



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Paulius Aleliūnas
Projekto autorius

lekt. dr. Olga Strikuliėnė
Vadovė

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas.

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (6211EX014)

Paulius Aleliūnas

Projekto autorius

lekt. dr. Olga Strikulinė

Vadovė

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2020



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Paulius Aleliūnas

Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas

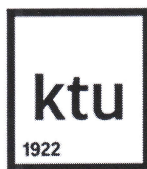
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Pauliaus Aleliūno, baigiamasis projektas tema „Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Pauliui Aleliūnui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	Design and Research of Plastic Bottle Caps Defect Inspecting Machine Vision System

Patvirtinta 2020 m. balandžio 6 d. dekano potvarkiu Nr. V25-13-7-1

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2020 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

–

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Išanalizuoti pramonėje taikomus vaizdo atpažinimo būdus, pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodus ir skirtingų rūšių apšvietimo įtaką vaizdui atpažinti.
2. Parinkti tinkamą įrangą vaizdo analizei atlikti.
3. Suprojektuoti apšvietimo sistemą.
4. Sukurti kamštelių broko analizės programą.
5. Ištirti analizės rezultatų pakartojamumą ir jos trukmei įtaką darančius veiksnius.
6. Statistiškai ištirti kamštelių broko aptikimo efektyvumą.

Vadovė lekt. dr. Olga Strikuliene
(vadovo pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau Paulius Aleliūnas
(studento vardas, pavardė)

2020 m. balandžio 28 d.

Aleliūnas Paulius. Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Olga Strikulienė; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektronikos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vaizdas, atpažinimas, sistema, analizė, plastikinis, kamštelis, brokas, kamera, apšvietimas.

Panevėžys, 2020. 70 p.

Santrauka

Šiame darbe yra aprašomas plastikinių kamštelių broko atpažinimo vaizdo sistemos projektavimas ir tyrimas. Šios vaizdo atpažinimo sistemos paskirtis yra aptikti ir išanalizuoti plastikinių kamštelių broką, atsisakant žmogiškųjų išteklių panaudojimo, t. y. siekiama automatizuoti kamštelių kokybės tikrinimo procesą. Taigi, projekto tyrimų objektas – plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistema. Projekte analizuoti septynių skirtingų spalvų plastikiniai kamšteliai, kuriuose brokas gali pasitaikyti briaunoje arba tarpinėje. Projekto tikslas – suprojektuoti ir ištirti plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemą.

Projekto uždaviniai: išanalizuoti pramonėje taikomus vaizdo atpažinimo būdus, pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodus ir skirtingų rūšių apšvietimo įtaką vaizdui atpažinti; parinkti tinkamą įrangą vaizdo analizei atlikti; suprojektuoti apšvietimo sistemą; sukurti kamštelių broko analizės programą; ištirti analizės rezultatų pakartojamumą ir jos trukmei įtaką darančius veiksnius; statistiškai ištirti kamštelių broko aptikimo efektyvumą. Tyrimų metodai: mokslinės literatūros analizė, eksperimentiniai tyrimai.

Mokslinės literatūros analizėje pirmiausiai apžvelgti mašininės regos ir žmogaus regos panašumai ir skirtumai, pranašumai ir trūkumai. Taip pat siekiant parinkti teisingus vaizdo sistemos komponentus apžvelgtos pramoninės vaizdo kameros, jų kalibravimo metodai, apšvietimo sistemos ir vaizdo apdorojimo bei analizavimo įrankiai.

Projektavimo dalyje aprašoma visa vaizdo analizavimo sistemos struktūra, susidedanti iš parinktų komponentų (pločio skenavimo (2D) kameros su „VGA“ raiška, 6 mm židinio nuotolio objektyvu, analizę atliekančiu mini-kompiuteriu „Intel NUC“ ir kt.). Plačiai aprašomas apšvietimo sistemos projektavimas (šviesos kritimo kampo modeliavimas, šviestuvų išdėstymo ir apšvietimo lygio simuliacijų kūrimas „DIALux“ programine įranga). Galiausiai pateikiamas vaizdo analizavimo programos algoritmas (kuriamas „Matrox Design Assistant“ programine įranga) ir kiekviena ji sudaranti dalis bei programos kūrimo metu iškilusios problemos (pvz. klaidingas spalvų aptikimas).

Tyrimo dalyje aprašomas analizuojamų duomenų pakartojamumo (97,38 %) skaičiavimas, kiekvieno algoritmo žingsnio ir bendras vykdymo laikas (35,86–49,69 ms) visoms septynioms kamštelio spalvoms. Galiausiai nuodugniai aprašomi dvidešimt skirtingų plastikinių kamštelių broko analizavimo atvejų, iš kurių keturiuose atvejuose brokas sunkiai aptinkamas, o viename neaptinkamas visai. Šiam atvejui ištaisyti atliktos programos modifikacijos, kurios pailgino (+21,15 ms) prieš tai matuotą algoritmo vykdymo laiką.

Aleliūnas Paulius. Design and Research of Plastic Bottle Caps Defect Inspecting Machine Vision System. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Olga Strikuliene; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Electronics Engineering, Technology Sciences.

Keywords: image, recognition, vision, system, analysis, plastic, cap, defect, inspection, camera, lighting.

Panevėžys, 2020. 70 pages.

Summary

This paper describes the design and research of a plastic bottle caps defect inspecting machine vision system. The purpose of this vision system is to detect and analyze defects in plastic bottle caps, eliminating the use of human resources, that is, to automate the process of quality assurance. Thus, the object of the project research is a plastic bottle caps defect inspecting machine vision system. In this project, plastic bottle caps of seven different colors were analyzed, in which a defect may occur at the edge or gasket. The aim of the project is to design and research of a plastic bottle caps defect inspecting machine vision system.

Project objectives: to analyze the methods of image recognition used in industry, the methods of calibration of industrial video cameras and the influence of different types of lighting for image recognition; select the appropriate equipment for image analysis; design a lighting system; create a plastic bottle caps defect analysis program; to study the repeatability of the analysis results and the factors influencing analysis time duration; to statistically investigate the effectiveness of plastic caps defect detection. Research methods: analysis of scientific literature, experimental research.

In the analysis of the scientific literature, the similarities and differences, advantages and disadvantages of machine vision and human vision were reviewed first. Industrial cameras, their calibration methods, lighting systems, and image processing and analysis tools were also reviewed to select the correct vision system components.

The design part describes the entire structure of the vision system, consisting of selected components (area scan (2D) camera with VGA resolution, 6 mm focal length lens, Intel NUC mini-computer for analysis, etc.). Lighting system design (modeling of light incidence angle, creation of luminaire layout and lighting level simulations with DIALux software) is described in detail. Finally, the algorithm of the image analysis program (developed using the Matrox Design Assistant software) and the problems encountered during the development of the program (e.g. incorrect color detection) are presented.

The research part describes the calculation of the repeatability of the analyzed data (97.38%), the time of each step of the program algorithm and the total execution time (35.86–49.69 ms) for all seven plastic cap colors. Finally, twenty different cases of defect inspection of plastic bottle caps are described in detail, in four cases the defect is difficult to detect and in one case it is not detectable at all. To correct this case, program modifications were made, which extended (+21.15 ms) the previously measured execution time of the algorithm.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Vaizdo atpažinimas	12
1.1.1. Mašininės regos ir žmogaus regos palyginimas	12
1.2. Pramoninės vaizdo kameros	14
1.2.1. Linijinio skenavimo, 1D vaizdo kameros.....	15
1.2.2. Ploto skenavimo, 2D vaizdo kameros	16
1.2.3. Erdvės skenavimo, 3D vaizdo kameros.....	18
1.3. Pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodai.....	19
1.3.1. Kalibravimas „Matrox Design Assistant 5“ programine įranga.....	19
1.3.2. Lęšio išgaubtumo įvertinimas kalibravimo procese.....	22
1.4. Apšvietimo sistemos.....	22
1.4.1. Apšvietimo metodai.....	22
1.5. Vaizdo apdorojimo ir analizavimo įrankiai.....	25
1.5.1. Vaizdo apdorojimo įrankiai.....	25
1.5.2. Vaizdo analizavimo įrankiai.....	26
2. Vaizdo analizavimo sistemos projektavimas.....	29
2.1. Vaizdo analizavimo sistemos struktūra	29
2.2. Apšvietimo sistemos projektavimas	32
2.3. Vaizdo analizavimo programos algoritmas	35
2.4. Programos kūrimo metu iškilusios problemos ir jų šalinimas.....	46
2.4.1. Spalvos aptikimo įrankio problemos	46
2.4.2. Kamštelio tarpinės broko paieškos vaizdo korekcijų problemos	47
3. Vaizdo analizavimo sistemos tyrimas	50
3.1. Analizuojamų duomenų pakartojamumo tyrimas	50
3.2. Programos algoritmo etapų vykdymo laiko tyrimas	51
3.3. Plastikinių kamštelių broko analizavimo tyrimas.....	53
Išvados	67
Literatūros sąrašas	69
Priedai.....	71
1 priedas. Programos algoritmas	71
2 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių briaunos geometrinis plotas.....	73
3 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių briaunos plotis	74
4 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių tarpinės šviesumas	75

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Žmogaus regos ir mašininės regos savybių palyginimas	13
2 lentelė. „Basler AG“ linijinio skenavimo kamerų nuskaitymo sparta	15
3 lentelė. „Basler AG“ ploto skenavimo kamerų nuskaitymo sparta.....	17
4 lentelė. „Basler acA640-750uc“ ploto skenavimo kameros specifikacija	30
5 lentelė. Spalvos atpažinimo įrankio spalvų mėginių RGB reikšmės	39
6 lentelė. Šviesumo tikrinimo įrankio slenkstinės pikselių reikšmės.....	43
7 lentelė. Pakartotinai analizuojamų kamštelių duomenų vidurkinės reikšmės.....	50
8 lentelė. Pakartotinai analizuojamų kamštelių duomenų standartinio nuokrypio reikšmės	51
9 lentelė. Programos algoritmo etapų vykdymo laikas	52

Paveikslų sąrašas

1 pav. Optinės iliuzijos ir kiti netrivialūs atvaizdai.	14
2 pav. Vaizdo atpažinimo sistema su linijinio skenavimo kamera	16
3 pav. Vaizdo atpažinimo sistema su ploto skenavimo kamera.....	17
4 pav. Lazerinės trianguliacijos principu pagrįsta 3D vaizdo atpažinimo sistema	18
5 pav. Struktūrizuotos šviesos projekcijos principu pagrįsta 3D vaizdo atpažinimo sistema.....	19
6 pav. Kalibravimo tinklelių tipai.	20
7 pav. Kalibravimo duomenų apdorojimo režimai.	21
8 pav. Reikalavimai taškų masyvo tinklelio šablonui.....	21
9 pav. Skirtingo κ koeficiento pavyzdžiai.....	22
10 pav. Galinis apšvietimas	23
11 pav. Difuzinis (pilno šviesos lauko) apšvietimas.....	23
12 pav. Tamsaus lauko apšvietimas	24
13 pav. Dalinai šviesos lauko arba kryptinis apšvietimas.....	24
14 pav. Morfologinės erozijos, išplėtimo, atidarymo ir uždarymo operacijos	25
15 pav. Morfologinė ploninimo operacija.....	26
16 pav. Morfologinė lašo operacija.....	26
17 pav. Uždarų briaunų patikrinimo įrankis	28
18 pav. Plastikinis kamštelis (a) ir konvejerio juosta (b).....	29
19 pav. Plastikinio kamštelio matoma forma su skirtingais objektyvais.	31
20 pav. Sistemos struktūrinė schema	32
21 pav. Apšvietimo sistemos spindulių kritimo kampas.....	33
22 pav. Pirmasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b)	33
23 pav. Antrasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b).....	34
24 pav. Trečiasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b)....	35
25 pav. Programos algoritmo 1 dalis.....	36
26 pav. Kameros vaizdas prie skirtingų ekspozicijos laiko reikšmių.	36
27 pav. Programos algoritmo 2 dalis.....	38
28 pav. Kamštelio spalvos aptikimo įrankiu gautų nuotraukų pavydžiai	38
29 pav. Programos algoritmo 3 dalis.....	40
30 pav. Programos algoritmo 3 dalies žingsnių gauti rezultatai.	41
31 pav. Uždarų briaunų patikrinimo įrankio apmokymo modelio kūrimas.....	42
32 pav. Programos algoritmo 4 dalis.....	42
33 pav. Programos algoritmo 5 dalis.....	44
34 pav. Kraštinių aptikimo operacijos veikimo pavyzdys	44
35 pav. Programos algoritmo 6 dalis.....	46
36 pav. Klaidingas spalvų aptikimas.....	46
37 pav. Spalvos aptikimo įrankio problema.....	47
38 pav. Vaizdo korekcijų problema smulkiam objektui	47
39 pav. Vaizdo korekcijų problemos sprendimas smulkiam objektui	48
40 pav. Vaizdo korekcijų problema nekontrastingam brokui	48
41 pav. Vaizdo korekcijų problemos nekontrastingam brokui sprendimas	49
42 pav. Programos algoritmo etapų vykdymo laiko stulpelinė diagrama.....	52
43 pav. 1-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	54
44 pav. 2-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	54

45 pav.	3-iasis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	55
46 pav.	4-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	55
47 pav.	5-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	56
48 pav.	6-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	57
49 pav.	7-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	57
50 pav.	8-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	58
51 pav.	9-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	59
52 pav.	10-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	59
53 pav.	11-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	60
54 pav.	12-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	60
55 pav.	13-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	61
56 pav.	14-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	62
57 pav.	15-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	62
58 pav.	16-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	63
59 pav.	17-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	63
60 pav.	18-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	64
61 pav.	19-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	64
62 pav.	20-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys	65
63 pav.	Papildomos vaizdo korekcijos probleminio broko tarpinėje paieškai.....	66
64 pav.	Brokuotų sričių tarpinėje paieška po papildomų korekcijų koreguotame vaizde.	66

Įvadas

Pramonei vis žengiant tolyn automatizacijos ir robotizacijos kryptimi atsiranda poreikis gerinti produkcijos našumą, spartinti gamybinius procesus, diegti naujas technologines naujoves, kur įmanoma pakeisti žmogaus rankų darbą. Daugelyje pramonės sričių vyksta pagamintos produkcijos (detalių, gaminių, ruošinių ar kt. objektų) broko ar kokybės patikra.

Šiame darbe bus sprendžiama konvejeriu judančių, skirtingų spalvų plastikinių kamštelių broko aptikimo ir analizavimo problema. Konkrečiu nagrinėjamu atveju, konvejeriu pervežti plastikiniai kamšteliai turi būti individualiai patikrinti dėl broko naudojant žmogiškuosius išteklius. Siekiant pašalinti rankų darbą ir automatizuoti šį procesą, reikia išspręsti kaip techninėmis priemonėmis atpažinti kamštelių broką, kuris pasitaiko dvejose kamštelio dalyse – kamštelio briaunoje arba kamštelio tarpinėje. Šiai problemai spręsti galima naudoti vaizdo atpažinimo sistemą, kuri suteikia galimybę stebėti ir identifikuoti įvairaus pobūdžio objektų savybes, tarp šių ir broką, kaip atskirai išsiskiriančią savybę. Taip pat reikia numatyti brokuotos produkcijos šalinimo galimybę.

Tyrimų objektas: plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistema.

Projekto tikslas: suprojektuoti ir ištirti plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemą.

Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti pramonėje taikomus vaizdo atpažinimo būdus, pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodus ir skirtingų rūšių apšvietimo įtaką vaizdui atpažinti.
2. Parinkti tinkamą įrangą vaizdo analizei atlikti.
3. Suprojektuoti apšvietimo sistemą.
4. Sukurti kamštelių broko analizės programą.
5. Ištirti analizės rezultatų pakartojamumą ir jos trukmei įtaką darančius veiksnius.
6. Statistiškai ištirti kamštelių broko aptikimo efektyvumą.

Tyrimų metodai: mokslinės literatūros analizė, eksperimentiniai tyrimai.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

1. ALELIŪNAS, P. ir O. STRIKULIENĖ. Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2020: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2020 balandžio 24 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas.

Konferencijose skaityti pranešimai:

1. Pranešimas tema „Plastikinių kamštelių broko analizavimo vaizdo atpažinimo sistemos projektavimas ir tyrimas“ 20-oje studentų mokslinių darbų konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2020“. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas, 2020 m. balandžio 24 d.

1. Literatūros analizė

Šiame skyriuje apžvelgiami vaizdo atpažinimo sistemų ypatumai ir jų pritaikymo pramonėje būdai. Taip pat analizuojami vaizdo kamerų kalibravimo metodai, skirtingo tipo apšvietimo sistemų ypatumai ir vaizdo analizavimo ir apdorojimo įrankiai programinėje įrangoje.

1.1. Vaizdo atpažinimas

Vaizdo atpažinimas (angl. *Machine Vision*), dar vadinamas mašinine rega (tiesioginis vertimas), – tai technologija ir metodai, naudojami vaizdų gavybos ir apdorojimo pagrindu atliekamam automatiniam tikrinimui ir analizei tokiose srityse, kaip automatinis tikrinimas, procesų valdymas ir robotų orientavimas. Sąvokos „mašininė rega“ apibrėžimai gali būti skirtingi, tačiau visi jie apima technologiją ir metodus, naudojamus informacijai iš vaizdo gauti. Gauta informacija – tai gali būti paprastas signalas, nusakantis ar objektas tinkamas / netinkamas arba sudėtingesnis duomenų rinkinys, pavyzdžiui, kiekvieno objekto identifikacija, padėtis ir orientacija [1,2].

Vaizdo atpažinimo sistemas sudaro skaitmeniniai jutikliai, kurie yra integruoti pramoninėse kamerose su specializuota optika ir suteikia galimybę gauti vaizdus, kuriuos kompiuterių aparatinė ir programinė įrangos galėtų apdoroti, analizuoti, įvertinti ir pagal tai priimti sprendimus [3].

Vaizdo atpažinimo sistemų galimybės:

- sulygtinti užfiksuotą objekto atvaizdą su etaloniniu;
- nuskaityti tekstinius užrašus ir brūkšninius ar dvimačius kodus;
- surasti specifinius požymius: dėmes, įtrūkimus, nutrupėjimus, įbrėžimus;
- išmatuoti atstumus ir kampus, nustatyti objektų poziciją, orientaciją, spalvą ir kt.;
- nustatyti atstumą ir poziciją erdvėje (3D) (robotui valdyti).

1.1.1. Mašininės regos ir žmogaus regos palyginimas

Žmogaus rega yra tinkamiausia kokybiškam sudėtingam, nestruktūrizuotam vaizdui interpretuoti, tuo tarpu mašininė rega išsiskiria kiekybiniu struktūrizuoto vaizdo matavimu pasižyminčiu greičiu, tikslumu ir pakartojamumu. Pavyzdžiui, gamybos linijoje mašininė vaizdo atpažinimo sistema gali patikrinti šimtus ar net tūkstančius dalių per minutę. Vaizdo atpažinimo sistema su tinkamai parinkta kameros skiriamąja geba ir optika gali lengvai atpažinti labai mažas objekto detales, kurių nemato žmogaus akis.

Eliminuojant fizinį kontaktą tarp bandymo sistemos ir bandomųjų dalių, mašininė rega apsaugo nuo dalinės žalos ir pašalina su mechaninių matavimo prietaisų nusidėvėjimu susijusias išlaidas ar priežiūros laiką, nes tokio pobūdžio prietaisai yra nebenaudojami. Mašininė rega suteikia papildomos naudos saugai ir eksploatacijai, nes sumažinamas žmonių, dalyvaujančių gamybos procese, skaičius. Be to, apsaugo nuo žmonių sukeltos taršos švariose patalpose ir apsaugo žmones nuo pavojingos aplinkos, jiems fiziškai šiose aplinkose nedalyvaujant [4].

Nors žmogaus rega, kurią sudaro akys ir smegenys, turi daug neįtikėtinų gebėjimų, kurių šiuo metu negali užtikrinti įrenginiai su konkurencingomis savybėmis, tačiau žmonių atliekamas vizualinis tikrinimo procesas turi trūkumų, procesas yra [2]:

- monotoniškas;
- sunkus;

- varginantis;
- subjektyvus;
- nepakankamai tiksliai atkartojamas;
- brangus tikrinimo rezultatų išsamus dokumentavimas;
- daugeliu atvejų per lėtas;
- brangus.

1 lentelė. Žmogaus regos ir mašininės regos savybių palyginimas [2]

	Žmogaus rega (akys ir smegenys)	Mašininė rega (vaizdo užfiksavimo ir apdorojimo įrenginiai)
Jutiminės priemonės (jutikliai)	<ul style="list-style-type: none"> – maža optinė skiriamoji geba; – intensyvumo vertės ir matmenys negali būti visiškai užfiksuoti, nes nėra geometrinių ar radiometrinių standartų; – apribota tik matoma šviesa; – spektrinis suvokimas trimis kanalais. 	<ul style="list-style-type: none"> – aukšta optinė skiriamoji geba; – galima užfiksuoti absoliučias intensyvumo vertes ir matmenis; – galima naudoti šviesą už matomos spektro dalies; – galima daugiakanalio spektro skiriamoji geba.
Vaizdų apdorojimas ir analizė	<ul style="list-style-type: none"> – didelis lygiagrečių, labai tarpusavyje susijusių ir lėtų neuronų kiekis; – „užprogramuota“, mokantis iš pavyzdžių. 	<ul style="list-style-type: none"> – vienas ar daugiau galingų procesorių; – algoritmai įprastai turi būti aiškiai ir tiksliai suprojektuoti.
Specialūs gebėjimai	<ul style="list-style-type: none"> – patirtis ir žinios; – prisitaikomumas ir mokymosi gebėjimas; – aktyvus regėjimas, nedelsiant keičiantis tikrinimo nustatymą (regos kontrolinė kilpa); – dideli pažinimo gebėjimai; – intuicija. 	<ul style="list-style-type: none"> – tikslūs skaičiavimai; – didelis apdorojimo greitis; – didelio duomenų kiekio kaupimas („fotografinė atmintis“).

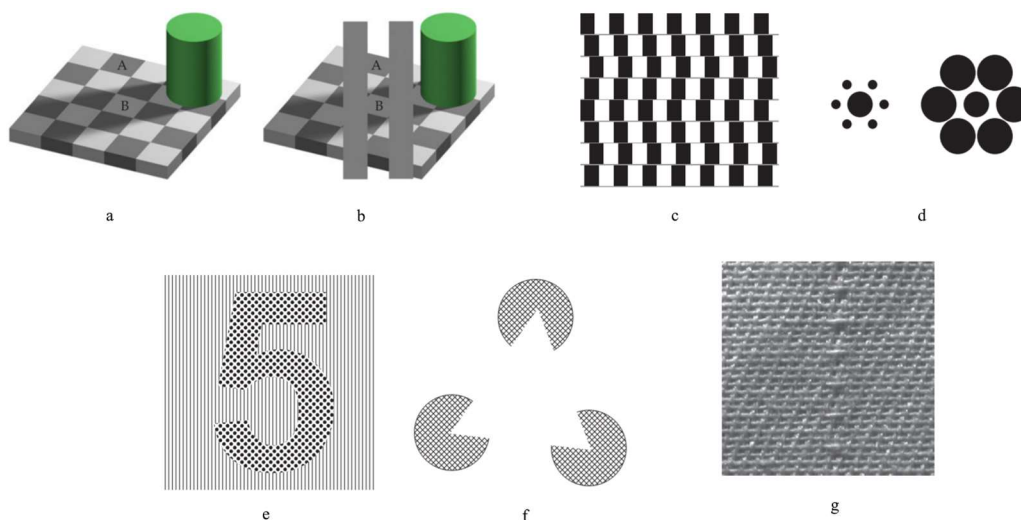
Skirtingai nuo techninių vizualinių tikrinimo sistemų, žmogaus regos sistema gali būti lengvai apgauta stebint optines iliuzijas, o tai rodo, kad abi sistemos veikia skirtingai. Tačiau netrivialias¹ vizualinės interpretacijos užduotis, kurias gali lengvai įvykdyti žmonės, sudėtinga atlikti techninėmis priemonėmis (žr. 1 pav.).

1-ame paveiksle matyti, kaip „a“ ir „b“ raidėmis išskirtose paveikslo dalyse A ir B langelių spalvos yra vienodos – tai žmogaus regos sistemos optinė apgaulė, kuri neveikia techninės vaizdo atpažinimo įrangos. Dalyje „c“ pavaizduota situacija, kai horizontalios linijos žmogaus akiai atrodo netiesios, nors realybėje yra atvirkščiai. Analogiškai, paveikslėlio „d“ dalyje, viduryje esantieji skrituliai yra vienodo dydžio nors žmogus suvokia juos esant skirtingo dydžio.

Pereinant prie netrivialių paveikslėlių, „e“ dalyje žmogus iš karto suvokia matantis skaičių 5, tačiau mašininė rega susiduria su sunkumais, kadangi reikia atpažinti ir išskirti dviejų rūšių ornamentus, ir dar atpažinti tekstinį simbolį. Dalyje „f“ žmogus geba pamatyti trikampį, anaipol aptikti trikampį yra labai sudėtinga su mašinine rega ir tai reikalauja sudėtingų atpažinimo algoritmų. Galiausiai

¹Žodžio „trivialus“ priešingybė, t. y. priešingybė žodžiams tradicinis, įprastas, pažįstamas, suprantamas

dalyje „g“ žmogus lengvai suvokia tekstilės pluošto pažeidimą, o mašininė regai vėl reikalingi sudėtingesni ir kompleksiškesni atpažinimo metodai.



1 pav. Optinės iliuzijos ir kiti netrivialūs atvaizdai. a, b optinė apgaulė, indikuojanti spalvų, pažymėtų A ir B raidėmis vienodumą; c – optinė tiesių linijų apgaulė; d – optinė skritulių dydžio apgaulė; e–g – netrivialūs atvaizdai, lengvai suprantami žmonėms [2]

Vaizdo atpažinimo sistemą sudaro trys pagrindinės dalys:

- vaizdo kamera ir optika;
- apšvietimo sistema;
- vaizdų apdorojimo ir analizės programinė įranga.

Tai yra neatsiejamos sistemos dalys, be kurių ji negalėtų funkcionuoti.

1.2. Pramoninės vaizdo kameros

Vaizdo atpažinimo srityje taikomos vaizdo kameros yra skirtingų tipų ir gali būti klasifikuojamos pagal:

- užfiksuojamą vaizdą:
 - 1D – linijinio skenavimo;
 - 2D – ploto skenavimo;
 - 3D – erdvės skenavimo;
- vaizdų apdorojimo galimybes:
 - įprastos kameros, be jokio vaizdo apdorojimo įtaisų savyje;
 - „smart“ kameros su savyje integruotu vaizdo apdorojimo kompiuteriu;
- vaizdo spalvą:
 - nespaltvotos;
 - spaltvotos;
 - infraraudonųjų spindulių;
- spartą;
- vaizdo jutiklio matricos dydį;
- ir kt.

1.2.1. Linijinio skenavimo, 1D vaizdo kameros

Linijinio nuskaitymo kameros naudoja tik vieną šviesai jautrių elementų liniją, kurios imtis yra nustatoma pagal šviesai jautrios zonos dydį ir Δx atstumą tarp atskirų elementų. Nuskaitymas vyksta y kryptimi, t. y. perkeliant stebimą objektą y kryptimi arba perstumiant kamerą ta pačia kryptimi. Eilės plotį Δy lemia santykinis objekto arba kameros judėjimo greitis, taip pat greitis, kuriuo eilutės yra nuskaitymos.

Naudojant linijinio nuskaitymo kamerą gali būti pasiekta didelė, paprastai iki 16384 pikselių [2], skiriamoji geba, nes ji paprastai turi didesnę pikselių skaičių nei viena ploto nuskaitymo kameros linija. Rinkoje paprastai yra kamerų, kurių eilutės plotis atitinka 7 μm , 10 μm ir 14 μm [5].

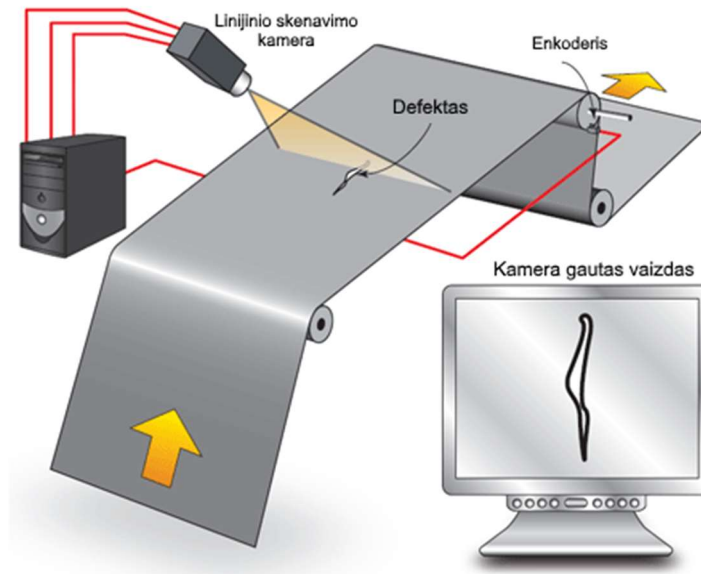
Linijinio skenavimo kamerų sparta nusakoma eilutės nuskaitymu per laiko vieneta, t. y. išreiškiama eilutės skaitymo dažniu. Pvz. anot gamintojo „Teledyne DALSA“, linijinio skenavimo kameros eilučių nuskaitymo greitis siekia 200 kHz arba kitaip tariant 5 μs vienai eilutei. „Piranha3“ kamera, kurios vienos eilutės skiriamoji geba yra 16384 pikselių ir nuskaitymo sparta – 72 kHz, pasiekiamas 1,179 mlrd. pikselių per sekundę greitis. [6]. 2 lentelėje pateikti gamintojo „Basler AG“ linijinio skenavimo kamerų nuskaitymo spartos duomenys [7].

2 lentelė. „Basler AG“ linijinio skenavimo kamerų nuskaitymo sparta [7]

Rezoliucija	Skiriamoji geba, px	Nuskaitymo sparta, Hz	Nuskaitymo greitis, px/s
2k	2048 × 1	80	163,8 mln.
4k	4096 × 1	80	327,7 mln.
8k	8192 × 1	80	655,4 mln.
12k	12288 × 1	66	811,0 mln.

Linijinio nuskaitymo kameras ypač tinka naudoti automatizuotam ištisinių, nenutrūkstamų produktų ir konvejerių juostų patikrinimui. Kamerą galima valdyti reliatyviniu enkoderiu, kuris matuoja konvejerio juostos greitį. Tokiu būdu, viena vaizdo linija visada yra proporcinga judėjimo greičiui. Kameros eilutės nuskaitymo greitis turi būti sinchronizuotas su judančio nuskaitymo objekto greičiu, jei norima pasiekti tą pačią skiriamąją gebą važiavimo kryptimi y . Jei taip nėra, ir eilutės nuskaitymo greitis yra fiksuotas, o objekto greitis kinta, tuomet gautas objekto vaizdas bus pailgintas arba suspaustas. Tačiau konvejerių ar kitos pozicionavimo įrangos greitis yra kintantis, nes dažnai priklauso nuo apkrovos pokyčių ir pagreičio arba stabdymo, o tai reiškia, kad jie retai važiuoja tuo pačiu greičiu. Tai savo ruožtu reiškia, kad paprastai neįmanoma dirbti su fiksuotu linijos nuskaitymo greičiu.

Tradicinės linijų nuskaitymo kamerų taikymo sritys pramonėje yra ištisinių, nenutrūkstamų objektų ar medžiagų analizavimas. Linijinio nuskaitymo kameros, naudojamos spausdinimo pramonėje, popieriaus gamyboje ir vėlesniame jo apdorojime; plieno plokščių, stiklo juostų arba tekstilės gaminių gamyboje, siekiant nustatyti ir klasifikuoti šių medžiagų defektus. Išskirtinės pritaikymo sritys – maisto pramonė, pavyzdžiui, šalinant netobulus kukurūzų branduolius ar panašius maisto produktus, kurie yra pakopiniu principu praleidžiami pro vieną ar daugiau linijinių skenavimo kamerų. Sistemos su linijinio skenavimo kamera pavyzdys pateiktas 2 paveiksle.



2 pav. Vaizdo atpažinimo sistema su linijinio skenavimo kamera [5]

1.2.2. Ploto skenavimo, 2D vaizdo kameros

Ploto skenavimo kameros – tai bendro naudojimo, sutinkamos daugelyje mašininės regos sistemų kameros, kurios turi didelio pikselių kiekių matricos jutiklį, užfiksuojančią 2D vaizdą tam tikroje scenoje viename ekspozicijos cikle su horizontaliais ir vertikaliais elementais. Nors tokių kamerų konfigūravimas ir derinimas yra paprastesnis lyginant su 1D kameromis, jos ne visada yra veiksmingos, kai tikrinamas objektas juda ar nepilnai matomas visame matymo lauke. Ploto skenavimo kameros pritaikomos tose srityse, kuriose objektas stovi, net jei tik trumpam laiko momentui, kurio metu užfiksuoja kameros vaizdas [8].

2D ploto skenavimo kameros būna dviejų tipų: su CCD (angl. *Charged-Couple Device*) arba CMOS (angl. *Complementary metal oxide semiconductor*) jutikliais.

CCD jutiklis

Krūvio sąsajos įtaisas – jutiklis, susidedantis iš geometriškai labai tikslaus šviesai jautrių elementų tinklo. Fotonai, nukreipti į puslaidininkinę medžiagą, gamina elektronų-skylių poras. Elektronai yra kaupiami erdvės įkrovimo regione. Vieni pikseliai tiesiogiai nesiliečia vienas su kitu, nes yra atskirti potencialinėmis duobėmis, kad būtų išvengta krūvio nešėjų patekimo į gretimus elementus. Šalia šviesai jautrių elementų yra pernešimo horizontalia ir vertikalio kryptimi registrai. Jais yra pernešamas krūvis. Potencialinės duobės gali būti perkeliama, todėl individualūs krūviai gali būti nuskaityti analoginio pernešimo registro principu [2].

Kai jutiklis yra apšviečiamas tam tikrą laiką ir krūvio pernešėjai suintegruoti, sukauptas visų pikselių krūvis yra pernešamas į gretimą apšviestą vertikalios skaitymo registrą. Po to krūvis yra perkeliama į apšviestą horizontalų registrą linija po linijos. Nuskaitymas vyksta žingsnis po žingsnio.

Vienas iš šio jutiklių trūkumų yra tai, kad apie pusę teritorijos apima šviesai nejautrūs pernešimo registrai. Ekspozicija nuskaitymo metu iškraipo užfiksotą vaizdą. Taip pat, ekspozicijos laiko kontrolė nėra įgyvendinama elektroniniu būdu ant lusto (elektroninio užrakto), bet mechaniniu

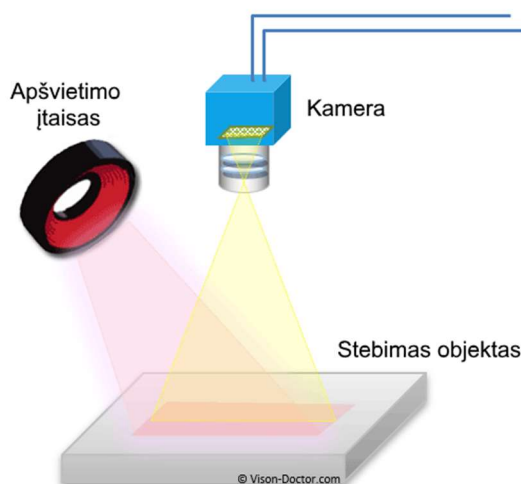
būdu. CCD jutiklių privalumai yra jų mažas dydis, mažas svoris ir kaina, labai tiksli pikselių geometrija ir jų atsparumas smūgiams ir elektromagnetiniams laukams.

CMOS jutiklis

CMOS jutikliuose fotonų aptikimas grindžiamas tuo pačiu principu, kaip ir CCD jutikliuose, tačiau skaitymo metodai yra skirtingi: atskirų pikselių sukauptą krūvį gali tiesiogiai valdyti tranzistoriai ir adresų eilutės. Tai suteikia galimybę nuskaityti visą vaizdo plotą didesniu dažniu. Pernešimo registrai nereikalingi. Dažnai pikselio viduje jau yra stiprinimo grandinė kaip pirmasis apdorojimo etapas. Tačiau tai taip pat gali būti trūkumas, nes atskirų pikselių stiprinimo faktoriai gali būti skirtingi dėl gamybos tolerancijų.

Pagrindiniai CMOS vaizdo jutiklių privalumai prieš CCD vaizdo jutiklius yra laisva ir atsitiktinė prieiga prie pikselių, didelis temperatūros diapazonas, mažas energijos suvartojimas, mažos gamybos sąnaudos, tik vienos darbinės įtampos poreikis, išblukimo, užsiteršimo ir užvėlinimo nebuvimas, galimybė integruoti elektronines grandines.

Vaizdo atpažinimo sistemos su ploto skenavimo kamera pavyzdys pateiktas 3 paveiksle.



3 pav. Vaizdo atpažinimo sistema su ploto skenavimo kamera [9]

Ploto skenavimo kamerų nuskaitymo sparta priklauso nuo kameros skiriamosios gebos. 3 lentelėje pateiktas skirtingos skiriamosios gebos ploto skenavimo kamerų nuskaitymo spartos palyginimas, pagal gamintojo „Basler AG“ duomenis [10].

3 lentelė. „Basler AG“ ploto skenavimo kamerų nuskaitymo sparta [10]

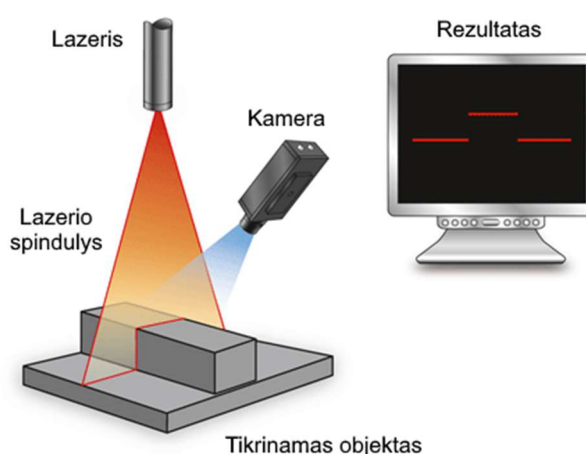
Pikselių sk., (MP)	Skiriamoji geba, (px)	Nuskaitymo sparta, (vaizdai/s)	Nuskaitymo greitis, (px/s)
0,3	640 × 480	751	230,7 mln.
1,3	1280 × 1024	203	266,0 mln.
2,3	1920 × 1200	164	377,8 mln.
5,0	2590 × 2048	60	318,2 mln.
12,0	4024 × 3036	31	378,8 mln.
20,0	5472 × 3646	17	339,3 mln.

1.2.3. Erdvės skenavimo, 3D vaizdo kameros

Erdvės skenavimo sistema geba apdoroti, analizuoti ir perduoti informaciją apie erdvėje esančius objektus. 3D vaizdo atpažinimas apima lazerinę trianguliaciją, stereo regą, struktūrizuotos šviesos projekciją, formos identifikavimą iš šešėlių ir baltos šviesos interferometriją.

Lazerinė trianguliacija

Lazerinės trianguliacijos metu įprastai objekto geometrinė forma yra matuojama lazeriu, kuris sukuria tikslią šviesos liniją, pro kurią objektas yra pernešamas. Kamera, sumontuota žinomu kampu nuo lazerio, įrašo lazerio linijos vaizdą, kuris atitinka objekto geometriją. Tai leidžia matuoti nukrypstančias lazerines linijas bet kuriuo momentu, kai objektas eina per lazerio spindulį. Šio proceso metu sudaromi keli profiliai, iš kurių sukuriamas trimatis vaizdas.



4 pav. Lazerinės trianguliacijos principu pagrįsta 3D vaizdo atpažinimo sistema [11]

Pagrindinis reikalavimas lazerinei trianguliacijai yra tas, kad objektas privalo judėti kameros ir lazerio spindulio atžvilgiu. Vadinamasis šešėliavimas yra viena iš galimų lazerinės trianguliacijos procesų problemų. Priklausomai nuo paviršiaus formos, yra rizika, kad lazerio linijos atvaizdas nuo objekto paviršiaus iki kameros bus blokuojamas aukštesniais objekto elementais, todėl tampa neįmanoma nustatyti tikslios aukščio informacijos apie vizualiai užblokuoto paviršiaus. Tam išspręsti galima panaudoti papildomas kameras [7]. Lazerinės trianguliacijos pavyzdys (žr. 4 pav.).

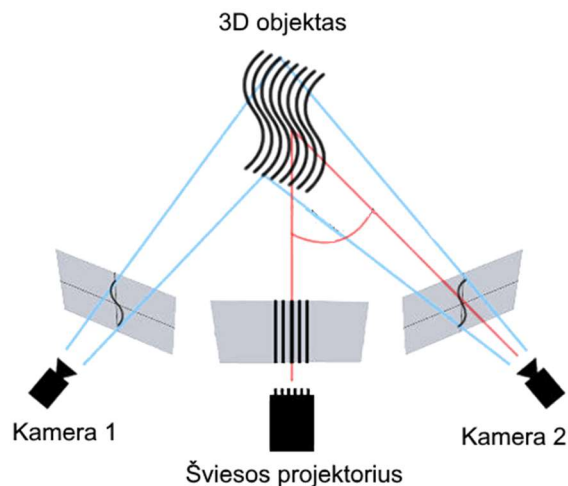
Stereo rega

Geometrinis stereo regos procesas grindžiamas dviejų ar daugiau kamerų naudojimu. Panašiai kaip žmogaus akys, dvi kameros naudojamos įrašyti objekto 2D vaizdus. Naudojant trianguliacijos metodą galima apskaičiuoti trimatį vaizdą iš dviejų 2D vaizdų. Tačiau, stereo regos metodu siekiant priskirti kiekvieną tikrinamo objekto tašką dviem 2D atvaizduose esantiems pikseliams, būtina turėti atskaitos ženklą ant tikrinamo objekto. Dėl šios priežasties stereo rega nėra tinkama naudoti gamybinėje aplinkoje [11].

Struktūrizuotos šviesos projekcija

Struktūrizuotos šviesos projekcija taip pat patemta trianguliacijos metodu. Skirtingai nuo lazerinės trianguliacijos arba stereo regos, 3D vaizdų apdorojimas, pagrįstas struktūrizuotos šviesos projekcija, reikalauja statinių objektų. Matavimai yra atliekami labai sparčiai, todėl matavimo laikas

svyruoja nuo kelių sekundžių iki sekundės dalių. Ši technologija pagrįsta koduota šviesa, pavyzdžiui, naudojami DLP projektoriai šviesai skleisti į objektą. Čia šviesa yra projektuojama juostomis ant objekto. Priklausomai nuo aukščio struktūros, ant objekto atsiranda šviesos juostų struktūra, kurią įrašo kamera, sumontuota žinomu kampu. Iš gautos 2D projekcijos su iškraipytomis šviesos juostomis galima sukurti 3D vaizdą [11]. Struktūrizuotos šviesos projekcijos pavyzdys pavaizduotas 5 paveiksle.



5 pav. Struktūrizuotos šviesos projekcijos principu pagrįsta 3D vaizdo atpažinimo sistema [12]

Anot gamintojo „Photoneo“, 3D erdvės skenavimo kamerų nuskaitymo sparta siekia 16 mln. pikselių/s ir vieno nuskaitymo trukmė gali būti diapazone 250–3000 ms [13].

1.3. Pramoninių vaizdo kamerų kalibravimo metodai

Kalibravimas leidžia susieti pikselių koordinatas su realiomis koordinatėmis ar sistemos matmenimis. Kalibravimas taip pat gali būti naudojamas vaizdo iškreipymui kompensuoti dėl įvairių kameros, optikos ar padėties ypatybių.

Kameros kalibravimas yra būtinas, norint tiksliai matuoti objektus. Kalibruojant kamerą galima ištaisyti iškreipimus dėl lęšio išgaubtumo, kuris būna skirtingų dydžių skirtingam lęšiui, ir gauti objekto koordinatas metriniais vienetais, pvz., metrais arba milimetrais. Norint kalibruoti kamerą, būtina transformuoti sugeneruotą trimatės realios erdvės taškų modelį į plokštuminę dvimatę projekciją [1, 14].

1.3.1. Kalibravimas „Matrox Design Assistant 5“ programine įranga

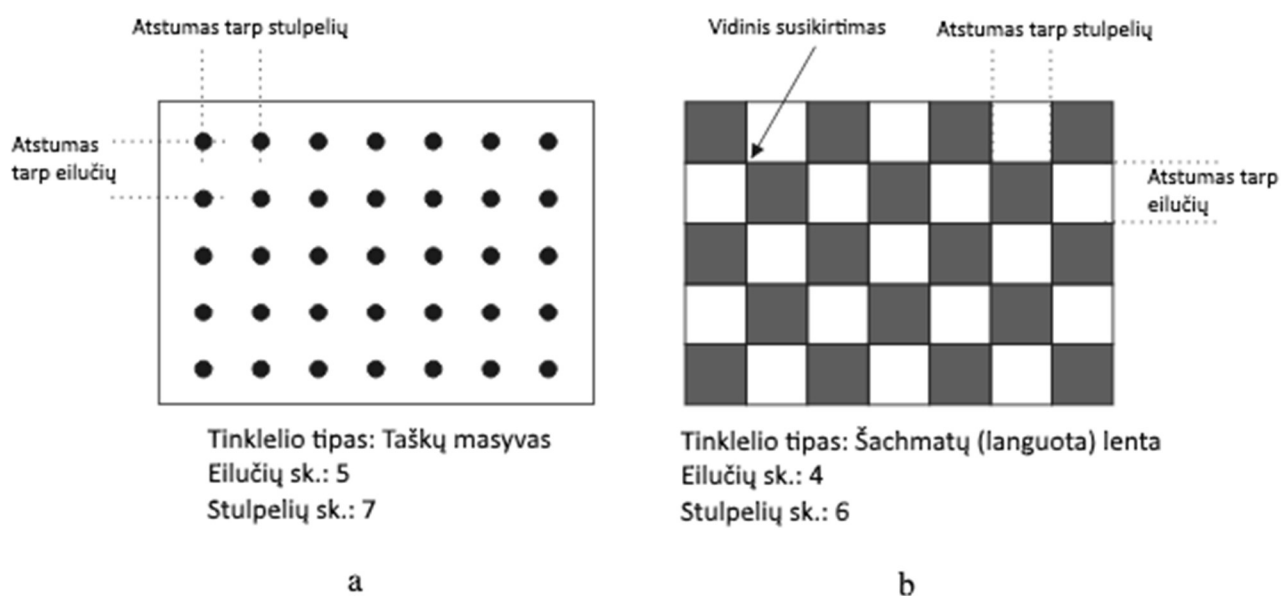
Kalibravimą „Matrox Design Assistant 5“ programinėje įrangoje galima atlikti naudojant vieną iš keturių būdų: mastelio keitimu, taškų sąrašu, taškų iš dviejų masių sąrašu arba naudojant tinklėlį [15].

- Mastelio keitimo metodas leidžia kalibruoti vaizdą, nurodant ilgį pikseliais ir lygiavertį ilgį tikromis koordinatėmis.
- Naudojant taškų sąrašo metodą, kiekvienam taškui reikia tiksliai pateikti kiekvieno pikselio koordinatas ir jam atitinkančias tikras koordinatas.

- Taškų iš dviejų masyvų sąrašo metodu pateikiami du masyvų rinkiniai. Pirmoje matricoje pateikiamos visos pikselių koordinatės, o antrame masyve pateikiamos atitinkamos tikrosios koordinatės.
- Tinklelio metodas nustato kalibravimo taškus iš vartotojo pateikto apskritimo ar šachmatų lentos tinklo. Reikia nurodyti eilučių ir stulpelių skaičių, taip pat atstumą tikrose koordinatėse tarp dviejų tinklelio elementų centrų, kuris atitinka atstumą tarp eilučių ir stulpelių.

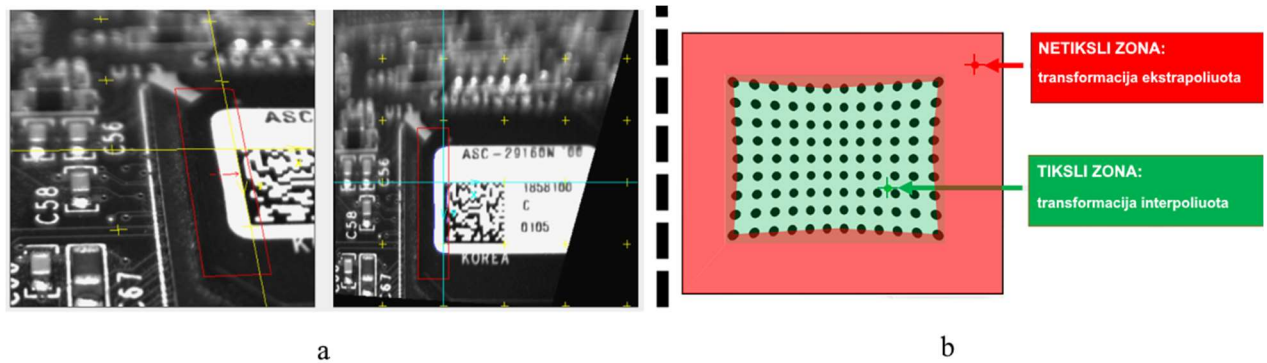
Tinklelio metodas

Šiam metodui reikalingas realus šablonas su šachmatų lentos tinkleliu arba stačiakampio formos taškų masyvu, kurie yra tolygiai išdėstyti realiose koordinatėse (žr. 6 pav.), tačiau šablonas gali būti iškraipytas iš kameros perspektyvos.



6 pav. Kalibravimo tinklelių tipai. a – taškų masyvas; b – šachmatų lenta [15]

Pasirinkus vieną iš dviejų kalibravimo tinkleliu būdų, taip pat reikia pasirinkti vieną iš dviejų kalibravimo duomenų apdorojimo režimų. Vienas iš jų yra perspektyvinis – pasirenkamas jei kamera nėra statmena objektui ir nėra išlenktų iškreipymų (objektas yra plokščias ir nėra lygiagretus kameros matymo laukui). Kitas režimas – tai tiesinės interpoliacijos režimas, jis yra naudojamas tokiems iškreipimo tipams: pvz., radialiniam, žuvies akies tipo lęšio arba pagalvėlės (žr. 9 pav.); tinklelio šablonas turi turėti pakankamai taškų, kad iškreipimas tarp dviejų taškų būtų nereikšmingas (žr. 7 pav.) [9].

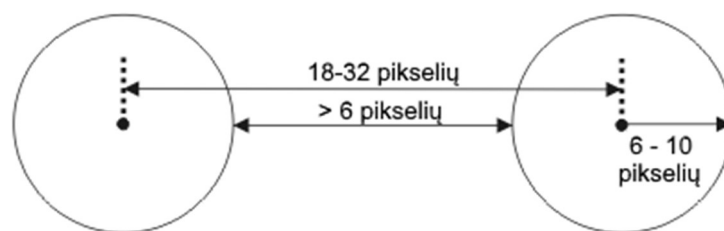


7 pav. Kalibravimo duomenų apdorojimo režimai. a – perspektyvinis; b – tiesinės interpoliacijos [15]

Reikalavimai tinklelio šablonams

Tiksliam kalibravimui, tinklelis turi turėti minimalų taškų skaičių ir atitikti gairių rinkinį, priklausomai nuo tinklo tipo.

Taškų masyvui: tinklelyje turi būti bent dvi eilutės ir du stulpeliai taškų. Taškų spindulys turėtų būti nuo 6 iki 10 pikselių, atstumas tarp gretutinių taškų centrų turėtų būti nuo 18 iki 32 pikselių, o mažiausias atstumas tarp taškų kraštų turėtų būti 6 pikseliai (žr. 8 pav.) [15].



8 pav. Reikalavimai taškų masyvo tinklelio šablonui [15]

Šachmatų lentos tinklelis turi turėti mažiausiai 4 eilutes ir 4 stulpelius. Visas tinklelis turėtų būti matomas lauke, daliniai tinkleliai nepalaikomi. Tinklelio kvadratų dydis turi būti ne mažesnis kaip 12 x 12 pikselių, o tinklelis turi būti pilnai arba beveik pilnai monochromatinis. Abiejų tipų tinkleliai turi būti pakankamai dideli, kad padengtų visą kameros matymo lauką, turėtų didelį kontrastą ir būtų be dėmių, purvo ar kitų trūkumų [15].

Atlikti tyrimai ir eksperimentai [16] parodė, kad taškų masyvo elementų centrų koordinatės gaunamos dalinių pikselių (*subpixel*) tikslumu. Tai pasiekama atliekant „Sobel“ operacijas apskritimo ar elipsės kraštinių aptikimui aproksimuojant gradiento lygį. Gauto gradiento dydžio pasiskirstymas taškų tiesėje buvo nustatytas naudojant biliarinę (dvilinijinę) interpoliaciją ir tada naudojamas objekto kraštinių taškų suradimui subpixel tikslumu. Todėl atskirų elementų paklaidos nevertintos, o tik bendroji paklaida (apibrėžta kaip atskirų elementų Euklido norma). Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad sukurta sistema turi gerą pradinio matavimo tikslumą ir gali išmatuoti deformuojamo kūno 3D deformaciją.

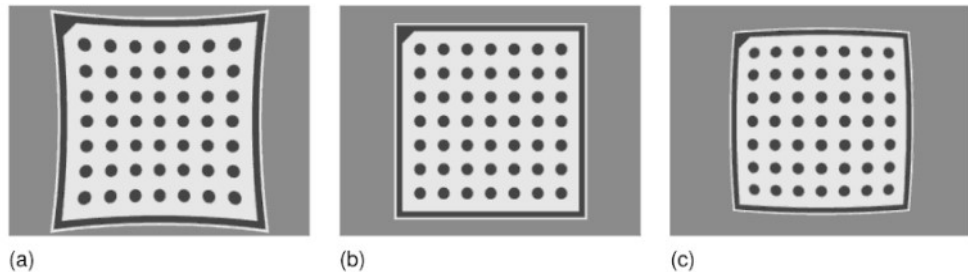
1.3.2. Lęšio išgaubtumo įvertinimas kalibravimo procese.

Atlikus perspektyvinę transformaciją, t. y. 3D realios erdvės koordinačių x, y, z transformaciją į 2D kameros vaizdo plokštumos koordinates u, v . Jei yra kameros lęšio išgaubtumas u, v koordinatės tampa netikslios ir iškraipytos. Lęšių iškraipymo transformaciją galima modeliuoti vien tik 2D vaizdo plokštumoje, t. y. 3D informacija yra nereikalinga. Daugelio lęšių iškraipymas gali būti pakankamai gerai aproksimuotas radialiniu iškraipymu naudojant padalijimo modelį [1]:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}; \quad (1.1)$$

čia κ – parametras, modeliuojantis radialinių iškraipymų dydį.

Jei κ yra neigiamas – iškraipymas yra statinės formos (žuvies akies tipo lęšiui); jei teigiamas – pagalvėlės formos (žr. 9 pav.).



9 pav. Skirtingo κ koeficiento pavyzdžiai: a – pagalvėlės tipo iškraipymas, $\kappa > 0$; b – iškraipymų nėra, $\kappa = 0$; c – statinės formos iškraipymas, $\kappa < 0$ [1]

Padalijimo modelis pasižymi vienu dideliu privalumu – vaizdo iškraipymą galima apskaičiuoti analitiškai. Jei padalijimo modelio nepakanka vaizdo iškraipymo apskaičiavimui tam naudojamas polinominis modelis [1]. Tačiau šiam modeliui negalima atlikti analitinio skaičiavimo, vaizdo iškraipymas apskaičiuojamas skaitmeniniu būdu šaknies radimo algoritmu.

1.4. Apšvietimo sistemos

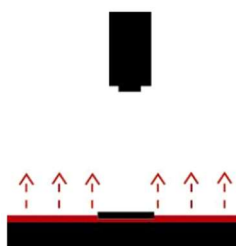
Apšvietimas yra vienas iš svarbiausių mašininės regos aspektų. Nepavykus tinkamai apšviesti objekto ar matymo lauko, gali būti prarasta reikiama informacija ir našumas. Tik tada kai pasiekiamas pakankamas kontrastas, leidžiantis aptikti specifinius ar defektingus objekto bruožus, vaizdo apdorojimo ir analizavimo programinė įranga gali tinkamai atlikti savo funkcijas, o tai yra pasiekama tik tinkamai apšvietus objektą. Skirtingiems objektams ir jų bruožams tikrinti naudojami skirtingi apšvietimo metodai, kurie apima šviesos šaltinį ir jo išdėstymą kameros atžvilgiu.

1.4.1. Apšvietimo metodai

Apšvietimo metodams taikyti reikalinga tam tikra konkreti šviesa ir geometrija, arba santykinis kameros, objekto bei šviesos išdėstymas.

Galinis apšvietimas

Galinis apšvietimas (angl. *Back lighting*) – tolygus šviesos šaltinis yra už objekto, todėl šiuo metodu yra gaunamas tamsus, kontrastingas objekto siluetas. Dažniausiai naudojamas skylių ir tarpų aptikimui, nepermatomo objekto buvimo/nebuvimo faktui pateikti, objektų pozicijai, orientacijai nustatyti arba atlikti matavimus. Taip pat naudojama permatomo objekto įtrūkiams, įbrėžimams, burbulams ir kt. defektams aptikti. Tačiau šiuo metodu yra prarandama informacija apie paviršiaus struktūrą [17, 18]. Galinio apšvietimo iliustracija pateikta 10 paveiksle.

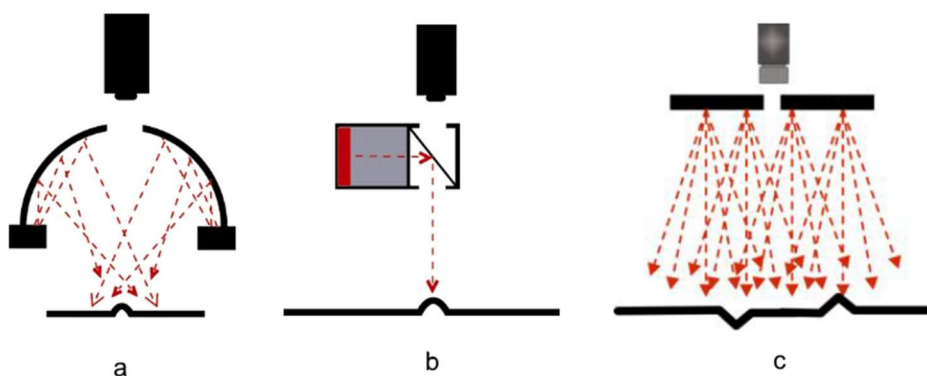


10 pav. Galinis apšvietimas [17]

Difuzinis (pilnai šviesaus lauko) apšvietimas

Difuzinis arba pilnas šviesaus lauko apšvietimas (angl. *Diffuse (full bright field) lighting*) dažniausiai naudojamas objektams su blizgiais paviršiais arba mišriai atspindinčiams objektams, kai reikia tolygios, bet daugiakryptės šviesos. Kupolo tipo apšvietimu objektas iš visų pusių ir kampų yra apšviestas vienoda šviesa, iš to seka, kad nėra jokių atspindžių net nuo veidrodinių paviršių, šviesa yra tolygiai paskirstyta po visą paviršių. Difuzinio kupolo tipo apšvietimo iliustracija pateikta raide „a“ (žr. 11 pav.)

Difuzinis koaksialinis apšvietimas, spinduliuoja šviesą statmenai į objektą. Tam tikslui pasiekti naudojamas veidrodis, kuriuo šviesos spinduliai nukreipiami 90 laipsnių kampu į objektą. Šiuo metodu yra paryškunami blizgūs, statmeni kamerai, paviršiai. Paviršiai, kurie nėra statmeni kamerai, yra tamsūs. Ši apšvietimo technika sumažina šešėlį ir akinimo efektą. Dėl šios priežasties šis metodas tinkamas aptikti blizgaus, plokščio paviršiaus trūkumus, atlikti matavimus ir tikrinti blizgius objektuose arba skaidrią pakuotę. Difuzinio koaksialinio apšvietimo iliustracija pateikta raide „b“ (žr. 11 pav.).

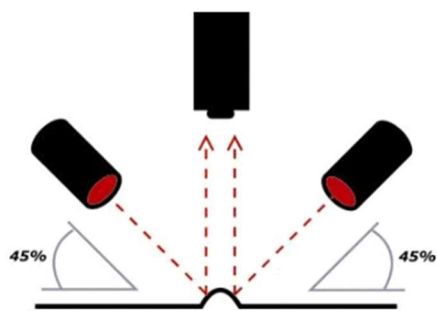


11 pav. Difuzinis (pilno šviesaus lauko) apšvietimas. a – kupolo tipo; b – koaksialinis; c – žiedinis [17]

Difuzinis žiedinis apšvietimas – tai intensyvaus šviesos apskritimas arba žiedas, užtikrinantis šešėlių nebuvimą ir gerą vaizdo kontrastą. Žiedinis apšvietimas – tai bendro naudojimo apšvietimo tipas, apimantis įvairius pritaikymo būdus dėl savo universalumo. Tačiau nėra išvengiama netenkinamų atspindžių and blizgių objektų [17, 18]. Difuzinio žiedinio apšvietimo iliustracija pateikta raide „c“ (žr. 11 pav.).

Tamsaus lauko apšvietimas (angl. *Dark field lighting*)

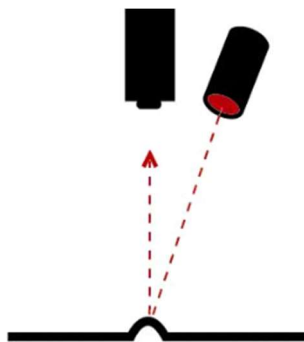
Tamsaus lauko apšvietimo metodu šviesa yra skleidžiama nuožulniu kampu į objektą. Bet kokios paviršiaus savybės – įbrėžimai, briaunos, įspaudai, išpjovos – atspindi šviesą atgal į kamerą, todėl šios paviršiaus savybės atrodo ryškios, o likusi dalis yra tamsi. Šis metodas gali būti sukurtas naudojant bet kokią kryptinę apšvietimo parinktį (juostą, žiedą, tašką), leidžiančią nukreipti šviesą į objekto paviršių [2, 18]. Kuo šviesos šaltinis yra nukreiptas didesniu kampu (kamos atžvilgiu) tuo didesnio kontrasto paviršiaus savybės gaunamos. Tamsaus lauko apšvietimo iliustracija (žr. 12 pav.).



12 pav. Tamsaus lauko apšvietimas [17]

Dalinai šviesaus lauko ar kryptinis apšvietimas (angl. *Partial bright field or directional*)

Dalinai šviesaus lauko apšvietimas yra dažniausiai naudojamas apšvietimo metodas ir yra labiausiai žinomas apšvietimas, kurį naudojame kasdien, įskaitant saulės šviesą. Šis apšvietimo tipas skiriasi nuo pilnai šviesaus lauko, nes jis yra kryptinis, paprastai iš taškinio šaltinio, ir dėl savo krypties pobūdžio jis yra geras pasirinkimas kontrasto generavimui ir objekto topografinėms detalėms išryškinti [17]. Tačiau nėra išvengiama ryškių atspindžių nuo blizgesnių paviršių, pvz. taškinio šviesos šaltinio atspindys. Dalinai šviesos lauko ar kryptinio apšvietimo iliustracija (žr. 13 pav.).



13 pav. Dalinai šviesos lauko arba kryptinis apšvietimas [17]

1.5. Vaizdo apdorojimo ir analizavimo įrankiai

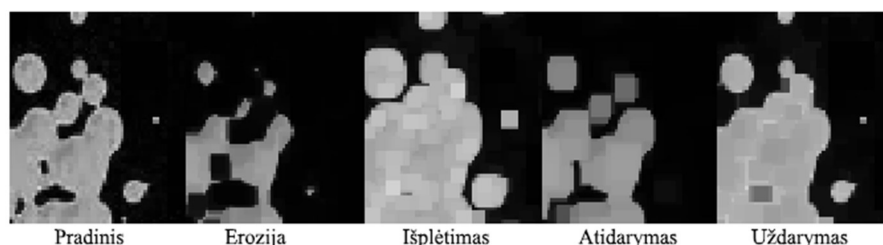
1.5.1. Vaizdo apdorojimo įrankiai

Vaizdo apdorojimo įrankiais siekiama pagerinti arba transformuoti atvaizdą arba jo regiono sritį ir sukurti naują išvesties vaizdą, kuris būtų lengviau ir greičiau išanalizuojamas ar surenkama informacija. Vaizdo apdorojimo operacijos [15]:

- „Point-to-point“ operacijos – šios operacijos apima nuolatinį pikselių slenkstinių reikšmių nustatymą, vaizdų palyginimą, vaizdų atimtį ir vaizdų išdėstymą. T.y. apskaičiuojamas kiekvieno pikselio rezultatas iš vieno ar dviejų pradinių vaizdų.
- Erdvinio filtravimo operacijos – Šios operacijos taip pat žinomos kaip konvoliucijos. Tai operacijos, kurios gali išlyginti (angl. *Smoothing*) vaizdus, pagerinti ir aptikti kraštines ir pašalinti „triukšmą“ iš vaizdo. Daugumoje šių operacijų rezultatai apskaičiuojami atsižvelgiant į svertinę pikselio ir jo gretutinių pikselių verčių sumą.
- Morfologinės operacijos – šios operacijos apima vaizdų eroziją, išplėtimą, atidarymą ir uždarymą. Naujos vertės apskaičiuojamos pagal geometrinius santykius ir atitiktis pradiniam vaizdui.
- Geometrinės transformacijos operacijos – šiomis operacijomis galima tinkamai orientuoti, apversti vertikaliai arba horizontaliai ir pakeisti vaizdo dydį.
- Kopijavimo ir konvertavimo operacijos – šiomis operacijomis atvaizdą galima užpildyti fiksuota verte arba pikseliais, nukopijuotais iš kito vaizdo. Jie taip pat leidžia konvertuoti spalvotus vaizdus į kitą spalvų erdvę, pavyzdžiui, pagal atspalvį, spalvą arba šviesumą.

Morfologinės operacijos.

Morfologinėmis operacijomis pikseliai pridedami arba pašalinami priklausomai nuo pasirinktos operacijos, pikselių vertės ar struktūrizuojamo elemento reikšmės. Operacijos yra apibrėžtos baltų objektų atžvilgiu, erozija (angl. *Erode*) padarys baltą objektą mažesnę, išplėtimas (angl. *Dilate*) padarys baltą objektą didesnę. Atidarymo (angl. *Open*) operacija nuosekliai atlieka erozijos ir išplėtimo operacijas, t.y. pirmiausiai atliekama erozija, o po to atliekamas išplėtimas. Tokiu būdu pašalinami smulkūs objektai ir paliekami stambūs. Uždarymo (angl. *Close*) operacija, priešingai nei atidarymo operacijai, pirmiausiai atlieka išplėtimo, o tada erozijos operacijas, tuo yra užpildomos mažos skylės dideliuose objektuose (žr. 14 pav.). [2, 15].



14 pav. Morfologinės erozijos, išplėtimo, atidarymo ir uždarymo operacijos [15]

Storinimo (angl. *Thick*) ir ploninimo (angl. *Thin*) operacijos atitinkamai prideda ir atima objekto sluoksnius. Šios operacijos yra panašios į erozijos / išplėtimo operacijas, išskyrus tuos atvejus, kai jos nuolat kartojamos, storinimo / ploninimo operacijos nekonvertuoja fono pikselių į objekto pikselius (išplėtimo atveju) arba fono į objekto pikselius (erozijos atveju). Tačiau objektai galiausiai

pasiekia pastovią būseną, vadinamą idempotencija. Ploninimo operacijos atveju ši būseną pasiekama, kai objektai sumažinami iki jų skeleto (žr 15 pav.) [2, 15].

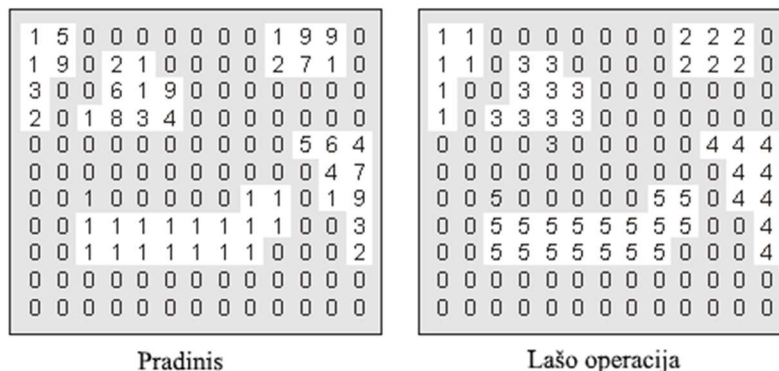


15 pav. Morfologinė ploninimo operacija [15]

Ploto atidarymo (angl. *Area open*) ir ploto uždarymo (angl. *Area close*) operacijomis yra pašalinami atitinkamai ryškūs arba tamsūs ekstremumai. Šios operacijos tinkamos stipriems atspindžiams šalinti.

Priešingai prieš tai minėtoms operacijoms, „*tophat*“ ir „*bottomhat*“ operacijos išskiria ir palieka ryškius ar tamsius ekstremumus, pagal nustatytas slenkstines reikšmes. Tai gali būti naudinga, išskiriant raides ir skaičius iš jų fono.

Lašo (angl. *Blob*) operacijos skirtos aptikti atskirus, vienas su kitu nesijungiančius nenulinės reikšmės (> 0) pikselių elementus esančius nulinės reikšmės pikselių fone. Pradedant nuo atskaitos taško, surandami atskiri elementai ir jiems priskiriami tam tikra pikselių vertė. Pvz. pirmam aptiktam elementui suteikiama pikselių reikšmė nr. 1, sekančiam aptiktam objektui suteikiama pikselių reikšmė nr. 2 ir t. t. (žr. 16 pav.) [2, 15].



16 pav. Morfologinė lašo operacija [15]

1.5.2. Vaizdo analizavimo įrankiai

Siekiant išgauti skirtingo pobūdžio informaciją iš pradinio arba jau apdoroto vaizdo reikalingi skirtingų paskirčių vaizdo analizavimo įrankiai. Toliau pateikiami „Matrox Design Assistant“ programinės įrangos vaizdo analizavimo įrankiai. [15, 19].

Modelio ir jo struktūros atpažinimas

Modelio atitikimo įrankiu surandami modeliai, ieškant panašaus erdvinio intensyvumo pasiskirstymo. Šiame etape naudojama išmani paieškos strategija, norint greitai rasti kelis modelius,

kurie gali būti atsitiktinai perkelti ar pasukti. Programinė įranga gali būti apmokyta rankiniu būdu įdiegiant modelio ar jo struktūros pavyzdžius arba nustatoma automatiškai. Reguluoti paieškos parametrus, redaguoti modelius galima rankiniu būdu. Modelio ar jo struktūros paieška gali būti optimizuojama koreguojant atitinkamumo lygio parametro reikšmę. Paieška baigiama, kai šio parametro reikšmės vertė tampa didesnė nei nustatyta. Kiekvienam modeliui taip pat gali būti nustatyta skirtinga pripažinimo parametro procentinė reikšmė, kurioje 100 % atitinka idealų analizuojamo objekto ir etaloninio modelio sutapimą, o 0 % atitinka visišką analizuojamo ir etaloninio objektų nesutapimą.

Geometrinių figūrų atpažinimas

Šiuo įrankiu atpažįstami apskritimų, elipsės, stačiakampių ir linijų segmentai. Apskritimų aptikimas nustatomas pagal numatomą spindulį, galimą skalės diapazoną ir numatomą jų kiekį. Elipsės ir stačiakampio aptikimas apibrėžiamas pagal numatomą plotį ir aukštį, galimą skalės ir kraštinių santykio diapazoną ir numatomą jų kiekį. Kiekvienu atveju įrankis gali suteikti informaciją apie centrinę poziciją, palyginti su atskaitos tašku. Jis taip pat gali suteikti informaciją apie apskritimų spindulį ir mastelį; elipsių ir stačiakampių pasukimo kampą, kraštinių santykį, plotį ir mastelį; linijų segmentų pradžios ir pabaigos pozicijas bei ilgį. Šie specializuoti įrankiai paprastai yra spartesni ir patikimesni analizuojant konkrečias formas nei bendrinis modelio atpažinimas.

Atpažinimas lašo operacijomis

Atpažinimas lašo operacijomis (angl. *Blob Analysis*) naudojamas identifikuoti, suskaičiuoti, surasti ir išmatuoti pagrindines savybes ir objektus, kad būtų galima nustatyti jų buvimo faktą, poziciją ir leisti atlikti tolimesnį patikrinimą. Atpažinimas veikia segmentuojant atvaizdus, kuriuose lašo operacijomis apdoroti elementai / objektai yra atskirti nuo fono ir nuo vienas kito. Galima išmatuoti daugiau kaip 50 charakteristikų, ir šie matavimai gali būti naudojami pašalinti ar palikti tam tikrus elementus / objektus išvesties vaizde.

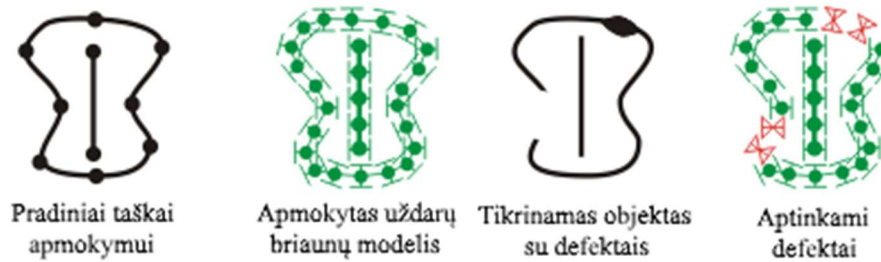
1D ir 2D matavimai.

1D ir 2D matavimo įrankius sudaro 1D matavimo įrankis; uždarų briaunų matavimo įrankis ir metrologijos įrankis.

Šie įrankiai dažniausiai naudojami gamybos kokybei įvertinti. 1D matavimo įrankyje naudojama vaizdo intensyvumo projekcija, kuria greitai nustatomos ir išmatuojamos tiesios kraštinės arba juostos kruopščiai apibrėžtame stačiakampio plote. Įrankis gali atlikti kelis kraštinių ir juostelių ar atstumų tarp jų 1D matavimus.

Uždarų briaunų patikrinimo įrankis skirtas tikrinti objektą, kurio briaunos yra nepertrauktos ir uždaros, t.y. uždaros kreivės formos, pvz., lankstūs gaminiai, klizai, hermetikai, arba jų tvirtinimo grioveliai. Šiuo įrankiu nustatomi ilgio, išdėstymo ir pločio skirtumai ir netolygumai (žr. 17 pav.).

Metrologijos įrankis yra skirtas 2D geometrinių matmenų ir tolerancijų matavimui. Žingsnis išskiria kraštines apibrėžtuose regionuose kuo geriau atitinkant geometrines savybes. Įrankiu galima kurti geometrines savybes iš matuojamų matmenų ar apibrėžiant matematiškai.



17 pav. Uždarų briaunų patikrinimo įrankis [15]

Geometrinės funkcijos apima lankus, apskritimus, taškus ir segmentus. Įrankis nustato leistinus nuokrypius pagal geometrinių savybių matmenis, pozicijas ir formas.

Simbolių ir teksto atpažinimas

Šiuo įrankiu nuskaitomas tekstas, kuris yra išgraviruotas, išėsdintas, markiruotas, atspausdintas, perforuotas arba štampuotas ant paviršiaus. Vienas iš nuskaitymo įrankių – OCR (taškų matricos) teksto nuskaitymas. Įrankis yra unikaliai sukurtas skaityti konkrečiai taškų matricos tekstą, kurį generuoja rašaliniai spausdintuvai. Įrankis geba nuskaityti bet kokių kampu pakrypusį, skirtingo kontrasto ir netolygaus fono OCR tekstą. Atpažįsta skyrybos ženklus ir tarpus. Jame yra iš anksto nustatyti šriftai, kuriuos galima redaguoti. Įrankis automatiškai nuskaityti kelias teksto eilutes, kuriose kiekviena eilutė gali būti kitokio šrifto.

Įprasto teksto atpažinimo įrankis yra pagrįstas sudėtinga technika, su geometrinėmis funkcijomis, leidžiančiomis greitai rasti ir skaityti tekstą, sudarytą iš vientisų simbolių, o patys simboliai yra gerai atskirti nuo fono ir vienas nuo kito.

Brūkšnių, 2D ir pašto kodų nuskaitymas.

Šis įrankis naudojamas 1D, 2D ir kitų sudėtinių identifikavimo kodų suradimui ir nuskaitymui. Įrankiu galima nuskaityti pasuktus, sumažintus ir pažeistus kodus sunkiomis apšvietimo sąlygomis. Įrankis gali suteikti informaciją apie kodo orientaciją, padėtį ir dydį. Be to, įrankis gali suteikti informaciją apie ANSI / AIM ir ISO / IEC klasifikavimo standartais paremto kodo kokybę. Kodai gali būti

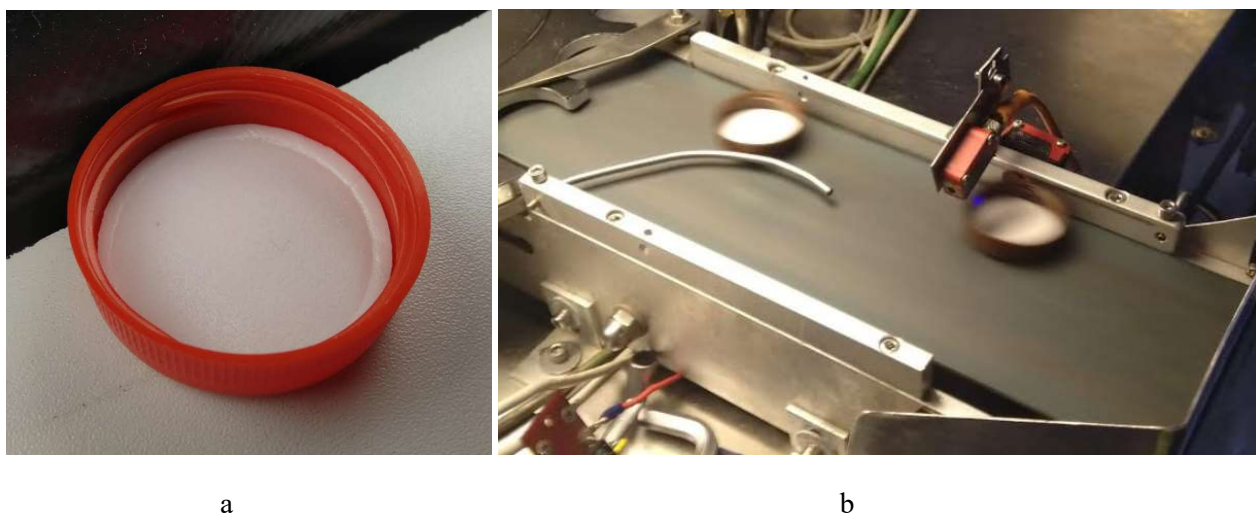
2. Vaizdo analizavimo sistemos projektavimas

2.1. Vaizdo analizavimo sistemos struktūra

Vaizdo analizavimo sistemos pagrindiniai elementai yra vaizdo kamera; šviesos šaltinis ir vaizdo apdorojimo įranga (kompiuteris).

Analizuojamasis objektas yra plastikinis kamštelis (žr. 18 pav., *a*), kuris gali būti septynių skirtingų spalvų – rudos, raudonos, oranžinės, geltonos, žalios, violetinės ir baltos. Kamštelio skersmuo – 44 mm, briaunos plotis – 1,5 mm, aukštis – 14 mm. Į kamštelio vidų yra dedama baltos spalvos, 1 mm storio tarpinė. Plastikinių kamštelių leistinos ribos prieš broką: briaunos aukštis gali kisti $\pm 0,3$ mm ribose, briaunos plotis $\pm 0,2$ mm ribose. Visos kamštelio briaunos apskritumo nuokrypa neturi viršyti 0,8 mm. Tai reiškia kamštelio briauna turi išlaikyti tikslią geometrinę formą, t.y. negali turėti jokių liejimo defektų ar briaunos trūkių, taip pat negali turėti jokių kitokios spalvos žymių. Kamštelio tarpinėje jokių būdu negali būti bet kokio dydžio kiaurymių ar skylių pro kurias būtų matomas kamštelio dugnas, taip pat negali būti jokių tarpinės svilimo ar kitokių degėsių defektų. Leidžiamos tarpinės įdubos iki 0,4 mm, tačiau jos neturi užimti didesnę plotą nei 4 % viso tarpinės ploto. Vis dėl to pageidautina tarpines su įdubomis, kurių plotas didesnis nei 5 mm², pripažinti brokuotomis siekiant atlikti pakartotiną broko patikrinimą žmogaus pagalba.

Kamštelių broko analizė atliekama ant važiuojančios konvejerio juostos. 18 paveikslo *b* dalyje pateikta konvejerio juostos fotografija prieš vaizdo analizavimo sistemos projektavimą. Konvejerio juostos greitis apytiksliai siekia 400 mm/s.



18 pav. Plastikinis kamštelis (a) ir konvejerio juosta (b)

Dėl didelio skirtingų spalvų kiekio, apimančio visą spalvų gamą – nuo baltos iki rudos (tamsaus atspalvio), turi būti naudojama spalvota kamera. Kadangi vienu metu analizuojamas vienas kamštelis, kurio skersmuo – 44 mm, o brokuotos sritys būna didesnės nei 1 mm (tarpinės skylės ir kiaurymės), didelės rezoliucijos (> 2 MP) kamera yra nereikalinga. Dėl didelio konvejerio greičio, lyginant su kamštelio dydžiu – 44 mm atstumas įveikiamas per 110 ms, reikalinga didelės spartos kamera – sparta didesnė nei 1 kadras per 110 ms (atsižvelgiant tik į kameros spartą, bet ignoruojant vaizdo analizavimo trukmę). Vaizdo analizavimo trukmė šiame etape dar nėra žinoma. Remiantis „Basler“ gamintojo siūloma produkcija [10], žemiausios rezoliucijos (640 × 480 px – 0,3 MP)

kamera pasižymi 751 kadru/s sparta. Pilnas kameros pavadinimas – „Basler acA640-750uc“. Išnaudojant visą kameros plotį kamštelio dydžiui (480:44), gaunamas 10,9 px : 1 mm arba 1 px : 91,7 μm tikslumas. Kadangi bet kokia brokuota kamštelio sritis būna didesnė nei 1 mm, tai ši sritis kameros vaizde užima didesnę nei 11 px plotą. Tai reiškia, kad gamintojo siūloma 0,3 MP rezoliucijos ir 751 kadro/s spartos kamera yra tinkama brokui analizuoti. Kameros specifikacija pateikta 4 lentelėje.

Kameroje yra du 24 V diskretiniai įėjimai / išėjimai ir du bendro naudojimo 5 V diskretiniai įėjimai/išėjimai, kurių paskirtis (įėjimas ar išėjimas) gali būti tarpusavyje keičiama. Kamštelių brokui analizuoti, 24 V įėjimas naudojamas kaip kameros trigeris, o 24 V išėjimas – kaip pneumatinio vožtuvo valdymas kamšteliiui nupūsti nuo konvejerio.

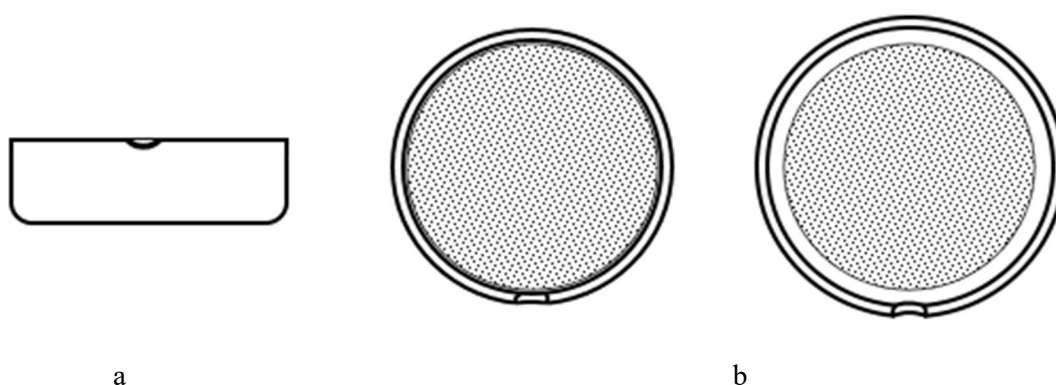
4 lentelė. „Basler acA640-750uc“ ploto skenavimo kameros specifikacija [10]

Jutiklio tipas	CMOS
Jutiklio dydis	3,1 mm × 2,3 mm
Užraktas (angl. <i>Shutter</i>)	Globalinis (angl. <i>Global shutter</i>)
Rezoliucija	640 px × 480 px
Kadrų dažnis	751 kadras/s
Spalvų spektras	Spalvota
Sąsaja	USB 3.0
Diskretinių įėjimų sk.	1
Diskretinių išėjimų sk.	1
Bendro naudojimo I/O sk.	2
Energijos sąnaudos	2,8 W
Korpuso dydis	29,3 mm × 29 mm × 29 mm
Svoris	80 g
Atsparumo klasė	IP30

Neatsiejamas kameros elementas yra jos objektyvas, kuris yra parenkamas atskirai, atsižvelgiant į situaciją. Pagrindinis parametras pagal kurį renkamasis objektyvas yra židinio nuotolis. Židinio nuotolis – tai atstumas nuo objektyvo optinio centro iki jutiklio matricos. Kuo židinio nuotolis yra mažesnis, tuo matymo kampas yra platesnis. Tačiau kuo matymo kampas platesnis, tuo didesnis vaizdo išgaubtumas. „Basler“ gamintojo siūlomų objektyvų modelių [20] židinio nutoliai yra intervale 4–50 mm. 4 mm židinio nuotolio objektyvo matymo kampas yra 42,0° × 32,1° (horizontaliai x vertikalčiai), o 50 mm židinio nuotolio objektyvo matymo kampas yra 3,5° × 2,6°. Atsižvelgiant į matymo kampo dydžius, kameros su objektyvu atstumas nuo kamštelio, jei laikoma, kad kamštelio dydis užima visą kameros matymo lauką, su 4 mm židinio nuotolio objektyvu būtų lygus 81 mm, o su 50 mm židinio nuotolio objektyvu atstumas būtų lygus 1 007 mm. Kamštelio tikrinimo atveju, naudinga naudoti didesnio matymo lauko (mažesnio židinio nuotolio) objektyvus, kadangi vaizdo išgaubtumas yra teigiamas efektas dėl apskritos kamštelio formos, vaizdo išgaubtumas leidžia matyti vidines kamštelio sienes, todėl smulkus kamštelio briaunos brokas yra lengviau aptinkamas. Pvz. smulkus briaunos paviršiaus pažeidimas gali būti neaptiktas naudojant siauro matymo lauko objektyvus, kadangi esant tik briaunos paviršiaus pažeidimui, kamštelio geometrinė forma yra nepakitusi, taigi būtų matoma taisyklinga nepakitusi kamštelio briauna ir

broko faktas nebūtų fiksuojamas. 19 paveiksle pateiktas šios situacijos pavyzdys. Taškiniu ornamentu pavaizduota tarpinė (kamštelio dugnas).

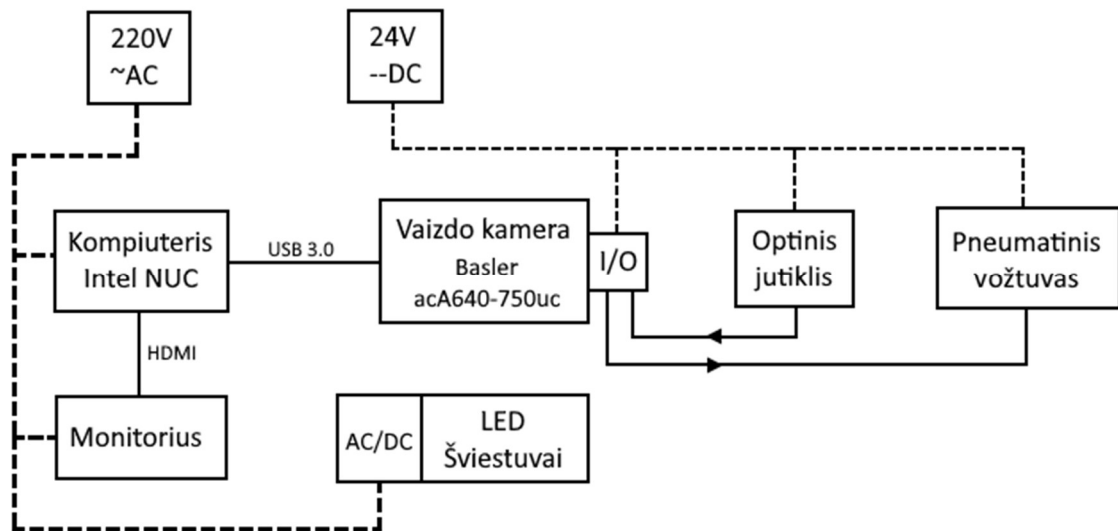
Naudoti mažiausio židinio nuotolio objektyvą netinka, nes kamera nutolusi 81 mm atstumu nuo kamštelio palieka mažai erdvės, kurioje gali skliti šviesos srautas tuo mažinant bendrą apšvietimo efektyvumą. Sekantis gamintojo siūlomas objektyvas yra su 6 mm židinio nuotoliu. Matymo kampas šiuo atveju yra $28,7^\circ \times 21,7^\circ$, o atstumas nuo kamštelio iki kameros siekia 121 mm. Išnaudoti visą kameros kadro plotį kamštelio dydžiui yra nepatikima dėl galimų kamštelio pozicijos nuokrypių konvejerio juostoje, nes kamštelis gali nepilnai patekti į kameros kadra. Paliekant 15 % rezervą kamštelio dydžiui kameros kadre gaunama, kad 480 px pločio kadras atitinka 50 mm. Po šių pakeitimų atstumas nuo kamštelio iki kameros objektyvo tampa 136 mm. Tai yra pakankamas atstumas naudojant šviesos šaltinius mažesnius nei 200 mm. Pasirinktas „Basler Lens C125-0618-5M“ objektyvo modelis.



19 pav. Plastikinio kamštelio matoma forma su skirtingais objektyvais: a – kamštelio vaizdas iš šono; b – kamštelio vaizdas iš viršaus su siauro matymo lauko objektyvu; c – kamštelio vaizdas iš viršaus su plataus matymo lauko objektyvu

Vaizdo analizė atliekama kompaktišrame (108 mm × 154 mm × 32 mm) minikompiuteryje „Intel NUC 8CCHK“ kompiuteryje su „Intel Celeron N3350“ dviejų branduolių, 2,40 GHz procesoriumi. Vaizdo apdorojimo ir analizavimo programinė įranga – gamintojo „Matrox Imaging“ programa – „Matrox Design Assistant 5.1“.

20 paveiksle pateikta visos sistemos struktūrinė schema, kurioje stačiakampiai blokai atstoja sistemos įrenginius (maitinimo šaltiniai ir el. įrenginiai), linijos – jungtis/kabelius tarp įrenginių. Punktyrinės linijos – maitinimo kabeliai, ištisinės linijos – signaliniai, duomenų perdavimo kabeliai su nurodytu tipu ar perdavimo kryptimi.



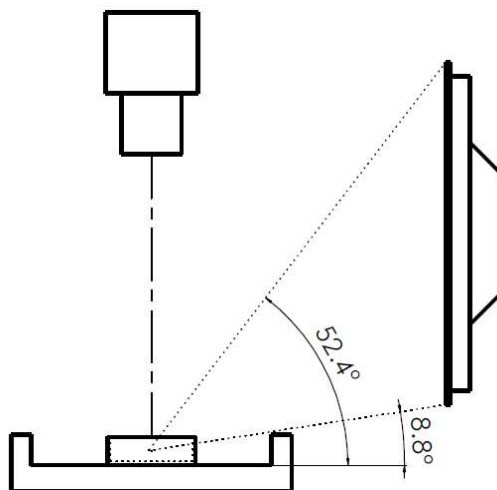
20 pav. Sistemos struktūrinė schema

2.2. Apšvietimo sistemos projektavimas

Vaizdo atpažinime, apšvietimo sistema, yra neatsiejama visos sistemos dalis. Esant netinkamam apšvietimui vaizdo atpažinimo kokybė gali kristi arba atpažinimo procesas nevykti visai, nes esant per mažai apšvietai vaizdinė informacija yra neprieinama arba jos nepakanka norint atskirti tam tikras atvaizdo dalis nuo nepageidaujamų.

Prieš pradėdant eksperimentuoti su vaizdo atpažinimo ir analizavimo įrankiais reikia suprojektuoti tinkamą apšvietimo sistemą. Atsižvelgiant į 1.4.1 skyrelyje pateiktą informaciją, pirmiausia (pirma apšvietimo sistemos versija) pasirinkta naudoti difuzinį pilnai apšviesto lauko apšvietimo tipą (žr. 11 pav.), nes šiuo apšvietimo tipu tolygiai apšviečiamas objektas ir apsaugoma nuo ryškių atspindžių. Iš trijų aprašytų variantų (žr. 1.4.1 skyrelis) buvo išbandytas tik žiedinis apšvietimo tipas (žr. 11 pav., c), nes jis yra universalus. Šis apšvietimo tipas leido pasiekti pilną viso kamštelio apšviestumą, tačiau nepavyko išvengti šviesos atspindžių nuo kamštelio briaunų lygaus paviršiaus (lygiagretaus kameros objektyvui). Dėl atsiradusių briaunos atspindžių prarandamas spalvos sodrumas, todėl yra apsunkinamas spalvos aptikimo procesas, mažėja jo efektyvumas. Taip pat šiuo apšvietimo būdu konvejerio juosta yra apšviečiama tuo pačiu šviesos srautu kaip ir kamštelis. Kuo konvejerio juostos spalva panašesnė į kamštelio spalvą ar kuo konvejerio juostos šviesumas panašesnis į kamštelio šviesumą, tuo vaizdo analizė yra apsunkinama, nes tampa sudėtinga atskirti kamštelio elementus nuo konvejerio juostos.

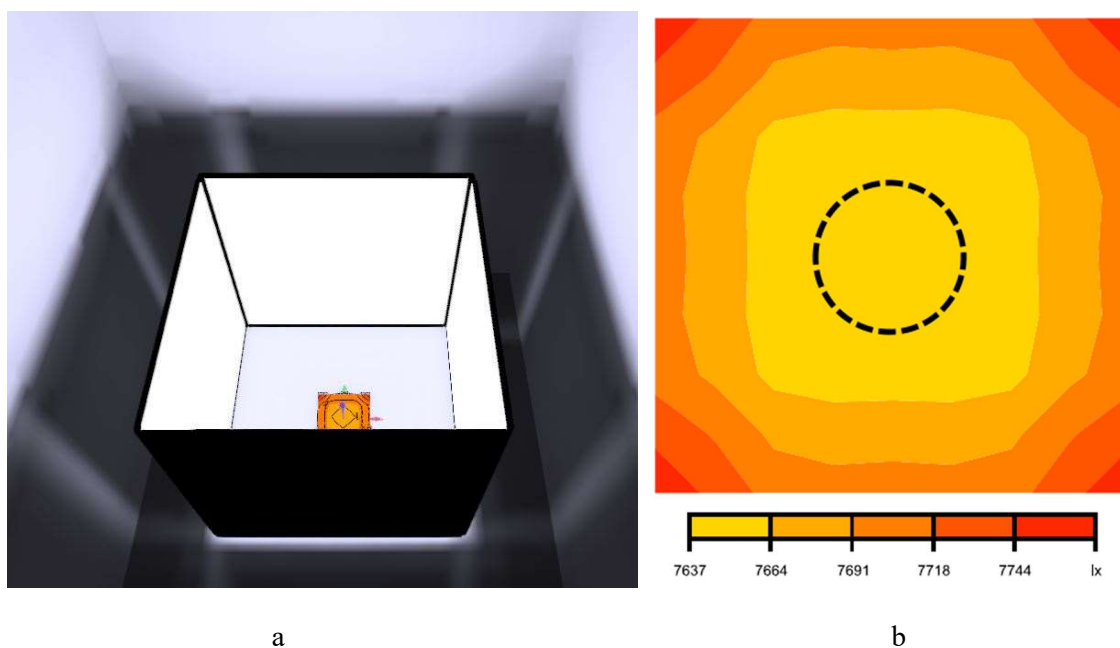
Įvertinus aprašytus trukumus, pasirinktas antrasis apšvietimo sistemos variantas (antroji apšvietimo sistemos versija), kuriame buvo eksperimentuojama su dviejų apšvietimo tipų kombinacija: tamsaus lauko ir dalinai šviesaus lauko apšvietimo tipais. Ši kombinacija gaunama naudojant vienos rūšies apšvietimo šaltinį – kvadrato formos panelinį difuzinį LED šviestuvą, kurio per visą šviečiantį plotą skleidžiama šviesa krenta nuo $8,8^\circ$ iki $52,4^\circ$ kampų (žr. 21 pav.). Tai reiškia, kad šviesos šaltinis atlieka tamsaus lauko apšvietimo ($< 45^\circ$) ir dalinai šviesaus lauko apšvietimo ($> 45^\circ$) funkcijas.



21 pav. Apšvietimo sistemos spindulių kritimo kampas

Taikant tokį apšvietimo būdą, yra išvengiama daugumos nepageidaujamų atspindžių nuo kamštelio lygaus paviršiaus briaunų, kadangi $8,8^{\circ}$ – $52,4^{\circ}$ kampo intervale šviesos šaltinio spinduliai nėra tiesiogiai atspindimi į kameros objektyvą. Dėl mažo spindulių kampo, atspindžių nuo konvejerio juostos taip pat sąlyginai nėra – atsispindi tik konvejerio juostos nelygumai ar smulkūs svetimkūniai.

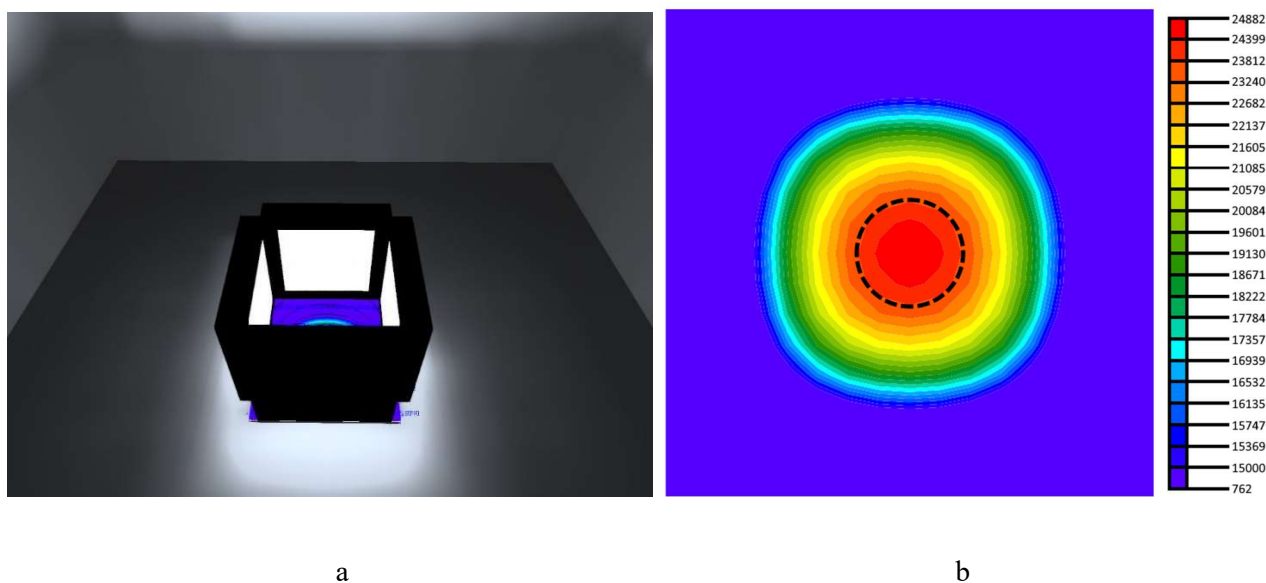
Kadangi kamštelis yra apskritas, tokia geometrija turi būti vienodai apšviesta, o tai reiškia, kad šviesos šaltiniai turi būti sudėti apskritimo forma aplink kamštelį ir nutolę vienodu atstumu. Apšvietimo sistemos projektuota programa „DIALux“. Šioje programoje sukuriama 3D erdvė, kurioje patalpinami realių parametrų šviesos šaltiniai (duomenys iš gamintojų puslapių), aprašomas skaičiuojamasis apšviečiamas plotas ir kt. Pirmas programos modelis sukurtas naudojantis realiai turimais šviesos šaltiniais – 4 vnt. 40 W 595×595 mm paneliniais LED šviestuvais (žr. 22 pav., a).



22 pav. Pirmasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b)

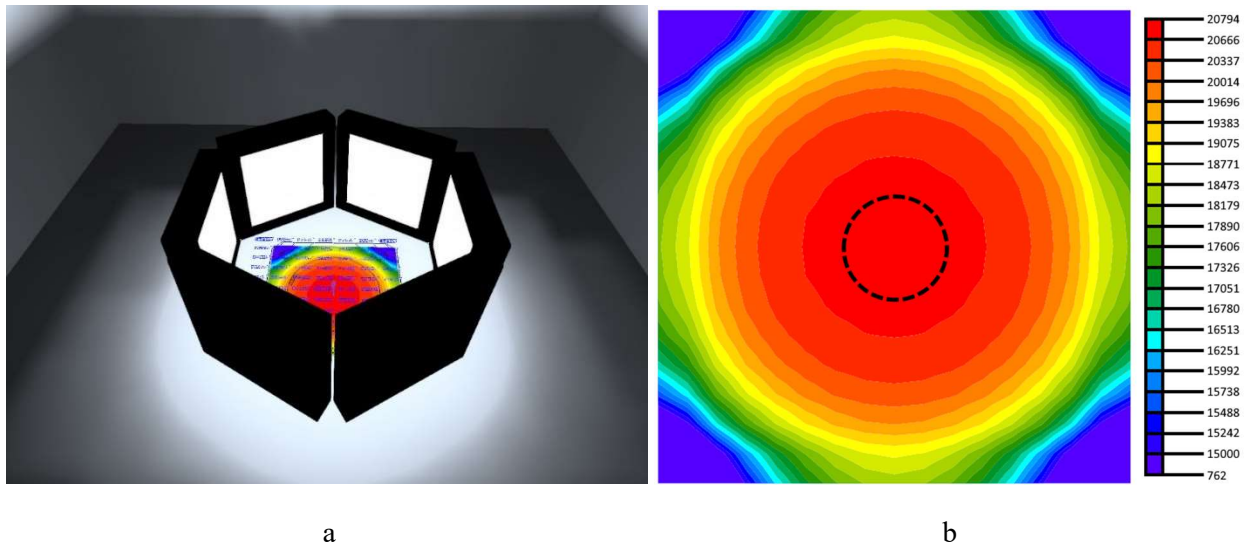
22 paveiksle pavaizduoti keturi „EUROLIGHT BERLIN“, 595 × 595 mm, 40 W, 4 000 K, 4 000 lm, šviestuvai, sudėti vienas prieš kitą ir sudarantys uždara kontūrą; 140 × 140 mm skaičiuojamasis plotas su spalvų skale. Šis modelis užima 3 540,25 cm² plotą, 0,21 m³ tūrį, suvartoja 160 W elektros energijos. Kaip matyti 22 paveikslo *b* dalyje kamščelio vietoje (pažymėta punktyriniu apskritimu) gautas apšvietos lygis patenka į 7 637–7 664 lx intervalą. Centrinėje ploto dalyje yra pats mažiausias apšvietos lygis, kuris stiprėja tolstant nuo centro. Atsižvelgiant į užimamą plotą ir tūrį, elektros energijos sąnaudas ir apšvietos lygį šis apšvietimo sistemos modelis nėra efektyvus, todėl kuriamas antras modelis, kuriame naudojami taip pat 4 vnt. LED panelinių šviestuvų, kurių parametrai: 12 W, 169 × 169 mm, 4 000 K, 1 020 lm, markė – „Ledvance DL SLIM SQ 155“. Modelis, sudarytas „DIALux“ programoje, pateiktas 23 paveikslo *a* dalyje.

Kaip ir pirmame variante šviestuvai yra sudėti vienas prieš kitą ir sudaro uždara kontūrą; skaičiuojamasis plotas su spalvų skale yra 200 × 200 mm. Šis modelis užima 285,61 cm² plotą, 0,005 m³ tūrį, suvartoja 48 W elektros energijos. 23 paveikslo *b* dalyje matyti „DIALux“ programos simuliacijos rezultatai. Kamščelio plote apšvietos lygis yra intervale 23 812–24 882 lx. Šiame modelyje centrinėje ploto dalyje yra didžiausias apšvietos lygis (24 882 lx), tačiau jis smarkiai krenta tolstant nuo centro – ties kamščelio šonu apie 23 812 lx. Skirtumas siekia 1 070 lx arba 4,3 %. Šis modelis yra žymiai pranašesnis už pirmąjį, kadangi užima 12 kartų mažesnę plotą, suvartoja 3 kartus mažiau elektros energijos ir kamščelį apšviečia 3 kartus stipresne šviesa. Tačiau iš 23 paveikslo *b* dalies matyti, kad apšviečiamas plotas nėra tikslios skritulio formos, o apšvietos lygis sparčiai mažėja tolstant nuo centro.



23 pav. Antrasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b)

Šiems trūkumams pašalinti antrasis modelis tobulinamas, pridodant 2 papildomus identiškus šviestuvus, sudarant šešiakampio formos uždara kontūrą (artėjama prie apskritimo formos). 24 paveikslo *a* dalyje pateiktas trečiasis apšvietimo sistemos modelis.



24 pav. Trečiasis apšvietimo sistemos modelis (a) ir gauti rezultatai „DIALux“ programoje (b)

Trečiajame modelyje šviestuvų modeliai ir skaičiuojamasis plotas tokie patys kaip ir antrame. Šeši šviestuvai užima 750,84 cm² plotą, 0,013 m³ tūrį, suvartoja 72 W elektros energijos. 24 paveikslo *b* dalyje matyti „DIALux“ programos simuliacijos rezultatai. Kamštelio plote apšvietos lygis yra intervale 20 760–20 794 lx. Kaip ir antrame modelyje, centrinėje ploto dalyje yra didžiausias apšvietos lygis (20 794 lx). Tačiau priešingai nei antrame modelyje, trečiame apšvietos lygis krenta nežymiai – ties kamštelio šonu apie 20 760 lx, skirtumas siekia tik 34 lx arba 0,16 %. Nors šis antrojo modelio patobulinimas užima 2,6 karto didesnę plotą, suvartoja 1,5 karto daugiau elektros energijos, o apšvietos lygis 13 % mažesnis, apšvietos lygis kamštelio plote yra visiškai tolygus – skirtumas tik 0,16 % lyginant su prieš tai buvusiu 4,3 %. Taip pat apšviestas plotas yra artimas idealiai skritulio formai (žr. 24 pav., *b*). Trečiasis modelis yra galutinis ir bus naudojamas kaip projektuojamos vaizdo analizavimo sistemos apšvietimo tipas.

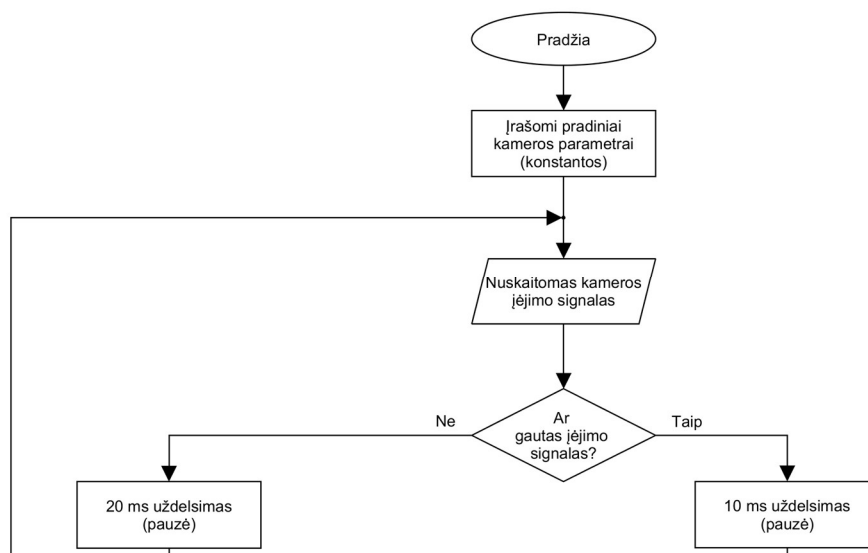
2.3. Vaizdo analizavimo programos algoritmas

Vaizdinės informacijos analizė vykdoma taikant „Matrox Design Assistant“ programinę įrangą (žr. 1.3.1 ir 1.5.2 skyrelius). Kamera gauto kamštelio vaizdo atpažinimo ir analizės programos kūrimas realizuojamas tiesiogiai kuriant algoritmą. Visas programos algoritmas yra pateiktas 1 ir 2 prieduose.

Programos veikimo principas yra pagrįstas pradinių užduočių vykdymu (iš karto po paleidimo) ir nuolatiniu ciklo kartojimu, kuriame vyksta visa vaizdo analizė. 25 paveiksle pateikta pirmoji programos algoritmo dalis, kurioje nustatomas pradinis žingsnis ir pradedamas begalinis ciklas.

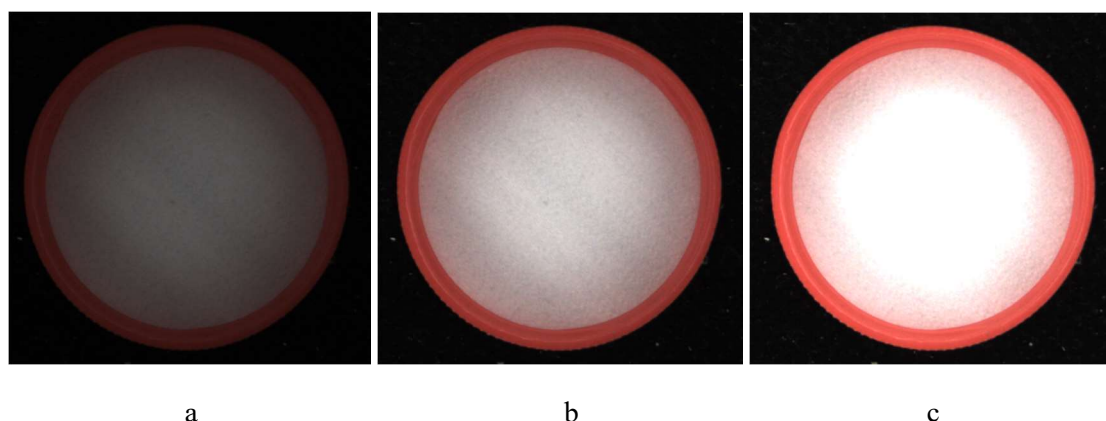
Programa prasideda nuo pradinių parametrų: ekspozicijos laiko, trigeriavimo režimo, nuotraukų kaupimo, nuotraukos rezoliucijos ir kt. įrašymo į kameros atmintį. Tuo yra užtikrinamas identiškų parametrų pastovumas, kiekvieną kartą iš naujo paleidžiant programą. Apsisaugoma nuo atsitiktinio parametrų atsistatymo į numatytuosius (arba gamyklinius).

Kadangi kamšteliai juda konvejeriu, ekspozicijos laikas proporcingai turi būti kuo mažesnis, siekiant išvengti išblukimo, tačiau turi būti pakankamai ilgas, kad į vaizdo jutiklį patektų užtektinai šviesos kokybiškai vaizdo analizei atlikti.



25 pav. Programos algoritmo 1 dalis

26 paveiksle yra pateiktas pavyzdys, kokią įtaką ekspozicijos laikas daro kadro šviesumui esant toms pačioms apšvietimo sąlygoms. Tinkamas ekspozicijos laikas kamštelių broko analizei yra nustatomas eksperimentiniu būdu, siekiant kad kamštelio tarpinė kadre būtų šviesi (lyginant 26 paveikslą *a* dalį su *b* dalimi), bet tuo pačiu ne per daug šviesi, kai prarandamas tarpinės paviršiaus detalumas (žr. 26 pav., *c*). Taigi eksperimentiniu būdu gautas ekspozicijos laikas yra 0,4 ms arba 400 μ s, esant apytiksliam 20 760 lx apšvietos lygiui.



26 pav. Kameros vaizdas prie skirtingų ekspozicijos laiko reikšmių: a – 200 μ s; b – 400 μ s; c – 800 μ s

Trigieravimo režimai gali būti tokie: išjungtas, programinis signalas, fizinis signalas, periodinis signalas. Jei trigieravimas išjungtas, tai reiškia, kad kamera fiksuoja naujus vaizdus (nuotraukas) nuolat vieną po kito. Programiniu signalu trigieruojama su tam skirtu trigierio žingsniu (programos bloku). Fizinis signalas kamera trigieruojama gavus fizinį jėjimo signalą į pačią kamerą. Periodiniu trigieriu kamera užfiksuoja vaizdą kiekvieną kartą po nustatyto laiko intervalo. Kadangi šioje sistemoje būtina užtikrinti kamštelio buvimą kameros matymo zonoje, tam naudojamas optinis jutiklis, kurio signalas atitinka fizinį kameros trigierį.

Nuotraukų kaupimo funkcijos esmė yra kaupti nuotraukas kameros vidinėje atmintyje. Siekiant išvengti nuotraukų praradimo rizikos, jei vaizdo apdorojimas ir analizė užtrunka ilgiau nei laiko

tarpas nuo vieno trigerio iki kito, t. y. jei analizės metu gautas naujas trigerio signalas, nuotrauka patalpinama kameros atmintyje, o kai analizavimas užbaigiamas, tuoj pat vėl pradedamas vidinėje atmintyje esančios nuotraukos apdorojimas. Šiame algoritme analizės trukmė (apytiksliai 50 ms) yra 4 kartus mažesnė nei laiko tarpas tarp trigerių (apytiksliai 200 ms), taigi nuotraukų kaupimas nenaudojamas.

Apdorojamų nuotraukų rezoliucija pasirenkama maksimaliai leidžiama – 640×480 px. Esant šiai rezoliucijai pasiekama gamintojo nurodyta greitaveika (751 kadras/s). Mažinant rezoliuciją greitaveika didėtų. Mažinti rezoliuciją siekiant didesnės spartos nėra prasmės, nes prarandama nuotraukos kokybė, kuri, išreikšta pikselių ir milimetrų santykiu, siekia apytiksliai 1 px – 0,09 mm. Šis santykis gaunamas padalijant realų kamštelio dydį (skersmuo – 44 mm) iš kamštelio dydžio nuotraukoje (skersmuo – 480 px).

Po pradinių kameros parametrų įrašymo toliau seka begalinio ciklo pradžia (žr. 25 pav.). Pirmas ciklo etapas yra fizinio kameros įėjimo signalo nuskaitymas. Šis žingsnis nėra tiesiogiai susijęs su prieš tai minėtu trigeriavimo režimu. Šiame etape tikrinama, ar įėjimo signalas yra / buvo suveikęs, ir ši informacija išsaugoma šiam etapui priklausančiame bito (bit arba bool) tipo kintamajame. Kitame etape įveikiama sąlyga, kurioje tikrinamas pastarasis kintamasis, t. y. ar buvo gautas įėjimo signalas. Jei signalo nebuvo, o tai reiškia neigiamą atsakymą, pereinama prie kito etapo – uždelsimo arba programos pauzės 20 ms. Programos pauzė naudojama siekiant išvengti suktukinio rakinimo [21] – (angl. *Spin locking*) algoritmo būsenos, kurioje reikiamo pasikeitimo (dažniausiai leidimo dirbti su sinchronizuota duomenų struktūra) laukiama uždareme cikle nuolat tikrinant esamą padėtį. Suktukinis rakinimas paprastai laikomas klaida, nes tokia gija laukdama eikvoja daug procesoriaus laiko, labai lėtindama kitų tuo metu vykdomų gijų darbą. Pavyzdžiui, jei tokia cikle laukiama vartotojo duomenų įvedimo, tokia programa stabdo kitas lygiagrečiai toje pat operacinėje sistemoje veikiančias programas. Po šio etapo seka paskutinis ciklo elementas – statuso žingsnis, apie jį plačiau aprašyta valdymo algoritmo aprašymo pabaigoje.

Jei įėjimo signalas buvo gautas, tuomet pereinama prie kito uždelsimo etapo (10 ms). Šis laiko intervalas skirtas pavėlinti kameros vaizdo gavimą programoje, nuo kameros realaus vaizdo užfiksavimo, norint išvengti prasilenkimo vykdant programą, jei tam tikri žingsniai nori naudoti vaizdą iš kameros, o kamera yra tik bepradedanti jį užfiksuoti.

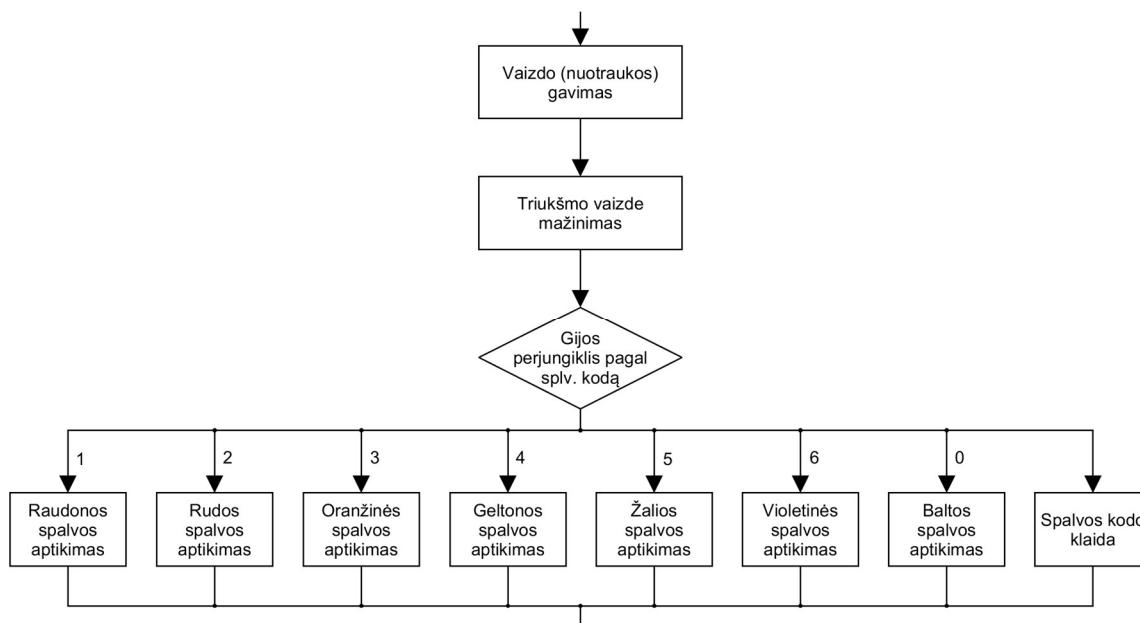
27 paveiksle pateikta antroji programos algoritmo dalis.

Šioje dalyje pradedama nuo vaizdo (nuotraukos) gavimo žingsnio, kuris seka po prieš tai aprašyto uždelsimo 10 ms žingsnio. Šiame žingsnyje į programą perkeliamas vaizdas iš kameros vidinės atminties. Toliau dirbama tik su vaizdu programoje, o kamera yra atlaisvinama.

Sekančiame žingsnyje iš kameros gautai nuotraukai yra mažinamas triukšmas. Ši pakoreguota nuotrauka bus naudojama daugelyje kitų žingsnių. Triukšmas mažinamas naudojantis erdvinio filtravimo operacija „smooth“ (žr. 1.5.1 skyrelį).

Sekantis žingsnis yra sąlyga su daugeliu variantų (gijų). Tai yra „switch case“ komandos atitikmuo daugelyje programavimo kalbų. Tikrinama sąlyga susideda iš keleto galimų variantų, čia yra tikrinamas sistemos operatoriaus (žmogaus) įvestas spalvos kodas kintamajame – skaičius nuo 0 iki 6. 0 – balta spalva, 1 – raudona, 2 – ruda, 3 – oranžinė, 4 – geltona, 5 – žalia, 6 – violetinė. Atitinkamai pagal įvestą kintamojo reikšmę, perjungiama į tam priskirtą giją su spalvos aptikimo

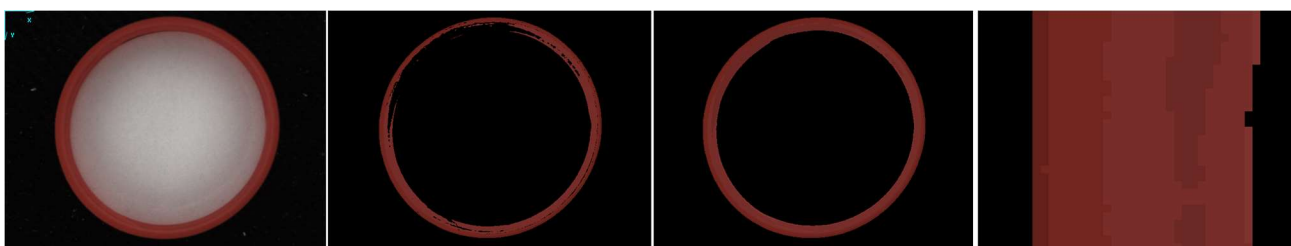
įrankiu. Jei dėl nenumatytų priežasčių kintamojo reikšmė yra didesnė negu 6, perjungiama į klaidos giją. Klaidos gijoje esantis žingsnis sugeneruoja klaidą, kuri nustoja vykdyti likusią programos dalį ir peršoka į statuso žingsnį pabaigoje.



27 pav. Programos algoritmo 2 dalis

Kiekvienoje gijoje (išskyrus klaidos giją) yra identiški spalvų aptikimo įrankiai, bet su skirtingais parametrais – skirtingais spalvų mėginiais (pavyzdžiais). Priežastis kodėl buvo nuspręsta palikti spalvos pasirinkimą žmogui, o ne naudotis visais spalvų pavyzdžiais viename įrankyje, plačiau aprašyta 2.4.1 skyrelyje. Parinktas „*Manhattan*“ spalvų aptikimo režimas, naudojant RGB spalvų skalę. Šiuo režimu gautas optimaliausias variantas, nes su kitais („*Euclidean*“ ar „*Mehalanobis*“) gaunami didesni ir neprognozuojami nuokrypiai (aptinkama per maža briauna arba per didelė), reikalauja daugiau spalvų mėginių ir kt. Vienai spalvai naudojami keli spalvų mėginiai su maža spalvos skirtumo tolerancija (leidžiamas skaitinis skirtumas nuo spalvos mėginio RGB reikšmių), nes tokiu būdu tiksliau gaunama kamštelio briaunos forma negu naudojant vieną spalvos mėginį su didele spalvos skirtumo tolerancija, kadangi kamštelio briauna nebūna visada vienodai tolygi, atsiradę atspalvio skirtumai gali nepateikti į spalvos tolerancijos ribas ir toks atspalvis nebūtų priimtas ir būtų klaidingai interpretuojama kamštelio briaunos kokybė.



























28 paveiksle pateikta kamštelio nuotrauka ir spalvos aptikimo įrankiu gauta nuotrauka, su per mažu ir su pakankamu kiekiu spalvos mėginių.



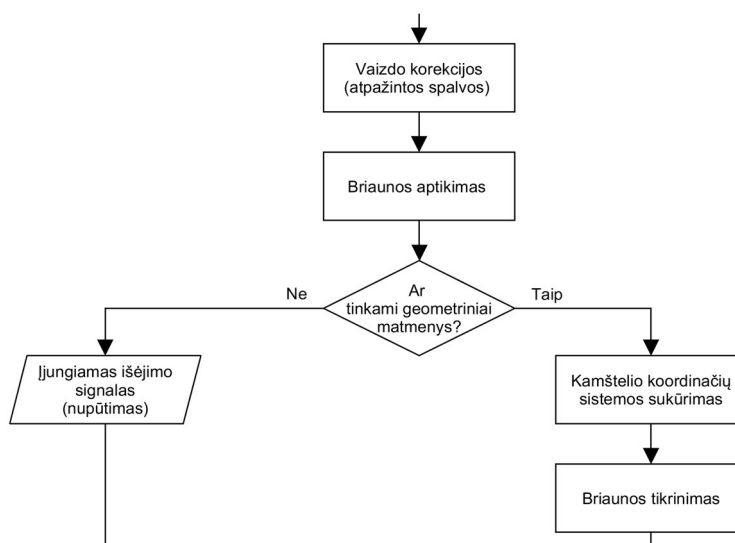
28 pav. Kamštelio spalvos aptikimo įrankiu gautų nuotraukų pavydžiai

28 paveiksle pradedant nuo kairės – pirmoje nuotraukoje nekoreguotas iš kameros gautas vaizdas; antroje – spalvos aptikimo įrankiu gauta nuotrauka su nepakankamu kiekiu spalvos mėginių; trečioje – spalvos aptikimo įrankiu gauta nuotrauka su pakankamu kiekiu spalvos mėginių; ketvirtoje – priartinta trečios nuotraukos dalis. 5 lentelėje pateikti visi naudojami spalvos mėginiai.

5 lentelė. Spalvos atpažinimo įrankio spalvų mėginių RGB reikšmės

Spalva	Nr.	R	G	B	Pavyzdys
Raudona	1	194	74	45	
	2	201	81	55	
	3	188	78	60	
	4	189	88	74	
Ruda	1	92	73	44	
	2	103	90	65	
	3	109	81	49	
	4	82	61	35	
	5	79	67	58	
Oranžinė	1	214	125	58	
	2	224	133	73	
	3	223	132	42	
	4	192	112	43	
Geltona	1	225	213	39	
	2	236	216	39	
	3	202	188	38	
Žalia	1	41	120	39	
	2	53	109	48	
	3	65	127	68	
	4	54	134	52	
Violetinė	1	95	79	160	
	2	88	71	157	
	3	104	100	157	
	4	114	105	171	
	5	90	84	133	
	6	75	66	139	

29 paveiksle pateikta trečioji programos algoritmo dalis.



29 pav. Programos algoritmo 3 dalis

Ši dalis prasideda nuo vaizdo (nuotraukos) korekcijų taikomų spalvos atpažinimo įrankio sugeneruotai nuotraukai. Iš viso yra paeiliui atliekamos 4 vaizdo korekcijos:

- spalvotos nuotraukos projekcija (konvertavimas) į nespalvotą;
- morfologinė erozijos operacija;
- paprastas slenkstinis filtravimas;
- morfologinė ploto uždarymo operacija.

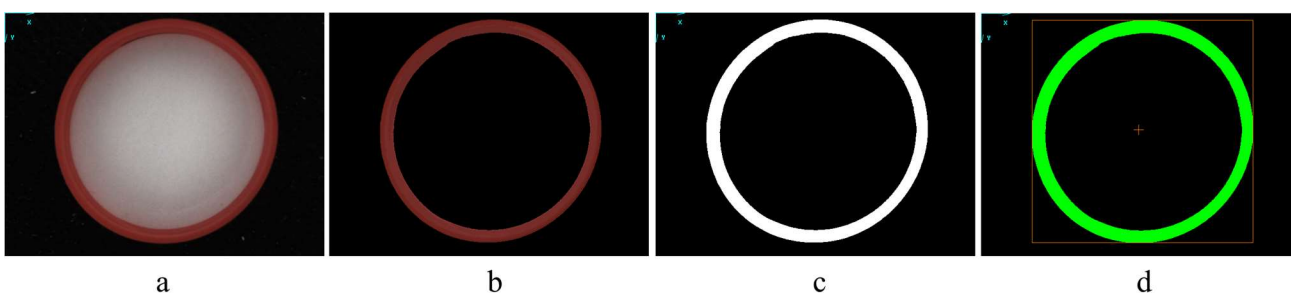
Pirmoji korekcija yra spalvotos nuotraukos konvertavimas į nespalvotą, tolimesniems analizavimo žingsniams spalvos bus nebereikalingos, nes spalvos aptikimo įrankiu buvo išskirta tik pagal spalvą aptikta kamštelio dalis, ko pasėkoje nuotraukoje egzistuoja tik toji spalva ir juodos spalvos fonas.

Antrąją erozijos operacija (žr. 1.5.1 skyrelį) yra pašalinami nepageidaujami smulkūs objektai ar taškai, kurie gali tiesiogiai pakenkti vėlesniuose analizavimo etapuose teisingai interpretuoti broko buvimo faktą (paskelbiamas broko faktas kokybiškam kamšteliiui). Šioje aplikacijoje iš viso atliekamos trys iteracijos (atliekama tris kartus), o struktūrinio elemento dydis yra 2×2 px stačiakampis. Šio elemento esmė yra patikrinti ar jo plote yra pikselių skirtumas, jei yra – atliekama nurodyta operacija, šiuo atveju erozija, taigi šviesesni pikseliai yra paverčiami tamsiais. Jei pikselių skirtumo nėra, tuomet jokia operacija neatliekama.

Trečioji operacija – paprastas slenkstinis filtravimas, kuomet atliekamas nuotraukos binarizavimas, t. y. nuotraukos spalvų konvertavimas į juodą ir baltą. Parinkta slenkstinė pikselio reikšmė nurodo, kad visos pikselių reikšmės, kurios yra mažesnės už slenkstinę virsta juoda spalva, o visos pikselių reikšmės, kurios yra didesnės už slenkstinę virsta balta spalva. Nagrinėjamu atveju pikselio slenkstinė reikšmė pasirinkta 10 – nežymūs tamsūs pikseliai (turintys mažesnę reikšmę už 10) yra ignoruojami ir paverčiami į reikšmę lygią 0. O visi kiti likę pikseliai paverčiami į reikšmę lygią 255 (baltą).

Paskutinė operacija yra ploto uždarymo operacija – ja yra pašalinami juodi plotai baltame fone (kamštelio briaunoje), t. y. juodas plotas užpildomas jį ribojančia balta spalva. Ploto dydis pasirinktas 1500. Šios korekcijos nebuvo pradiniu projektavimo etapu, o buvo įdėta tik kaip problemos sprendimo būdas eksperimentavimo metu (žr. 2.4.1 skyrelį). Rezultatas po visų keturių korekcijų pateiktas 30 paveikslo dalyje c.

Sekantis žingsnis vadinasi „Briaunos aptikimas“. Šiame žingsnyje, naudojantis prieš tai aprašytą korekcijų gautu atvaizdu, yra surandamas vienetinis elementas ir jo geometriniai duomenys, kuris traktuojamas kaip viso kamštelio briauna. Tai atliekama naudojantis lašo operacija. Šioje aplikacijoje ieškoma elementų kurių plotas viršija 29 000 px, kadangi iš eksperimentų gauta, jog kamštelio briaunos plotas būna artimas 32 000 px, taigi tai yra pirmas broko aptikimo etapas. Jeigu briauna yra labai smarkiai pažeista, t. y. dalis kamštelio neišlieta, gautas briaunos plotas bus mažesnis nei 29 tūkst. px, ir joks elementas atitinkantis sąlygą nebus aptiktas.



30 pav. Programos algoritmo 3 dalies žingsnių gauti rezultatai: a – kameros vaizdas; b – spalvos aptikimo įrankio vaizdas; c – po vaizdo korekcijų; d – aptiktas briaunos elementas

Be ploto, dar yra randami du papildomi geometriniai parametrai – elemento centro koordinatės X reikšmė ir Y reikšmė. Šie parametrai suteikia informaciją apie kamštelio padėtį ir bus naudojami kaip koordinatinių sistemos pradžios taškas kituose analizavimo žingsniuose. Aptiktas elementas atvaizduotas žalia spalva ir jo aprėpties langelis bei centras oranžine spalva (žr. 30 pav., d).

Po briaunos aptikimo seka sąlygos žingsnis, kurioje tikrinamas faktas ar briaunos aptikimo žingsnyje ploto sąlyga buvo tenkinta ar ne. Jei nebuvo tenkinama, pereinama į išėjimo valdymo žingsnį. T. y. įjungiamas išėjimo signalas, kuris reiškia kamštelio nupūtimą nuo konvejerio – atmetimą kaip brokuoto. Jei ploto sąlyga buvo tenkinama, tuomet pereinama prie kamštelio koordinatinių sistemos sukūrimo žingsnio. Šiame žingsnyje, kaip prieš tai minėta, iš gautos elemento X ir Y reikšmių suformuojama nauja koordinatinių sistema, kurioje pradžios taškas (0,0) yra būtent šios X ir Y reikšmės.

Paskutinis šios dalies žingsnis yra briaunos tikrinimas. Briaunų tikrinimas atliekamas su uždaru briaunų patikrinimo įrankiu (žr. 1.5.2 skyrelį ir 17 pav.). Šio įrankio veikimo principas pagrįstas apmokymo modelio sukūrimu ir jo taikymu tikrinamiems objektams. Apmokymo modelis sukuriamas sudedant taškus ant matomos briaunos (žr. 31 pav., a). Taškai yra sujungiami vienas su kitu polilinija sudarant išžėstintų taškų modelį. Ant polilinijos yra sugeneruojamos stačiakampės paieškos zonos (žr. 31 pav., b), kurių parametrai yra laisvai keičiami. Atlikti eksperimentai rodo, kad po korekcijų gautame atvaizde to pačio kamštelio briaunos plotis gali varijuoti nuo 22 px iki 37 px (dėl sriegio ant vidinių kamštelio sienelių). Taigi atsižvelgiant į tai, paieškos zonos plotis pasirinktas 50 px, su pakankamu rezervu nuo maksimalaus galimo briaunos pločio; aukštis – 20 px;

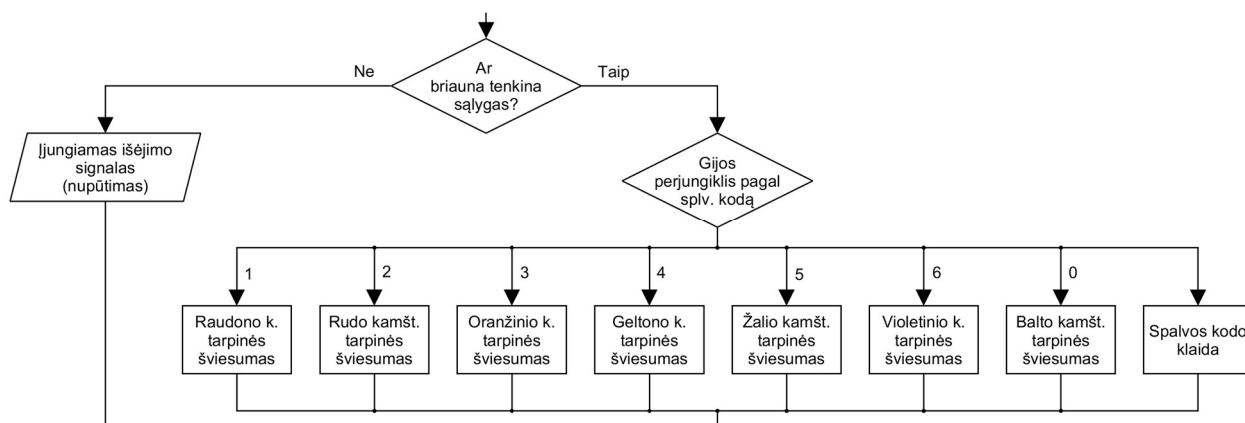
atstumas tarp paieškos zonų – 20 px, esant didesniai atstumui, smulkūs briaunos pažeidimai gali atsidurti tarp zonų ir būti neaptikti. Esant kuo mažesniai atstumui, didėja paieškos zonų skaičius, kuris ilgina analizavimo trukmę. Nominalus briaunos plotis apskaičiuojamas automatiškai – gautas 28,9 px. Nominalaus pločio neigiama bei teigiama tolerancijos parinktos po 10 px. Tai reiškia, briaunos pločiai, kaip tinkami, būtų priimami nuo 19 iki 39 px pločio. Paieškos zonos nuokrypis nuo nominalios pasirinktas 18 px, kamšteliai nėra visuomet idealiai apskriti, todėl briaunai esant ne toje pačioje vietoje kaip apmokymo modelyje sukeltų problemų ir gera briauna būtų pripažįstama kaip brokuota.



31 pav. Uždarytų briaunų patikrinimo įrankio apmokymo modelio kūrimas: a – taškų sudėjimas; b – paieškos zonų nustatymas

32 paveiksle pateikta ketvirtoji programos algoritmo dalis.

Pirmasis šios dalies žingsnis yra briaunos tinkamumo sąlygos patikra. Tai yra antras ir paskutinis etapas kamštelio briaunos broko tikrinime. Jei po briaunos tikrinimo etapo (iš algoritmo 3-ios dalies) gauta netinkama briauna, pereinama prie išėjimo valdymo žingsnio. Kaip ir trečiojoje algoritmo dalyje, įjungiamas išėjimo signalas, kuris reiškia kamštelio nupūtimą nuo konvejerio – atmetimą kaip brokuoto. Jei briaunos tinkamumo sąlyga buvo tenkinta, tuomet pereinama prie, analogiško antrajai algoritmo daliai, gijų perjungiklio pagal spalvos kodą. Tik šiuo atveju kiekvienoje gijoje yra ne spalvos aptikimo įrankiai, o šviesumo lygio tikrinimo įrankiai. Sulig šia vieta baigiasi kamštelio briaunos analizė ir prasideda kamštelio tarpinės analizė. Nors tarpinė yra baltos spalvos, tačiau tarpinės kraštuose yra atspindima kamštelio briaunos spalva, taigi kiekviena tarpinė turi kamštelio spalvos atspalvį. Dėl šios priežasties šviesumui tikrinti naudojami įrankiai su skirtingais parametrais kiekvienai spalvai.



32 pav. Programos algoritmo 4 dalis

Šviesumo tikrinimo įrankyje naudojama nuotrauka iš triukšmo mažinimo žingsnio pirmoje algoritmo dalyje. Šviesumui tikrinti būtina naudoti nespaltvotą nuotrauką, todėl naudojama nuotraukos šviesumo juosta (angl. *Luminance band*), kuri yra nespaltvota. Šviesumas tikrinamas ne

visame nuotraukos plote, o tik aprašytoje srityje, kuri yra skritulio formos. Šio srities centras nustatytas pagal kamštelio geometrijos tikrinimo žingsnio gautas X ir Y koordinatas. Kadangi kokybiška tarpinė visada būna tokio pat dydžio (apie 402 px skersmens), srities skersmuo nustatomas šiek tiek mažesnis nei tarpinės realus dydis – 385 px, siekiant išvengti neteisingo šviesumo apskaičiavimo įtraukiant nepageidaujamą kamštelio briaunos kraštą, nes tarpinė turi dešimtųjų milimetro dalių laisvumą. Taip pat dėl idealios apskritimo formos kamštelio nebuvimo, kamštelio centras gali būti blogai apskaičiuotas, ir šviesumo tikrinimo sritis perstumta į kraštą, nuo realaus centro. Taigi tikrinimo srities skersmuo yra apytiksliai 16 px mažesnis nei realus tarpinės skersmuo ($\sim 402 - 16 = \sim 385$). Šviesumo tikrinimo įrankiu apskaičiuojama vidurkinė, mažiausia ir didžiausia pikselių reikšmės, pikselių kontrasto reikšmė ir pikselių standartinė deviacija. Tarpinės šviesumo tikrinimo atveju naudojamosi tik vidurkine pikselių reikšme. Tuo pačiu šiame įrankyje galima nustatyti slenkstinę reikšmę, kurią pvz. viršijus rezultatas priimamas kaip tinkamas, nepasiekus – priimamas kaip netinkamas. Kadangi nuo kamštelio spalvos priklauso ir tarpinės šviesumas (dėl šviesos atspindžio, nuo kamštelio sienelių į tarpinę) – balto kamštelio tarpinė yra šviesiausia, o rudo kamštelio tarpinė yra tamsiausia. Visos slenkstinės reikšmės pateiktos 6 lentelėje. Visos slenkstinės reikšmės yra apytiksliai per 15 vnt. mažesnės už tikrąsias kokybiškų tarpinių šviesumo reikšmes.

6 lentelė. Šviesumo tikrinimo įrankio slenkstinės pikselių reikšmės

	Raudona	Ruda	Oranžinė	Geltona	Žalia	Violetinė	Balta
Šviesumo slenkstinė reikšmė	160	145	170	170	160	160	190

33 paveiksle pateikta penktoji programos algoritmo dalis.

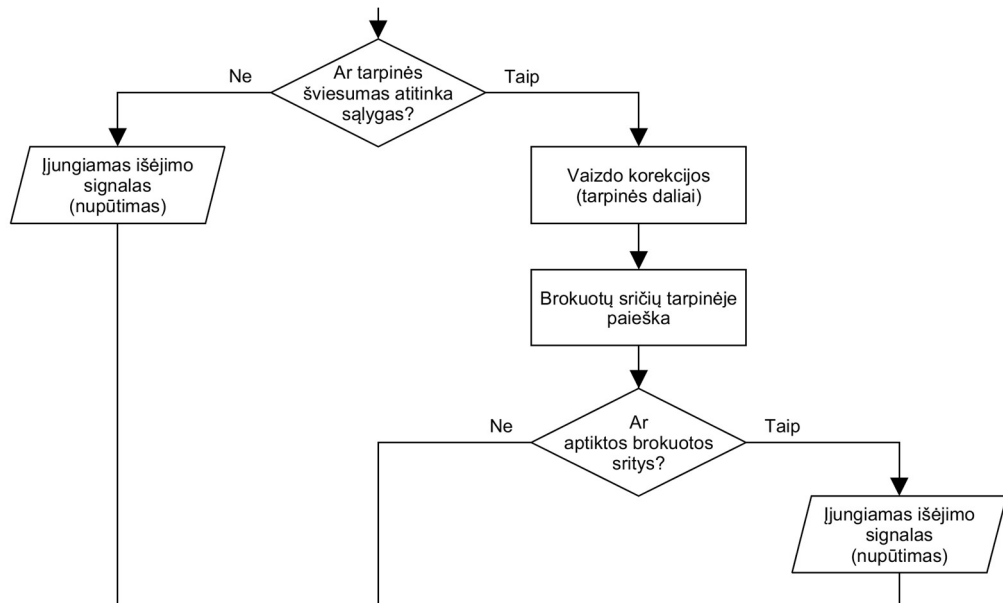
Ši dalis prasideda nuo tarpinės šviesumo sąlygos tikrinimo. Tai yra pirmas kamštelio tarpinės broko analizavimo etapas. Jei tarpinės šviesumas netenkina sąlygos – vidurkinė pikselių reikšmė mažesnė nei slenkstinė, pereinama vėl prie išėjimo valdymo žingsnio. Įjungiamas išėjimo signalas, kuris reiškia kamštelio nupūtimą nuo konvejerio – atmetimą kaip brokuoto. Šiuo etapu užtikrinama, kad kamšteliai be jokios tarpinės arba su labai dideliu tarpinės pažeidimu bus nepraleisti kaip tinkami.

Jei šviesumo sąlygos tenkinamos pereinama prie vaizdo (nuotraukos) korekcijų žingsnio. Korekcijos taikomos tai pačiai nuotraukai naudojamai šviesumo tikrinimo įrankyje.

Iš viso taikomos šešios korekcijos, kurios vykdomos paeiliui:

- kraštinių aptikimas;
- išlyginimo operacija;
- erozijos operacija;
- paprastas slenkstinis filtravimas;
- morfologinė uždarymo operacija;
- morfologinė atidarymo operacija.

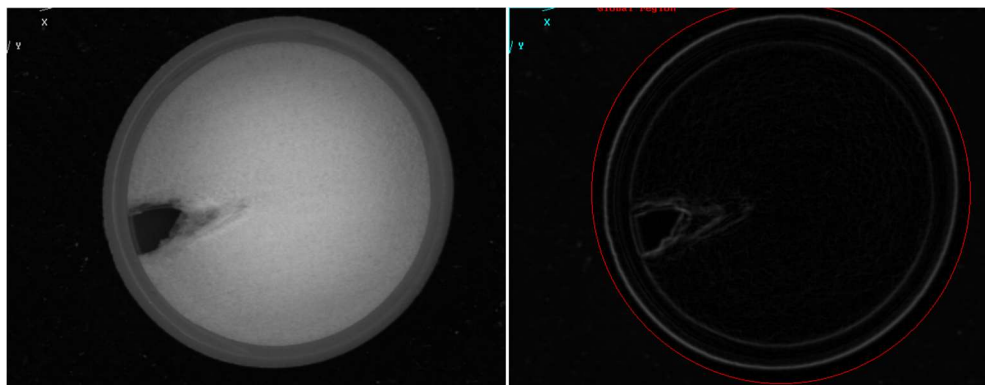
Dauguma korekcijų buvo pritaikytos kaip problemų taisymas eksperimentų metu (žr. 2.4.2 skyrelį).



33 pav. Programos algoritmo 5 dalis

Pirmoji korekcija – tai kraštinių aptikimo operacija. Šios operacijos principas pagrįstas pikselių reikšmių pasikeitimo išryškiniu, t. y. kuo didesnis skirtumas tarp gretimų pikselių, tuo šviesesnė pikselių reikšmė priskiriama išėjimo nuotraukoje. Jei nėra jokio gretimų pikselių pasikeitimo, priskiriama juoda (žemiausia) pikselių reikšmė (žr. 34 pav.).

Antra atlikta korekcija – tai išlyginimo operacija (angl. *Window leveling*), kai tam tikras nuotraukos pikselių verčių diapazonas yra ištempiamas į platesnį diapazoną arba suglaudintas į siauresnį diapazoną. Pikseliams, kurie nepatenka į diapazoną, priskiriamos atitinkamai minimali arba maksimali diapazono reikšmės. Šios aplikacijos atveju vaizde po pirmos korekcijos pikselių diapazonas nuo 15 iki 50 yra išplečiamas į pilną diapazoną nuo 0 iki 255. Šitokiu būdu yra paslepamos nežymios ir nepageidaujamos aptiktos kraštinės (< 15) ir visi pikseliai šviesesni nei 50 turi tokią pačią reikšmę – 255. Visi 15–50 reikšmės pikseliai yra išryškunami. Pvz. originali pikselio reikšmė, lygi 30, virsta į 219.



34 pav. Kraštinių aptikimo operacijos veikimo pavyzdys

Kairėje vaizdas prieš korekcijas, dešinėje vaizdas po kraštinių aptikimo korekcijos.

Trečia korekcija – tai erozijos operacija. Atlieka tokias pačias funkcijas, kaip ir minėta trečiojoje algoritmo dalyje, tačiau šį kartą tėra tik viena iteracija. Siekiama pašalinti smulkias dėmes tarpinėje, kurios nėra brokas. Su didesniu iteracijų kiekiu iškyla grėsmė netekti smulkaus tarpinės broko informacijos.

Ketvirta korekcija – tai paprastas slenkstinis filtravimas. Taip pat analogiškas korekcijai trečioje algoritmo dalyje. Slenkstinė reikšmė – 15.

Priešpaskutinė korekcija yra morfologinė uždarymo operacija. Šia korekcija yra panaikinamos smulkios juodos dėmes, kurias riboja balta spalva, jas užspalvinant fonine, balta spalva. Tuo siekiama išvengti įtrūkimų iššęstinėse formose, nes tai gali sukelti problemų vėlesniame brokuotų elementų paieškoje – per maži elementai yra ignoruojami, o didelis elementas su pilnais įtrūkimais yra tolygu keletui mažų elementų. Atliekamos dvi iteracijos, struktūrinio elemento dydis – 4×4 px.

Paskutinė, šešta korekcija – morfologinė atidarymo operacija. Šia korekcija atliekama priešingybė prieš tai buvusiai korekcijai. Kadangi struktūrinis elementas yra 5×5 px dydžio. Visos baltos sritys siauresnės nei 5 px bei supamos juoda spalva bent iš dviejų pusių yra pašalinamos. Tuo siekiama pašalinti tarpinės kraštines ir palikti tik brokuotas sritys.

Sekantis penktos algoritmo dalies žingsnis yra brokuotų sričių paieška tarpinėje. Naudojamas analogiškas briaunos aptikimui įrankis – lašo įrankis. Šį kartą šiuo įrankiu siekiama rasti visus elementus kurių plotas viršija 40 px, brokuotų sričių ieškoma vaizde po korekcijų. Mažesni nei 40 px elementai traktuojami kaip nereikšmingi elementai, atsitiktinai vis dar likę po visų korekcijų. Brokuota sritis tarpinėje įprastai užima gan didesnę plotą.

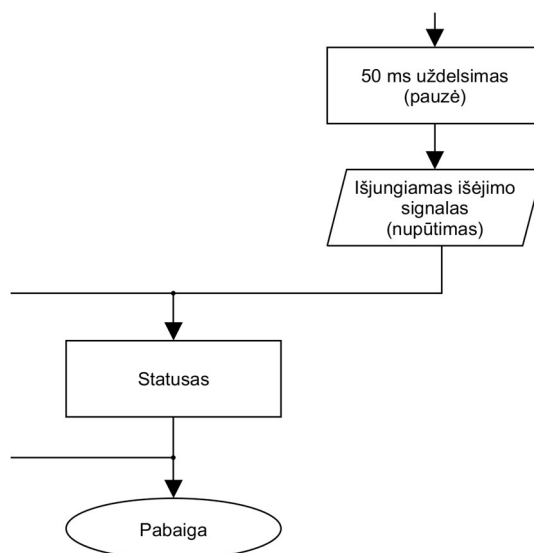
Paskutinis šios dalies žingsnis yra sąlyga, kurioje tikrinama ar buvo aptiktas bent vienas brokuotas elementas. Jei buvo rastas – įjungiamas išėjimo signalas, kuris reiškia kamštelio nupūtimą. Jei nerastas – reiškia kamštelio tarpinė yra tinkama ir pereinama į tolimesnius algoritmo etapus aprašytus kitoje dalyje. Šis etapas yra antras ir paskutinis kamštelio tarpinės broko analizėje. Tuo pačiu tai yra paskutinis brokavimo etapas, jei vykdant programą, prieita iki šios dalies, reiškia kamštelis yra kokybiškas ir išėjimo signalas, skirtas pašalinti kamštelį, niekada nebuvo įjungtas.

35 paveiksle pateikta paskutinė programos algoritmo dalis.

Po visų analizavimo žingsnių prieinama prie 50 ms uždelsimo (pauzės) žingsnio. Šis laikas yra skirtas išlaikyti išėjimo signalą (kamštelio nupūtimą) 50 ms. Po šios pauzės seka išėjimo signalo išjungimas. Jei analizės metu signalas niekada nebuvo įjungtas, šiuo žingsniu nevykdoma jokia naudinga funkcija, t.y. išjungiamas išjungtas signalas, įrašoma reikšmė *false* į būseną *false*.

Paskutinis algoritmo žingsnis – statusas. Šis žingsnis yra galutinis ciklo etapas, į jį sueina visos gijos. Jo atitikmuo programavimo kalbose yra „*try...catch*“ komanda. Visi programos etapai yra atliekami „*try*“ dalyje, tačiau įvykus bet kokie klaidai vykdant programą, ši baigiama vykdyti ir peršokama į „*catch*“ dalį, šiuo atveju statuso žingsnį.

Taip pat statuso žingsnyje galima išreikšti ir atvaizduoti visų žingsnių būsenas bet kokioje vartotojo sąsajoje.



35 pav. Programos algoritmo 6 dalis

Po statuso žingsnio ciklas yra kartojamas iš naujo ir vykdomas begalinį skaičių kartų.

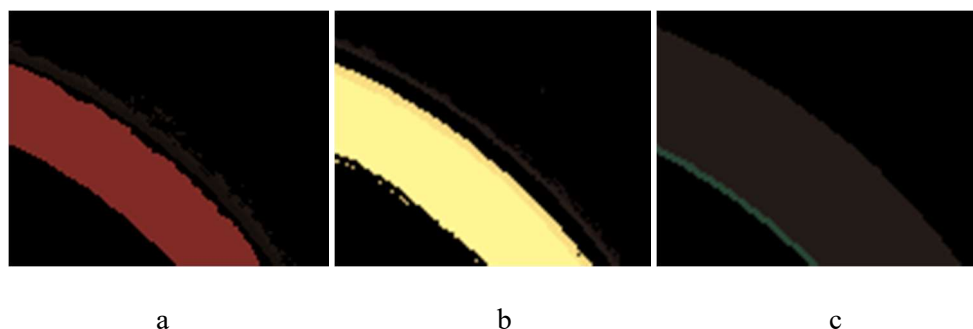
2.4. Programos kūrimo metu iškilusios problemos ir jų šalinimas

Kamštelių broko analizės programos kūrimo metu kilo įvairių tipų problemų. Visos problemos susiję su klaidingu kokybiškų kamštelių pripažinimu brokuotais, dėl pradiniu metu nenumatytų atsitiktinių kamštelio požymių. Keletas problemų aprašomi sekančiuose skyreliuose.

2.4.1. Spalvos aptikimo įrankio problemos

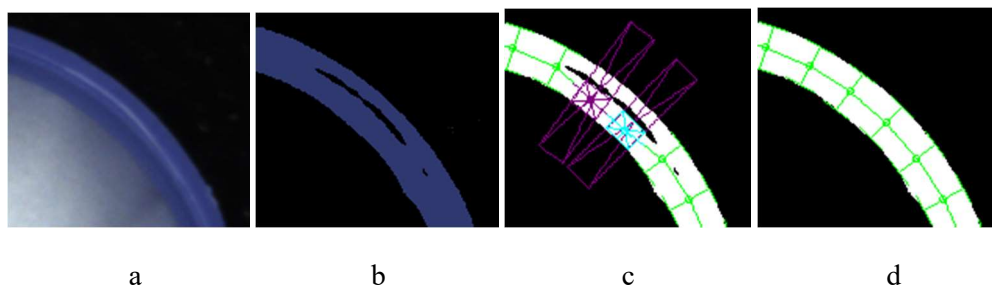
2.3 poskyryje aprašyta, kad spalvos atpažinimo įrankis – tai pirma vaizdo analizavimo priemonė (prieš ją seka vaizdo apdorojimo įrankis – triukšmo mažinimas vaizde). Viena iš iškilusių problemų yra susijusi su visų kamštelio spalvų mėginių talpinimu viename spalvos įrankyje. Dirbant su raudonos, oranžinės ar geltonos spalvos kamšteliais, tamsūs jų kraštai aptinkami kaip ruda spalva. Dėl šios problemos neįmanoma aptikti tinkamos kamštelio geometrinės formos su tam skirtu įrankiu (žr. 36 pav.)

Šiai problemai pašalinti nuspręsta naudoti atskirus spalvos aptikimo įrankius kiekvienai spalvai, o spalvos kodo pasirinkimas paliekamas sistemos operatoriumi.



36 pav. Klaidingas spalvų aptikimas. a – raudono kamštelio; b – geltono kamštelio; c – rudo kamštelio

Kita iškilusi problema yra susijusi su kamštelio briaunos netolygumu, dėl kurio atsiranda atspindys (žr. 37 pav., *a*). Kamštelio dalies su atspindžiu atspalvis yra šviesesnis už tikrąją kamštelio spalvą, todėl spalvos aptikimo įrankiu ši dalis nėra aptinkama (žr. 37 pav., *b*).

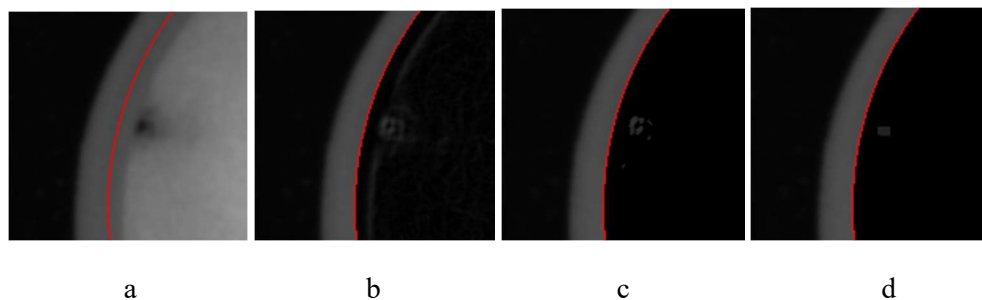


37 pav. Spalvos aptikimo įrankio problema: a – kameros kadro dalis; b – spalvos aptikimo įrankio kadro dalis; c – briaunos tikrinimo įrankio kadro dalis atvaizduojanti problemą; d – briaunos tikrinimo įrankio kadro dalis be problemų

Kadangi neaptikta dalis yra sąlyginai maža ($< 1\ 500$ px) – kamštelio briaunos aptikimo žingsnyje aptiktas objektas tenkino dydžio (> 30 tūkst. px) sąlygą, t. y. kamštelio briaunos geometrinė forma teisinga, perėjus prie briaunos tikrinimo žingsnio iškilo problema, kuomet nagrinėjamoje vietoje buvo aptikta plonesnė nei 19 px pločio briaunos dalis (žr. 37 pav., *c*). Ši problema kilo dėl įrankio veikimo principo – tikrinamo atstumo tarp perėjimo iš juodos spalvos į baltą ir po to perėjimo iš baltos spalvos į juodą. Ši problema sprendžiama pašalinant tokio pobūdžio juodas dėmes. Tai atliekama naudojant ploto uždarymo morfologinę operaciją, apie kurią plačiau aprašyta 1.5.1 skyrelyje ir 2.3 poskyryje. Pakartojus briaunos tikrinimą jau po ploto uždarymo yra gaunama kokybiška briauna (žr. 37 pav., *d*).

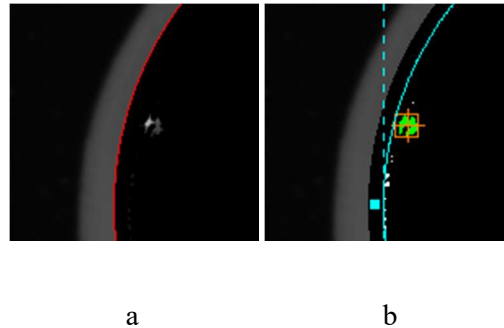
2.4.2. Kamštelio tarpinės broko paieškos vaizdo korekcijų problemos

Prieš tikrinant kamštelio tarpinę dėl broko pirmiausia atliekamos vaizdo korekcijos (žr. 2.3 poskyrį). Problemos vaizdo korekcijų taikyme atsiranda, kai vienokio broko išryškinime naudojamos korekcijos, atmeta kitokio pobūdžio brokuotą sritį. Kaip pavyzdys pateikiama kadro dalis, kurioje kamštelio tarpinė yra su šone esančiu nudegimo dėmės broku (žr. 38 pav., *a*). Atlikus visas pirmo eksperimento operacijas: kraštinių aptikimo operaciją (žr. 38 pav., *b*), išlyginimo operaciją, aukštų reikšmių (angl. *high-pass*) filtravimą (žr. 38 pav., *c*) ir erozijos operaciją (žr. 38 pav., *d*), gautame galutiniame kadre likęs elementas yra mažesnis nei 40 px, todėl ignoruojamas.



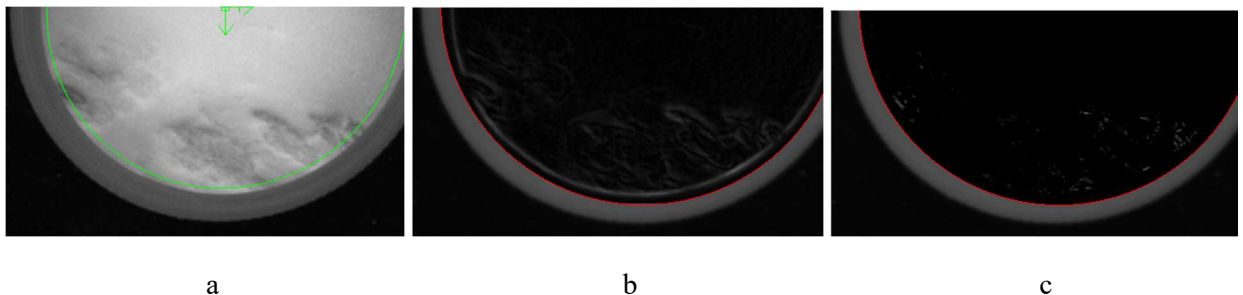
38 pav. Vaizdo korekcijų problema smulkiam objektui: a – kameros kadro dalis; b – kraštinių aptikimo kadro dalis; c – aukštų reikšmių filtravimo kadro dalis; d – erozijos operacijos kadro dalis (galutinis kadras)

Šiai problemai spręsti šiam brokuotam elementui išskirti yra naudojama „*bottomhat*“ morfologinė operacija, kuria yra išryškinamos šviesios sritys (ekstremumai), priklausomai nuo slenkstinės pikselio reikšmės (žr. 39 pav., *a*). Po šios korekcijos brokuotas elementas yra didesnis nei 40 px, todėl yra aptinkamas (žr. 39 pav., *b*)



39 pav. Vaizdo korekcijų problemos sprendimas smulkiam objektui: *a* – „*bottomhat*“ operacijos kadro dalis; *b* – broko elementų paieškos įrankio kadro dalis

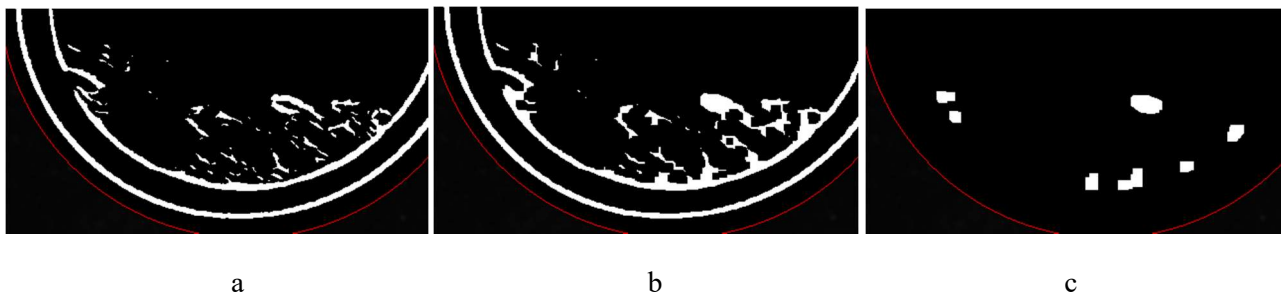
Su šia korekcija yra sėkmingai aptinkamas minėtas broko tipas, tačiau tokių vaizdo korekcijų panaudojimas sukelia problemų kitokio pobūdžio tarpinės broko aptikime. Jei tarpinės brokuota sritis neturi ryškių kontrastų tarp kokybiškos dalies ir tarp broko dalies, nors ir užima didelį tarpinės plotą, broko aptikimas su „*bottomhat*“ operacija yra nesėkmingas (žr. 40 pav.).



40 pav. Vaizdo korekcijų problema nekontrastingam brokui: *a* – kameros kadro dalis; *b* – kraštinių aptikimo kadro dalis; *c* – „*bottomhat*“ operacijos kadro dalis (galutinis kadras)

Kraštinių aptikimo įrankiu aptinkamas ir išskiriamas kiekvienas didelį plotą užimančios brokuotos srities elementas (žr. 40 pav., *b*). Tačiau naudojant prieš tai minėtą „*bottomhat*“ operaciją paliekamas didelis kiekis smulkių objektų (žr. 40 pav., *c*). Šie smulkūs objektai nesijungia vienas su kitu ir nė vienas netenkina didesnio už 40 px dydžio sąlygos, todėl brokas nėra aptinkamas ir „*bottomhat*“ operacija yra netinkama naudoti. Šiai problemai spręsti pasitelkiamas didesnis kiekis morfologinių operacijų – paprastas slenkstinis filtravimas, uždarymo bei atidarymo operacijos. Apie šias operacijas jau užsiminta programos algoritmo 5-oje dalyje (žr. 2.3 poskyrį). Paprastuoju slenkstiniu filtravimu visi kadro atspalviai paverčiami tik į juodą ir baltą spalvas (žr. 41 pav. *a*). Po filtravimo gautame kadre atliekama uždarymo operacija, kuria yra užpildomos juodos sritys, apsuptos balta spalva arba sujungiamos artimos baltos sritys (žr. 41 pav. *b*). Po uždarymo gautame kadre atliekama atidarymo operacija, su kuria siekiama pašalinti išskirtas kamštelio briaunas. Kartu su briaunomis, pašalinamos ir smulkesnės brokuotos sritys, tačiau lieka pakankamas kiekis

nepašalintų elementų (7) (žr. 41 pav. c). Visi 7 elementai yra didesni nei 40 px, taigi sėkmingai aptinkami ir broko faktas užregistruojamas.



41 pav. Vaizdo korekcijų problemos nekontrastingam brokui sprendimas: a – kameros kadro dalis; b – kraštinių aptikimo kadro dalis; c – „bottomhat“ operacijos kadro dalis (galutinis kadras)

3. Vaizdo analizavimo sistemos tyrimas

3.1. Analizuojamų duomenų pakartojamumo tyrimas

Esminis vaizdo analizavimo sistemos gaunamų rezultatų kokybės rodiklis yra analizuojamų duomenų pakartojamumas. Idealiu atveju analizuojant tą patį objektą (plastikinį kamštelį) visada turi būti gaunami identiški analizės rezultatai. Kuo to paties objekto kiekybiniu matavimu gauti duomenys yra labiau „išsibarstę“ nuo bendro aritmetinio vidurkio, tuo vaizdo analizavimo sistemos patikimumas ir duomenų tikslumas yra mažesnis. Jei neįmanoma užtikrinti aukšto pakartojamumo (~100 %), tyrimai bus netikslūs.

Pakartojamumo tyrimas atliekamas kiekvienai kamštelio spalvai. Tiriama parametrai, kurie yra tiesiogiai susiję su broko analizavimu ir aptikimu: kamštelio briaunos geometriniai matmenys (plotas), vidutinis kamštelio briaunos plotis ir tarpinės šviesumo lygis.

Pakartojamumo dydis kiekvienam matuotam parametru yra nustatomas, apskaičiuojant standartinį nuokrypį, taikant tokią formulę:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.1)$$

čia s – standartinis nuokrypis, N – reikšmių kiekis, x_i – i -toji reikšmė, \bar{x} – reikšmių aritmetinis vidurkis.

Visų spalvų kamšteliai buvo leidžiami pro broko analizavimo sistemą po 20 kartų. Gauti rezultatai pateikti 2, 3 ir 4 prieduose.

Formulėje (3.1) vienintelis nežinomas dydis yra aritmetinis vidurkis \bar{x} . Apskaičiuotos aritmetinio vidurkio reikšmės kiekvienai spalvai ir kiekvienam matuotam parametru yra pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė. Pakartotinai analizuojamų kamštelinių duomenų vidurkinės reikšmės

Spalva	Plotas, px	Briaunos plotis, px	Tarpinės šviesumas, px
Raudona	32372,70	27,39	180,38
Ruda	35304,75	29,93	165,08
Oranžinė	30597,40	26,05	185,87
Geltona	30263,05	25,85	187,34
Žalia	33982,15	28,73	171,81
Violetinė	32627,45	28,90	172,30
Balta	11428,55	8,94	211,75

Naudojantis formule (3.1) kiekvienai spalvai apskaičiuotas standartinis nuokrypis pateiktas 8 lentelėje.

8 lentelė. Pakartotinai analizuojamų kamštelių duomenų standartinio nuokrypio reikšmės

Spalva	Plotas, px		Briaunos plotis, px		Tarpinės šviesumas, px	
	px	% (nuo vidurkio)	px	% (nuo vidurkio)	px	% (nuo vidurkio)
Raudona	605,99	1,87 %	0,34	1,23 %	0,23	0,13 %
Ruda	923,43	2,62 %	0,71	2,38 %	0,19	0,12 %
Oranžinė	395,62	1,29 %	0,24	0,94 %	0,20	0,11 %
Geltona	458,15	1,51%	0,30	1,16%	0,51	0,27%
Žalia	470,07	1,38 %	0,35	1,21 %	0,22	0,13 %
Violetinė	584,37	1,79 %	0,35	1,28 %	0,23	0,13 %
Balta	140,23	1,23%	0,07	0,82%	0,26	0,12%

Apskaičiavus standartinį nuokrypį kiekvienai kamštelio spalvai ir kiekvienam analizuojamam parametru matyti, kad briaunos ploto standartinis nuokrypis yra didžiausias iš visų trijų analizuotų parametru: 1,23–2,62 % diapazonas nuo aritmetinio vidurkio. Mažiausias standartinis nuokrypis gautas tarpinės šviesumo parametru: 0,11–0,27 % nuo aritmetinio vidurkio, o briaunos pločio standartinis nuokrypis: 0,82–2,38 %.

Briaunos parametru (ploto bei pločio) didžiausias nuokrypis gautas su rudos spalvos kamšteliu (atitinkamai 2,62 % ir 2,38 %), o mažiausias standartinis nuokrypis gautas su baltos spalvos kamšteliu (atitinkamai 1,23 % ir 0,82 %), tačiau baltos spalvos kamštelio briaunai aptikti naudojamas skirtingas būdas nei kitoms spalvoms, tai atspindi ir briaunos ploto ir pločio aritmetiniai vidurkiai – baltos spalvos kamštelio: apie 11 000 px plotas ir apie 9 px plotis, o spalvotų kamštelių: 30 000–35 000 px plotas ir 26–30 px plotis. Taigi iš spalvotų kamštelių mažiausias standartinis nuokrypis gautas su oranžiniu kamšteliu (atitinkamai 1,29 % ir 0,94 %).

Absoliutus vaizdo analizavimo sistemos matuojamų parametru pakartojamumas apskaičiuojamas iš idealios 100 % reikšmės atimant didžiausią standartinį nuokrypį (2,62 %). Apskaičiuotas absoliutus sistemos matuojamų parametru pakartojamumas: 97,38 %.

Žemiausia riba, prie kurios briaunos plotas yra priimamas kaip tinkamas, yra 29 000 px. Iš visų spalvų (išskyrus baltą) mažiausias gautas briaunos plotas yra geltonos spalvos kamštelio (30 263,05 px). Skirtumas tarp 29 000 ir 30 263,05 yra 1 263,05 px, tai reiškia nuokrypis negali viršyti šios reikšmės arba procentine išraiška negali viršyti 4,17 % nuo vidurkio.

3.2. Programos algoritmo etapų vykdymo laiko tyrimas

Kiekvieno programos algoritmo etapo vykdymas trunka tam tikrą laiko tarpą. Vykdomo laikas parodo kiek kompiuterio procesorius vykdo procesą, t. y. vieną programos etapą. Laiko dydis priklauso nuo proceso sudėtingumo ir jį sudarančių operacijų kiekio. Šiuo tyrimu siekiama išmatuoti visų vaizdo analizavimo programos etapų vykdymo laiko trukmę, ir išsiaiškinti, kurie etapai yra sudėtingiausi ir trunka ilgiausiai, o kurie įvykdomi greitai.

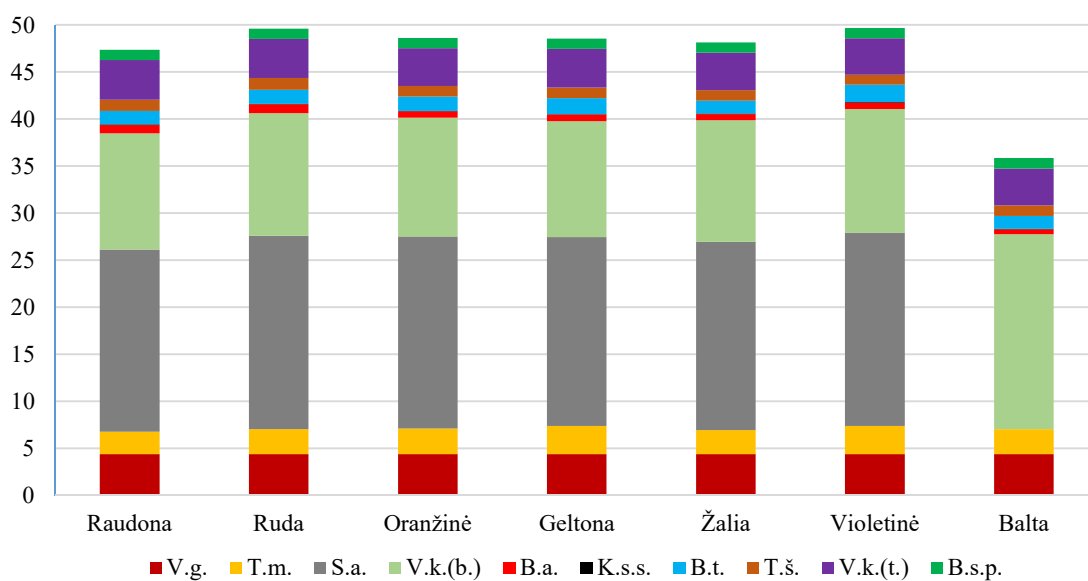
Analogiškai pakartojamumo tyrimui, atskirai matuojamas visų spalvų kamšteliamas vykdymo laikas. Matuojamas šių programos etapų atskirų etapų vykdymo laikas: vaizdo gavimas, triukšmo mažinimas, spalvos aptikimas, vaizdo korekcijos (briaunai), briaunos aptikimas, koordinacių

sistemos sukūrimas, briaunos tikrinimas, tarpinės šviesumas, vaizdo korekcijos (tarpinei), brokuotų sričių tarpinėje paieška. 9 lentelėje pateiktos vykdymo laiko vidurkinės penkių bandymų reikšmės.

9 lentelė. Programos algoritmo etapų vykdymo laikas.

Etapas	Vykdymo laikas, ms						
	Raudona	Ruda	Oranžinė	Geltona	Žalia	Violetinė	Balta
Vaizdo gavimas	4,37						
Triukšmo mažinimas	2,38	2,68	2,73	2,99	2,55	3,00	2,65
Spalvos aptikimas	19,39	20,54	20,42	20,11	20,03	20,54	-
Vaizdo korekcijos (briaunai)	12,33	13,04	12,61	12,29	12,92	13,16	20,73
Briaunos aptikimas	0,89	0,93	0,68	0,71	0,65	0,67	0,52
Koordinačių sistemos sukūrimas	0,06						
Briaunos tikrinimas	1,44	1,50	1,52	1,68	1,36	1,86	1,36
Tarpinės šviesumas	1,19	1,25	1,13	1,13	1,12	1,03	1,12
Vaizdo korekcijos (tarpinei)	4,21	4,13	4,02	4,12	4,01	3,90	3,94
Brokuotų sričių tarpinėje paieška	1,09	1,11	1,09	1,09	1,08	1,10	1,11
Iš viso	47,35	49,61	48,63	48,55	48,15	49,69	35,86

Vaizdo gavimo ir koordinatinių sistemos sukūrimo etapų vykdymo laiko reikšmės yra vidutiniškai vienodos visoms kamšelių spalvoms (atitinkamai 4,37 ms ir 0,06 ms). Iš 9 lentelėje pateiktų matavimų rezultatų matyti, kad spalvotų kamšelių bendras visų etapų vykdymo laikas yra diapazone 47,35–49,69 ms, o baltos spalvos kamšelių – 35,86 ms. 42 paveiksle pavaizduota detalizuota visų spalvų kamšelių analizavimo programos algoritmo etapų vykdymo laiko stulpelinė diagrama.



42 pav. Programos algoritmo etapų vykdymo laiko stulpelinė diagrama

42 paveiksle stulpelinės diagramos sudaromosios dalys yra programos algoritmo etapų vykdymo laiko reikšmės, kurios identifikuojamos pagal savo spalvą ir etapo pavadinimo santrumpą (žr. 9 lentelę).

Baltos spalvos kamštelių analizavimo laikas yra mažiausias (35,86 ms), nes jiems neatliekamas spalvos aptikimas, tačiau reikalingos papildomos vaizdo korekcijos briaunos tiksliam aptikimui, lyginant su kitomis spalvomis, todėl vaizdo korekcijų briaunai etapas baltiems kamšteliams vykdomas 20,73 ms, o spalvotiems kamšteliams 12,29–13,16 ms. Taigi šis etapas vykdomas ilgiausiai iš visų.

Spalvotų kamštelių analizė vidutiniškai trunka 48,66 ms, kurioje ilgiausiai vykdomas spalvos aptikimo etapas – 19,39–20,54 ms. Apytiksliai vienos sekundės skirtumas tarp šio diapazono ribų yra nulemtas spalvos mėginių kiekiu, kurių yra ieškoma visame vaizde. Rudos ir violetinės spalvos mėginių yra daugiausiai (žr. 5 lentelę), todėl spalvos aptikimas trunka ilgiausiai (20,54 ms). Likusios spalvos turi mažesnę kiekį spalvos mėginių, todėl ir vykdymo laikas yra trumpesnis. Antras etapas pagal vykdymo laiko dydį yra vaizdo, gauto po spalvos aptikimo, korekcijos. Šio etapo vykdymo laikas yra 12,29–13,16 ms ribose. Atliekamų korekcijų kiekis – 4. Anaiptol, šio etapo vykdymo laikas baltiems kamšteliams, kaip prieš tai minėta, yra 20,73 ms, o korekcijų kiekis – 5.

Programoje yra dar vienas vaizdo korekcijų etapas, skirtas tarpinės broko paieškai. Tačiau jo vykdymo laikas yra trumpesnis (3,90–4,21 ms) nei prieš tai apžvelgto vaizdo korekcijų etapo, o korekcijų kiekis yra 6. Matyti, kad šio etapo vykdymo laikas yra apytiksliai 3 kartus trumpesnis už ankstesnio vaizdo korekcijų etapo vykdymo laiką, nors korekcijų kiekis yra dviem vienetais didesnis. Pirmuoju etapu yra naudojamos spalvotos nuotraukos konvertavimo į nespaltotą ir ploto uždarymo operacijos, kurių nėra antrame vaizdo korekcijų etape. Tačiau, spalvotos nuotraukos konvertavimo į nespaltotą operacijos nėra baltos spalvos kamštelių vaizdo korekcijų etape. Daroma išvada, kad ploto uždarymo operacija yra pati sudėtingiausia ir užima daugiausiai laiko, kadangi visame vaizde ieškoma juodos spalvos sričių, kurios yra apsuptos balta spalva ir kurių plotas gali būti nuo 1 iki 1500 px. Dėl tokio plataus diapazono operacija yra vykdoma ilgiausiai.

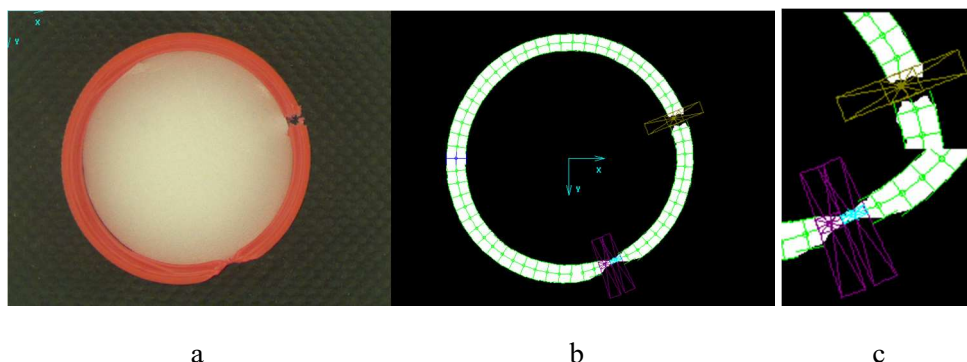
Vaizdo gavimo iš kameros vykdymo laikas yra apytiksliai 4,37 ms. Likusių analizės etapų vykdymo laikas siekia nuo 0,52 ms iki 3 ms. Visų spalvų atvejais mažiausiai trunka koordinatinių sistemos sukūrimas – 0,06 ms arba 60 μs.

Spalvotų kamštelių (išskyrus baltą) briaunos analizė vidutiniškai trunka 35,27 ms arba 72,5 % viso analizės laiko. Tarpinės analizė vidutiniškai trunka 6,30 ms arba 12,9 % viso analizės laiko. Balto kamštelio briaunos analizė trunka 22,67 ms arba 63,2 % viso analizės laiko. Tarpinės analizė trunka 6,17 ms arba 17,2 % viso analizės laiko.

3.3. Plastikinių kamštelių broko analizavimo tyrimas

Kadangi suprojektuotos ir tiriamos sistemos paskirtis yra atpažinti ir išanalizuoti plastikinių kamštelių broką, šiuo tyrimu atliekama dvidešimt skirtingų brokuotų plastikinių kamštelių apžvalga – būdingas broko požymis, gauti duomenys programine įranga, broką aptinkantis programos algoritmo etapas.

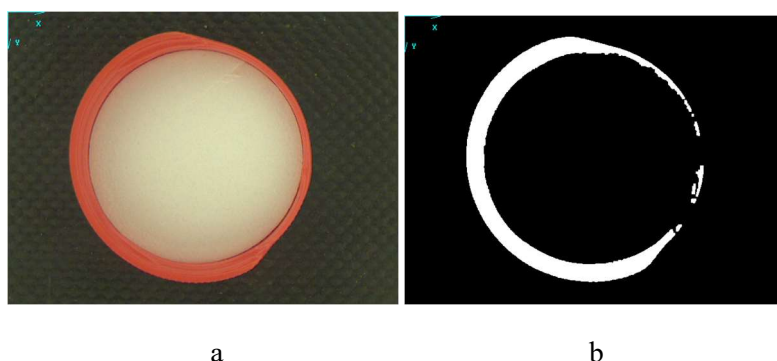
43 paveiksle pavaizduotas pirmasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelio briauna su smulkiu liejimo broku (matomas briaunos susiaurėjimas) ir su dirbtiniu trūkiu.



43 pav. 1-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas, c – priartintos aptikto broko sritys

Po spalvos aptikimo ir vaizdo korekcijų etapų, briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 835 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Toks rezultatas yra tikėtinas, kadangi briaunoje yra mažos, lyginant su visu briaunos dydžiu, brokuotos dalys, o kamštelio briauna iš dalies atitinka kokybiško kamštelio briauną (žr. 30 pav.). Kadangi pirmuoju broko analizavimo etapu brokas neaptiktas, pereinama prie sekančio etapo – briaunos tikrinimas. Šiame etape (žr. 43 pav. b) aptiktos abejos brokuotos dalys. Geltonos spalvos stačiakampiu pavaizduojamas aptiktas tarpas briaunoje (39,96 px), o violetinės spalvos stačiakampiu pavaizduota aptikta briaunos dalis netenkinanti briaunos pločio sąlygos ($6\text{ px} < 19\text{ px}$). Tikrinamos briaunos atitinkamumo santykis su apmokymo modeliu – 94,9 %. Po šio etapo plastikinis kamštelis pripažįstamas brokuotu, nes atitinkamumo santykis nėra lygus 100 %, todėl tolimesni analizavimo etapai nebevykdomi.

44 paveiksle pavaizduotas antrasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelio briauna su stambiu liejimo broku – matomas briaunos susiaurėjimas užimantis pusę kamštelio briaunos.

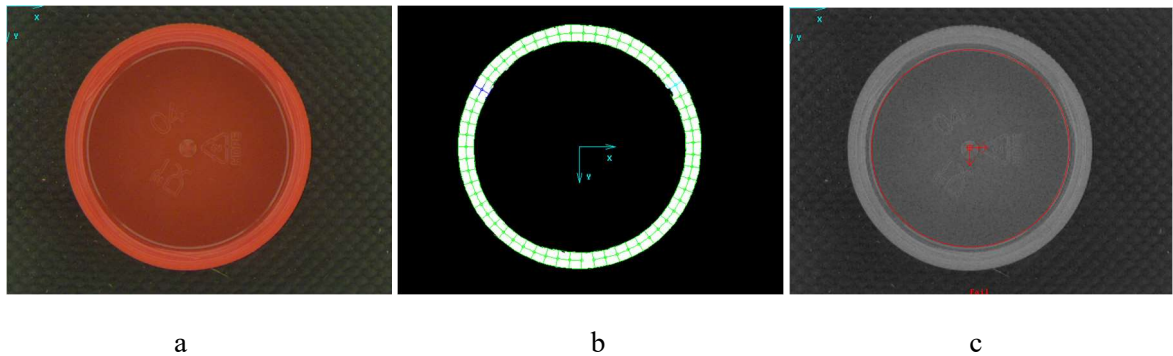


44 pav. 2-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos aptikimo įrankio vaizdas

Po spalvos aptikimo ir vaizdo korekcijų etapų, briaunos aptikimo įrankiu (žr. 44 pav. b) aptiktos briaunos plotas yra lygus 23 384 px, kuris netenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygos ($> 29\,000$

px). Šiame etape yra pripažįstamas plastikinio kamštelio brokas ir tolimesnė analizė yra nebevykdoma.

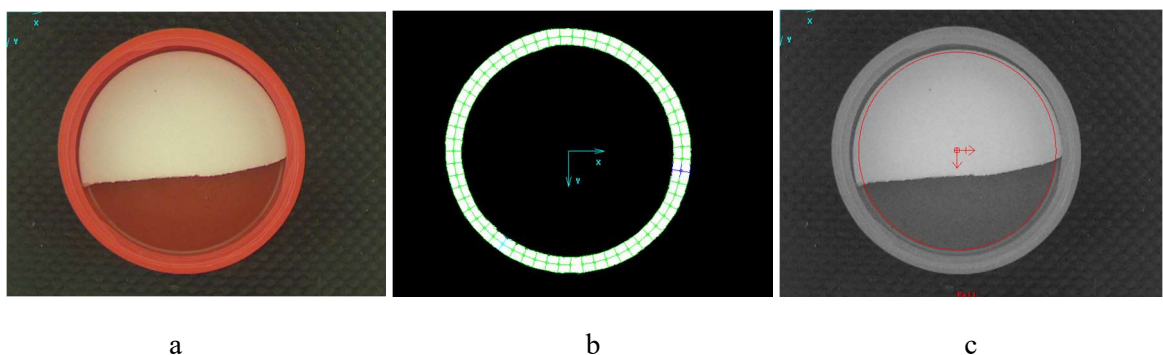
45 paveiksle pavaizduotas trečiasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis be tarpinės, briauna – kokybiška.



45 pav. 3-iasis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – šviesumo matavimo įrankio vaizdas

Po spalvos aptikimo ir vaizdo korekcijų etapų, briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 31 108 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Šiuo etapu neaptikus jokio broko pereinama prie sekančio etapo – briaunos tikrinimo. Briaunos tikrinimo etape (žr. 45 pav. b) neaptikta jokių briaunos brokuotų dalių, nes visi tikrinimo segmentai yra žalios spalvos (atitinka apmokymo modelį), mėlyna spalva atvaizduojama plačiausia ir siauriausia briaunos dalys, tačiau taip pat patenkančios į apmokymo modelio briaunos pločio atitikimo sąlygas (19–39 px), taigi apmokymo modelio atitinkamumas yra 100 % – kamštelio briauna yra kokybiška. Po šio etapo pereinama prie tarpinės šviesumo matavimo etapo. Išmatuotas tarpinės šviesumas – 83,9 px. Tokio dydžio šviesumas netenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygos (160 px, žr. 6 lentelę). Taigi šiame etape plastikinis kamštelis yra pripažįstamas brokuotu ir tolimesnė analizė nebeatliekama.

46 paveiksle pavaizduotas ketvirtasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis su nepilna tarpine, briauna – kokybiška.

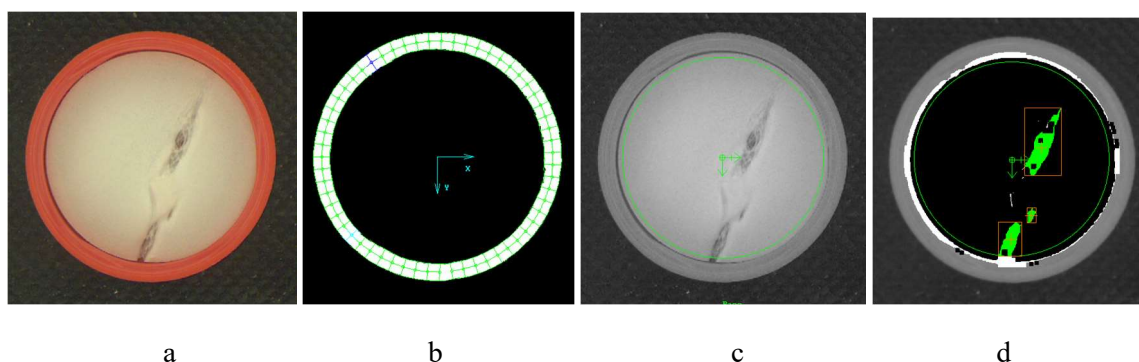


46 pav. 4-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 33 190 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Perėjus prie briaunos tikrinimo įrankio (žr. 46 pav. b), gautas

100 % apmokymo modelio atitinkamumas (toliau – atitinkamumo santykis) ir briauna pripažįstama kaip kokybiška. Perėjus prie tarpinės šviesumo matavimo, gautas rezultatas yra lygus 144,9 px, kuris netenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygos (160 px). Šiame etape plastikinis kamštelis yra paskelbiamas brokuotu ir tolimesnė analizė yra nebevykdoma.

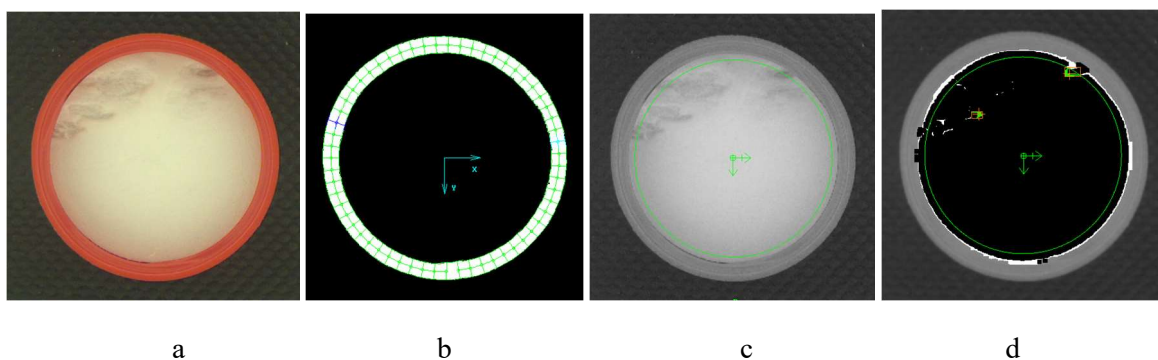
47 paveiksle pavaizduotas penktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis su tarpinės liejimo broku, briauna – kokybiška.



47 pav. 5-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 768 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Šiame etape neaptikus briaunos broko, pereinama prie briaunos tikrinimo etapo (žr. 47 pav. *b*), kuriame gautas briaunos atitinkamumo santykis yra lygus 100 %. Po šių etapų briauna pripažįstama kokybiška ir pereinama prie tarpinės analizės. Tarpinės šviesumo tikrinimo etape (žr. 47 pav. *c*) išmatuotas šviesumas siekia 171,8 px, kuris tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (160 px). Šiuo etapu tarpinės brokas neaptiktas, todėl sekančiuose etapuose atliekamos vaizdo korekcijos tarpinės plotui ir ieškoma brokuotų sričių jau koreguotame vaizde. Kaip matyti 47 paveikslo *d* dalyje, aptiktos trys brokuotos sritys, atvaizduotos žalia spalva ir apvestos oranžinės spalvos stačiakampiu. Aptiktų brokuotų sričių plotai yra: 1816 px, 198 px ir 1 015 px. Brokuotomis sritimis pripažįstamos aptiktos sritys, kurių plotas viršija 40 px. Šis etapas yra paskutinis broko analizės etapas programoje. Taigi po jo yra atitinkamai valdomas išėjimo signalas, brokuoto kamštelio šalinimui.

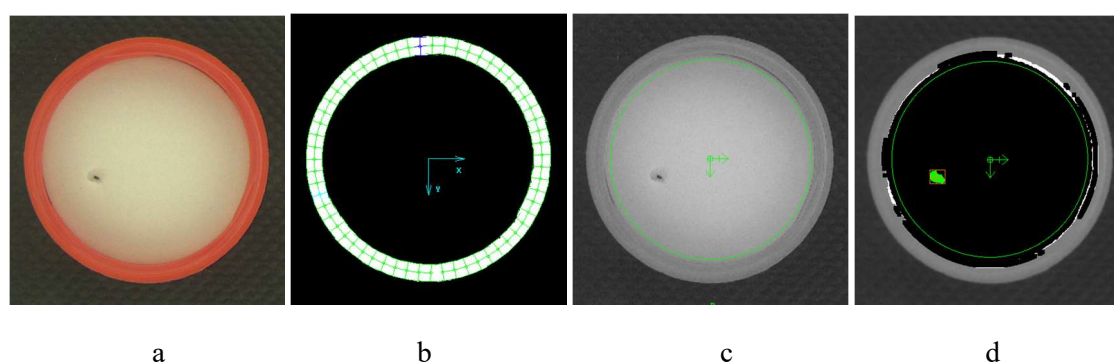
48 paveiksle pavaizduotas šeštasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis su tarpinės liejimo broku, žemo kontrasto ir užimančio penktadalį tarpinės ploto (žr. 48 pav. *a*), briauna – kokybiška.



48 pav. 6-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 622 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Tenkinant šią sąlygą, brokas nepatinkamas ir pereinama prie briaunos tikrinimo etapo (žr. 48 pav. b). Šiame etape briauna 100 % atitinka apmokymo modelį, todėl brokas čia neaptinkamas – briauna kokybiška. Po briaunos tikrinimo seka tarpinės šviesumo tikrinimas (žr. 48 pav. c). Išmatuotas tarpinės šviesumas – 185,3 px, kuris taip pat tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (160 px). Neužfiksavus broko šiame etape, atliekamos vaizdo korekcijos tarpinės ir ieškoma brokuotų sričių. Brokuotų sričių paieškos įrankiu (žr. 48 pav. d) aptiktos dvi brokuotos sritys, kurių plotas atitinkamai lygus 68 px ir 108 px. Nors ir realus tarpinės brokas užima apytiksliai 16 290 px plotą (17 % viso tarpinės ploto), dėl žemo kontrasto (< 10 px) tarp brokuotų sričių ir sveikos tarpinės, kai tuo pačiu kontrastas tarp tarpinės centro ir krašto yra apie 25 px, vaizdo atpažinimo sistema aptiktų sričių plotas yra palyginti mažas (0,4 % ir 0,7 % nuo viso brokuoto ploto), todėl tokio tipo tarpinės brokas pasižymi didele neaptikimo tikimybe. Sėkmingai aptikus broką šiame etape, toliau seka kameros išėjimo signalo valdymas. T.y. duodama komanda kamštelio nupūtumui suslėgtu oru.

49 paveiksle pavaizduotas septintasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis su tarpinės degėsio dėme (žr. 49 pav. a), briauna – kokybiška.

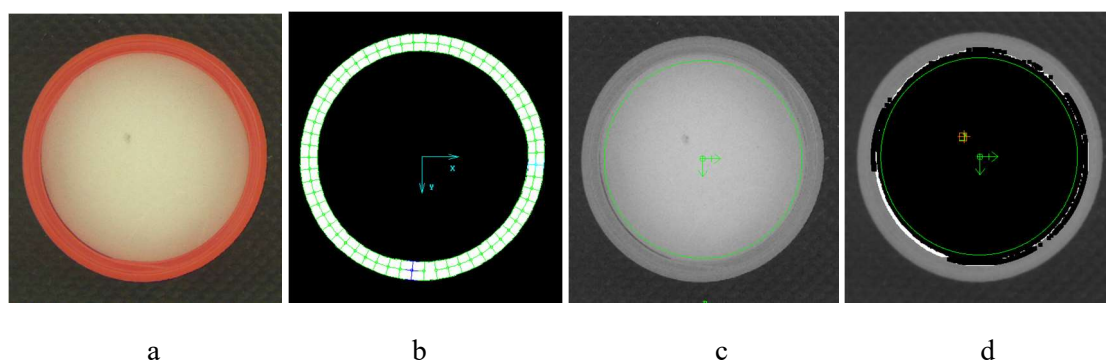


49 pav. 7-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 33 304 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Briaunos tikrinimo įrankiu (žr. 49 pav. b) visi, išskyrus du,

segmentai yra žalios spalvos ir likę du segmentai yra mėlynos spalvos, kurie parodo ploniausią ir plačiausią briaunos vietą. Apmokymo modelio atitinkamumas yra lygus 100 %. Taigi briauna pripažįstama kokybiška. Tarpinės šviesumo tikrinimo įrankiu (žr. 49 pav. *c*) išmatuotas tarpinės šviesumas (171,2 px) tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (> 160 px). Šiame etape neaptikus broko pereinama prie vaizdo korekcijų tarpinei ir ieškoma brokuotų sričių koreguotame vaizde. Brokuotų sričių paieškos įrankiu (žr. 49 pav. *d*) aptiktos srities plotas siekia 354 px, kuris viršija minimalią ribą (40 px) prie kurios sritis pripažįstama brokuota. Aptikus broką šiame paskutiniame broko analizavimo etape, įjungiamas kamštelio šalinimo išėjimo signalas.

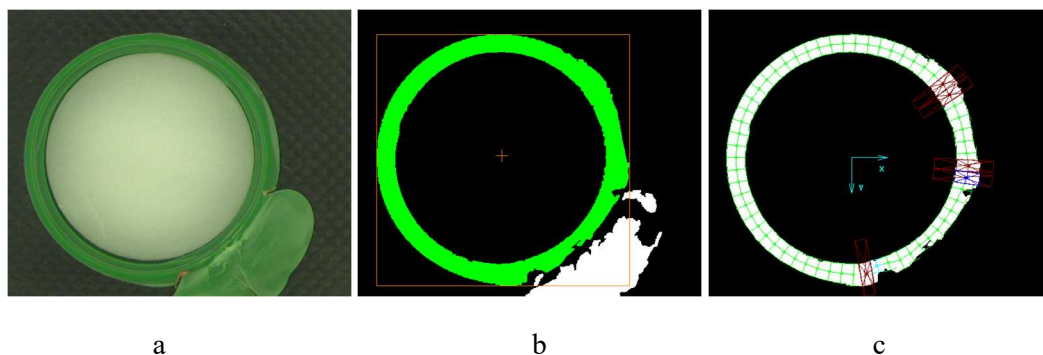
50 paveiksle pavaizduotas aštuntasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – raudonos spalvos kamštelis su smulkiu tarpinės broku (žr. 50 pav. *a*), briauna – kokybiška.



50 pav. 8-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 33 642 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Briaunos tikrinimo įrankiu (žr. 50 pav. *b*), visi segmentai atitinka apmokymo modelį (atitinkamumas – 100 %), todėl kamštelio briaunoje brokas neaptiktas. Tarpinės šviesumo tikrinimo etape (žr. 50 pav. *c*) išmatuotas šviesumas siekia 172,5 px. Kokybiškos tarpinės šviesumo sąlyga (> 160 px) yra tenkinama. Šiame etape neaptikus tarpinės broko, atliekamos vaizdo korekcijos ir ieškoma brokuotų sričių koreguotame vaizde (žr. 50 pav. *d*). Aptiktos srities plotas siekia 48 px, kuris yra arti minimalios aptikimo reikšmės (40 px) tačiau ją viršija. Kaip ir šeštuoju atveju, čia tarpinės brokuota sritis yra žemo kontrasto su sveika tarpinės dalimi (< 10 px), tačiau užima mažą plotą (apie 260 px). Vaizdo atpažinimo sistema aptikta tik 18,4 % dydžio srities dalis. Teoriškai, pritaikant šį procentinį santykį, žemo kontrasto brokuotos sritys, kurių plotas yra mažesnis nei 211 px bus neaptinkamos, nes aptinkama sritis būtų mažesnė už 40 px. Tačiau tokio tipo tarpinės brokas nėra laikomas kritiniu ir blogiausiu atveju gali būti praleidžiamas kaip kokybiškas.

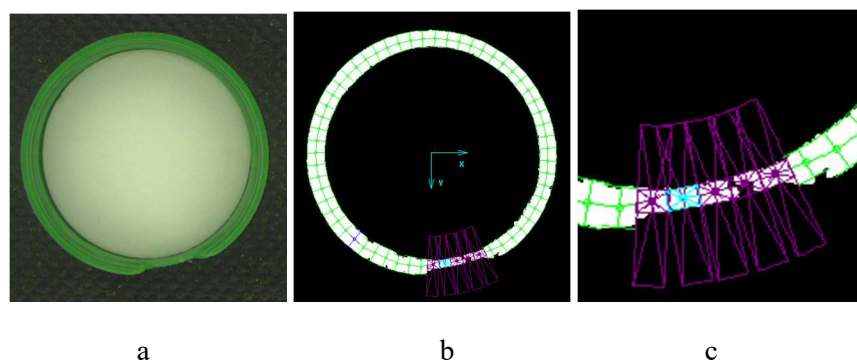
51 paveiksle pavaizduotas devintasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su stambiu briaunos liejimo broku (žr. 51 pav. *a*).



51 pav. 9-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos aptikimo įrankio vaizdas; c – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu (žr. 51 pav. b) aptiktos briaunos plotas yra lygus 38 007 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Kadangi šio etapo sąlyga yra tik vienpusė, t. y. nustatyta tik žemutinė riba, todėl bet kokia briaunos ploto reikšmė didesnė už minimalią reikšmę bus priimama kaip kokybiška. Šiuo atveju gautas briaunos plotas yra apytiksliai 2 700 px didesnis už didžiausią užfiksuotą kokybiško kamštelio briaunos plotą: apie 35 300 px (žr. 7 lentelę). Taigi įvedus maksimalią ribą, pvz. 37 500 px, šis kamštelis būtų pripažintas brokuotu briaunos aptikimo etape, tačiau nesant šiai ribai, pereinama prie briaunos tikrinimo etapo (žr. 51 pav. c). Šiame etape aptikti penki brokuoti segmentai, pavaizduoti raudonos spalvos stačiakampiu, kurie reiškia, kad briaunos plotis (41,1 px) viršija maksimalią leidžiamą pločio reikšmę (39 px). Apmokymo modelio atitinkamumas siekia 91,5 %, todėl šiame etape kamštelis pripažįstams brokuotu ir tolimesnė analizė nebeatliekama.

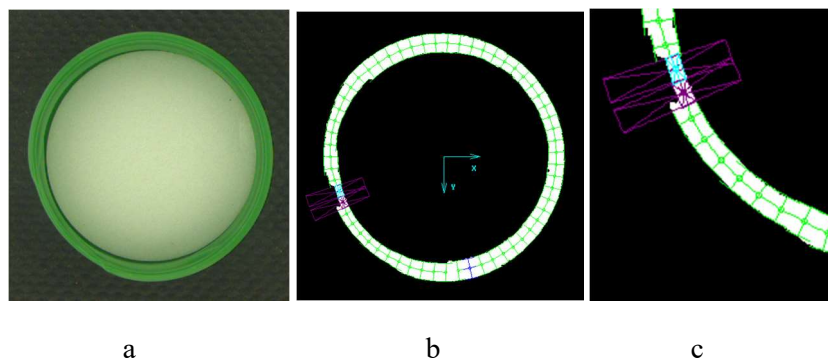
52 paveiksle pavaizduotas dešimtas brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su nedideliu briaunos liejimo broku (žr. 52 pav. a).



52 pav. 10-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – priartintas briaunos tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 031 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\,000$ px). Tenkinant šią sąlygą, brokas šiame etape neaptinkamas, todėl pereinama prie briaunos tikrinimo etapo (žr. 52 pav. b). Šiame etape aptikti 5 segmentai (žr. 52 pav. c), pažymėti violetine spalva, kurie simbolizuoja, kad briaunos plotis (12,2 px) netenkina minimalaus pločio sąlygos (19 px). Apmokymo modelio atitinkamumas yra lygus 91,5 %, todėl šis kamštelis pripažįstamas brokuotu ir tolimesnė analizė nebeatliekama.

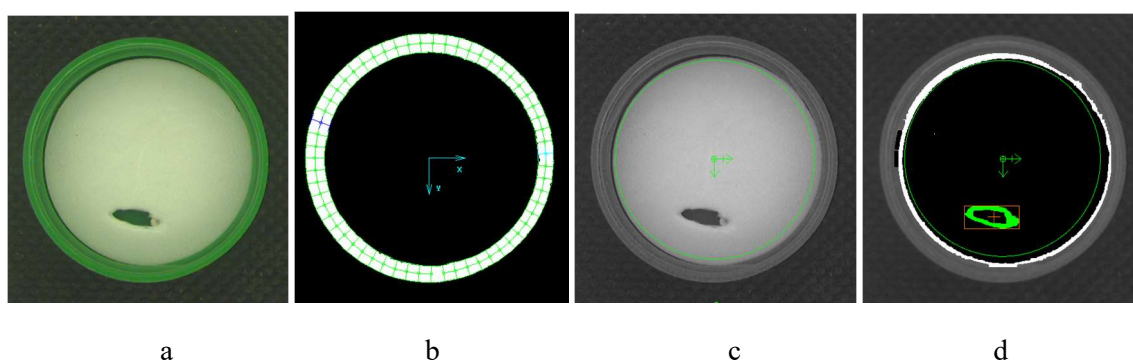
53 paveiksle pavaizduotas vienuoliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su nežymiu briaunos liejimo broku (žr. 53 pav. a).



53 pav. 11-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – priartintas briaunos tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 31 526 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Briaunos tikrinimo etape aptikti du violetinės spalvos segmentai (žr. 53 pav. b), parodantys, kad briaunos plotis (11 px) netenkina minimalaus pločio briaunos sąlygos (19 px). Atitinkamumas – 96,6 %. Tačiau realus brokuotos briaunos ilgis siekia 207 px, o aptikimo įrankiu aptikta tik 38 px ilgio atkarpa (2 segmentai) arba 18,3 % visos brokuotos briaunos ilgio. Likusios atkarpos dalies plotis vidutiniškai siekia 20,8 px, kuris tenkina minimalaus pločio briaunos sąlygą. Dėl šios priežasties reikia papildomai atlikti stebėjimus su tokio broko tipo kamšteliais ir neaptikimo atveju didinti minimalią briaunos pločio ribą. Po šio etapo analizė nebetęsiama, nes kamštelis pripažintas brokuotu.

54 paveiksle pavaizduotas dvyliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su skylė tarpinėje (žr. 54 pav. a), briauna – kokybiška.

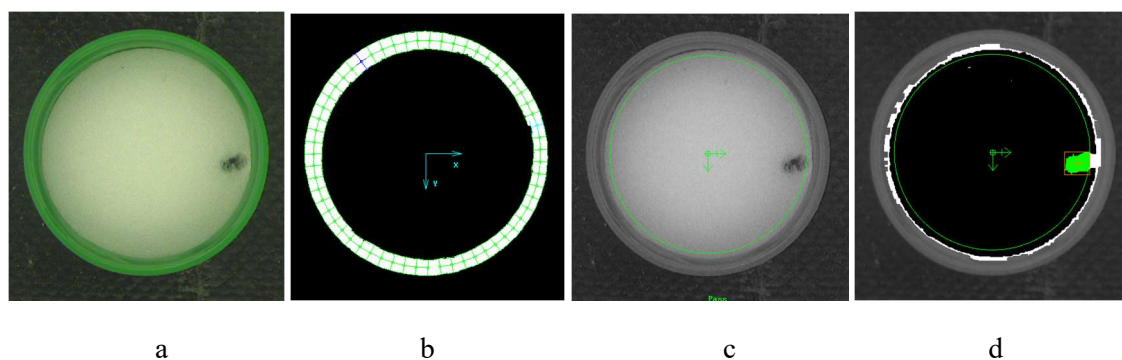


54 pav. 12-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 34 466 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Briaunos tikrinimo įrankio (žr. 54 pav. b) rezultatai parodo, kad visi segmentai atitinka apmokymų modelį 100 %, todėl briauna yra kokybiška. Tarpinės šviesumo tikrinimo (žr. 54 pav. c) etapo metu išmatuotas šviesumas yra lygus 166,8 px, kuris tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (> 160 px). Kadangi šiuo etapu tarpinės brokas

neaptiktas, atliekamos vaizdo korekcijos ir ieškoma brokuotų sričių koreguotame vaizde (žr. 54 pav. *d*). Šiame etape aptinkama viena brokuota sritis, pažymėta žalia spalva ir apvesta oranžinės spalvos stačiakampiu, ir kurios plotas siekia 1431 px, kuris gerokai viršija minimalią ribą (40 px). Kadangi brokuotų sričių ieškoma pagal staigų kontrasto pokytį, aptikti tik tarpinės skylės kontūrai bet ne visa skylė, tačiau to pilnai pakanka šio tarpinės brokui aptikti.

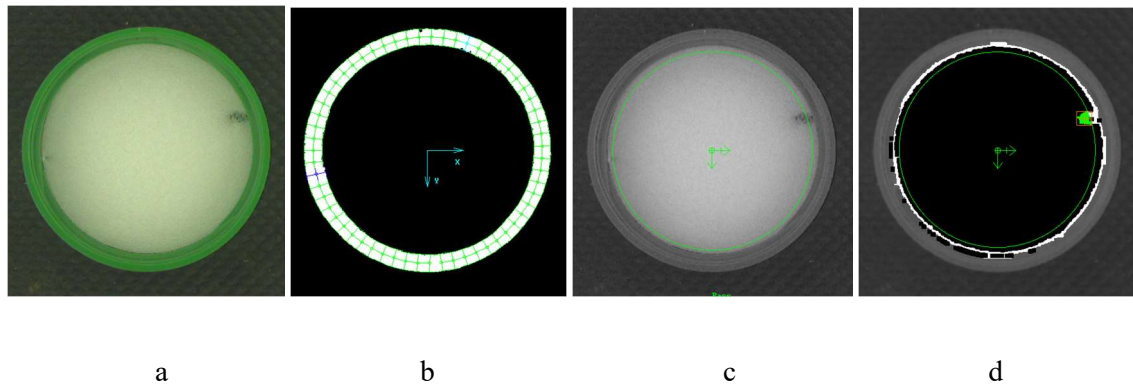
55 paveiksle pavaizduotas tryliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su dėme tarpinės šone (žr. 55 pav. *a*), briauna – kokybiška.



55 pav. 13-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Labai panašus atvejis į 12-ąjį, tik šiuo atveju tarpinė nėra visiškai kiaura, ir tarpinės dėmė yra šone. Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 579 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą (> 29 000 px). Briaunos tikrinimo etape (žr. 55 pav. *b*) taip pat tenkinama 100 % apmokymo modelio atitinkamumo sąlyga, taigi briauna yra pripažįstama kaip kokybiška. Sekančiu etapu, matuojamas tarpinės šviesumas (žr. 55 pav. *c*). Išmatuotas tarpinės šviesumas siekia 164,3 px, kuris tenkina tarpinės šviesumo minimalią sąlygą (>160 px). Neaptikus broko nėra viename iš praėjusių etapų, pereinama prie vaizdo korekcijų tarpinės plotui ir brokuotų sričių paieškos koreguotame vaizde (žr. 55 pav. *d*). Šio etapo metu aptikta viena brokuota sritis kurios plotas yra lygus 1152 px, kuris taip pat gerokai viršija minimalią ribą (40 px). Šiuo atveju aptikta pilna dėmė, o ne kontūrai, kaip 12-ame pavyzdyje, nes ši dėmė nėra pilnai kiaura, todėl jos viduje yra daug kontrasto pokyčių, kurie yra aptinkami vaizdo atpažinimo sistema.

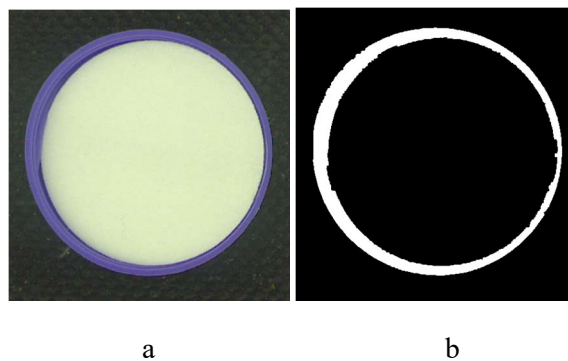
56 paveiksle pavaizduotas keturioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – žalios spalvos kamštelis su dėme tarpinės krašte (žr. 56 pav. *a*), briauna – kokybiška.



56 pav. 14-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Šiuo atveju tarpinės dėmė yra krašte ir žemesnio kontrasto nei 12-as ar 13-as atvejai. Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 33 129 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($>29\ 000$ px). Tikrinant briauną tikrinimo įrankiu (žr. 56 pav. *b*) gautas 100 % apmokymo modelio atitinkamumas, taigi kamštelio briauna yra kokybiška. Pereinant prie tarpinės analizės, tarpinės šviesumo tikrinimo etape (žr. 56 pav. *c*) gautas tarpinės šviesumas siekia 167,4 px, kuris tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (>160 px). Neaptikus broko šiame etape, atliekamos vaizdo korekcijos ir ieškoma brokuotų sričių koreguotame vaizde (žr. 56 pav. *d*). Aptiktos srities plotas yra lygus 341 px, tačiau aptikta ne visa (45,7 %) tarpinės dėmė, kadangi brokuotų sričių paieškos zona yra mažesnė už tarpinę, siekiant išvengti klaidingo broko aptikimo priskiriant kamštelio briaunas kaip brokuotas sritis.

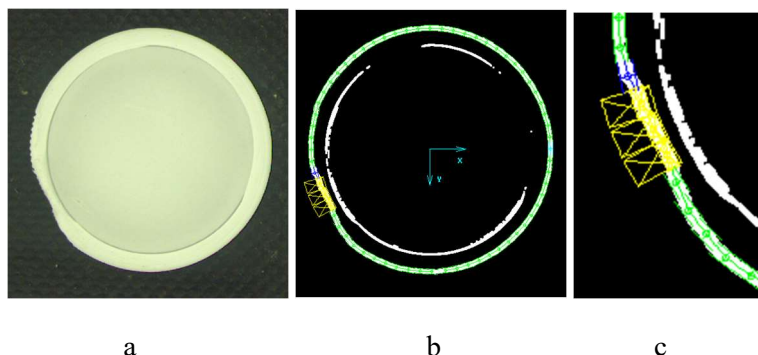
57 paveiksle pavaizduotas penkioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – violetinės spalvos kamštelis su ne pilnai išsprausa tarpine (žr. 57 pav. *a*), briauna – kokybiška.



57 pav. 15-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos aptikimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu (žr. 57 pav. *b*) aptiktos briaunos plotas yra lygus 20 660 px, kuris netenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygos ($> 29\ 000$ px). Šiame etape kamštelis yra paskelbiamas brokuotu ir tolimesnė analizė nebeatliekama. Šiuo atveju kamštelio briauna ir tarpinė yra kokybiški, tačiau dėl neišsprausos tarpinės visa kamštelio briauna nėra matoma, todėl pripažįstama kaip brokuota.

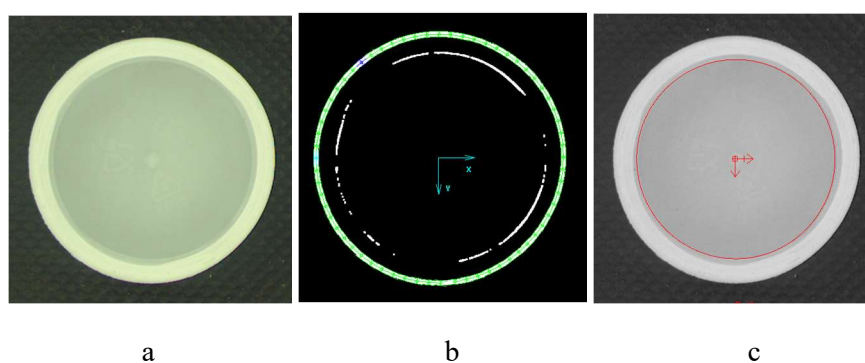
58 paveiksle pavaizduotas šešioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – baltos spalvos kamštelis su briaunos broku (žr. 58 pav. a).



58 pav. 16-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – priartintas briaunos tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 11 129 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 10\,500$ px). Šiame etape neaptikus briaunos broko pereinama prie briaunos tikrinimo (žr. 58 pav. b). Šiame etape aptikti 3 geltonos spalvos segmentai, kurie simbolizuoja briaunos segmentą esantį per toli nuo apmokymo modelio segmento (toliau nei 7 px), taigi apmokymo modelio atitinkamumas siekia 95,3 % ir šiame etape kamštelis pripažįstamas brokuotu. Kaip matyti, skirtingai nuo ankstesnių etapų, briaunos aptikimas atliekamas skirtingu įrankiu, vietoj spalvos atpažinimo įrankio, išskiriami balto kamštelio kontūrai, kurie vėliau išplečiami. Todėl briaunos plotas siekia apytiksliai 11 000 px ir vidutinis briaunos plotis – 9,3 px.

59 paveiksle pavaizduotas septynioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – baltos spalvos kamštelis be tarpinės (žr. 59 pav. a), briauna – kokybiška.

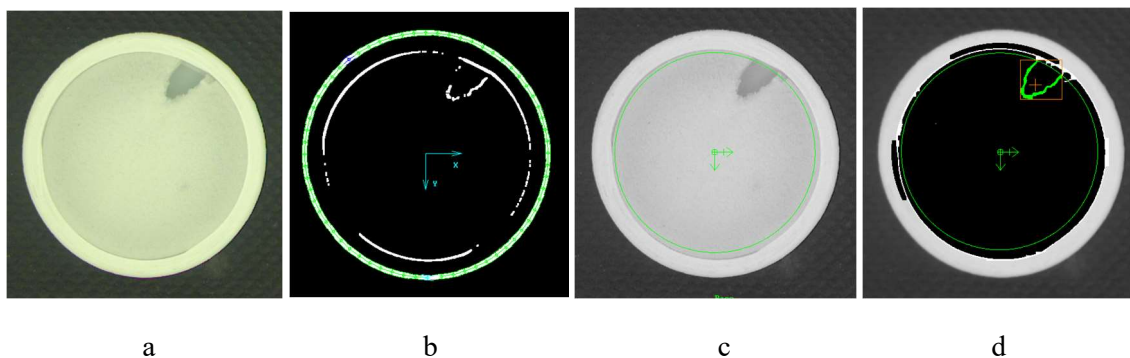


59 pav. 17-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 11 387 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 10\,500$ px). Sekančiame etape tikrinama briauna (žr. 59 pav. b). Visi briaunos segmentai atitinka apmokymų modelį (100 % atitikimas), todėl briauna yra pripažįstama kokybiška. Tarpinės šviesumo tikrinimo etapo metu išmatuotas tarpinės šviesumas siekia 174,5 px, kuris netenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygos (> 190 px). Tarpinė neatitinka šviesumo sąlygų (nes jos nėra), todėl kamštelis yra pripažįstamas brokuotu ir tolimesni analizės etapai

nebevykdomi. Baltos spalvos kamštelio dugnas kameros vaizde yra tamsesnis nei balta tarpinė todėl šis broko požymis atpažįstamas tikrinant tarpinės šviesumą.

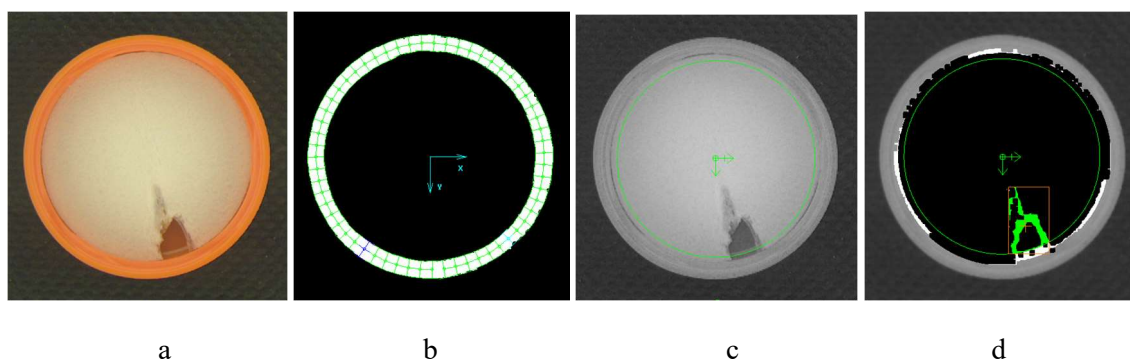
60 paveiksle pavaizduotas aštuonioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – baltos spalvos kamštelis su skylė tarpinės krašte (žr. 60 pav. a), briauna – kokybiška.



60 pav. 18-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 11 304 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 10\,500$ px). Briaunos tikrinimo etapo metu (žr. 60 pav. b) visi briaunos tikrinimo segmentai 100 % atitinka apmokymo modelio segmentus, todėl kamštelio briauna pripažįstama kokybiška. Tikrinant tarpinės šviesumą (žr. 60 pav. c), gauta šviesumo vertė – 196,7 px, kuri viršija minimalią tarpinės šviesumo ribą (190 px). Tai reiškia, tarpinė atitinka šviesumo sąlygą ir brokas šiame etape neaptinkamas. Atlikus vaizdo korekcijas ir vykdant brokuotų sričių paiešką (žr. 60 pav. d), aptikta viena brokuota sritis, kurios plotas yra lygus 657 px, kuris gerokai viršija minimalią ribą (40 px). Analogiškai 12-ajam atvejui, aptikti tik tarpinės skylės kontūrai, dėl didelio kontrasto (apie 18 px) tarp tarpinės ir skylės atspalvių. Kadangi skylės viduje nėra kontrasto pokyčių, todėl brokuotos sritys ten neaptinkamos. Tačiau, tarpinės skylės kontūrų aptikimo pakanka kamštelį pripažinti brokuotu.

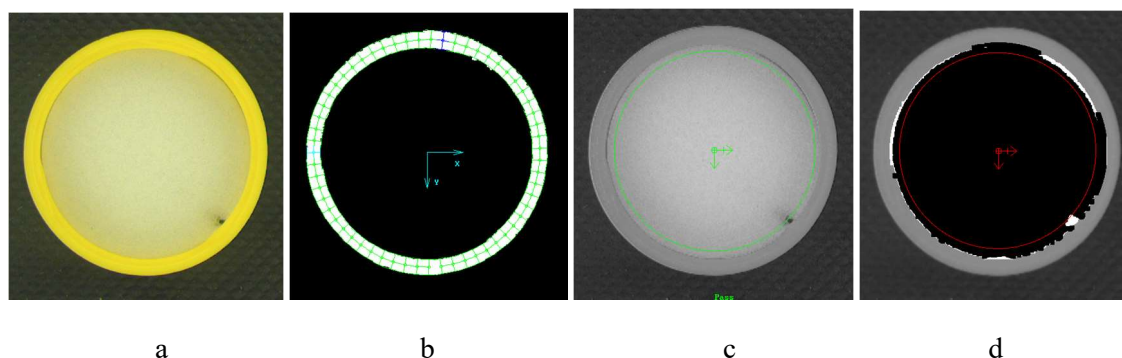
61 paveiksle pavaizduotas devynioliktasis brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – oranžinės spalvos kamštelis su skylė tarpinės krašte (žr. 61 pav. a), briauna – kokybiška.



61 pav. 19-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 32 134 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Tikrinant briauną tikrinimo įrankiu (žr. 61 pav. *b*) gautas 100 % apmokymo modelio atitinkamumas, taigi kamštelio briauna yra kokybiška. Pereinant prie tarpinės analizės, tarpinės šviesumo tikrinimo etape (žr. 61 pav. *c*) gautas tarpinės šviesumas siekia 174 px, kuris tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (> 170 px). Neaptikus broko šiame etape, atliekamos vaizdo korekcijos ir ieškoma brokuotų sričių koreguotame vaizde (žr. 61 pav. *d*). Aptiktos srities plotas yra lygus 1812 px, kuris yra ženkliai didesnis už minimalią srities ploto ribą (40 px). Kaip ir ankstesniais atvejais, kuriuose tarpinė yra su skylė, aptinkami tik tarpinės skylės kontūrai.

62 paveiksle pavaizduotas dvidešimtas brokuoto plastikinio kamštelio atvejis – geltonos spalvos kamštelis su degėsiu tarpinės krašte (žr. 62 pav. *a*), briauna – kokybiška.

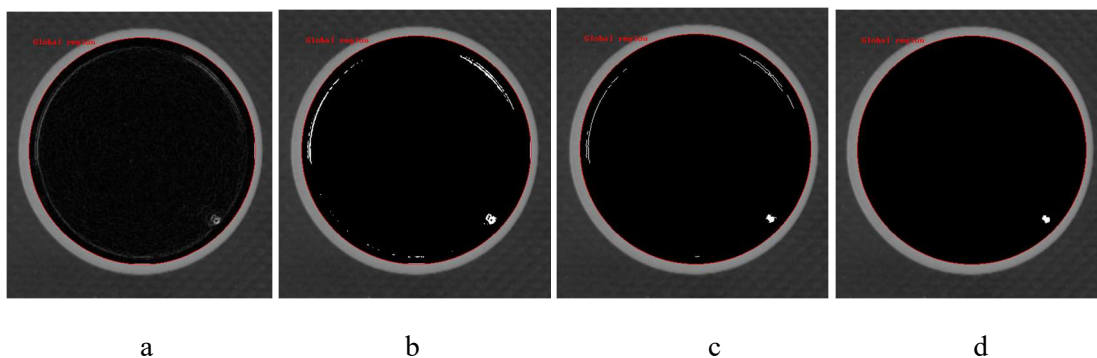


62 pav. 20-asis plastikinio kamštelio broko analizavimo pavyzdys: a – kameros vaizdas; b – briaunos tikrinimo įrankio vaizdas; c – tarpinės šviesumo tikrinimo įrankio vaizdas; d – tarpinės brokuotų sričių paieškos įrankio vaizdas

Briaunos aptikimo įrankiu aptiktos briaunos plotas yra lygus 30 708 px, kuris tenkina kokybiškos briaunos ploto sąlygą ($> 29\ 000$ px). Taip pat briaunos tikrinimo įrankiu (žr. 62 pav. *b*) apmokymo modelio atitinkamumas yra lygus 100 % nes visi tikrinimo segmentai sutampa. Taigi kamštelio briauna yra kokybiška. Perėjus prie tarpinės šviesumo tikrinimo etapo (žr. 62 pav. *c*) išmatuotas tarpinės šviesumas – 176,2 px, kuris tenkina kokybiškos tarpinės šviesumo sąlygą (> 170 px). Šiame etape neaptikus broko, atliekamos įprastos vaizdo korekcijos ir vykdoma brokuotų sričių paieška koreguotame vaizde (žr. 62 pav. *d*). Tačiau jokių brokuotų sričių neaptinkama nes degėsis tarpinėje nepatenka į paieškos zoną, todėl toks kamštelis klaidingai pripažįstamas kokybišku. Šiai problemai spręsti pasitelkiamos papildomos vaizdo korekcijos (žr. 63 pav.) ir naujas brokuotų sričių paieškos įrankis. Paeiliui atliekamos vaizdo korekcijos:

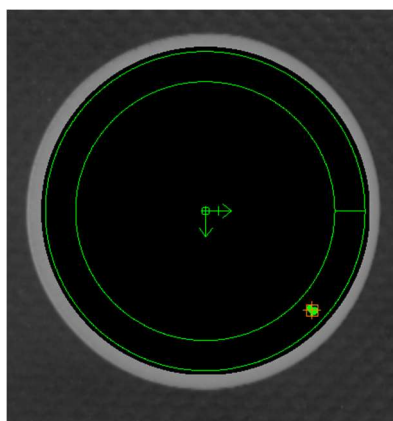
- Kraštinių aptikimas;
- išlyginimo operacija;
- paprastas slenkstinis filtravimas;
- morfologinė ploto atidarymo operacija;
- morfologinė ploto uždarymo operacija;
- ploninimo operacija;
- morfologinė atidarymo operacija.

Plačiau apie vaizdo korekcijų operacijas 1.5 ir 2.3 poskyriuose.



63 pav. Papildomos vaizdo korekcijos probleminio broko tarpinėje paieškai: a – koreguotas vaizdas po išlyginimo operacijos; b – vaizdas po slenksstinio filtravimo; c – po ploninimo operacijos; d – po morfologinės atidarymo operacijos

Po korekcijų, koreguotame vaizde (žr. 63 pav. *d*) vykdoma brokuotų sričių paieška (žr. 64 pav.).



64 pav. Brokuotų sričių tarpinėje paieška po papildomų korekcijų koreguotame vaizde

Šio brokuotų sričių paieškos įrankio paieškos plotas yra žiedo tipo, kurio vidurinė linija atitinka tarpinės kraštą. Šiuo atveju aptikta sritis, kurios plotas yra lygus 112 px. Tokio ploto sritis viršija minimalią brokuotos srities ploto ribą (40 px). Taigi šiame etape brokas aptinkamas ir kamštelis pripažįstamas brokuotu.

Tačiau pagrindinis papildomų vaizdo korekcijų ir brokuotų sričių paieškos įrankio įdiegimo trūkumas yra pailgėjęs bendras analizės laikas. Naujų vaizdo korekcijų taikymas vidutiniškai trunka 18,54 ms, o brokuotų sričių paieška – 2,61 ms. Galiausiai spalvotų kamštelių vidutinis analizės laikas pailgėjo 43,5 % (nuo 48,66 ms iki 69,81 ms), o baltos spalvos kamštelių analizės laikas pailgėjo 59 % (nuo 35,86 ms iki 57,01 ms).

Išvados

1. Iš literatūros apžvalgos apie mašininės regos ir žmogaus regos suliginimo išsiaiškinta, kad mašininė rega yra pranašesnė už žmogaus regą skirtingo kontrasto vaizdų spalvų ar geometrinių formų atpažinime, tačiau žmogaus rega yra pranašesnė ieškant ir atpažįstant specifinius bruožus ornamentinio tipo vaizduose. Apžvelgus pramonėje naudojamas trijų tipų vaizdo kameras, išsiaiškinti kiekvienų privalumai ir trūkumai. Pvz. linijinio skenavimo kameros yra labiausiai tinkamos stebėti ir tikrinti nenutrūkstamus produktus (pvz. plėvelę ar popierių), o ploto skenavimo kameros tinkamiausios stacionariems objektams stebėti ir tikrinti. Iš apžvelgtų kalibravimo metodų, pradedant nuo realaus pasaulio koordinacių taškų susiejimu su kameros matymo lauko taškais iki tinklelio šablono naudojimo, nuspręsta, kad pastarasis yra geriausiais pasirinkimas, kadangi galima objektyviai įvertinti plokštumos kreivumą ar kameros lęšio išgaubtumą. Apžvalgoje minėti skirtingo apšvietimo metodai: nuo šviesaus lauko iki tamsaus lauko ir galinio apšvietimo. Šviesaus lauko apšvietimo metodas tinkamiausias kreiviams, blizgiems paviršiams, o tamsaus lauko apšvietimas tinkamiausias, plokštaus paviršiaus defektams aptikti. Galinis apšvietimas tinkamiausias objekto formai, kontūro defektų aptikimui ar objekto buvimo faktui nusakyti.
2. Plastikinių kamštelių broko analizei naudojama spalvota kamera, nes kamšteliai būna septynių spalvų, apimančių visą spalvų gamą (nuo raudonos, geltonos, žalios iki violetinės bei nuo baltos iki tamsiai rudos). Pasirinkta kamera „Basler acA640-750uc“ yra pati sparčiausia (751 kadras/s) iš „Basler ace“ serijos, tačiau pačios mažiausios skiriamosios gebos (640×480 px). Tokia geba yra pilnai pakankama, nes gaunamas px ir mm santykis yra 1:0,09, o brokuotos sritys būna didesnės nei 1 mm. Objektyvas pasirinktas su antru pagal mažumą židinio nuotoliu (6 mm). Su mažu židinio nuotoliu vaizdas yra išgaubiamas, kurio dėka galima stebėti vidines kamštelio sienelės.
3. Pasirinktas apšvietimo tipas yra kombinacija iš dalinai šviesaus lauko ir tamsaus lauko apšvietimo tipų, nes išvengiama tiesioginių atspindžių į kameros objektyvą ir tuo pačiu pakankamai apšviečiamas kamštelis – galutiniu modeliu gautas apšvietos lygis apytiksliai lygus 20790 lx, kuris krenta 0,16 % už 20 mm (kamštelio krašte).
4. Sukurta vaizdo analizavimo programa, susidedanti iš 24 žingsnių. Atliekama dviejų rūšių kamštelių broko analizė – 1) Tikrinama kamštelio briauna; 2) Tikrinama kamštelio tarpinė. Kamštelio tarpinė nebetikrinama, jei aptiktas kamštelio briaunos brokas. Brokuoti kamšteliai šalinami suslėgtu oru nupučiant nuo konvejerio juostos. Sprendimo būdas iškilusiai problemai, kuomet naudojant vieną spalvos aptikimo įrankį su visų galimų spalvų mėginiais aptinkamos nepageidaujamos spalvos, yra naudoti atskirą spalvos aptikimo įrankį kiekvienai spalvai, o spalvos pasirinkimas paliekamas sistemos operatoriui.
5. Analizuojamų duomenų pakartojamumo tyrimas buvo atliktas tiriant kiekvienos spalvos kamštelį po 20 kartų. Pakartojamumas gautas skaičiuojant standartinį nuokrypį kamštelio briaunos plotui, briaunos pločiui ir tarpinės šviesumui. Gautas briaunos ploto standartinis nuokrypis yra 1,23–2,62 % ribose nuo vidurkinės reikšmės (rudos spalvos didžiausias, baltos spalvos mažiausias), briaunos pločio standartinis nuokrypio ribos: 0,82–2,38 % (rudos spalvos didžiausias, baltos spalvos mažiausias) ir tarpinės šviesumo standartinio nuokrypio ribos: 0,11–0,27 %. Absolūtus sistemos analizuojamų parametrų pakartojamumas gautas atimant didžiausio standartinio nuokrypio procentinę išraišką iš 100 %, t. y. – 97,38 %.
6. Atlikus programos algoritmo etapų vykdymo laiko tyrimą, gauta, kad spalvotų kamštelių analizė vidutiniškai trunka 48,66 ms, o baltų kamštelių – 35,86 ms. Ilgiausiai trunkantis analizės etapas

yra vaizdo korekcijų baltos spalvos kamštelio briaunai aptikti taikymo etapas, kurio vykdymo laikas siekia 20,73 ms. Tuo tarpu analogiško etapo likusių spalvų kamšteliams vykdymo laikas yra diapazone 12,29–13,16 ms. Tačiau spalvotiems kamšteliams reikalingas spalvos aptikimo įrankis vykdomas 19,39–20,54 ms. Vaizdo korekcijų brokuotų sričių tarpinėje paieškai etapas vykdomas 3,90–4,21 ms. Visi likusieji analizės etapai vykdomi nuo 0,52 ms iki 3 ms laiko, išskyrus koordinacių sistemos sukūrimą, kuris trunka 0,06 ms arba 60 μ s.

7. Atlikus dvidešimties skirtingų brokuotų kamštelių apžvalgą išsiaiškinta, kad 19 atvejų iš 20 brokas buvo atpažintas ir išanalizuotas. Iš kurių 4 atvejai yra rizikingi, kuomet brokas gali būti ne visada aptinkamas. Pvz. 6-uoju atveju, dėl žemo kontrasto (< 10 px) tarp brokuotų sričių ir sveikos tarpinės aptikta tik 1,1 % brokuotos srities tarpinėje; 8-ojo atvejo pavyzdžiu išsiaiškinta, kad teoriškai, žemo kontrasto (< 10 px) brokuotos sritys, kurių plotas yra mažesnis nei 211 px būtų neaptinkamos; 9-uoju atveju gautas didelis briaunos plotas (38007 px), lyginant su didžiausiu užfiksuotu kokybiško kamštelio briaunos plotu (35304 px), yra priimamas kaip kokybiškas, taigi įvedus 37500 px maksimalią leistiną ribą (~ 2000 px rezervas nuo didžiausios reikšmės), didelio briaunos ploto kamšteliai būtų pripažinti brokuotais jau pirmame etape; 11-uoju atveju, kuomet briaunos brokas yra nežymus, aptikta tik 18,3 % visos brokuotos briaunos ilgio, o likusios briaunos dalies plotis vidutiniškai siekė 20,8 px, kuris tenkina minimalaus pločio briaunos sąlygą (> 19 px). 20-uoju atveju broko aptikimas buvo nesėkmingas, nei su vienu broko analizės įrankiu brokas neatpažintas.
8. 20-ojo brokuoto plastikinio kamštelio nesėkmingos broko analizės problemai spręsti, buvo pasitelktos papildomos vaizdo korekcijos ir naujas brokuotų sričių paieškos tarpinėje įrankis. Po šių pakeitimų brokas sėkmingai atpažįstamas ir išanalizuojamas, tačiau analizės laikas spalvotiems kamšteliams išaugo 43,5 % (nuo 48,66 ms iki 69,81 ms), o baltos spalvos kamštelių analizės laikas išaugo 59 % (nuo 35,86 ms iki 57,01 ms).

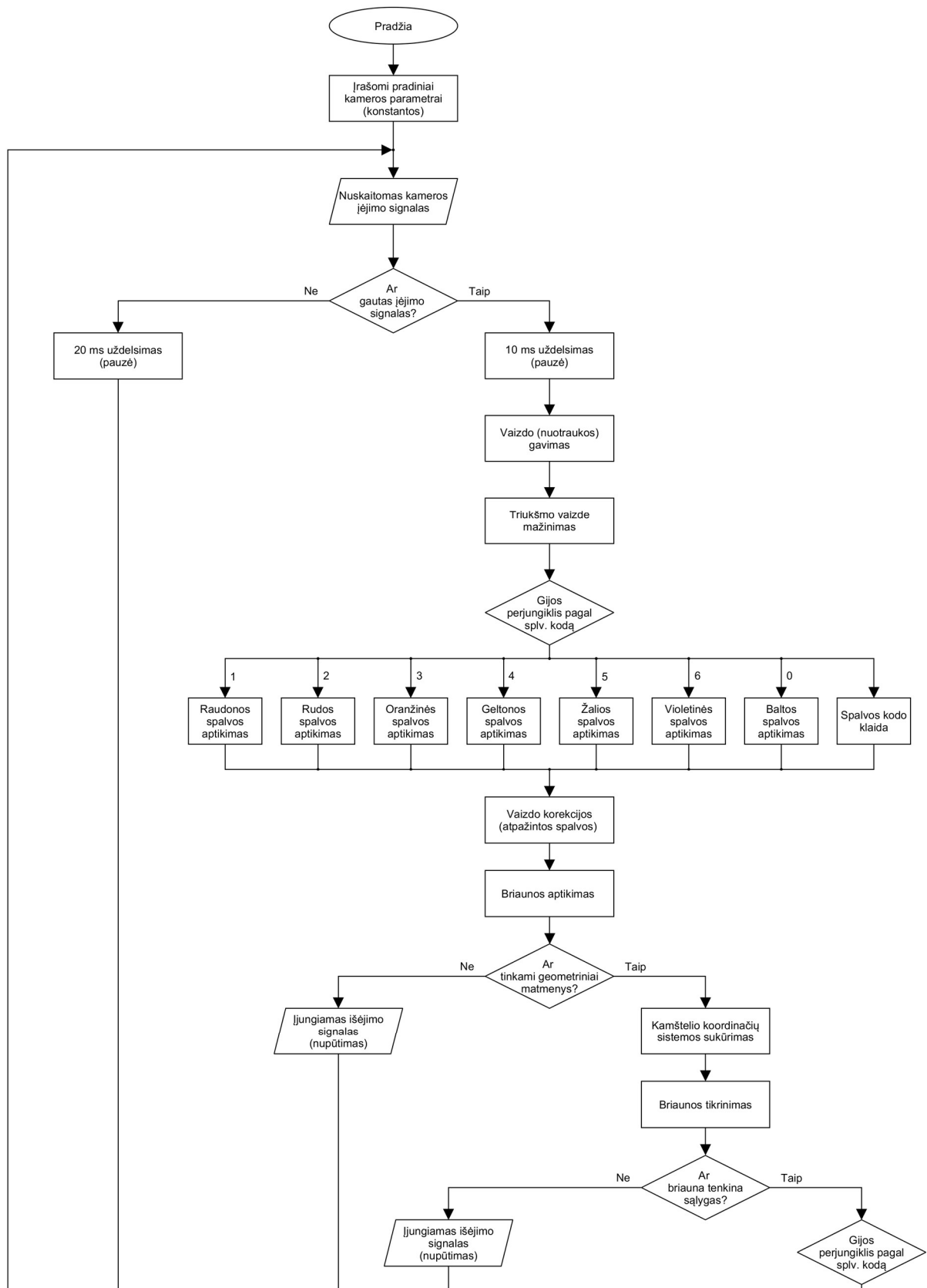
Literatūros sąrašas

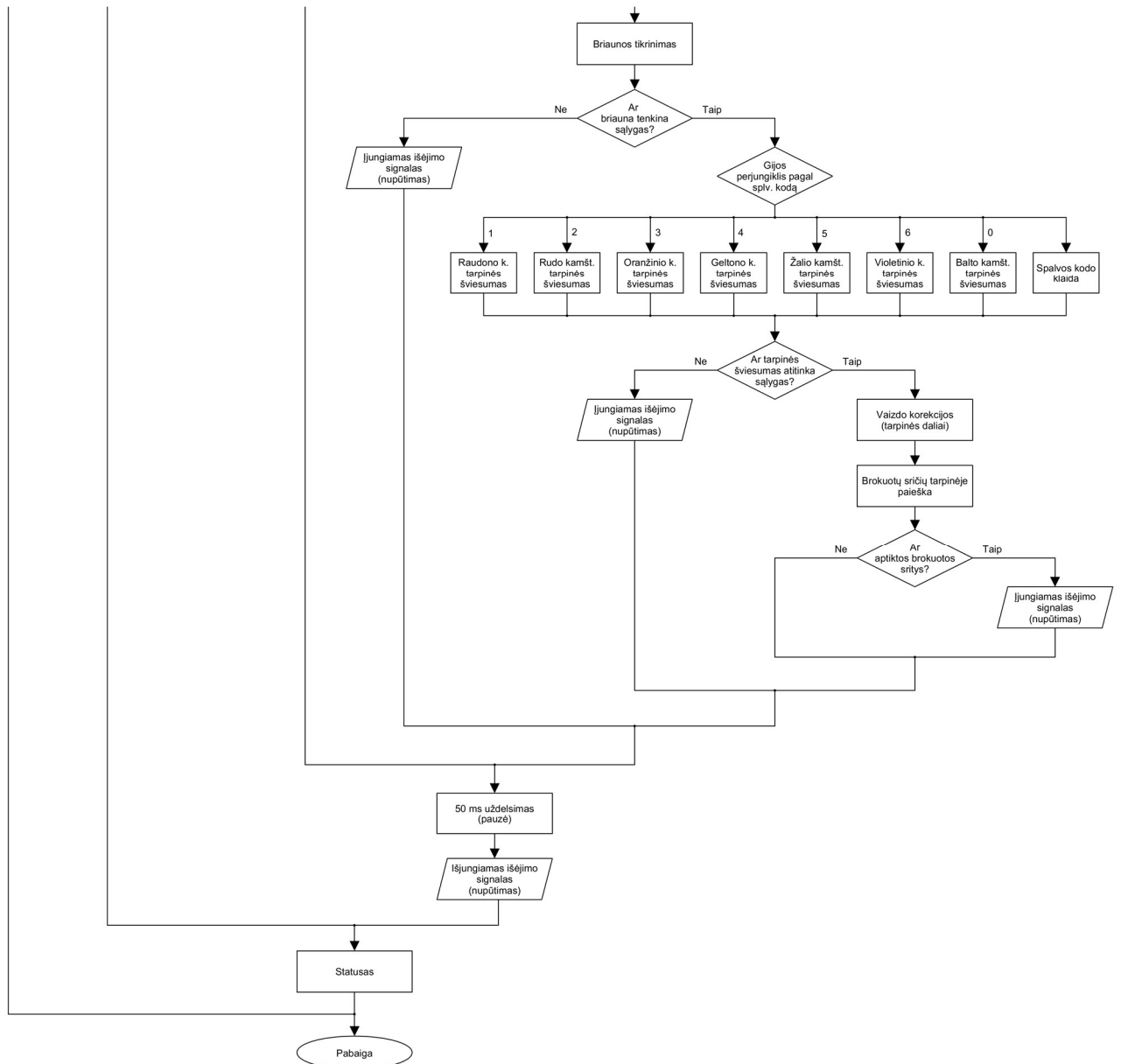
1. STEGER, C. et al. Machine vision algorithms and applications. In [interaktyvus]. 2018. p. 497. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=tppFDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR19&dq=illumination+for+machine+vision&ots=omrKrSqK&sig=srOf1gvN4-PbteUUPIIHfj5RSWA&redir_esc=y#v=onepage>.
2. BEYERER, J. et al. *Machine Vision* [interaktyvus]. Karlsruhe: Springer, 2016. 802 p. ISBN 9783662477939.
3. COGNEX CORPORATION What is Machine Vision - Introduction to Machine Vision | Cognex. In [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/what-is-machine-vision>>.
4. COGNEX CORPORATION Benefits of Machine Vision - Introduction to Machine Vision | Cognex. In [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/benefits>>.
5. STEMMER IMAGING Line scan cameras. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.stemmer-imaging.com/en-se/technical-tips/line-scan-cameras/>>.
6. TELEDYNE DALSA [interaktyvus]. 2014. Prieiga per internetą: <<https://www.inspect-online.com/file/track/7757/1>>.
7. BASLER AG Basler racer - Line Scan Cameras. In [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/line-scan-cameras/racer/>>.
8. CHROMASENS Line-scan vs. area-scan cameras: What is right for your machine vision application? In [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.automationmag.com/technology/hardware/6989-line-scan-vs-area-scan-cameras-what-is-right-for-your-machine-vision-application>>.
9. Selection Criteria industrial vision systems. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per internetą: <https://www.vision-doctor.com/images/stories/systeme/en/Selection_Criteria_industrial_vision_systems.png>.
10. BASLER AG Basler ace - Area Scan Cameras. In [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/#productline=aceu>>.
11. STEMMER IMAGING 3D machine vision – technical basics and challenges. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.stemmer-imaging.com/en-gb/knowledge-base/3d-machine-vision/>>.
12. Structured Light 3D scanner Schematic. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.opensourceimaging.org/wp-content/uploads/OpenSourceImagingInitiative-ProjectUpload-StructuredLight3Dscanner-Schematic.png>>.
13. PHOTONEO PhoXi® 3D Scanner. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.photoneo.com/phoxi-3d-scanner/>>.
14. SEMENIUTA, O. Analysis of Camera Calibration with Respect to Measurement Accuracy. In *Procedia CIRP* [interaktyvus]. 2016. Vol. 41, p. 765–770. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115011877>>.
15. MATROX ELECTRONIC SYSTEMS LTD. 2017. .
16. LUO, P.-F. - WU, J. Easy calibration technique for stereo vision using a circle grid. In [interaktyvus]. 2008. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per internetą: <<http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/>>.
17. MARTIN, D. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per internetą: <<https://www.advancedillumination.com/wp-content/uploads/2018/10/A-Practical-Guide-to-Machine-Vision-Lighting-v.-4-Generic.pdf>>.
18. COGNEX CORPORATION Machine Vision Lighting - Introduction to Machine Vision. In

- [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2019-05-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components/lighting>>.
19. MATROX ELECTRONIC SYSTEMS LTD. [interaktyvus]. .2018. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per internetą: <https://www.matrox.com/imaging/media/pdf/products/software/da/design_assistant.pdf>.
 20. BASLER AG Lenses | Basler. In [interaktyvus]. 2020. [žiūrėta 2020-01-11]. Prieiga per internetą: <<https://www.baslerweb.com/en/products/vision-components/lenses/>>.
 21. Suktukinis rakinimas – Vikipedija. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-01-02]. Prieiga per internetą: <https://lt.wikipedia.org/wiki/Suktukinis_rakinimas>.

Priedai

1 priedas. Programos algoritmas





2 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių briaunos geometrinis plotas

Eil. nr.	Kamštelio briaunos geometrinis plotas, px						
	Raudona	Ruda	Oranžinė	Geltona	Žalia	Violetinė	Balta
1	31317	36212	30426	30070	32904	32904	11443
2	32595	34702	30592	30633	33967	32135	11331
3	33038	34734	31219	30228	33943	32149	11538
4	33117	36598	30262	30959	34009	32771	11212
5	32318	34260	31136	30005	34391	31756	11630
6	33024	35789	30896	29721	34013	32600	11421
7	32447	33899	30380	30396	33560	31466	11331
8	31618	34418	30303	30603	33329	33953	11594
9	32167	36252	31008	30469	33954	33295	11471
10	32761	36230	30963	30517	35096	32872	11447
11	32480	36423	30763	29472	34395	32267	11459
12	32833	34287	30603	30249	34167	32044	11765
13	31485	35853	30641	29430	33945	32730	11354
14	31845	35053	30012	30839	33947	33267	11520
15	31994	34906	30109	29637	33562	32179	11304
16	32239	36285	30386	29709	33994	33122	11227
17	33395	35713	30758	30308	34524	32591	11415
18	32401	35989	31261	30698	33381	33253	11368
19	31346	35077	30431	30862	34175	32880	11529
20	33034	33415	29799	30456	34387	32315	11212

3 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių briaunos plotis

Eil. nr.	Kamštelio briaunos plotis, px						
	Raudona	Ruda	Oranžinė	Geltona	Žalia	Violetinė	Balta
1	26.8	30.4	25.9	25.8	27.9	27.9	8.9
2	27.4	29.4	26.0	26.1	28.7	27.4	8.9
3	27.9	29.6	26.5	25.7	28.8	27.4	9.0
4	27.5	31.0	25.9	26.3	29.0	27.9	8.8
5	27.4	28.9	26.3	25.7	28.9	27.2	9.0
6	27.7	30.1	26.2	25.5	28.6	27.7	9.0
7	27.5	29.0	26.0	26.0	28.3	27.1	8.9
8	26.9	29.5	25.9	26.2	28.1	28.5	9.0
9	27.2	30.5	26.2	26.0	28.9	28.2	9.0
10	27.7	30.8	26.2	26.0	29.3	27.8	8.9
11	27.5	30.9	26.2	25.3	29.1	27.5	9.0
12	27.6	29.0	26.1	25.9	28.9	27.4	9.1
13	26.9	29.8	26.1	25.2	29.0	27.8	8.9
14	27.2	29.7	25.7	26.2	28.8	28.2	9.0
15	27.2	29.8	25.8	25.6	28.6	27.5	8.9
16	27.3	30.7	25.9	25.5	28.7	28.0	8.9
17	28.0	30.4	26.2	25.8	29.0	27.8	8.9
18	27.4	30.6	26.5	26.1	28.2	28.1	8.9
19	26.9	29.9	25.9	26.1	28.9	27.9	9.0
20	27.8	28.5	25.5	25.9	28.9	27.5	8.8

4 priedas. Pakartotinai analizuojamų kamštelių tarpinės šviesumas

Eil. nr.	Kamštelio tarpinės šviesumas, px						
	Raudona	Ruda	Oranžinė	Geltona	Žalia	Violetinė	Balta
1	180.1	165.4	185.6	187.4	171.9	177.7	212.1
2	180.5	164.9	185.9	187.2	171.9	177.8	211.7
3	180.5	165.0	186.1	187.5	171.7	177.7	212.0
4	180.8	165.1	185.7	187.5	171.5	177.8	211.8
5	180.2	165.0	186.2	186.9	172.2	177.5	212.2
6	180.7	165.0	186.0	187.1	171.9	177.9	211.5
7	180.3	165.1	185.8	187.2	172.0	177.4	211.8
8	180.2	164.6	186.0	187.2	171.9	178.1	212.0
9	180.4	165.2	186.1	187.2	171.9	178.0	211.6
10	180.7	165.0	186.2	187.1	171.8	177.9	211.7
11	180.4	165.0	185.6	186.9	171.7	177.7	211.8
12	180.4	165.0	185.9	187.5	171.4	177.5	212.1
13	180.0	165.5	186.0	189.4	171.5	178.1	211.6
14	180.2	165.4	185.6	187.2	171.7	178.0	211.7
15	180.1	165.0	185.7	187.0	171.7	177.7	211.8
16	180.4	165.1	185.9	187.1	171.8	178.1	211.2
17	180.8	165.0	185.7	187.2	172.0	177.8	211.7
18	180.3	164.9	186.0	187.3	171.5	178.3	211.6
19	180.1	165.2	185.6	187.5	171.8	177.6	211.8
20	180.4	165.1	185.7	187.4	172.3	177.6	211.2