matyti (62 pav.), kad geriausi rezultatai gauti skylėms esant matuojamo vaizdo centre, kraštinėse padėtyse gauti rezultatai prastesni. Tokie rezultatai gauti, nes skylėi esant šoninėse padėtyse nematomas jos dugnas, vietoje jo vaizde matomas apšviestas skylės šonas, kuris vietomis beveik susilieja su matuojamo paviršiaus tekstūra. Taip pat pastebėta, kad vaizdo taškams tolstant nuo kameros centro vaizdas yra iškraipomas, gaunamas taškų išblukinimas, kurio neįmanoma atstatyti kalibruojant (63 pav. a). Dėl šių priežasčių, pritaikius pasirinktą vaizdo apdorojimą, randama nepilna ir netiksli apskritimo briauna (63 pav. b).



62 pav. Skylės skersmuo skirtingose vaizdo pozicijose

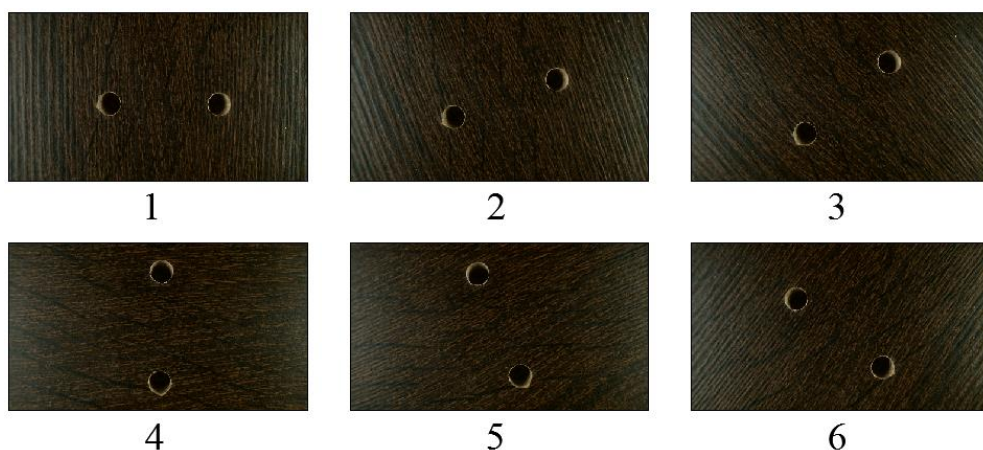
Siekiant išvengti šių matavimo palaidų, reikėtų keisti esamą vaizdo kamerą į kokybiškesnę su mažesniais vaizdo iškraipymais arba sistema atlikdama matavimus turi pozicijuoti kamerą tiksliai virš matuojamo objekto. Taip pat tiriant objektą iš arti galima vaizdą programiškai apkarpyti iš visų pusių, kad būtų fiksuojamas vaizdas be išblukimų.



63 pav. Skylės padėtis 7 pozicijoje: a) neapdorotas vaizdas iš kameros; b) rasta skylės briauna

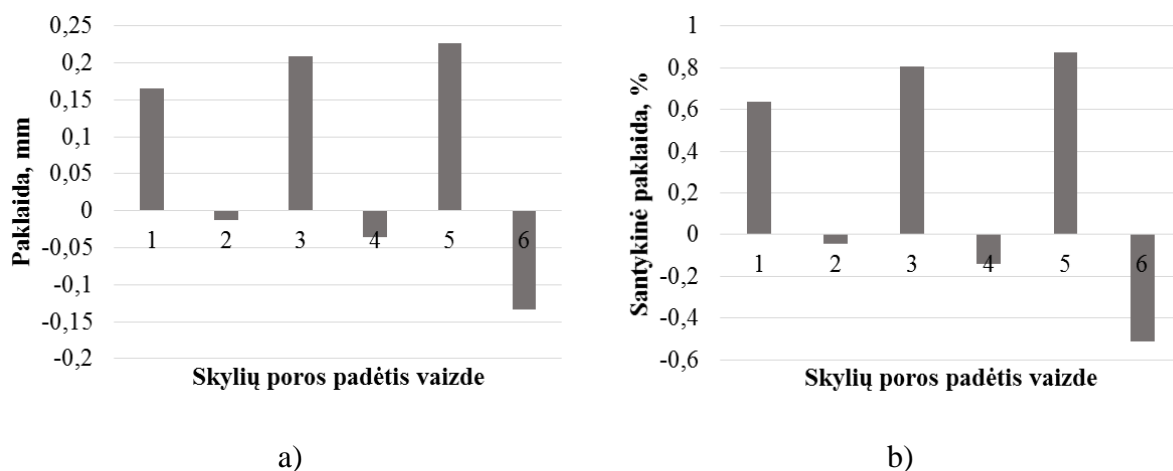
3.9 Atstumo tarp skylių nustatymo tyrimas

Šiuo tyrimu siekiama nustatyti, ar vaizde esant dviem arti viena kitos skylėms efektyvu nustatyti atstumą tarp jų centrų, kad būtų galima supaprastinti ir pagreitinti bendrą sistemos darbą. Tyrimui CNC staklėmis išgręžiamos dvi 5mm skersmens skylės, atstumas tarp jų centrų 25mm, skylės centro gręžimo paklaida 0,05mm, skylės gylis 8mm. Matavimai atliekami 7cm aukštyje. Vaizdai tyrimui imami skylėms esant 6 skirtingose pozicijose (64 pav.). Tyrimo metu gautos matavimo paklaidos pateiktos stulpelinėje diagramoje (65 pav. a), taip pat ir santykinės paklaidos (65 pav. b).



64 pav. Skylių pozicijos bandymo metu

Iš gautų tyrimo rezultatų matyti (64 pav. b), kad santykinės matavimo paklaidos svyruoja nuo -0,513% iki 0,873%, atitinkamai *SI* sistemos vienetai nuo -0,133mm iki 0,227mm. Blogiausi matavimo rezultatai detales pakreipus pagal 3 ir 5 poziciją (64 pav.). Geriausi matavimo rezultatai gauti 2 ir 4 pozicijoje. Geriausias rezultatas 2 pozicijoje – -0,046%, absoliutinė paklaida - 0,012mm. Prasčiausi rezultatai 5 pozicijoje – 0,873%, absoliutinė paklaida 0,227mm. Kalibravimo metu nustatyta vieno vaizdo taško vertė 0,0369mm.



65 pav. Atstumo tarp skylių tyrimo metu gautos matavimo paklaidos: a) absoliutinės paklaidos; b) santykinės paklaidos

Gauti paklaidų dydžiai nėra sistemingai pasiskirstę, todėl galima teigti, kad matavimo rezultatams didžiausią įtaką turėjo matavimo metodas ir skylių padėtis vaizde, nes skylių koordinatinių duomenys fiksuoti ne vaizdo centre (žr. 3.8 poskyris).

3.10 Brokuotų skylės briaunų aptikimo metodo tyrimas

Siekiant nustatyti kaip efektyviai veikia metodas, pasirinkta naudoti visų turimų tipų plokštes, jose išgręžiant 5mm skersmens skyles. Kiekvieno tipo plokščiėje padaroma po dvi skylės,

vienu atveju taisyklingos formos, kitu – su aptrupėjusiu laminatu. Tiriama ar visais atvejais sistema nustatys pažeistą plotą, ar nebus išbrokuotos geros būklės skylės. Sistema matavimą atlieka 7 cm aukštyje nuo matavimo plokštumos. Gauti duomenys su pažeisto ploto atvaizdavimu pateikti prieduose (8 priedas). Taip pat apskaičiuotas defekto dydis procentais kiekvienu atveju. Matomuose pavyzdžiuose mėlyna spalva pažymėta rastos skylės kontūras, žalia spalva rasto broko kontūras.

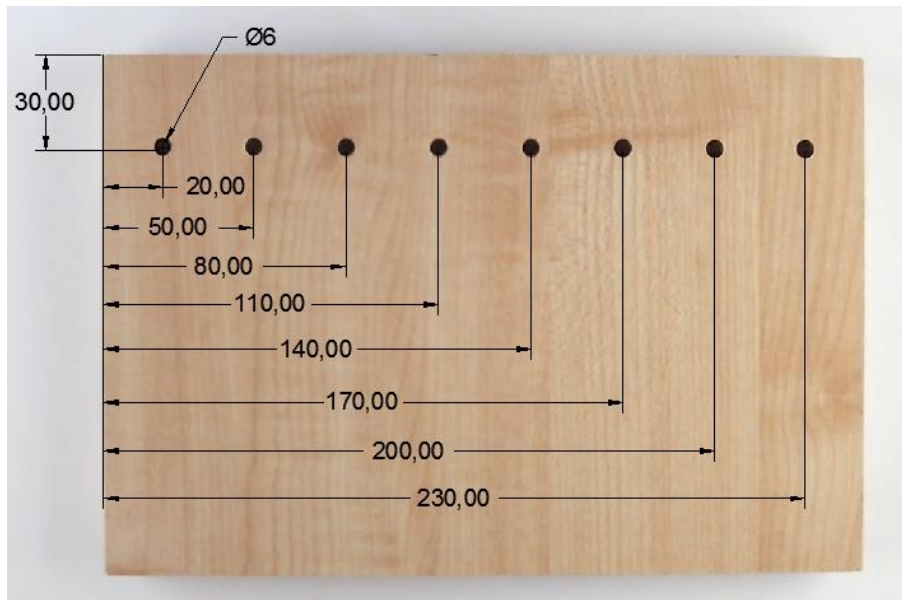
Išanalizavus tyrimo duomenis matyti, kad skylės gręžimo brokas rastas visuose specialiai brokuotose bandiniuose, mažiausias 1 bandymo metu – 5,41%, didžiausias 4 bandymo metu – 137,43%. Pastebėta, kad 2 ir 6 bandymo metu rastas nepilnas detalės brokas, tai įtakojo paviršiaus tekstūros spalva. Pavyzdžiui 6 plokštės tekstūra primena mažas skylės ir yra panašios spalvos kaip medžio drožlės. Tiriant gerai išgręžtas skylės didžiausias rastas brokas yra 6 bandymo metu – 5,25%, mažiausias 5 bandymo metu – 0,24%. Nustatyta, kad tiriant 6 bandinio gerai išgręžtą skylę, aplink ją rastas netikras brokas, o paviršiaus tekstūros dalis, nuokrypis šiuo atveju siekia 5,25%. Kituose paviršiuose taip pat aptiktas nežymus brokas, kurį įtakojo matavimo bei skaičiavimo paklaidos, labai smulkus laminato nutrupėjimas aplink skylės.

Atlikus tyrimą galima teigti, kad tiriant vienspalves detales jose brokas randamas su mažomis paklaidomis, o tiriant margus paviršius gautais metodo duomenimis pasitikėti negalima.

3.11 Skylių pozicijos detalėje aptikimo tyrimas

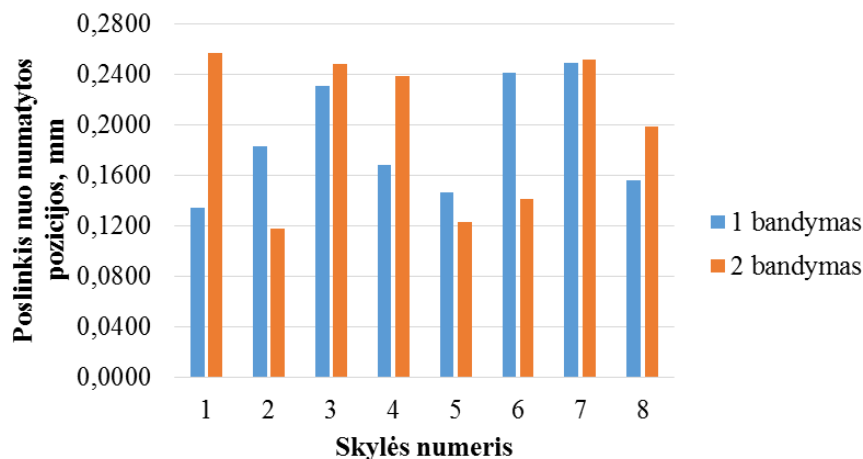
Tyrimui atlikti pasirenkama šviesios spalvos plokštė, kurioje kas 30mm išgręžiamos aštuonios 6mm skersmens skylės. Gręžimui naudotos CNC programuojamos staklės, kurių pozicionavimo paklaida $\pm 0,05$ mm. Skylių išdėstymas ir koordinatės pateiktos paveikslėlyje (66 pav.). Bandymas atliktas du kartus, detalę pakreipus skirtingais kampais. 10cm aukštyje naudojant *Hough* metodą nustatytos detalės koordinatės, apskaičiuotas posvyrio kampas. 7cm aukštyje robotui esant 1 pozicijoje užfiksuotas pirmasis detalės kampas, kurio atžvilgiu bus skaičiuojamos skylių padėtys. Skylių matavimai atlikti 8,9,10,11,12,13,14 pozicijose. Sistemos kalibravimo metu nustatyta, kad 7cm aukštyje vieno vaizdo taško vertė lygi 0,0365mm. Skylių pozicijos vaizde apskaičiuojamos remiantis ankstesniame skyriuje aptarta metodika (žr. 2.8.1 punktą).

Atlikus matavimus nustatyta, kad pirmo bandymo metu detalės posvyrio kampas lygus – 2,18 laipsnio, antro bandymo metu -0,78 laipsnio. Rastos koordinatės ir apskaičiuotos absoliutinės paklaidos nuo numatytų skylių pozicijų pateiktos lentelėje prieduose (9 priedas). Paklaidos apskaičiuojamos taikant formulę atstumui tarp dviejų taškų rasti (10). Paklaidų analizei sudaroma stulpelinė diagrama (67 pav.).



66 pav. Skylių koordinatės plokštėje

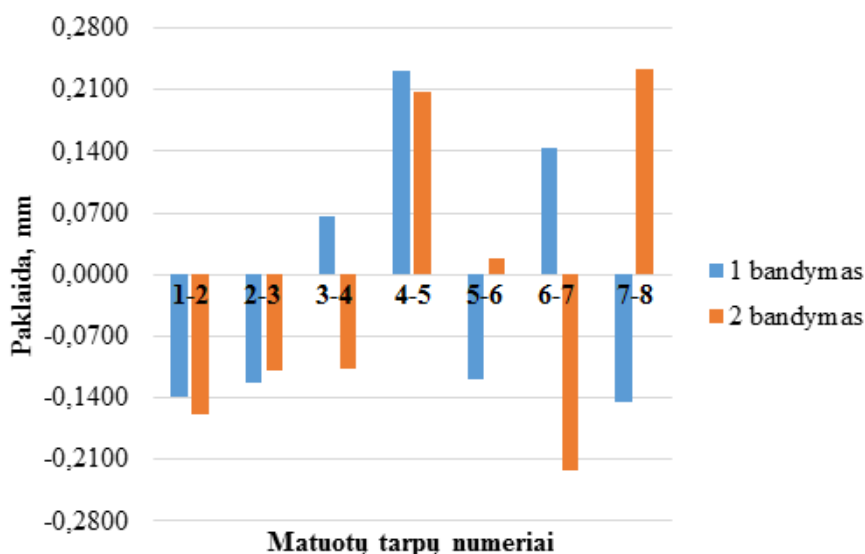
Kaip matyti iš gautų duomenų visų matavimų paklaidos pasiskirsčiusios nedėsnigai, abiem matavimo atvejais tos pačios skylės nutolusios skirtingais atstumais nuo numatytos pozicijos. Didžiausias užfiksuotas nukrypimas nuo žinomos pozicijos nustatytas 2 bandymo metu pirmai skylėi, lygus 0,2572mm. Mažiausias nukrypimas 2 bandymo metu antrai skylėi – 0,1179mm. Pastebėta, kad paklaidos mažesnės pirmojo bandymo metu, tai galima paaiškinti tikslesniu detalės posvyrio kampo nustatymu ir detalės atskaitos taško koordinatčių radimu.



67 pav. Skylių pozicijos radimo detalėje paklaidos

Tyrimo metu taip pat apskaičiuoti atstumai tarp gretimų skylių, gauti duomenys pateikti lentelėje prieduose (9 priedas). Grafiškai matavimo paklaidos pateiktos stulpelinėje diagramoje (68 pav.). Iš gautų duomenų matyti, kad atstumai pasiskirstę nesistemiškai. Didžiausia paklaida užfiksuotas antro bandymo metu tarp 7-8 skylės, dydis 0,2336mm, mažiausia paklaida antro

bandymo metu, tarp 5-6 skylės – 0,0191mm. Tyrimo rezultatai gauti panašūs į ankščiau šia tematika atliktus bandymus (žr. 3.9 skyrius).



68 pav. Atstumų paklaidos tarp rastų skylių

Apibendrinus rezultatus nustatyta, kad didžiausia paklaida nuo numatytos skylės pozicijos vaizde $\pm 0,2572\text{mm}$. Šio tyrimo metu atstumo tarp skylių nustatymo tikslumas $\pm 0,2336\text{mm}$. Rezultatams didžiausią įtaką turėjo detalės posvyrio kampo apskaičiavimas ir atskaitos taško koordinatinių nustatymas (1 detalės kampas). Rezultatus taip pat įtakoja koordinatinių perskaičiavimas skirtinguose vaizduose, prie šios paklaidos galima priskirti ir roboto judesio sukiamą paklaidą, kurios dydis $\pm 0,078\text{mm}$ (žr. 3.2 skyrius).

3.12 Skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad šoninio apšvietimo sistema pranašesnė už tiesioginio apšvietimo sistemą, nes vaizdas apšviečiamas tolygiau, nesukuriamas vienas apšviestas plotas, apšvietimo intensyvumas nepriklauso nuo matavimo platformos aukščio.
2. Nustatyta, kad robotui persislenkant iš vienos matavimo pozicijos į kitą, pozicionavimo paklaida siekia $\pm 0,078\text{ mm}$.
3. Nustatyta, kad detalių dydžio matavimui naudojant segmentavimo metodą, matavimo paklaidos tiesiogiai priklauso nuo detalės kampų taisyklingumo.
4. Nustatyta, kad geriausias būdas rasti detalės matmenis, taikant *Hough* linijų radimo metodą matuoti kiekvieną plokštės kampą iš arti, nustatytas metodo paklaidos dydis $\pm 0,3516\text{mm}$.
5. Nustatyta, kad geriausias metodas skylėms matuoti yra *RANSAC*, kuriuo galima vienodai tiksliai nustatyti tiek taisyklingais, tiek aplaužytais kraštais skylės.

6. Nustatyta, kad matuojant skylių skersmenis geriausi rezultatai gaunami matavimo platformai esant 7cm aukštyje.
7. Nustatyta, kad geriausi rezultatai gaunami matuojamą skylę pozicionuojant vaizdo centre, matavimo paklaidos $\pm 0,1077\text{mm}$, skylėi esant vaizdo krašte matavimo paklaidos padidėja iki $\pm 0,1984\text{mm}$.
8. Išsiaiškinta, kad skersmens matavimo rezultatai priklauso nuo skylės gylio, kuo ji gilesnė tuo tiksliau randama skylės briauna ir nustatomas jos skersmuo.
9. Nustatyta, kad tiriant skylės aptūpėjimo broką vienspalvėse detalėse jis aptinkamas su mažomis paklaidomis visiems paviršiams, tačiau tiriant margus paviršius duomenimis pasitikėti negalima.
10. Bandymų metu nustatyta, kad skylės pozicijos detalėje aptikimo paklaidos siekia $\pm 0,2572\text{mm}$, tarpo tarp skylių nustatymo paklaidos $\pm 0,2336\text{mm}$.

IŠVADOS

1. Išanalizavus vaizdo kamerų sandarą nustatyta, kad pagrindiniai atvaizdų iškraipymai susidaro dėl netobulos lęšio formos ir nelygiagrečios jo ir kameros matricos padėties. Šie iškraipymai kompensuojami specialiomis koeficientų matricomis.
2. Nustatyta, kad vieno vaizdo taško vertė milimetrais priklauso nuo matavimo plokštumos aukščio, pagal sukurtą sistemą šis ryšys aprašomas lygtimi $f(x)=ax+b$.
3. Nustatyta, kad naudojant robotizuotą matavimo sistemą tinkamiausias yra šoninis objektų apšvietimas, nes matuojamas paviršius apšviečiamas tolygiai, nesukuriamas vienas apšviestas plotas, apšvietimo intensyvumas nepriklauso nuo matavimo platformos aukščio.
4. Nustatyta, kad geriausias būdas rasti stačiakampės detalės matmenis, taikant Hough linijų radimo metodą matuoti kiekvieną plokštės kampą iš arti, nustatytas paklaidos dydis $\pm 0,3516\text{mm}$.
5. Nustatyta, kad geriausias metodas skylėms matuoti yra *RANSAC*. Geriausi matavimo rezultatai gauti skylėi esant vaizdo centre, matavimo paklaidos $\pm 0,1077\text{mm}$. Skylėi esant vaizdo krašte matavimo paklaidos padidėja iki $\pm 0,1984\text{mm}$, nes atlikus vaizdo kalibravimą pašalinti ne visi kameros sukelti iškraipymai.
6. Nustatyta, kad taikant sudarytą metodą skylės briaunų aptupėjimo brokui tirti, vienspalvėse detalėse skylių defektai randami su mažomis paklaidomis. Tačiau tiriant paviršius, kuriuose brokuoto ploto tekstūra neišsiskiria iš bendros detalės paviršiaus tekstūros, gautais matavimo duomenimis pasitikėti negalima.
7. Bandymų metu nustatyta, kad skylės pozicijos detalėje aptikimo paklaidos siekia $\pm 0,2572\text{mm}$, tarpo tarp skylių nustatymo paklaidos – $\pm 0,2336\text{mm}$. Didžiausią įtaką paklaidų dydžiui turi matuojamo objekto padėtis vaizde.
8. Nustatyta, kad atliekant robotizuotos matavimo sistemos tyrimus gautos paklaidos yra didesnės nei esamų pramoninių sistemų. Siekiant gauti tikslesnius matavimo rezultatus reiktų rinktis robotą palaikantį tiesioginio ryšio sąsają, tokiu atveju būtų galima kamerą pozicionuoti tiksliai virš matuojamo objekto. Be to reiktų rinktis kokybiškesnę kamerą, turinčią mažesnius vaizdo iškraipymus.

LITERATŪRA

1. **SALAH, H.** Probing system characteristics in coordinate metrology. Measurement science review. October 2010, vol 10, no. 4, p. 120-129. ISSN 1335-8871
2. **FEČOVA, V., KOČIŠKO, M.** The principle of measuring by coordinate measuring machines and new possibilities of work with these machines. Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI). Jan./Feb. 2013, p. 101-104. ISBN 978-1-4673-5928-3
3. **JARAMINAS, M., JONUTIS, V.** Vaizdų atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas. Magistro darbas. Kauno technologijos universitetas, 2008. [žiūrėta 2015 m. sausio 10 d.] Prieiga per internetą: http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2008~D_20080811_151809-23043/DS.005.0.02.ETD
4. **FENG, Q., GAO, Y., SHAO, S.** A new method for dynamically measuring diameters of train wheels using line structured light visual sensor. Photonics and Optoelectronics (SOPO). Shanghai: Symposium on. May 2012, p. 1-4. ISBN 978-1-4577-0909-8
5. **CHUGUI, Y., V.,** Optical measuring systems and laser technologies for scientific and industrial applications. Measurement science review. January 2007, vol 7, Secion3, no. 1, 1-10. ISSN 1335-8871
6. **BENTLEY, P.** Principles of measurement systems. Pearson education limited. England, Harlow: 2005, p. 521. ISBN 0-13-043028-5
7. Edge-QI Furniture [žiūrėta 2015m. sausio 15 d.] Prieiga per internetą: <http://www.optonova.se/EdgeQualityEdgeQI.htm>
8. Automatic optical surface inspection, control of edges, measurement and process monitoring [žiūrėta 2015m. sausio 15 d.] Prieiga per internetą: <http://pdf.directindustry.com/pdf/baumer-inspection/automatic-surface-edge-inspection-dimension-check-furniture-elements/14424-246861.html>
9. **NAKAO, Y.** Measurement of drilling burr by image processing technique. 2001 [žiūrėta 2015m. vasario 26d.] Prieiga per internetą: http://www.aspe.net/publications/Annual_2001/PDF/POSTERS/METRO/FORM/1142.PDF
10. **TANG, M.** Study and the system design of ring detecting based on the theory of vision measurement. Information science and engineering (ICISE). 2009 1st International Conference on. IEEE. December 2009, p. 1441-1443. ISBN 978-1-4244-4909-5
11. **CHUNG, S., YOON, H.** Inspection of Micro-Drilling Processes by using the On-Machine vision. 2003 [žiūrėta 2015m. vasario 26d.] Prieiga per internetą: http://aspe.pointinspace.com/publications/Annual_2003/PDF/5proc/2mach/1265.PDF

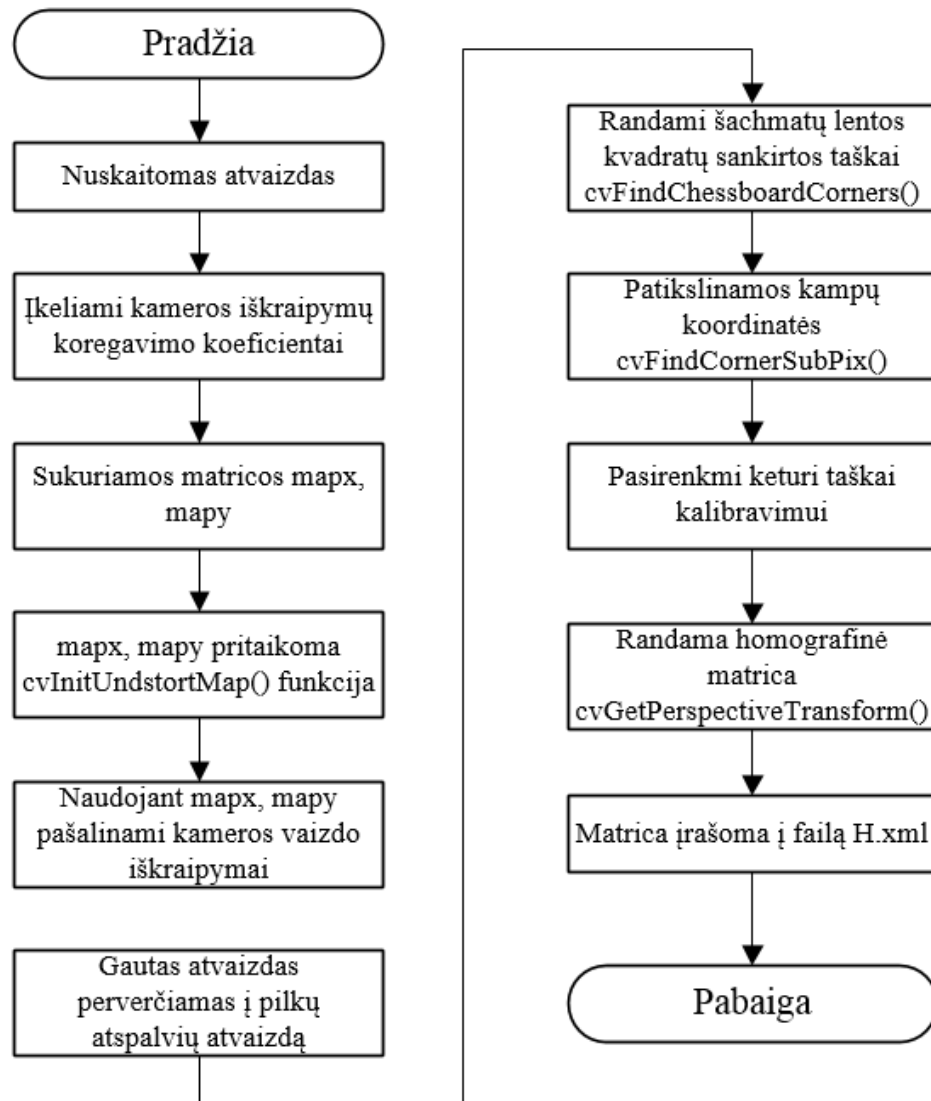
12. **ZHU, W.** Development of a monocular vision system for robotic drilling. Journal of Zhejiang University SCIENCE C. August 2014, vol 15, Issue 8, p. 593-606. ISSN 1869-1951
13. **DARYL, M.** Practical guide to machine vision lighting [žiūrėta 2015m. kovo 10d.] Prieiga per internetą: <http://www.rauscher.de/downloads/public/datenblaetter/Machine-Vision-Lighting-Practical-Guide.pdf>
14. Precise lighting for machine vision [žiūrėta 2015m. balandžio 26d.] Prieiga per internetą: <https://www.automation.siemens.com/simatic-sensors-static/ftp/6zb5330-0au02-0ba0.pdf>
15. **KASPARAITIS, P.** Skaitmeninis vaizdų apdorojimas. Segmentavimas. 2008 [žiūrėta 2015m. kovo 12d.] Prieiga per internetą: <http://www.mif.vu.lt/~pijus/SVA/segm.pdf>
16. **FELICIANO, F., LETA, R., SOUZA, L.** Discussing accuracy in an automatic measurement system using computer vision techniques. ABSM Symposium series in mechatronic. 2006, vol 2, p. 645-652. ISBN 978-85-85769-26-0
17. **ASHBURNER, J., FRISTON, K.** Image segmentation. The Wellcome Dept. of Imaging Neuroscience. London, 2008, [žiūrėta 2015m. balandžio 10d.] Prieiga per internetą: <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/doc/books/hbf2/pdfs/Ch5.pdf>
18. **DERVINIS, D.** Vaizdų apdorojimas. Mokomoji knyga. TEV, Kaunas, 2012. ISBN: 978-609-433-107-7
19. **AKINLAR, C., TOPAL, C.** EDcircles: real-time circle detection by edge drawing (ED). Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2012 IEEE International Conference on. March 2012, p. 1309-1312. ISBN 978-1-4673-0045-2
20. **HORNBERG, A.** Handbook of machine vision. Handbook. WILEY-VCH, 2006. ISBN-13: 978-3-527-40584-8
21. RANSAC – fitting a circle to a set of points. Pattern recognition systems – Lab 2 [žiūrėta 2015m. balandžio 26d.] Prieiga per internetą: http://users.utcluj.ro/~raluca/prs/prs_lab_02e.pdf
22. **ŠLAUSTAS, D.** Erdvinių objektų geometrijos nustatymas kompiuterine rega. Magistro darbas. Šiaulių universitetas, 2011. [žiūrėta 2015 m. sausio 25 d.] Prieiga per internetą: http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2011~D_20110804_095125-85153/DS.005.0.02.ETD
23. **BRADSKI, G., KAEHLER, A.** Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library . Handbook. O'Reilly media, 2012. ISBN: 978-0-596-51613-0
24. Product On-line manual IRB 1400 [žiūrėta 2014m. lapkričio 18d.] Prieiga per internetą: <http://rab.ict.pwr.wroc.pl/irb1400/prod14.pdf>

25. **ZHANG, Z.** A Flexible New Technique for Camera Calibration. Pattern analysis and machine intelligence. November 2000, vol 22, no. 11, p. 1330-1334. ISSN 0162-8828
26. SuDoKu Grabber with OpenCV: The Plot [žiūrėta 2015m. kovo 15d.] Prieiga per internetą: <http://www.aishack.in/tutorials/sudoku-grabber-with-opencv-plot/>
27. Line-line intersection [žiūrėta 2015m. kovo 20d.] Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Line-line_intersection
28. **BULLOCK, R.** Least-Squares Circle Fit. October, 2006 [žiūrėta 2015m. balandžio 10d.] Prieiga per internetą: http://www.dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf
29. Rotation Matrices: Derivation of 2D Rotation Matrix [žiūrėta 2015m. kovo gegužės 10d.] Prieiga per internetą: <https://engineering.purdue.edu/~bethel/rot2.pdf>

PRIEDAI

1. VAIZDO KALIBRAVIMO ALGORITMAS

Paveikslėlyje pateikiamas iš kameros gauto vaizdo kalibravimo algoritmas (1 pav.), kurio metu randama homografinė matrica, kuri sulygiagretina kameros matricos ir stebimo objekto plokštumas.



1 pav. Homografinės matricos radimo algoritmas

2. EKSPERIMENTAMS NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS

Lentelėje pateikiamą laminuotų medžio drožlių plokščių pavyzdžiai, kurie naudojami atliekant tyrimus (1 lentelė). Iš viso naudojamos keturios matinės ir keturios blizgios plokštės. Visų plokščių matmenys vienodi, t.y. 249 x 169 x 18 mm.

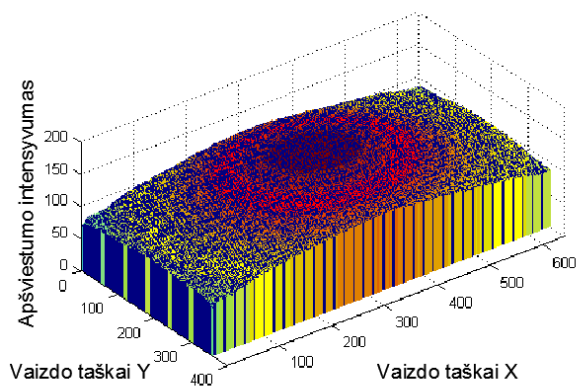
1 lentelė

Naudojamų plokščių pavyzdžiai

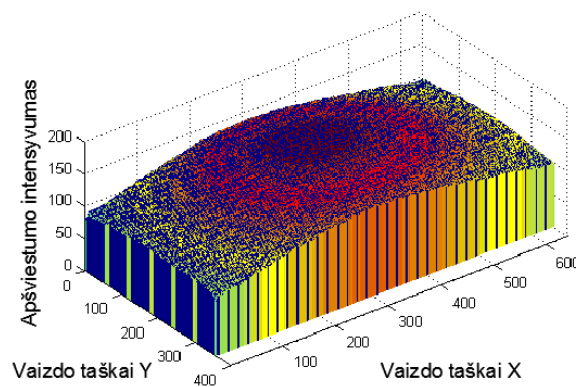
Bandinio Nr.	Pavyzdys	Spalva	Paviršius	Matmenys
1		Akacija	Blizgus	249x169x18
2		Alksnis	Blizgus	249x169x18
3		Tamsus alksnis	Blizgus	249x169x18
4		Raudonmedis	Blizgus	249x169x18
5		Pilka	Matinis	249x169x18
6		Geltonas marmuras	Matinis	249x169x18
7		Ažuolas	Matinis	249x169x18
8		Marmuras	Matinis	249x169x18

3. DETALUS APŠVIETIMO SISTEMŲ TYRIMAS

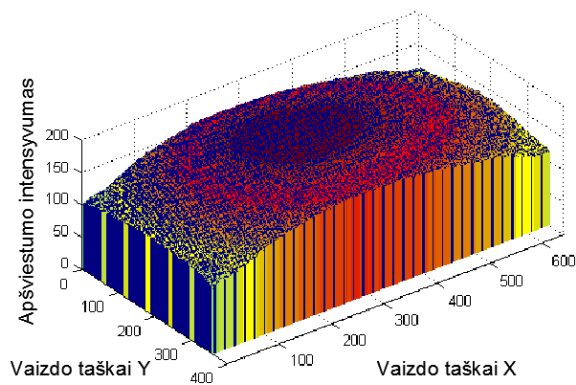
3.1 Tiesioginio apšvietimo sistemos tyrimas



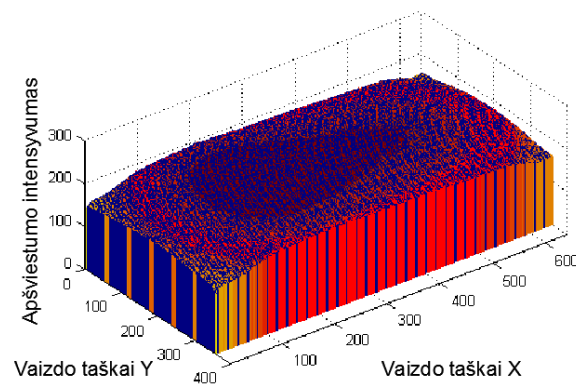
a)



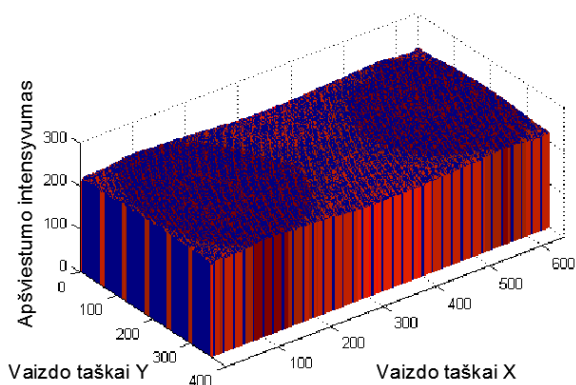
b)



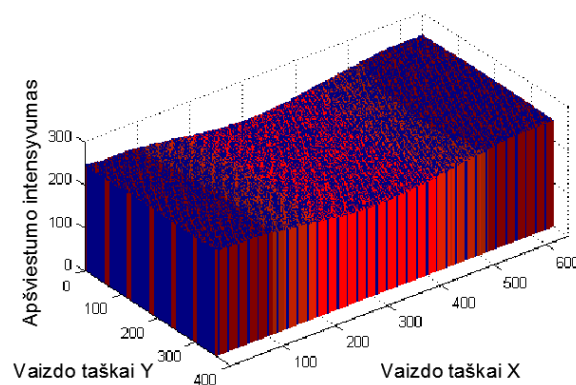
c)



d)



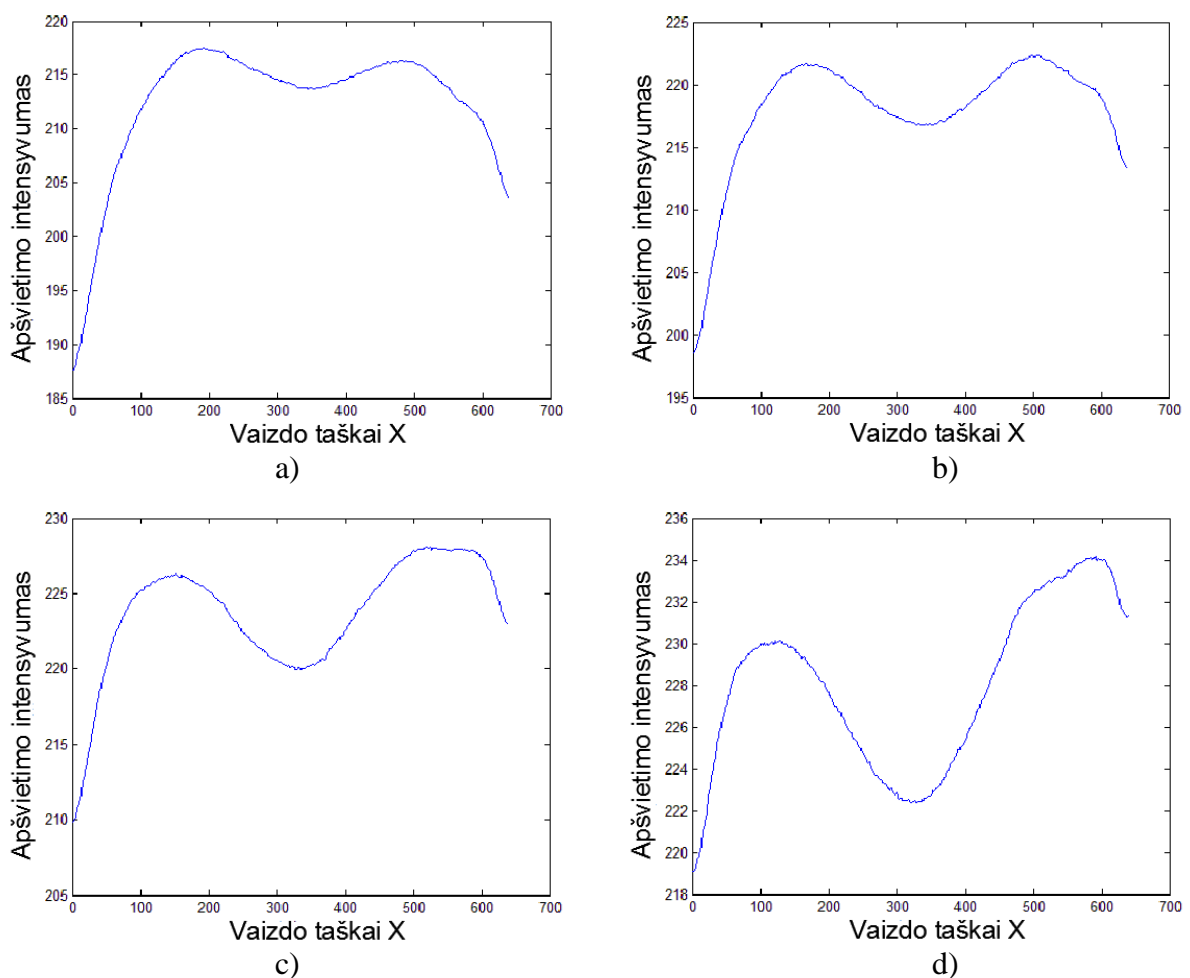
e)



f)

1 pav. Trimačiai apšviestumo tolygumo tyrimo grafikai tiesioginiam apšvietimui: a) atstumas 30cm; b) atstumas 25 cm; c) atstumas 20cm; d) atstumas 15cm; e) atstumas 10cm; f) atstumas 5cm

Šiam tyrimui atlikti nustatomas maksimalus apšvietimo elementų švietimo lygis, apšviečiamas baltas matinis paviršiaus plotas (popierius) ir su kamera daromi kadrai, matavimo sistemą perslenkant link matavimo plokštumos Z ašimi tolygiai nuo 30cm aukščio iki 5 cm aukščio, žingsnis 5cm. Bandyamas atliekamas tamsioje patalpoje be išorinių apšvietimo šaltinių. Kameros parametruose išjungiamos visos vaizdo korekcijos funkcijos, paliekant tik automatinis fokusavimas. Gauti vaizdai iš RGB perverčiami į pustonijų atspalvių skalę. Turint gautą naują dvimatį masyvą sudaroma 3D viso paveikslo taškų apšviestumo histograma iš kurios matoma kaip pasiskirstęs apšviestumas, t.y. kuriose vietose krenta šešėlis, o kuriose ne. Grafikuose atvaizduojama apšviestumo histograma kamerai esant 30, 25, 20, 15, 10 ir 5cm atstumu nuo balto paviršiaus plokštumos (1 pav.).



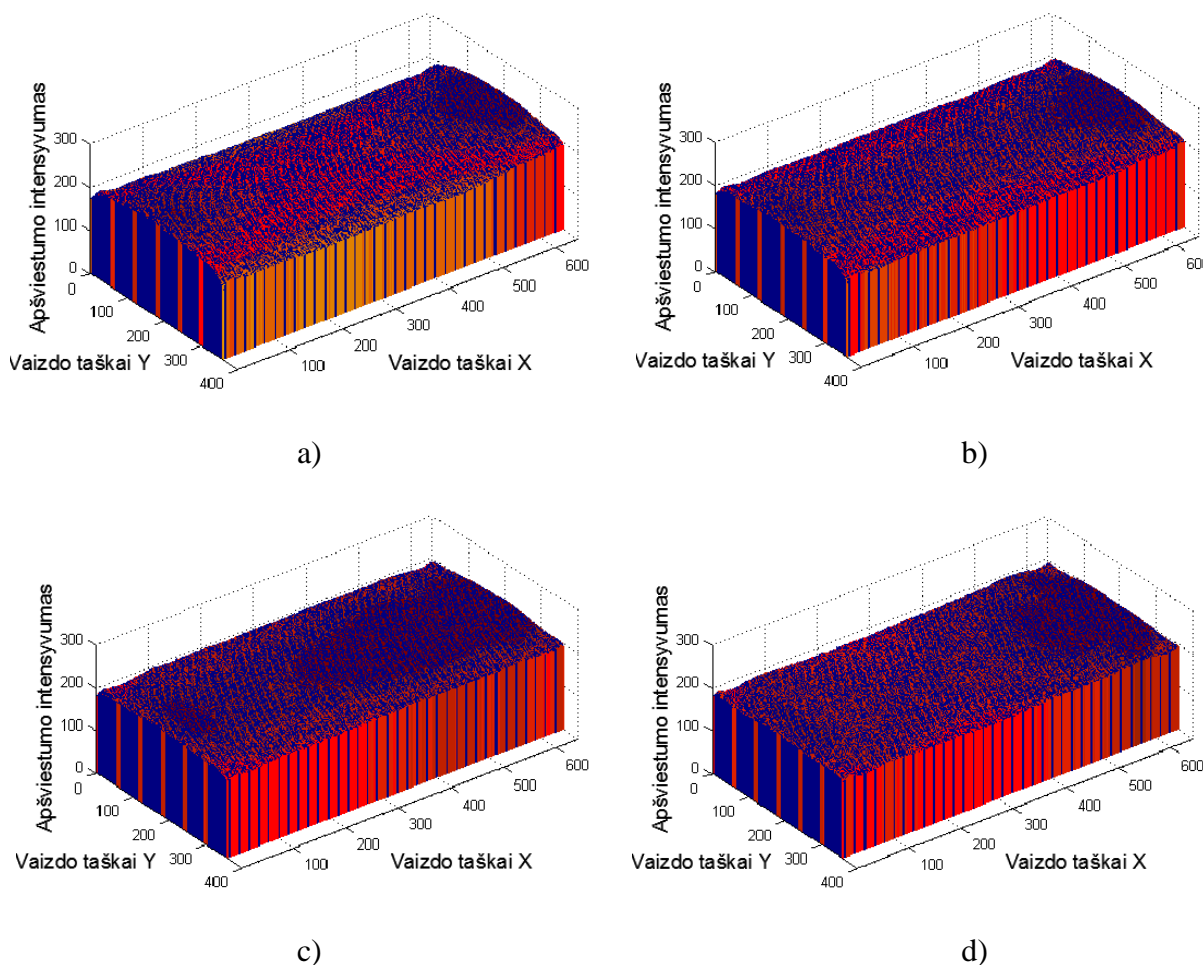
2 pav. Apšviestumo intensyvumo vidurkių grafikas X ašimi: a) atstumas 13cm; b) atstumas 12cm; c) atstumas 11cm; c) atstumas 10cm

Kaip matyti iš gautų duomenų, esant 30cm atstumui tarp matavimo platformos ir plokštumos, didžiausias intensyvumas yra vaizdo centre, mažėjant atstumui apšviestumas plečiasi į vaizdo šonus, esant 15cm atstumui apšviestumas yra beveik tolygus, kamera artinant dar arčiau atsiranda tamsi zona viduryje, kuri pastebima jau 10cm atstume. Taip nutinka dėl apšvietimo elementų suvertimo kampo, kuo jis didesnis tuo pašvietimas tolygesnis esant mažiems atstumams.

Matavimo platformai esat arti paviršiaus (~10 – 3cm) tamsi zona intensyvėja, nes šviestuvai nebedengia vienas kito šviesos srauto, apšvietimas didėja paveiklo šonuose. Siekiant tiksliau nustatyti pereinamąjį atstumą, kuomet viduryje atvaizdo atsiranda tamsi zona, pilkų atspalvių paveiklo X ašyje esančios taškų vertės vidurkinamos ir gaunamas labiau išraiškingas apšvietumo intensyvumo perteikimo grafikas, matavimas atliktas nuo 13cm iki 10 cm aukščio atstume, 1cm žingsniu. Rezultatai pateikti grafikuose (2 pav.).

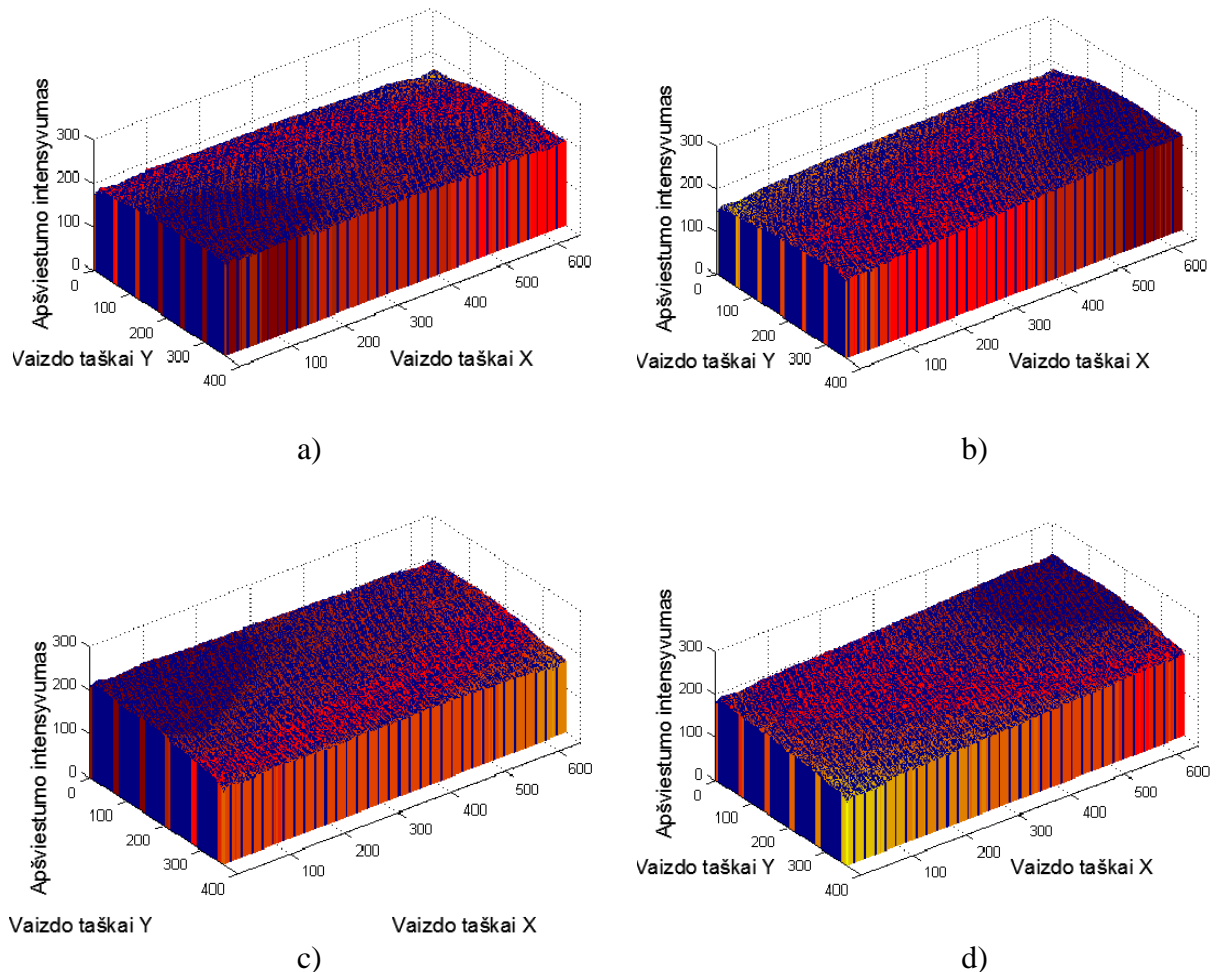
Išanalizavus grafikus nustatyta, kad esant 13cm atstumui apšvietumas (2 pav. a) yra beveik tolygus ir skiriasi tik per kelis taškus, kamerą artinant iki 12cm atstumo (2 pav. b) pradeda ryškėti nedidelis apšvietumo netolygumas, kuris tesiekia 5 punktus, turintis minimalią įtaka vaizdų atpažinimui centrinėje objekto dalyje. Tačiau kamerą artinant iki 11cm (2 pav. c), apšvietumo skirtumas ryškėja ir siekia jau 17 punktų ir toliau mažinant atstumą didėja. Galima daryti išvadą, kad atliekant matavimus mažesniame nei 12cm aukštyje prastėja kontūrų ir matmenų atpažinimo galimybės dėl netolygaus apšvietimo.

3.2 Šoninio apšvietimo sistemos tyrimas



3 pav. Trimačiai apšvietumo tolygumo tyrimo grafikai šoniniam apšvietimui: a) atstumas 40cm; b) atstumas 30 cm; c) atstumas 20cm; d) atstumas 10cm;

Šoninio apšvietimo tyrimo eiga tokia pati kaip ir tiesioginio apšvietimo. Tyrimas atliekamas tamsioje patalpoje. Kameros parametruose išjungiamos visos vaizdo korekcijos funkcijos, paliekama tik automatinis fokusavimas. Matavimams imami kadrai kamerą patalpinus apšvietimo sistemos centre, bandymai atliekami keturiuose aukščiuose, nuo matavimo plokštumos nutolus 40, 30, 20 ir 10cm atstumu. Gauti vaizdai pervedami į pustonį vaizdą ir sudaromos 3D apšvietumo histogramos (3 pav.).

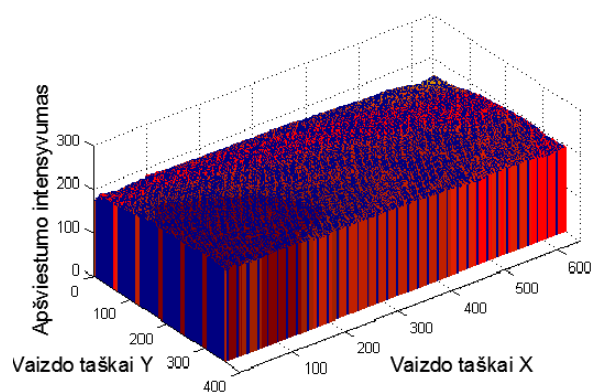


4 pav. Trimačiai apšvietumo tolygumo grafikai priartintose pozicijose: a) 1 pozicija; b) 3 pozicija; c) 7 pozicija; d) 9 pozicija;

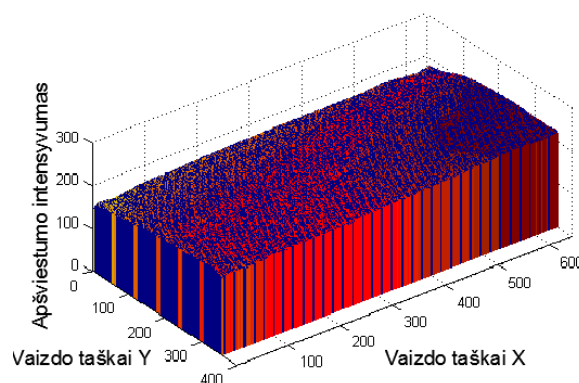
Atlikus gautų duomenų grafikų analizę matyti, kad apšvietimas pasiskirstęs beveik tolygiai visame matavimo plokštumos plote. Matuojant 40cm aukštyje galima išvelgti ryškesnius apšviestus plotus grafiko kraštuose, link apšvietimo elementų. Tačiau nuo 30cm aukščio šis reiškinys dingsta. Todėl galima daryti išvadą, kad matavimo plokštumos plotas arčiau apšvietimo elementų apšviečiamas stipriau, nes mažiau spindulių išsklaidoma. Kad įsitikinti šiuo teiginiu atliekami papildomi matavimai 10cm aukštyje, kamerei esant 1, 3, 7, 9 matavimo pozicijose. Y

ašies atžvilgiu kameros poslinkis 11cm, X ašies atžvilgiu 8cm. Gauti grafikai pateikti paveikslėliuose (4 pav.).

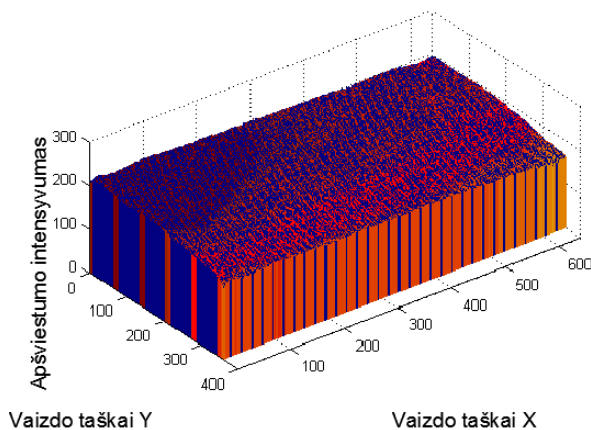
Kaip matyti iš gautų rezultatų (4 pav.), apšviesti plotai ryškesni link apšvietimo elementų pusės, jų centro link. Tai rodo, kad apšvietimas nėra visiškai idealus, tačiau jo netolygumas nėra aiškiai išreikštas, kinta tolygiai. Todėl galima teigti, kad šoninis apšvietimas yra pranašesnis už tiesioginį, nes nesukuria vieno apšviesto ploto centro, be to artinant link matavimo plokštumos vaizdo kamerą, nesudaro patamsėjęs plotas centre, kuris trukdo kokybiškai atlikti matavimus.



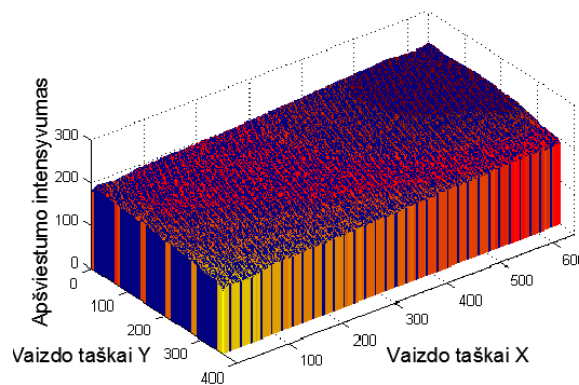
a)



b)



c)



d)

4 pav. Trimačiai apšviestumo tolygumo grafikai priartintose pozicijose: a) 1 pozicija; b) 3 pozicija; c) 7 pozicija; d) 9 pozicija;

4. PASIKARTOJANČIOS POZICIJOS TYRIMO REZULTATAI

Lentelėje pateikiamos gautos taško koordinatės atliekant pasikartojančios matavimo pozicijos tyrimą (1 lentelė).

1 lentelė

Pasikartojančios matavimo pozicijos tyrimas

Judant teigiama kryptimi Y ašimi link matavimo pozicijos		
Nr.	Taško koordinatė (x,y) 190mm aukštyje	Taško koordinatė (x,y) 260mm aukštyje
1	960,090; 446,455	971,922; 476,282
2	959,990; 446,387	971,995; 476,152
3	960,114; 446,564	972,032; 476,441
4	960,057; 446,513	971,952; 476,225
5	960,102; 446,502	972,011; 476,366
Judant neigiama kryptimi Y ašimi link matavimo pozicijos		
Nr.	Taško koordinatė (x,y) 190mm aukštyje	Taško koordinatė (x,y) 260mm aukštyje
1	960,142; 446,109	972,182; 476,130
2	960,142; 446,241	972,269; 476,119
3	960,166; 446,114	972,100; 476,013
4	960,152; 446,240	972,112; 476,092
5	960,072; 446,153	972,010; 476,123
Judant teigiama kryptimi X ašimi link matavimo pozicijos		
Nr.	Taško koordinatė (x,y) 190mm aukštyje	Taško koordinatė (x,y) 260mm aukštyje
1	960,033; 446,159	972,010; 476,148
2	960,086; 446,190	971,857; 476,080
3	960,091; 445,956	971,937; 476,005
4	960,075; 445,996	971,996; 476,132
5	960,054; 446,125	971,875; 476,133
Judant neigiama kryptimi X ašimi link matavimo pozicijos		
Nr.	Taško koordinatė (x,y) 190mm aukštyje	Taško koordinatė (x,y) 260mm aukštyje
1	959,866; 446,075	971,884; 476,252
2	960,052; 446,214	971,899; 476,355
3	960,083; 446,260	971,862; 476,012
4	960,010; 446,115	971,874; 476,152
5	959, 952; 446,252	971,955; 476,295

5. SISTEMOS TIKSLUMO TYRIMO REZULTATAI

Lentelėje atvaizduoti matavimo sistemos tikslumo tyrimo rezultatai (1 lentelė), pateikiamos vertės vaizdo taškais, pateikiama perdavimo funkcija, pateikiamas atstumas milimetrais ir matavimo paklaidos.

1 lentelė

Matavimo sistemos tikslumo tyrimas

Nr.	Aukštis, cm	Atstumas taškais	Gauta perdavimo funkcija	Atstumas milimetrais, mm	Paklaida, mm
1	22	1367,0341	$y=0,006430*x+0,004829$	199,9821	-0,0179
	26	1162,9477		200,0375	0,0375
	30	1011,8521		200,0725	0,0725
	34	894,9140		199,9676	-0,0324
2	22	1367,7614	$y=0,006431*x+0,004743$	200,0009	0,0009
	26	1163,5095		200,0643	0,0643
	30	1011,9227		200,0298	0,0298
	34	895,5025		200,0526	0,0526
3	22	1367,9942	$y=0,006424*x+0,004953$	200,1116	0,1116
	26	1163,1110		200,0283	0,0283
	30	1011,9616		200,0375	0,0375
	34	895,3950		200,0035	0,0035
4	22	1368,1563	$y=0,006439*x+0,004562$	200,0518	0,0518
	26	1163,0722		200,0205	0,0205
	30	1011,3447		199,9752	-0,0248
	34	895,1078		200,0459	0,0459
5	22	1368,4362	$y=0,006430*x+0,004746$	200,0736	0,0736
	26	1163,1677		199,9788	-0,0212
	30	1011,8926		199,9965	-0,0035
	34	895,5000		200,0243	0,0243

6. EKSPERIMENTŲ IR TYRIMŲ REZULTATŲ LENTELĖS

Letalėse pateikiami matavimo rezultatai atlikus detalėms matmenų aptikimo metodų tyrimą. *Hough* metodo tyrimas (1 lentelė) ir segmentavimo metodas (2 lentelė) atliekami 40 cm aukštyje. Patobulintas *Hough* metodo tyrimas (3 lentelė) 10 cm aukštyje virš matuojamo paviršiaus.

1 lentelė

Detalės matmenų gavimo duomenys taikant *Hough* metodą 40cm aukštyje

Plokštės numeris	Kraštinė	Detalės pozicija vaizde		
		1	2	2
1	1-2	246,4872	245,7653	246,8548
	3-4	245,7426	245,8897	245,9562
	1-3	166,9113	166,9003	166,8445
	2-4	166,8652	166,7144	167,0021
2	1-2	245,9092	246,3455	245,9589
	3-4	245,4392	246,7744	245,7545
	1-3	166,6262	167,3052	167,4958
	2-4	167,1862	167,1325	167,7002
3	1-2	246,2852	246,5521	246,4585
	3-4	246,4122	246,8121	246,6329
	1-3	166,5616	166,4252	166,4714
	2-4	166,6623	166,9421	167,2544
4	1-2	246,5817	246,9059	245,7251
	3-4	246,4952	246,4744	245,9965
	1-3	167,4148	167,6545	167,4000
	2-4	167,3695	167,8542	167,5234
5	1-2	246,1342	246,0125	245,9355
	3-4	246,9254	246,2212	246,4412
	1-3	166,8152	166,8142	166,6899
	2-4	166,9966	166,9521	166,7945
6	1-2	246,4151	246,6188	246,7587
	3-4	245,9332	246,7741	246,6454
	1-3	167,2124	167,1555	167,3517
	2-4	167,4498	166,9652	167,5653
7	1-2	246,6092	246,8451	246,7447
	3-4	246,8854	247,1251	246,6584
	1-3	167,5115	167,9585	168,1599
	2-4	167,7122	167,6022	168,3185
8	1-2	247,1620	247,0986	247,1002
	3-4	247,4322	247,4595	247,4032
	1-3	167,5462	167,8985	167,5990
	2-4	167,5469	167,7414	167,2652

Detalės matmenų gavimo duomenys taikant segmentavimo metodą 40cm aukštyje

Plokštės numeris	Kraštinė	Detalės pozicija vaizde		
		1	2	2
1	1-2	247,2504	246,9558	247,0660
	3-4	247,1523	247,1962	247,2956
	1-3	167,1144	167,0215	166,9657
	2-4	167,2343	167,0367	166,9945
2	1-2	245,4985	245,8585	245,6915
	3-4	246,5965	246,8665	246,7544
	1-3	165,8854	165,6544	165,7586
	2-4	166,6056	166,5121	166,8953
3	1-2	246,9824	247,1597	247,0769
	3-4	247,0695	247,2413	247,1125
	1-3	166,8742	166,9456	167,0998
	2-4	166,6893	166,8952	167,1232
4	1-2	246,2481	246,0478	246,1552
	3-4	246,4862	246,0986	246,0985
	1-3	166,6857	166,7425	166,5637
	2-4	166,7457	166,5999	166,6914
5	1-2	246,3595	246,1546	246,2961
	3-4	246,5220	245,9952	246,2683
	1-3	166,5512	166,3944	166,7343
	2-4	166,4456	166,4852	166,4948
6	1-2	246,2849	246,4985	246,3879
	3-4	246,2854	246,3852	246,2336
	1-3	166,9995	166,8656	167,0524
	2-4	167,0267	166,9853	167,0121
7	1-2	246,9425	246,8545	246,9133
	3-4	247,0975	246,8322	246,9632
	1-3	167,0541	167,2546	166,9666
	2-4	166,9852	167,1452	166,9765
8	1-2	246,1481	246,3989	246,0624
	3-4	246,2852	246,4955	246,1122
	1-3	166,7952	166,6549	166,5325
	2-4	166,6352	166,7852	166,7425

Detalės matmenų gavimo duomenys taikant *Hough* metodą 10cm aukštyje

Plokštės numeris	Kraštinė	Detalės pozicija vaizde		
		1	2	2
1	1-2	248,7223	249,0002	248,9652
	3-4	248,7632	249,1625	249,0500
	1-3	168,8614	169,0622	168,9424
	2-4	168,8135	169,1263	168,9265
2	1-2	248,8651	248,9656	249,1063
	3-4	248,7966	248,9002	249,0563
	1-3	168,6484	168,9122	168,9562
	2-4	168,7562	168,8978	169,0536
3	1-2	248,7811	249,0112	248,7233
	3-4	248,6501	248,9652	248,8362
	1-3	168,6831	168,9980	168,7214
	2-4	168,7365	168,8932	168,7455
4	1-2	248,8975	249,1351	248,9002
	3-4	248,8524	249,0570	248,8697
	1-3	168,9614	169,0985	168,9356
	2-4	168,8963	169,1895	168,8756
5	1-2	248,8454	248,8855	249,1125
	3-4	248,8154	248,9999	249,0125
	1-3	168,9648	168,9648	168,7963
	2-4	168,8562	169,0663	168,8653
6	1-2	248,7985	248,7677	248,8667
	3-4	248,7633	248,9112	248,9323
	1-3	168,8416	168,8112	168,8997
	2-4	168,7953	168,8679	168,9652
7	1-2	249,1317	248,9800	248,9365
	3-4	249,0752	249,0136	248,8963
	1-3	169,0712	169,0652	169,0326
	2-4	169,1155	169,1562	169,0141
8	1-2	248,9948	249,0256	248,9635
	3-4	249,1053	248,8652	248,9963
	1-3	169,0955	169,0500	168,9852
	2-4	169,0023	168,9652	168,9762

7. SKYLIŲ APTIKIMO PATIKIMUMO TYRIMO REZULTATAI

Šiame priede pateikiami patikimumo tyrimo matavimo duomenys, skirtinguose aukščiuose matuojant 5mm skersmens skylę duomenys pateikti vienoje lentelėje (1 lentelė), 10mm skersmens kitoje (2 lentelė).

1 lentelė

5mm skersmens skylės matavimo duomenys

Bandinio Nr.	Skylių skersmenys skirtinguose matavimo aukščiuose, mm				
	40cm	30cm	20cm	10cm	7cm
1	3,6687	3,8127	4,0901	5,0756	5,0320
2	–	4,6432	4,4067	4,8751	5,1029
3	3,6381	3,1710	4,4800	5,1007	4,9936
4	–	4,2280	4,2891	4,9721	5,0608
5	3,1608	4,7358	4,2247	4,9749	5,0844
6	–	–	–	4,8003	4,9184
7	4,1069	3,9637	3,9957	5,1631	5,0956
8	–	5,3969	4,2221	4,8856	4,9715

2 lentelė

10mm skersmens skylės matavimo duomenys

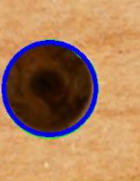

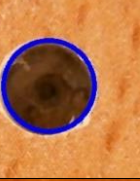

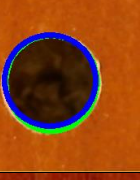
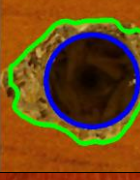
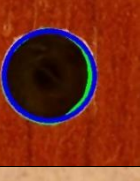
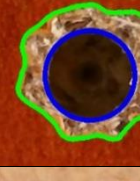
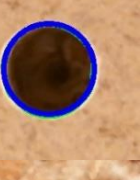
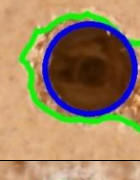
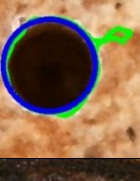

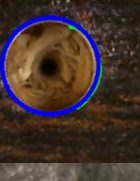
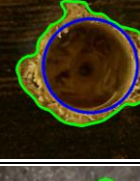
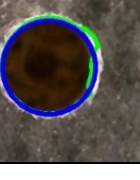
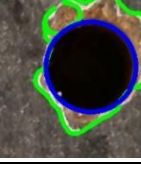
Bandinio Nr.	Skylių skersmenys skirtinguose matavimo aukščiuose, mm				
	40cm	30cm	20cm	10cm	7cm
1	9,4937	9,1977	9,6298	9,8661	10,0331
2	9,1880	9,4356	10,0645	10,0521	9,9536
3	8,9553	9,4336	9,8196	9,8932	10,0820
4	8,2698	9,1883	10,0972	9,9809	9,9146
5	8,9936	9,4126	9,7753	10,0340	10,1077
6	8,7168	9,5086	9,7128	10,1073	10,0183
7	7,7552	9,5960	10,1664	9,8099	10,0972
8	8,8098	9,1897	10,3224	10,0940	9,9042

8. BROKUOTŲ SKYLIŲ APTIKIMO TYRIMO REZULTATAI

Lentelėje pateikiamas apskaičiuotas defekto dydis procentais (1 lentelė). Matomuose mėlyna spalva pažymėtas rastos skylės kontūras, žalia spalva rasto broko kontūras.

1 lentelė

Brokuotų skylių aptikimo tyrimo rezultatai

Bandymo Nr.	Nebrokuota skylė		Brokuota skylė	
	Rastas brokas	Broko dydis, %	Rastas brokas	Broko dydis, %
1		2,21%		5,41%
2		2,1%		89,67%
3		2,6%		105,98%
4		2,22%		137,43%
5		0,24%		73,89
6		5,25%		63,24%
7		0,97%		60,14%
8		1,51%		61,62%

9. SKYLIŲ POZICIJOS DETALĖJE APTIKIMO TYRIMO REZULTATAI

Pirmoje lentelėje pateikiami duomenys gauti matuojant skylių pozicijos nuokrypį nuo numatytos pozicijos (1 lentelė), antroje lentelėje pateikiamos paklaidos gautos matuojant tarpus tarp gretimų išgręžtų skylių (2 lentelė).

1 lentelė

Skylių pozicijos detalėje tyrimo rezultatai

Skylės Nr.	1 bandymas			2 bandymas		
	Nustatyta X koordinatė	Nustatyta Y koordinatė	Pozicijos poslinkis, mm	Nustatyta X koordinatė	Nustatyta Y koordinatė	Pozicijos poslinkis, mm
1	20,1040	29,9155	0,1340	20,2569	29,9890	0,2572
2	49,9649	29,8205	0,1829	50,0987	30,0646	0,1179
3	79,8397	30,1666	0,2312	79,9888	30,2484	0,2486
4	109,9060	30,1401	0,1687	109,8817	30,2075	0,2389
5	140,1371	30,0511	0,1463	140,0881	29,9136	0,1234
6	170,0169	30,2409	0,2415	170,1067	30,0929	0,1414
7	200,1613	30,1893	0,2488	199,8830	30,2224	0,2513
8	230,0162	30,1554	0,1562	230,1166	30,1608	0,1986

2 lentelė

Atstumo tarp rastų skylių paklaidos

Tarpas \ Bandymas	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
1 bandymas	-0,1581	-0,1093	-0,1071	0,2079	0,0191	-0,2233	0,2336
2 bandymas	-0,1389	-0,1233	0,0664	0,2312	-0,1196	0,1445	-0,1451