



VILNIAUS UNIVERSITETAS

VYTAUTAS JAKŠTYS

KONTŪRO ATPAŽINIMO METODŲ TAIKYMAS
SKERSINEI CHROMATINEI ABERACIJAI ŠALINTI AKIES
DUGNO VAIZDUOSE IR KELIO DANGOS DEFEKTAMS
ATPAŽINTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, informatikos inžinerija (07 T)

VILNIUS, 2018

Disertacija rengta 2013–2017 metais Vilniaus universiteto Duomenų mokslo ir skaitmeninių technologijų institute.

Mokslinis vadovas

dr. Virginijus Marcinkevičius

(Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07 T).

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju savo moksliniam vadovui dr. Virginijui Marcinkevičiui ir konsultantui dr. Povilui Treigiui už suteiktas žinias, vertingus patarimus, pasiūlymus, mokslines konsultacijas rengiant šią disertaciją ir skatinimą nuolat tobulėti.

Dėkoju prof. habil. dr. Gintautui Dzemydai už visapusę paramą doktorantūros studijose.

Noriu padėkoti straipsnių bendraautoriams dr. Ernestui Filatovui, Jevgenijui Tichonovui už pagalbą bei konsultacijas rengiant straipsnius ir disertaciją.

Dėkoju dr. Olgai Kurasovai už vertingas pastabas ir patarimus rengiant šią disertaciją.

Dėkoju Vilniaus universiteto Duomenų mokslo ir skaitmeninių technologijų instituto analizės skyriaus kolektyvui už bendradarbiavimą ir pagalbą.

Nuoširdžiai dėkoju savo artimiesiems ir draugams už jų paramą, moralinį palaikymą, kantrybę ir supratingumą.

Dėkoju visiems, kurie tiesiogiai ar netiesiogiai prisidėjo prie šio darbo.

Vytautas Jakštys

Santrauka

Šioje disertacijoje vaizdų analizės ir apdorojimo kontekste tiriami kontūro atpažinimo metodai sprendžiant kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo ir skersinės chromatinės aberacijos akies dugno vaizduose sumažinimo uždavinius.

Objektų kontūrų atpažinimas rastriniuose vaizduose aktualus daugeliui praktinių sričių: astronomijai, meteorologijai, kriminalistikai, karybai, pramonei, inžinerijai, medicinai, archeologijai, robotikai ir t. t. Sukurta daug įvairių metodų kontūrams atpažinti, kurie grindžiami diferencialiniais operatoriais, energijos funkcijomis, histerizės, neuroninių tinklų metodais ir t. t. Šie metodai efektyvūs vaizduose, kurių maža spalvinė variacija arba kurių tekstūra labai vienalytė, arba objektai visada išsidėstę simetriškai vienas kito atžvilgiu. Tačiau realybėje tokių vaizdų pasitaiko retai, todėl sukurtų metodų tikslumas labai sumažėja. Šioje disertacijoje analizuojami vaizdai, tokie kaip kelio dangos defektai ar medžio šakos lentoje, kurių tekstūra nevienalytė, didelė spalvinė variacija, o objektai visada skirtingos formos. Šioje disertacijoje pristatytas metodas kelio dangos defektų, medžio šakos lentoje kontūrams atpažinti, kuris pritaikius binarizacijos slenksčio metodą kiekvieną kontūro ar triukšmo tašką įvertina svoriu ir taikant Dijkstra algoritmą suranda labiausiai tikėtiną kontūrą. Norint dar labiau sumažinti netinkamai atpažintus kontūro taškus ieškomi ir pašalinami labiausiai vienas nuo kito nutolę kontūro taškai. Disertacijoje šis metodas palygintas su kitais išanalizuotais kontūrų atpažinimo metodais. Atlikus kontūrų atpažinimo eksperimentinius tyrimus su kelio dangos defektais pastebėta, kad aktyvaus kontūro metodas tik 53 % tikslumu atpažįsta kontūrus lyginant su žmogaus apibrėžtu kontūru. Disertacijoje pristatytas naujas kontūro atpažinimo metodas 25 % tiksliau už aktyvaus kontūro metodą atpažįsta kontūrus lyginant su žmogaus

apibrėžtu kontūru. Tikslumas vertinamas viso žmogaus apibrėžto kontūro ploto su žmogaus apibrėžto ir metodo paskaičiuoto kontūro plotų skirtumu.

Kita disertacijoje tiriama sritis, kurioje taikyti kontūrų atpažinimo metodai – skersinės chromatinės aberacijos šalinimas. Chromatinė aberacija pasireiškia, kai balta šviesa, praėjusi pro optinių lęšių sistemą, dėl dispersijos sukuria įvairių vaizdo iškraipymų. Kadangi kiekvienos spalvos bangos ilgis skiriasi, ir šviesos spindulio nuokrypio kampas lūžtančiai lęšyje kiekvienai spalvai skiriasi. Visi fotoaparatai turi optinius lęšius, ir visose optinėse sistemose pasireiškia įvairių iškraipymų. Norint pagerinti fotografuojamo vaizdo kokybę tikslinga chromatinę aberaciją sumažinti. Sukurti mechaniniai metodai, grindžiami achromatinių, apochromatinių arba difrakcinių lęšių pridėjimu į optinę sistemą, leidžia sumažinti chromatinę aberaciją. Tačiau jei ribojami fotoaparatus dydžiai, mechaniniai sprendimo metodai netinka dėl užimamos vietos ir kitų priežasčių. Ši problema gali būti sprendžiama programiniais metodais. Tačiau dėl galimų įvairiausių optinių sistemų išdėstymo variantų neįmanoma sukurti vieno universalaus metodo chromatinei aberacijai šalinti, todėl šią problemą reikia spręsti kiekvienai optinei sistemai atskirai. Atlikta analitinė apžvalga parodė, kad skersinę chromatinę aberaciją galima šalinti metodais, grindžiamais kalibravimo šablonų taikymu, tačiau toks sprendimas tinka tik turint fotoaparatus, su kuriuo buvo fotografuota scena. Sumažinti skersinei chromatinei aberacijai neturint fotoaparatus su kuriuo buvo fotografuota scena, disertacijoje pristatomas naujas skersinės chromatinės aberacijos akies dugno vaizduose šalinimo metodas, grindžiamas kraujagyslių tinklo kontūrų atpažinimu kuris nereikalauja turėti fotoaparatus su kuriuo buvo fotografuota scena.

Visa disertacijos apimtis – 129 puslapis, 58 numeruotos formulės, 54 iliustracijos ir 8 lentelės. Literatūros sąrašą sudaro 134 šaltiniai.

Tyrimų rezultatai publikuoti 2 periodiniuose recenzuojamuose mokslo žurnaluose, 2 straipsniai nerecenzuojamuose užsienio tarptautinės konferencijos leidiniuose, 5 santraukos konferencijų leidiniuose. Šie rezultatai pristatyti ir aptarti 3 tarptautinėse ir 4 nacionalinėse konferencijose.

Abstract

In this research, in the context of image analysis and processing, contour recognition methods are investigated for solving the problem of road surface defect recognition and lateral chromatic aberration in eye fundus images.

The recognition of object contours in raster images is relevant in many practical fields: astronomy, meteorology, forensics, warfare, industry, engineering, medicine, archeology, robotics, and many others. Different methods for recognizing contours are based on differential operators, energy functions, hysteresis, neural network methods, etc. Such methods are effective in images with low color variations, with a lot of uniform textures or objects that are always symmetrical in relation to each other. But in reality, such images are rarely seen, and the accuracy of the methods developed is greatly reduced. In this thesis, images such as road surface defects or timber knots which do not have a uniform texture, have large color variations, and objects that are always in different shapes, are analyzed. The thesis presents a method for identifying contours of road surface defects and timber knots, which, by applying the binary threshold method, evaluates each point of the contour or noise by weight and uses the Dijkstra algorithm to find the most likely contour. In order to further reduce the points that are not recognized correctly, the most distant points are spotted and removed. In this study, this method was compared to other analyzed contour detection methods. Following the contour detection experiments with road surface defects, it was observed that the active contour technique only recognizes contours with an accuracy of 53% when compared to the accuracy of contours detected by the human eye. The new contour detection method introduced in the thesis is 25% more accurate than the active contour method when recognizing the contours, when both are compared to the

human-defined contours. The precision is measured by the difference in the total human-defined contour area with the human-defined and method-calculated contour areas.

Another topic investigated in the research for which contour detection methods were used was the reduction of lateral chromatic aberration. Chromatic aberrations occur when white light passes through the optical lens system and dispersion results in various distortions of the image. As the wavelength of each color is different, the angle of deviation of the light radius differs from one color to another after passing through the lens. All cameras use optical lenses, and various distortions occur in all optical systems. In order to improve the quality of the image captured, it is essential to reduce chromatic aberration. The development of mechanical methods based on the adding of achromatic, apochromatic or diffractive lenses to the optical system helps to reduce the effect of chromatic aberration. However, when limiting the size of the camera, mechanical methods of solving the problem are not suitable due to the occupancy of space and other reasons. This problem can be solved using software methods. However, due to a variety of optical system layouts, it is not possible to create one universal method for eliminating chromatic aberration, so this problem needs to be addressed for each optical system individually. An analytical review has shown that the lateral chromatic aberration effect can be reduced by methods based on calibration patterns, but such a solution is only appropriate when the camera, with which the scene was captured, is available. To reduce the effect of lateral chromatic aberration without having the camera with which the scene was captured, a new method for reducing lateral chromatic aberration in eye fundus images is presented in the thesis. It is based on the detection of contours in the blood vessel network and does not require the camera with which the image was captured.

General scope of the thesis — 129 pages, 58 numbered formula, 54 figures and 8 tables. The literature list is comprised of 134 sources.

Analytical results were published in 2 periodical scientific journals and 7 other publications. These results were presented and discussed in 3 international and 4 national conferences.

Žymėjimai

Simboliai	
(x, y)	Vaizdo taško (pikslio) koordinatės.
(x', y')	Vaizdo taško (pikslio) koordinatės po korekcijos.
(x_f, y_f)	Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro koordinatės.
ΔE_{ab}	Atstumo matavimas tarp dviejų spalvų (L_1, a_1, b_1) ir (L_2, a_2, b_2) CIE Lab spalvų modelyje.
$A(x, y)$	Pradinio RGB vaizdo intensyvumas (x, y) taške.
a_0, \dots, a_{15}	Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo korekcijos modelių koeficientai.
$B(x, y)$	Mėlynos spalvos intensyvumas (x, y) taške.
E	Energijos funkcija. Kiti skirtingų energijų žymėjimai: $E_{int}, E_{img}, E_{con}, E_{cont}, E_{curv}, E_{line}, E_{term}$.
$E_{abr}(G, B),$ $E_{abr}(G, R)$	Šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos, pritaikyta vaizdams ir matuojanti intensyvumų skirtumus skirtinguose kanaluose.
F_R, F_G, F_B	Raudonos (R), žalios (G), mėlynos (B) spalvų fokuso centrai.
f_R, f_G, f_B	Raudonos (R), žalios (G), mėlynos (B) spalvų fokuso ilgiai nuo lęšio iki fokuso centrų.
$G(x, y)$	Žalios spalvos intensyvumas (x, y) taške.

Simboliai	
$G_f(x, y)$	Gauso glotninimo filtro reikšmė vaizdo (x, y) taške.
G_x, G_y	Gradientinio operatoriaus konvoliuciniai filtrai (pvz. horizontalus, vertikalus ir kiti).
h	Vaizdo aukštis.
θ	Gradiento operatoriaus briaunos orientacijos kampas.
$I(x, y)$	Pilkosios spalvos vaizdo intensyvumas (x, y) taške.
M_{AChZ}	<i>Achromatic Zipper</i> – vaizdo kokybės vertinimo matas.
M_{BM}	Suliejimo matas (angl. <i>Blur Metric</i>) – vaizdo kokybės vertinimo matas.
M_{ChZ}	<i>Chromatic Zipper</i> – vaizdo kokybės vertinimo matas.
P	Optinio lęšio galia.
$P(x, y)$	Koreguoto RGB vaizdo intensyvumas (x, y) taške.
p	Studento t-testo reikšmingumo lygmuo.
$R(x, y)$	Raudonos spalvos intensyvumas (x, y) taške.
σ	Standartinis kvadratinis nuokrypis (angl. <i>Standard deviation</i>).
$T(x, y)$	Binarizacijos slenkstis, apskaičiuotas kiekvienam vaizdo taškui (x, y) atskirai.
V_D	Abbès skaičius.
w	Vaizdo plotis.
ω	Lęšio dispersija.

Santrumpos	
ChA	Chromatinė aberacija (angl. <i>Chromatic aberration</i>).
FCK, FCT	Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro nustatymo metodai.
IChA	Išilginė chromatinė aberacija (angl. <i>Axial or Longitudinal Chromatic Aberration</i>).
ISSM	Atvirkštinis struktūrinis panašumas (angl. <i>Inverse Structural Similarity</i>).
KA	Skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu.
KŠ	Skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas kalibravimo šablonais.
MSE	Vidutinė kvadratinė paklaida (angl. <i>Mean Squared Error</i>).
PSNR	Didžiausias signalo ir triukšmo santykis (angl. <i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>).
RMSE	Šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. <i>Root Mean Squared Error</i>).
SSIM	Struktūrinis panašumas (angl. <i>Structural Similarity</i>).
SChA	Skersinė chromatinė aberacija (angl. <i>Lateral or Transverse Chromatic Aberration</i>).

Iliustracijų sąrašas

1 pav. Populiariausi briaunų pavyzdžiai: a) laiptelio arba ideali briauna; b) nuožulni briauna; c) stogo briauna; d) reali briauna.	18
2 pav. Briaunos pavyzdys.	19
3 pav. Briaunos aptikimas naudojant išvestines [16].....	20
4 pav. Populiariausių statmenų gradiento operatorių konvoliuciniai filtrai.	21
5 pav. Populiariausių kompaso gradiento operatorių konvoliuciniai filtrai.	22
6 pav. Laplaso operatoriaus konvoliuciniai filtrai.	23
7 pav. Laplaso ir Gauso operatoriaus konvoliucinis filtras, kai $\sigma = 1,4$	24
8 pav. Kenio metodo schema.....	25
9 pav. Skirtingi kelio dangos defektų – duobių pavyzdžiai.....	29
10 pav. Skirtingų metodų rezultatai: a) originalus vaizdas; b) Kenio metodas; c) Sobelio operatorius; d) Kiršo operatorius; e) Previto operatorius; f) Gyvatės metodas.	32
11 pav. Gyvatės modelio rezultatas. a) pradinis kontūras; b) galutinis gyvatės modelio kontūras.....	33
12 pav. Metodo kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo schema.....	34
13 pav. Skirtingų metodų pavyzdžiai: a) Huang [48], b) Otsu [56], c) Minimum [49], d) Trikampio [59], e) Prisitaikantis [15].....	36
14 pav. Slenksčio nustatymas trikampio algoritmu.	36
15 pav. Priklausomybė prisitaikančio binarizacijos slenksčio metodo branduolio dydžio: a) ksize = 951; b) ksize = 1075; c) ksize = 1201.	38
16 pav. Vaizdo padalijimas į atkarpas.	38
17 pav. Atkarpos iš aibės Z pavyzdys.	39
18 pav. Išskleista kelio dangos defektą apibūdinančių pikselių aibė.....	39
19 pav. Kontūras, gautas naudojant Dijkstros algoritmą.....	41
20 pav. Kelio dangos defekto kontūras.	42
21 pav. Kelio dangos defektų kontūrų atpažinimas skirtingais metodais: a) Gyvatės – Trikampio; b) Gyvatės – Prisitaikantis; c) Pasiūlytas – Trikampio; d) Pasiūlytas – Prisitaikantis.	43
22 pav. Įvairūs kontūrų pavyzdžiai. a) originalūs vaizdai; b) disertacijoje pasiūlyto kontūro atpažinimo metodo rezultatai.	45
23 pav. Akies dugno vaizdai: a) vaizdas su skersinės chromatinės aberacijos efektu; b) vaizdas be chromatinės aberacijos efekto.	48
24 pav. Aberacijų tipų pavyzdžiai: a) šabloninis vaizdas; b) astigmatinė; c) komatinė; d) lauko kreivumo; e) įgaubta distorsinė; f) išgaubta distorsinė; g) sferinė; h) išilginė chromatinė; i) skersinė chromatinė. Vaizdai panaudoti iš MacEvoy [72] puslapio....	49
25 pav. Aberacijų tipai.....	50
26 pav. Astigmatinė aberacija: a) astigmatinės aberacijos principas [74]; b) anastigmatinis lęšis.....	51

27 pav. Komatinės aberacijos principas [74].....	51
28 pav. Lauko kreivumas: a) lauko kreivumo principas [74]; b) storas menisko lęšis.	52
29 pav. Distorsinės aberacijos iškreipimai: a) neiškreipytas objektas, b) iškreipymas, gautas naudojant glaudžiamąjį lęšį; c) iškreipymas, gautas naudojant sklaidomąjį lęšį.	53
30 pav. Sferinė aberacija: a) sferinės aberacijos principas; b) sferinės aberacijos šalinimas [76].....	54
31 pav. Išilginė chromatinė aberacija.	55
32 pav. Skersinė chromatinė aberacija.	57
33 pav. Bayer mozaika: a) raudonos; b) žalios; c) mėlynos spalvų filtrai; d) bendra spalvų filtrų matrica.	59
34 pav. Bayer mozaikos spalvų atkūrimas [84].....	59
35 pav. Kalibravimo šablonai [85].	60
36 pav. Kalibravimo šablonai: a) originalūs kalibravimo šablonai; b) kalibravimo šablonų vaizdai, gauti nufotografavus SmartScope M5 fotoaparatu.	61
37 pav. Spalvų persidengimas: a) RGB spalvų intensyvumas horizontalios atkarpos nuo centro iki vaizdo krašto; b) RGB spalvos idealiame modelyje.....	62
38 pav. Lęšių išdėstymo schemas pavyzdys šalinant aberacijas [75].	63
39 pav. Optiniai lęšiai: a) achromatinis lęšis; b) apochromatinis lęšis.....	64
40 pav. Dviejų sluoksnių difrakcinis lęšis.	65
41 pav. Programiniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai.	66
42 pav. Korekcijos modeliai: a) paprastas, b) afininis; c) radialinis.	69
43 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodų naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą schema.	80
44 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo naudojant kalibravimo šablonus metodo schema.	82
45 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo, pagrįsto kraujagyslių tinklo atpažinimu, metodo schema.....	83
46 pav. Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro suradimas: a) nufotografuotas kalibravimo šablono vaizdas; b) kiekvieno kvadratėlio RGB kanalų centrai; c) nubrėžtos linijos per kiekvieną RGB kanalų centrą.	85
47 pav. Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro suradimas G-R vaizde: a) G- R vaizdas; b) įbrėžtas kvadratas; c) vaizdas, gautas panaudojus Gauso blukinimo filtrą; d) surastas skersinės chromatinės aberacijos centras.	87
48 pav. Akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimo schema.	88
49 pav. Pagrindiniai žingsniai akies dugno kraujagyslių nustatymo: a) originalus vaizdas; b) lokalaus normalizavimo filtras; c) aukštų dažnių filtras; d) binarinis vaizdas panaudojus slenkstį; e) 100 paryškintų kontūrų; f) mėlyno kanalo kontūrai; g) žalio kanalo kontūrai; h) raudono kanalo kontūrai.....	90
50 pav. Vaizdui, gautam Optomed SmartScope M5 fotoaparatu, panaudotas 30 × 30 tinklelis bei kiekvienam gautam naujam tinklelio vaizdui pritaikytas paprasčiausias korekcijos modelis naudojant Levenbergo-Markardo minimizavimo algoritimą. a) juodai baltų kvadratėlių kalibravimo šablono vaizdo raudono ir žalio kanalų skirtumas; b) juodai baltų kvadratėlių šablono vaizdo mėlyno ir žalio kanalų skirtumas; c) akies dugno vaizdo raudono ir žalio kanalų skirtumas; d) akies dugno vaizdo mėlyno ir žalio kanalų skirtumas.	94

51 pav. Kalibravimo šablonai prieš (viršutinė eilutė) ir po (apatinė eilutė) projekcinio koregavimo. a) ir d) apskritimų, b) ir e) juodų / baltų kvadratėlių 4×4 pikselių dydžio, c) ir f) juodų/baltų kvadratėlių 8×8 pikselių dydžio kalibravimo šablonai..	95
52 pav. Atstumas nuo fotoaparato lęšio iki tinklainės.....	96
53 pav. ISSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.....	99
54 pav. Korekcijos rezultatai su KŠ ir KA metodais naudojant projekcinį modelį. a) ir d) vaizdai be pakeitimų; b) ir e) vaizdai atlikus korekciją naudojant KŠ metodą su projekciniu modeliu; c) ir f) vaizdai atlikus korekciją naudojant KA metodą su projekciniu modeliu.....	101

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Briauņų ir kontūrų atpažinimo metodų ypatybės [9].	28
2 lentelė. Metodų tikslumų lyginimas.	44
3 lentelė. Korekcijos modelių rezultatai naudojant KŠ metodą.	92
4 lentelė. Apskaičiuotų RMSE korekcijos modeliams rezultatai naudojant KŠ metodą.	97
5 lentelė. Apskaičiuoti SSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.	98
6 lentelė. Apskaičiuoti ISSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.	98
7 lentelė. Skersinės chromatinės aberacijos pašalinimo vertinimo matų rezultatai...	100
8 lentelė. Studento t-testų rezultatai.	101

Turinys

ĮVADAS	5
Tyrimų sritis	5
Problemos aktualumas	7
Tyrimų objektas	9
Darbo tikslas ir uždaviniai	9
Tyrimų metodai	10
Mokslinis naujumas	10
Praktinė darbo reikšmė	11
Ginamieji teiginiai	11
Darbo rezultatų aprobavimas	12
Disertacijos struktūra	14
1 KONTŪRŲ ATPAŽINIMO METODŲ TINKAMUMO KELIO DANGOS KONTŪRAMS ATPAŽINTI TYRIMAS	15
1.1 Objektų kontūrų atpažinimas rastriniuose vaizduose.....	16
1.1.1 Diferencialiniai operatoriai briaunoms išskirti	19
1.1.2 Algoritminiai metodai kontūrai išskirti	24
1.1.3 Briaunų ir kontūrų atpažinimo metodų ypatybės.....	27
1.2 Kelio dangos defektų atpažinimo metodai.....	29
1.3 Kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas	32
1.4 Eksperimentinis lyginimas	42
1.5 Skyriaus išvados.....	46
2 ABERACIJOS IR VAIZDŲ KOKYBĖ	47
2.1 Aberacijų tipai.....	48
2.1.1 Monochromatinės aberacijos	49

2.1.2	Chromatinės aberacijos.....	54
2.1.3	Iškraipymai, atsirandantys dėl vaizdo jutiklių.....	57
2.2	SmartScope M5 Optomed fotoaparato chromatinės aberacijos tipo nustatymas 60	
2.3	Chromatinės aberacijos šalinimo metodai	62
2.3.1	Mechaniniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai.....	63
2.3.2	Programiniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai	65
2.4	Chromatinės aberacijos šalinimo kokybės vertinimo metodai	71
2.4.1	Vidutinė kvadratinė paklaida.....	72
2.4.2	Šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos	72
2.4.3	Didžiausias signalo ir triukšmo santykis	72
2.4.4	Struktūrinis panašumas.....	72
2.4.5	Pokyčio tarp dviejų spalvų matas	73
2.4.6	Suliejimo matas	74
2.4.7	<i>Chromatic</i> ir <i>Achromatic Zipper</i> matai.....	76
2.5	Skyriaus išvados.....	78
3	SKERSINĖS CHROMATINĖS ABERACIJOS ŠALINIMO METODAS	79
3.1	Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodai naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą.....	79
3.1.1	Skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas naudojant kalibravimo šablonus	82
3.1.2	Pasiūlytas skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu	83
3.2	Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrų nustatymas.....	84
3.3	Akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimas	88
3.4	Ekperimentiniai tyrimai.....	90
3.4.1	Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrų nustatymo metodų lyginimas.....	91
3.4.2	Skersinės chromatinės aberacijos koregavimas taikant korekcijos modelius.....	92
3.4.3	Geriausio skersinės chromatinės aberacijos šalinimo modelio nustatymas naudojant kalibravimo šablonus	95
3.4.4	Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodų lyginimas naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą.....	99
3.5	Skyriaus išvados.....	102

4 BENDROSIOS IŠVADOS	105
5 LITERATŪRA	107

Įvadas

Tyrimų sritis

Disertacijoje gauti rezultatai susiję su dviem tyrimų sritimis: vaizdų apdorojimu (angl. *Image Processing*) ir vaizdų analize (angl. *Image Analysis*).

Vaizdinė informacija taip sparčiai išpopuliarėjo įvairiose srityse ir jos duomenų tiek daug, kad kilo didelis poreikis ją apdoroti norint gauti reikšmingos informacijos, pvz., atpažinti objektą, objekto kontūrą, segmentuoti objektus ir t. t. Ši sritis įvardijama vaizdų analizės sritimi. Skaitmeninių vaizdų analizė, objektų atpažinimas ir kontūrų nustatymas išplitęs po įvairias sritis: astronomijoje, meteorologijoje, kriminalistikoje, karyboje, pramonėje, inžinerijoje, medicinoje, archeologijoje, robotikoje ir t. t. Sukurta daug įvairių metodų objektams atpažinti, ir jie pakankamai gerai veikia sprendžiant tokius uždavinius, kaip veido atpažinimas, mašinos numerio atpažinimas ir t. t. Tipiniu atveju tokiems uždaviniams spręsti metuose naudojami neuroniniai tinklai tad ir jie yra labai patikimi bei efektyvūs, tačiau nepakankamai gerai atpažįsta kontūrus, kurių didelė spalvinė variacija, nevienalytė tekstūra, o kontūras kiekvienu atveju skirtingos formos. Įvairius vienalytės tekstūros kontūrus gerai galima atpažinti Kenio metodu (angl. *Canny method*) [1], tačiau šiuo metodu blogai atpažįstami objektai, kurių dauguma kontūro taškų labai panašūs į triukšmo taškus. Šalinant triukšmą, šalinami kontūro taškai, ir atvirkščiai, nešalinant triukšmo, triukšmo taškai atpažįstami kaip kontūro taškai. Tokiems kontūrams atpažinti sukurtas aktyvaus kontūro metodas. Šiuo metodu iš anksto apibrėžta uždara kreivė aplink objektą koreguojama ieškant trumpiausio kelio tarp kontūro taškų, esančių ant kreivės, ir atsižvelgiant į įvairias pradines

sąlygas: briaunos kryptį, briaunos intensyvumo dydį ir t. t. Vis dėlto norint, kad šis metodas konverguotų, reikia pradinius taškus atidėti netoli ieškomo kontūro.

Šioje disertacijoje vaizdų analizės ir apdorojimo kontekste tiriami kontūro atpažinimo metodai sprendžiant kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo ir skersinės chromatinės aberacijos akies dugno vaizduose sumažinimo uždavinius.

Sudėtinga atpažinti objekto kontūrą, jei vaizdo didelė spalvinė variacija, jei šio tekstūra nevienalytė, jei objekto kontūras kiekviename vaizde turi skirtingą formą. Tokių objektų pavyzdžiai – kelio dangos defektai ar šakos lentoje, pavaizduoti 22 a) paveiksle. Šioje disertacijoje pristatytas metodas kelio dangos defektų ir medžio šakos lentoje kontūrams atpažinti, kuris taikant binarizacijos slenksčio metodą kiekvieną kontūro ar triukšmo tašką įvertina svoriu, o taikant Dijkstra [2] algoritmą suranda labiausiai tikėtiną kontūrą. Norint dar labiau sumažinti netinkamai atpažintus kontūro taškus, ieškomi ir pašalinami labiausiai vienas nuo kito nutolę kontūro taškai. Disertacijoje šis metodas lyginamas su kitais išanalizuotais kontūrų atpažinimo metodais.

Kita disertacijos tiriamą sritis, kurioje buvo taikomi kontūrų atpažinimo metodai – skersinės chromatinės aberacijos šalinimas. Dauguma kompiuterių, telefonų ir kitų prietaisų turi vienokį ar kitokį vaizdo fiksavimo įrenginį, todėl itin aktualu jį sukurti tokį, kad vaizdai būtų kuo kokybiškesni. Kadangi visi fotoaparatai turi lęšius, viena iš pagrindinių kliūčių yra chromatinė aberacija (ChA). Chromatinė aberacija pasireiškia, kai balta šviesa, praėjusi pro optinių lęšių sistemą, dėl dispersijos sukuria įvairių vaizdo iškraipymų. Kadangi kiekvienos spalvos bangos ilgis skiriasi, ir šviesos spindulio nuokrypio kampas lūžtančiai lęšyje kiekvienai spalvai skiriasi. Šį efektą mechaniškai galima sumažinti achromatiniais, apochromatiniais arba difrakciniais lęšiais. Tačiau jei ribojami fotoaparatus dydžiai, mechaninis sprendimų būdas netinka, nes atsiranda papildomos vietos, svorio ir kaštų ribojimų. Dėl šių priežasčių kyla poreikis kiekvienai optinei sistemai sukurti programinę įrangą, kuri kaip galima labiau sumažintų chromatinę aberaciją. Dažniausiai literatūroje aprašomi

metodai taiko fotoaparato kalibravimą [3] [4] [5]. Nufotografavus sceną su pasirinktais šabloniniais vaizdais ir palyginus gautą rezultatą su šablono vaizdu, parenkami įvairūs korekcijos modeliai, sumažinantys neatitikimus tarp šių vaizdų. Taip parinktas korekcijos modelis taikomas visiems tuo fotoaparatu padarytiems vaizdams. Tačiau šių metodų negalima taikyti vaizdams neturint fotoaparato, su kuriuo fiksuota scena. Kitas chromatinės aberacijos pavyzdys – prie tamsaus kontūro atsirandantys spalviniai skirtumai šviesiame fone. Šiam efektui šalinti dažniausiai literatūroje aprašomi metodai, naudojantys objektų kontūrų atpažinimą ir prie kontūrų kraštų ieškantys ir šalinantys violetinę spalvą. Tačiau šis efektas dažniausiai pasireiškia esant išilginei chromatinei aberacijai. Šioje disertacijoje plačiai išanalizuoti, išbandyti skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodai ir pristatytas naujas, kraujagyslių kontūrų atpažinimu grindžiamas metodas skersinei chromatinei aberacijai šalinti akies dugno vaizduose, kuris gali būti taikomas visiems akies dugno vaizdams neturint fotoaparato.

Problemos aktualumas

Vaizdinei informacijai išplitus po įvairiausias sritis kilo didelis poreikis ne tik pagerinti gauto vaizdo kokybę, bet ir atlikti skaitmeninių vaizdų analizę, objektų atpažinimą, kontūrų nustatymą ir t. t. Skaitmeninių vaizdų apdorojimas aktualus daugeliui sričių: meteorologijai (orų prognozei), medicinai (pozitronų emisijos tomografijai, magnetinio rezonanso tomografijai, kompiuterinei tomografijai, ultra garso tyrimams, rentgenogramoms), archeologijai (vaizdo gerinimo ir atkūrimo procedūroms, naudojamoms atkurti išblukusius vaizdus), kriminalistikai, astronomijai, karybai, pramonei, inžinerijai ir t. t. Per ilgą laiką įgyta patirtis žmogui lengvai leidžia atpažinti įvairiausius objektus ir jų kontūrus, tačiau vaizdų analizei tai sudėtinga. Sukurti metodai gerai aptinka objektus ir jų kontūrus vaizduose, kurių maža spalvinė variacija ir labai vienalytė tekstūra. Tačiau realybėje tokių vaizdų pasitaiko retai, todėl sukurtų metodų

tikslumas labai sumažėja, jeigu vaizdo didelė spalvinė variacija, objektų nevienalytė tekstūra, o forma kiekvienu atveju kinta. Šiai grupei vaizdų priskiriami ir tokie vaizdai, kaip medžio šakos lentoje, ištrupėjusios namo sienos dalys, kelio dangos defektai. Šiuo metu kelininkai patys matuoja kelio pažeidimus ir sprendžia kelio remonto darbus, baldininkai patys atpažįsta šakas lentoje ir padengia jas glaistu, tad kilo poreikis sukurti metodą, automatizuotai ir tiksliai atpažįstantį šiuos kontūrus.

Vaizdinei informacijai išsaugoti naudojami fotoaparatai, kuriami vis tobulesni, kad būtų atkurtas kuo tikslesnis vaizdas. Konstruojami vis jautresni šviesai fotoaparatai vaizdo jutikliai, jaistiksčiau išsaugomi vaizdo taškai. Stengiamasi didinti fotoaparatai matricą, kad būtų galima išsaugoti kuo daugiau vaizdo taškų. Kuriamos vis sudėtingesnės fotoaparatai optinės lęšių sistemos siekiant gerinti fotografuojamų vaizdų kokybę, pvz., mažinti įvairias aberacijas. Kadangi optiniai lęšiai gaminami iš stiklo, labai svarbu juos pagaminti kuo skaidresnius, jų išlinkimo forma turi būti idealiai vienoda ir negali būti jokių kitokių pašalinių išgaubimų ar grublėtumų. Tačiau tai padaryti labai sudėtinga, todėl visos optinės lęšių sistemos turi didesnių ar mažesnių iškraipymų, atsiradusių dėl įvairių aberacijų. Vaizdas esti neryškus, spalvos susiliejusios, prie objektų kontūrų matyti papildomų spalvų, netgi gali būti iškraipyta objekto forma. Aberacijas mechaniškai bandoma šalinti įvairiais achromatiniais, apochromatiniais arba difrakciniais lęšiais. Kadangi šie lęšiai užima papildomos vietos ir dažniausiai jų gamyba yra brangi, jie nepraktiški mažiems fotoaparatais, tokiems, kaip portatyvinės akies dugno kameros. Todėl kuriami įvairūs skaitmeninių vaizdų programiniai koregavimo metodai, kurie padėtų sumažinti chromatinę aberaciją. Literatūroje aprašomiems metodams, kuriais sumažinama skersinė chromatinė aberacija, dažniausiai reikalingas fotoaparatas, su kuriuo fiksuota scena. Kadangi visuose akies dugno vaizduose matomas kraujagyslių tinklas, atpažinus jų kontūrus atsirado galimybė sukurti metodą, kuris nereikalautų fotoaparato, su kuriuo fiksuota scena.

Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimo objektas – skaitmeniniai vaizdai, objektų kontūrų atpažinimas, skersinės chromatinės aberacijos šalinimas taikant objektų kontūrų atpažinimą.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas:

1. Sukurti metodus, grindžiamus objektų kontūro atpažinimo metodais, kurie atpažintų kelio dangos defektų kontūrus ir mažintų skersinę chromatinę aberaciją akies dugno vaizduose.

Šiam tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti esamų metodų, skirtų didelės spalvinės variacijos ir nevienalytės tekstūros objektų kontūrams atpažinti, analizę ir sukurti metodą, skirtą kelio dangos defektų kontūrams atpažinti.
2. Palyginti disertacijoje sukurto kelio dangos defektų kontūrų metodo tikslumą su aktyvaus kontūro metodu ir žmogaus apibrėžtais kontūrais.
3. Atlikti esamų metodų, skirtų skersinei chromatinei aberacijai šalinti, analizę ir įvertinti galimybę bei sukurti metodą skersinei chromatinei aberacijai šalinti akies dugno vaizduose be fotoaparato naudojant objektų kontūro atpažinimą.
4. Palyginti disertacijoje pasiūlyto metodo, kuris grindžiamas kraujagyslių tinklo atpažinimu, skersinės chromatinės aberacijos mažinimo tikslumą su kalibravimo šablonais, grindžiamais skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodais.

Tyrimų metodai

Disertacijoje suformuluoti uždaviniai sprendžiami analitiniais ir eksperimentiniais metodais. Analizuojant skersinės chromatinės aberacijos šalinimo ir objektų kontūrų nustatymo mokslinius straipsnius ir eksperimentinius rezultatus naudoti informacijos paieškos, sisteminimo, analizės ir apibendrinimo metodai.

Remiantis eksperimentinio tyrimo metodu, atlikta statistinė duomenų ir tyrimų rezultatų analizė, o jos rezultatams įvertinti naudotas apibendrinimo metodas.

Mokslinis naujumas

Disertacijoje gauti šie rezultatai:

1. Sukurtas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas, kuriuo galima atpažinti sudėtingą uždara nevienalytės tekstūros ir didelės spalvinės variacijos objekto kontūrą, tokį, kaip kelio dangos defektas ar medžio šaka lentoje.
2. Lyginant pasiūlytą kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodą su aktyvaus kontūro metodu naudojant prisitaikančio metodo binarizacijos slenkstį nustatyta, kad vidutiniškai 25 % tiksliau kontūrą atpažino pasiūlytas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas.
3. Sukurtas naujas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo akies dugno vaizduose metodas, grindžiamas kraujagyslių tinklo struktūros atpažinimu.
4. Sukurtas naujas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo akies dugno vaizduose metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu ir nereikalaujantis fotoaparato, tikslumu nenusileidžia kalibravimo šablonais grindžiamiems skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodams.

Praktinė darbo reikšmė

Sukurtas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas ir programinė įranga. Šiuo metodu galima atpažinti sudėtingą uždara nevienalytės tekstūros, didelės spalvinės variacijos ir skirtingos formos kiekvienam vaizde kontūrą. Praktiškai šį metodą gali taikyti kelininkai kelio dangos defektams atpažinti, baldininkai – šakoms lentoje atpažinti.

Sukurtas naujas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo akies dugno vaizduose metodas, kuris yra grindžiamas kraujagyslių tinklo atpažinimu, ir sukurta programinė įranga. Šis metodas gali būti naudojamas įvairioms portatyvinėms akies dugno kameroms, kuriose pasireiškia skersinė chromatinė aberacija. Šis metodas, išbandytas SmartScope M5 Optomed fotoaparatu, vaizduose sumažino skersinę chromatinę aberaciją ir pagerino vaizdų kontrastą.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas yra tinkamas sudėtingam uždaram kontūrai atpažinti.
2. Sukurtas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas veikia tiksliau už aktyvaus kontūro metodą.
3. Kalibravimo šablonais grindžiamas skersinių chromatinių aberacijų šalinimo metodas su projekciniu modeliu skersinės chromatinės aberacijos efektą akies dugno vaizduose šalina geriau už analogiškus metodus su afininiu, paprastu ir radialiniu modeliais.
4. Sukurtas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu, tikslumu prilygsta kalibravimo šablonais grindžiamiems skersinių chromatinių aberacijų šalinimo metodams.

Darbo rezultatų apibavimas

Tyrimų rezultatai publikuoti 2 periodiniuose recenzuojamuose mokslo žurnaluose, 2 straipsniai nerenzuojamuose užsienio tarptautinės konferencijos leidiniuose, 5 santraukos konferencijų leidiniuose. Šie rezultatai pristatyti ir aptarti 3 tarptautinėse ir 4 nacionalinėse konferencijose.

Straipsniai periodiniuose recenzuojamuose leidiniuose:

A1. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Tichonov J.; Treigys P. Detection of the Road Pothole Contour in Raster Images. *Information Technology and Control*. ISSN 1392–124X. 2016. T. 45. Nr. 3. 300–307. Impact factor 0.475.

A2. Petkus T.; Tichonov J.; Filatovas E.; Jakštys V. Quality Assessment of High-Resolution Images with Small Distortions after Compression. *Baltic journal of modern computing*. ISSN 2255-8942. 2017. Vol. 5. Iss. 2. 206–220.

Straipsniai nerenzuojamuose užsienio tarptautinės konferencijos leidiniuose:

A3. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. The Investigation of Chromatic Aberration Correction for Digital Eye Fundus Images. *International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies (CSIST'2016)*. Minskas. Baltarusija. 2016. ISBN 9789855663691.

A4. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. Evaluation of Correction Methods of Lateral Chromatic Aberration in Digital Eye Fundus Images, *The 8th International Conference on Pattern Recognition Systems (ICPRS-17)*. Madridas. Ispanija. 2017. ISBN 9781785616525.

Santraukos konferencijų leidiniuose:

1. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. Research on Identification of Defects Contours of Road Surface in Raster Images. *Duomenų analizės*

metodai programų sistemoms: šeštoji tarptautinė konferencija: Druskininkai. Lietuva. 2014. ISBN 9789986680505. 26.

2. Jakštys V. Metodas kelio dangų defektų kontūrams nustatyti. Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai: penktoji jaunųjų mokslininkų konferencija: pranešimų santraukos. Vilnius. Lietuva. 2015. Lietuvos mokslu akademijos leidykla. 48–51.
3. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. Experimental Investigation of Chromatic Aberration Elimination in Digital Images of Eye Fundus Camera. Duomenų analizės metodai programų sistemoms: septintoji tarptautinė konferencija: Druskininkai. Lietuva. 2015. ISBN 9789986680581. 26.
4. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. Lateral Chromatic Aberration Correction in Digital Eye Fundus Images. EURO 2016: 28th European conference on operational research. Poznań 3-6.07.2016: conference handbook. Lenkija. 139–139.
5. Jakštys V.; Marcinkevičius V.; Treigys P. An application of radial distortion model for chromatic aberration correction. Duomenų analizės metodai programų sistemoms: aštuntoji tarptautinė konferencija: Druskininkai. Lietuva. 2016. ISBN 9789986680611. 25–26.

Skaityti pranešimai 3 tarptautinėse konferencijose:

1. Tarptautinė konferencija “Scientific Program of International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies (CSIST’2016)”. Minskas. Baltarusija. 2016. Spalio 24–27 d.
2. 8-oji tarptautinė konferencija “Pattern Recognition Systems (ICPRS-17)”. Madridas. Ispanija. 2017 m. Liepos 10–14 d.
3. 28-oji tarptautinė konferencija “European Conference on Operational Research”. Poznań. Lenkija. 2016 m. liepos 3–6 d.

Skaityti pranešimai 4 respublikinėse konferencijose:

1. 6-oji tarptautinė konferencija „Duomenų analizės metodai programų sistemoms“. Druskininkai. Lietuva. 2014 m. Gruodžio 4–6 d.
2. 5-oji LMA jaunųjų mokslininkų konferencija „Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai“. Vilnius. Lietuva. 2015 m. Vasario 10 d.
3. 7-oji tarptautinė konferencija „Duomenų analizės metodai programų sistemoms“. Druskininkai. Lietuva. 2015 m. Gruodžio 1–3 d.
4. 8-oji tarptautinė konferencija „Duomenų analizės metodai programų sistemoms“. Druskininkai. Lietuva. 2016 m. Gruodžio 1–3 d.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro 4 skyriai ir literatūros sąrašas. Disertacijos skyriai: Įvadas, Kontūrų atpažinimo metodų tinkamumo kelio dangos kontūrams atpažinti tyrimas, Aberacijos ir vaizdų kokybė, Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas, Bendrosios išvados, Literatūra. Papildomai disertacijoje pateiktas iliustracijų, lentelių, simbolių ir žymėjimų sąrašas. Visa disertacijos apimtis 129 puslapiai, 58 numeruotos formulės, 54 paveikslėliai ir 8 lentelės. Disertacijoje remtasi 134 literatūros šaltiniais.

1 Kontūrų atpažinimo metodų tinkamumo kelio dangos kontūrams atpažinti tyrimas

Vaizdai naudojami labai įvairiose srityse ir jų kasdien padaromi milijonai. Pagal pobūdį vaizdai gali būti skirstomi į šias grupes [6]:

- Atspindžio vaizdai (angl. *Reflection images*) – atspindėti nuo objekto paviršiaus vaizdai. Dauguma eksperimentų atliekami su atspindžio vaizdais, tai radarai, sonarai, lazeriai ir kiti. Tokiu būdu gali būti nustatoma forma, tekstūra, spalva ir t. t.
- Emisijos vaizdai (angl. *Emission images*) – tai šviečiančių objektų vaizdai, kaip žvaigždės, lemputės, ir t. t.
- Absorbcijos vaizdai (angl. *Absorption images*). Iš šių vaizdų gaunama objekto vidinė struktūra. Pvz., spinduliais skleidžiama radiacija ir priklausomai nuo to, kiek rentgeno spindulių sugerta ar atspindėta, galima nustatyti objekto struktūrą.

Skaitmeninių vaizdų apdorojimas aktualus daugeliui sričių: medicinai (pvz., pozitronų emisijos tomografijai, magnetinio rezonanso tomografijai, kompiuterinei tomografijai, ultra garso tyrimams, rentgenogramoms), astronomijai (elektromagnetiniam spinduliavimui), meteorologijai (orų prognozei), archeologijai (vaizdo gerinimo ir atkūrimo procedūroms, naudojamoms atkurti išblukusius vaizdus) kriminalistikai, karybai, pramonei, inžinerijai ir kt. Skaitmeniniai vaizdai pagal kodavimo būdą kompiuteryje yra skirstomi į vektorinius ir rastrinius. Vektoriniuose vaizduose taškai, linijos, kreivės ir kitos įvairiausios figūros aprašomos matematinėmis formulėmis, tai

leidžia lengvai keisti mastelį neprarandant vaizdo kokybės. Šioje disertacijoje bus kalbama tik apie rastrinius vaizdus.

Rastriniuose (taškiniuose) vaizduose informacija pateikiama pikseliais, kuriuos nusako taško intensyvumas spalviniame kanale ir pozicija. Žmogus lengvai atpažįsta ir išskiria įvairius objektus bei jų kontūrus iš per ilgą laiką įgytos patirties. Vaizdų analizei tai sudėtinga, kadangi iki šiol nėra universalių algoritmų, gerai ar bent patenkinamai veikiančių įvairiose situacijose. Įvairūs kontūro atpažinimo metodai plačiau išanalizuoti 1.1 poskyryje.

Sukurta daug įvairių metodų veidui atpažinti, mašinos numeriui nustatyti ar pan., nes objekto kontūrai visada išsidėstę simetriškai [7] [8]. Šie metodai dažniausiai naudoja neuroninius tinklus ir yra patikimi ir efektyvūs. Kontūrų grupei, kurių maža spalvinė variacija ir vienalytė tekstūra, dažniausiai taikomi įvairūs briaunų aptikimo (angl. *Edge detection*) operatoriai, tokie kaip Kenio, Sobelio (angl. *Sobel operator*) ir kiti metodai, grindžiami histerize, gradiento analize ir t. t. [1]. Deja, šie metodai blogai veikia esant pašaliniam triukšmui [9]. Triukšmas vaizde yra nereikalinga informacija, todėl geriausia jį pašalinti arba kiek įmanoma labiau sumažinti. Tačiau labai dažnai šalinant triukšmą, šalinami kontūro taškai ir atvirksčiai, nešalinant triukšmo, triukšmo taškai atpažįstami kaip kontūro taškai. Sukurta ir kitų metodų, grindžiamų aktyvaus kontūro idėja, atsparių esamam triukšmui vaizde, kaip aktyvaus kontūro metodas (angl. *Snake or Active Contour method*) [10]. Tačiau ir šie metodai nepakankamai gerai veikia su tokiais vaizdais, kaip ištrupėjusios namo sienos dalis, kelio dangos defektai ir pan. Keletas kelio dangos defektų pavyzdžių pateikta 22 a) paveiksle.

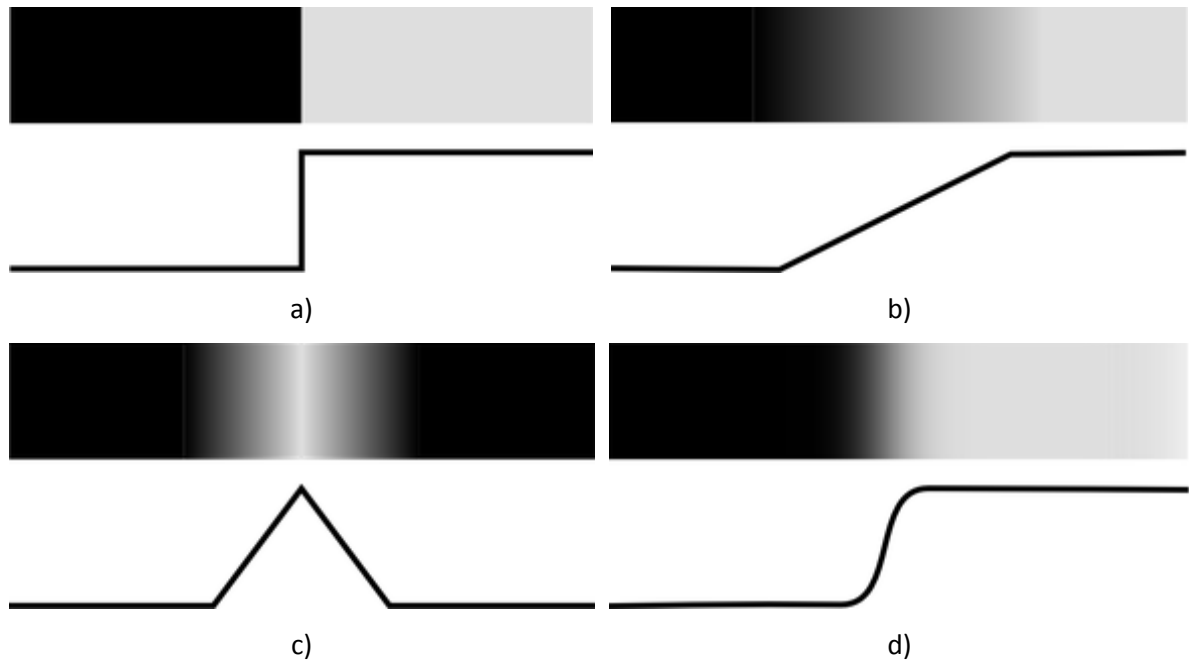
Šiame skyriuje pateikiami gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai, publikuoti autoriaus straipsnyje A1.

1.1 Objektų kontūrų atpažinimas rastriniuose vaizduose

Rastriniuose vaizduose analizė atliekama taškų (pikselių) lygmenyje, analizuojamos taškų intensyvumų reikšmės, norint atpažinti įvairius objektus ir

jų kontūrus. Siekiant atskirti vaizde objektus atliekama vaizdo segmentacija. Segmentavimas – tai vaizdo priekinio plano (angl. *Foreground*) skyrimas į atskiras identifikuojamas dalis nuo antrojo plano (angl. *Background*) [11]. Kartais vaizdo segmentacija atliekama norint aptikti objektų kontūrus, o kartais atvirkščiai – visų pirma atpažįstami kontūrai norint atlikti objektų segmentaciją. Dažniausiai vaizdas segmentuojamas ieškant panašaus ryškio vietų vaizde, vienalytės tekstūros, mažos spalvinės variacijos vietų ir pan. Kadangi šioje disertacijoje dirbama su nevienalytės tekstūros ir didelės spalvinės variacijos vaizdais, segmentavimo metodai netinkami [12].

Staigus intensyvumo reikšmių pasikeitimas tarp šalimai esančių vaizdo taškų iš didelių į mažas, arba atvirkščiai, vadinamas gradiento pokyčiu. Jei atliekant segmentaciją pastebėtas staigus gradiento pokytis, tokios vaizdo vietos vadinamos briauna [12]. Pvz., jei kaimyninio taško intensyvumas yra labai panašus į ieškomo taško, tame taške greičiausiai nėra jokios briaunos, tačiau jei intensyvumas labai skiriasi, taškas tikriausiai priklauso briaunai. Objekto kontūro briauną nusako intensyvumų skirtumų dydis ir nuolydžio kampas [13]. Kaip matyti 1 pavyzdyje, esti keletas kontūro briaunų variantų: a) laiptelio arba idealiai pavaizduota briauna, kai briauna skiria labai skirtingus ir ryškius objektus (realybėje tokios briaunos neegzistuoja); b) nuožulni briauna – labai dažnai pasitaikanti briauna; c) stogo briauna, tokia briauna gali vaizduoti, tarkime, vamzdį prie sienos; d) dažniausiai pasitaikanti realybėje briauna, ji labai panaši į laiptelio briauną, tik išblukinta.

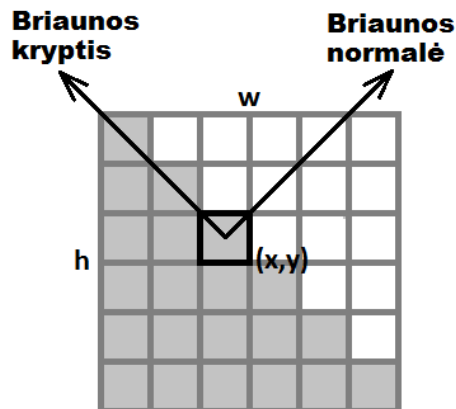


1 pav. Populiariausi briaunų pavyzdžiai: a) laiptelio arba ideali briauna; b) nuožulni briauna; c) stogo briauna; d) reali briauna.

Iš vaizdo gautų briaunų galima gauti daug informacijos (kampų, linijų, kreivių), kuri gali būti naudojama kontūrai nustatyti, objektams segmentuoti. Briauną nusako keturi dydžiai, pavaizduoti 2 paveiksle: briaunos normalė – vektorius, kurio kryptis rodo maksimalų intensyvumo pokytį; briaunos kryptis – vektorius, statmenas briaunos normalei; briaunos centras – (x, y) vieta vaizde, 2 paveiksle juodo kvadratėlio vieta; briaunos svoris – apskaičiuotas intensyvumo dydis taške (x, y) [14].

Briaunų radimas susideda iš keturių etapų [15]:

- Glotninimas (angl. *Smoothing*) – sumažina triukšmą išlaikant informaciją apie briaunas.
- Paryškimas (angl. *Enhancement*) – naudojamas paryškimo (angl. *Sharpening*) filtras briaunoms.
- Aptikimo (angl. *Detection*) – tikrinama, kurie pikseliai turi būti priskirti triukšmui, o kurie briaunoms.
- Vietos nustatymo (angl. *Localization*) – nustatoma tiksli briaunų vieta vaizde.

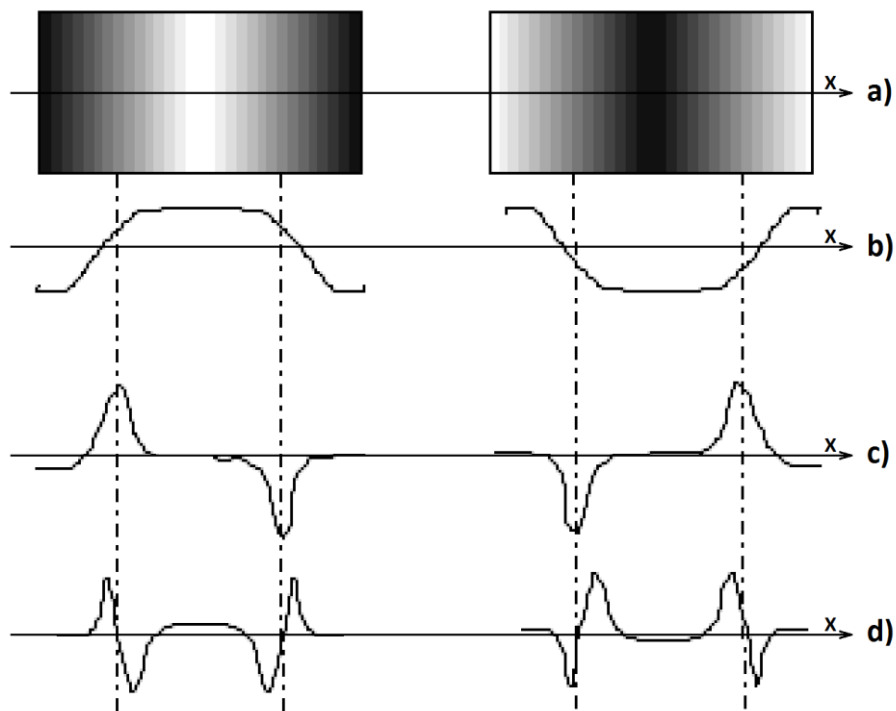


2 pav. Briaunos pavyzdys.

Briaunų atpažinimo metodai skirstomi į dvi grupes: diferencialiniai operatoriai, jie taikomi tik viename etape – kai aptinkamos briaunos; algoritminiai metodai, jie taikomi keletame apdorojimo, įvertinimo ir briaunų aptikimo etapų [13]. Kai briaunos vaizde atpažįstamos, galima taikant įvairius metodus konstruoti objektų kontūrus. Plačiau apie juos aprašyta tolimesniuose poskyriuose.

1.1.1 Diferencialiniai operatoriai briaunoms išskirti

Diferencialiniai operatoriai briaunoms išskirti grindžiami pirmos ir antros eilės išvestinėmis. 3 a) paveiksle pavaizduoti briaunų intensyvumų pokyčiai, o 3 b) paveiksle pavaizduoti briaunų intensyvumų pjūviai x ašyje. 3 c) paveiksle pavaizduota pirmos eilės išvestinė x ašyje, kuri rodo funkcijos kitimo greitį – kaip priekinis vaizdo planas atsiskiria nuo antrojo vaizdo plano. 3 d) paveiksle pavaizduota antros eilės išvestinė, kuri yra teigiama pereinant iš tamsios briaunos pusės į šviesią ir neigiama – pereinant iš šviesios briaunos pusės į tamsią, o nulis visur kitur [9].



3 pav. Briaunos aptikimas naudojant išvestines [16].

Gradientu grindžiami operatoriai briaunoms tirti:

Briaunų aptikimas grindžiamas pirmos eilės išvestinėmis. Diferencialiniai operatoriai, naudojantys tik pirmos eilės išvestines, vadinami gradiento operatoriais. Jie paryškina briaunas arba sumažina triukšmą. Gradientas – vektorius, susidedantis iš briaunos svorio ir briaunos krypties. Briaunos svoris tiksliai apskaičiuojamas pagal (1) formulę, tačiau jo aproksimacija gali būti gauta naudojant (2) formulę. Briaunos kryptis apskaičiuojama pagal (3) formulę [14].

$$|GO| = \sqrt{GO_x^2 + GO_y^2}; \quad (1)$$

$$|GO| = |GO_x| + |GO_y|; \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{GO_y}{GO_x}\right), \quad (3)$$

čia GO_x ir GO_y yra konvoliuciniai filtrai.

Konvoliucija apibrėžiama kaip vaizdo apdorojimo veiksmas, kuris iš dviejų pirminių masyvų – kalibravimo šablono ir apdorojamo vaizdo – apskaičiuoja

naują vaizdą [17]. Gradiento operatoriai dar skirstomi į statmenus ir kompasos [13].

Populiariausi statmeni gradiento operatoriai yra: Pikselių skirtumo (angl. *Pixel difference*) [13], Atskirų pikselių skirtumo (angl. *Separated pixel difference*) [13], Robertso (angl. *Roberts operator*) [18], Previto (angl. *Prewitt operator*) [19], Sobelio (angl. *Sobel operator*) [20] ir Frei-Cheno (angl. *Frei-Chen*) [21]. Statmenų gradiento operatorių konvoliuciniai filtrai GO_x ir GO_y pavaizduoti 4 paveiksle. Statmenais jie vadinami todėl, kad konvoliucinį filtrą GO_x pasukus 90° gaunamas GO_y .

Operatorius	Stulpelio gradientas	Eilutės gradientas
	GO_x	GO_y
Pikselių skirtumo [13]	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Atskirtų pikselių skirtumo [13]	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Robertso [18]	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Previto [19]	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
Sobelio [20]	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
Frei-Cheno [21]	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$

4 pav. Populiariausių statmenų gradiento operatorių konvoliuciniai filtrai.

Kita gradiento operatorių grupė yra kompaso gradiento operatoriai. Jie taip vadinami todėl, kad visi konvoliuciniai filtrai aprašomi sukant vieną konvoliucinį filtrą visomis kompaso kryptimis, kaip parodyta 5 paveiksle: šiaurės (Š), vakarų (V), pietų (P), rytų (R), šiaurės vakarų (ŠV), pietvakarių (PV), pietryčių (PR), šiaurės rytų (ŠR). Populiariausi kompaso gradiento operatoriai yra: Previto kompaso (angl. *Prewitt compass*) [13], Kiršo kompaso (angl. *Kirsch compass*) [22] ir Robinsono kompaso (angl. *Robinson compass*) [9]. Konvoliuciniai filtrai pavaizduoti 5 paveiksle.

Kryptis	Previto kompaso	Kiršo kompaso	Robinsono kompaso
Š	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
ŠV	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$
V	$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
PV	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$
P	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$
PR	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}$
R	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
ŠR	$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

5 pav. Populiariausių kompaso gradiento operatorių konvoliuciniai filtrai.

Naudojant statmenus ir kompaso gradiento operatorius konvoliuciniai filtrai taikomi kiekvienam vaizdo taškui, taip suformuojamas vaizdas su išskirtomis briaunomis.

Briaunų aptikimas naudojant antros eilės išvestinę. Populiariausi diferencialiniai operatoriai, naudojantys antros eilės išvestinę, yra: Laplaso (angl. *Laplace operator*) [13] ir Laplaso ir Gauso (angl. *Laplacian of Gaussian*) (LoG) [13].

Laplaso operatoriaus reikšmės $L(x, y)$ skaičiuojamos pagal (4) formulę.

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}. \quad (4)$$

Atsižvelgiant į tai, kad vaizdas sudarytas iš diskrečių intensyvumo reikšmių, Laplaso operatorius gali būti apskaičiuotas naudojant konvoliucinius filtrus ir intensyvumo reikšmes aproksimuojant antros eilės išvestine. Populiariausi Laplaso operatoriaus konvoliuciniai filtrai pavaizduoti 6 paveiksle.

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

6 pav. Laplaso operatoriaus konvoliuciniai filtrai.

Kadangi šie konvoliuciniai filtrai skaičiuoja vaizdo antros eilės išvestinę ir tipiniu atveju naudojamas mažas (9×9) konvoliucinis filtras, Laplaso operatorius yra labai jautrus triukšmui, todėl visų pirma naudojamas Gauso glotninimo filtras [13], pateiktas (5) formulėje.

$$G_f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (5)$$

Iš sujungtų (4) ir (5) formulių gaunamas Laplaso ir Gauso operatorius (angl. *Laplacian of Gaussian operator*) (LoG), aprašomas (6) formule [13].

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right] * e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Kadangi vaizdas sudarytas iš diskrečių intensyvumo reikšmių, tai LoG operatorius gali būti apskaičiuotas naudojant konvoliucinius filtrus ir intensyvumo reikšmes aproksimuojant į antros eilės išvestinę.

LoG operatoriaus konvoliucinio filtro pavyzdys, kai $\sigma = 1,4$, pavaizduotas 7 paveiksle.

$$LoG = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 5 & 5 & 5 & 3 & 2 & 0 \\ 3 & 3 & 5 & 3 & 0 & 3 & 5 & 3 & 3 \\ 2 & 5 & 3 & -12 & -23 & -12 & 3 & 5 & 2 \\ 2 & 5 & 0 & -23 & -40 & -23 & 0 & 5 & 2 \\ 2 & 5 & 3 & -12 & -23 & -12 & 3 & 5 & 2 \\ 3 & 3 & 5 & 3 & 0 & 3 & 5 & 3 & 3 \\ 0 & 2 & 3 & 5 & 5 & 5 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

7 pav. Laplaso ir Gauso operatoriaus konvoliucinis filtras, kai $\sigma = 1,4$.

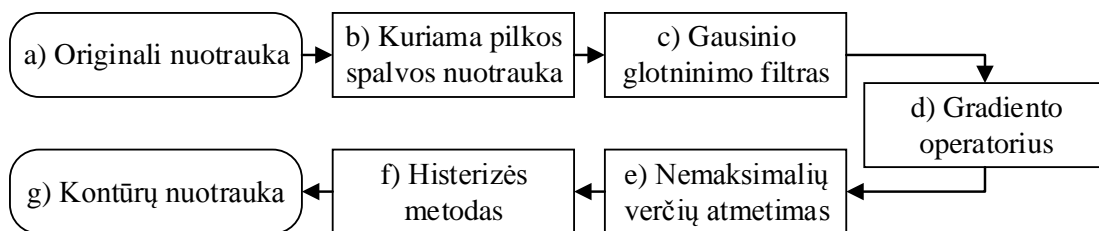
1.1.2 Algoritminiai metodai kontūrai išskirti

Naudojant diferencialinius operatorius kontūrai išskirti briaunos gaunamos euristiniu būdu, o algoritminiai metodai kontūrai išskirti grindžiami analitiniu briaunų nustatymo būdu. Algoritminiai metodai kontūrams atpažinti taikomi keletame apdorojimo, įvertinimo ir briaunų aptikimo etapų. Aptinkant kontūrus dauguma metodų reikalauja, kad vartotojas pats pasirinktų tam tikrus parametrus, priklausomai nuo to, kokį objektą norima atpažinti, kaip detalai jis turi būti atpažintas, koks norimo atpažinti objekto apšvietimas ar triukšmo lygis vaizde, kaip, tarkime, taikant Kenio metodą vartotojui reikia pasirinkti dvi ribines reikšmes. Sukurta daug metodų, kuriuos taikant naudojami įvairūs filtrai ir metodai automatiškai parinkti ribinėms reikšmėms [23]. Kiti metodai remiasi ne tik objekto briaunų aptikimu, bet ieško įvairių kitų objektų ypatybių, tokių, kaip objekto spalva, tekstūra, forma ir t. t. [24] [25] [26] [27].

Toliau pristatomi du dažniausiai literatūroje aprašomi algoritminiai metodai: **Kenio metodas**. (angl. *Canny method*) [1] yra vienas iš efektyviausių kontūro paieškos metodų. Canny's kurdamas šį metodą siekė pagerinti tuometinius briaunų atpažinimo metodus ir išsikėlė šiuos kriterijus [9]:

- Pirmasis ir pats svarbiausias kriterijus – maža paklaida. Svarbu, kad briaunos paveiksliuke nebūtų neatpažintos ar klaidingai atpažintos kaip briaunos;

- Antrasis kriterijus – tiksli briaunos taškų lokalizacija. Kitaip tariant, minimali atstumo paklaida tarp nustatytų briaunos pikselių ir realiųjų;
- Trečiasis kriterijus – briauna analizuojama ir atpažįstama tik vieną kartą. Šiuo kriterijumi siekiama visiškai panaikinti vienos ir tos pačios briaunos analizavimą kelis kartus.



8 pav. Kenio metodo schema.

Kenio metodo schema pavaizduota 8 paveiksle ir šio metodo algoritmo etapai yra šie:

- Originalus vaizdas.* Naudojamas originalus vaizdas.
- Kuriamas pilkos spalvos vaizdas* (angl. *Grayscale*) (I). Kadangi mūsų akys skirtingų spalvų ryškumą suvokia nevienodai, koeficientai apskaičiuoti atitinkamai naudojant BT.601 rekomendaciją [28], kurios formulė yra (7).

$$I(x, y) = R(x, y) * 0,299 + G(x, y) * 0,587 + B(x, y) * 0,114. \quad (7)$$
- Gausinio glotninimo filtras.* Atliekama glotninimo operacija naudojant Gauso filtrą pagal (5) formulę, siekiamas sumažinti vaizde esantis triukšmas, nežymūs intensyvumo svyravimai ir siekiamos palikti kontrastingos zonos.
- Gradiento operatorius.* Naudojamas gradiento operatorius briaunoms aptikti. Dažniausiai pasirenkamas Sobelio operatorius, kuris plačiau aprašytas 1.1.1 skyrelyje. Kiekvienam vaizdo taškui apskaičiuojamas gradientas ir gradiento kryptis. Šios vertės išsaugojamos į paveikslėlio taško komponentes. Į raudoną įrašoma gradiento, o į žalią – kampo reikšmės.
- Nemaksimalių verčių atmetimas.* Vykdomas nemaksimalių verčių atmetimas. Šio etapo tikslas – konvertuoti neaiškias gauto vaizdo gradiento

dydžio vertes (pikslius) į ryškias, aiškias vertes. Tai įgyvendinama naudojant 3×3 dydžio filtrą, kuriuo tikrinami vaizdo pikseliai tam tikromis kryptimis: Š–P, V–R; ŠR–PV; ŠV–PR.

f) *Histerizės metodas*. Gradiento reikšmių masyvas apdorojamas histerizės metodu pagal 8 f) paveikslo schemos žingsnį. Šis metodas naudoja dvi ribines reikšmes (angl. *threshold*) filtravimui, kintančias nuo 0 iki 255, jas vartotojui reikia pasirinkti pačiam. Jeigu reikšmė yra aukščiau ribinės, ji priklauso briaunai, o jeigu reikšmė yra tarp dviejų ribinių reikšmių, ji priskiriama nuliui, nebent egzistuoja taškų seka, jungianti du atskirus segmentus su gradiento reikšme, didesne už antrąją ribinę reikšmę.

g) *Kontūrų vaizdas*. Gaunamas vaizdas su išskirtais objektų kontūrais.

Aktyvaus kontūro metodas. Aktyvaus kontūro metodas, dažnai vadinamas **gyvatės** metodu (angl. *Snake or Active Contour method*), yra kontroliuojamo tęstinumo kontūras, kuris lanksčiai apsupa segmentuojamą objektą. Tai vienas iš klasikinių metodų objekto kontūrai apibrėžti, figūrai atpažinti, kraštui iš galimai triukšmingo paveikslėlio surasti; jį pasiūlė M. Kassas, A. Witkinas ir D. Terzopoulosas 1988 metais. Visą aprašymą apie aktyvaus kontūro metodą galima rasti [10]. Pagrindinis metodo tikslas yra minimizuoti energiją, susijusią su tolydžia kreive, vadovaujantis išorinėmis spaudimo jėgomis ir veikiant vidinėms vaizdo jėgoms, stumiančioms link linijų ar kraštų. Metodas grindžiamas efektyvia energijos funkcija, turinčia keletą minimumų ir priklausomybę nuo pradinio taško. Vis dėlto šis metodas reikalauja iš anksto atidėti pradinius taškus netoli ieškomo kontūro. Aktyvaus kontūro metodu brėžiama uždara tolydi kreivė, minimizuojanti šią funkciją:

$$E_{snake} = \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{img}(v(s)) + E_{con}(v(s)) ds, \quad (8)$$

čia $v(s) = I(x, y)$. $v(s)$ yra aktyvaus kontūro saugantis pilkos spalvos intensyvumo reikšmė vaizdo (x, y) taške, s yra aktyvaus kontūro taškų kiekis. E_{int} yra aktyvaus kontūro vidinė (angl. *Internal energy*) energija, E_{img} yra vaizdo energija, E_{con} yra išorinio spaudimo jėgos energija (angl. *Control*

energy). E_{con} leidžia vartotojui interaktyviai kontroliuoti ir nukreipti gyvatę link norimo kontūro.

Vidinė energija E_{int} sudaryta iš kontūro tolydumą ir kreivumą apibūdinančių energijų:

$$E_{int}(v(s)) = \alpha E_{cont}(v(s)) + \beta E_{curv}(v(s)), \quad (9)$$

čia E_{cont} yra tolydumo energija (angl. *Continuity energy*), E_{curv} yra kreivumo energija (angl. *Curvature energy*) ir α, β yra vartotojo nustatyti svoriai.

Vaizdo energija išskirstyta į tokias svorių energijas:

$$E_{img}(v(s)) = w_{line} E_{line}(v(s)) + w_{edge} E_{edge}(v(s)) + w_{term} E_{term}(v(s)), \quad (10)$$

čia $E_{line}(v(s)) = I(v(s))$ yra linijos energija (angl. *Line energy*), priklausanti nuo vaizdo intensyvumų, $E_{edge}(v(s)) = -|\nabla I(v(s))|^2$ yra krašto energija (angl. *Edge energy*), priklausanti nuo vaizdo gradiento, E_{term} yra nutraukimo energija (angl. *Termination energy*), leidžianti surasti linijų dalių ar kraštų nutraukimą. w_{line} , w_{edge} ir w_{term} yra vartotojo nustatyti svoriai.

Funkcijos E_{snake} optimizavimas yra gana paprastas ir gali būti realizuotas iteraciniu gradiento metodu.

1.1.3 Briaunų ir kontūrų atpažinimo metodų ypatybės

Kompiuterinėje regoje objektų kontūro atpažinimas labai svarbus objektų segmentavimui ir t. t. 1 lentelėje surašyti briaunų ir kontūrų atpažinimo metodų privalumai ir trūkumai [9].

1 lentelė. Briaunų ir kontūrų atpažinimo metodų ypatybės [9].

Metodas	Ypatybės	
	Privalumai	Trūkumai
Gradiento statmeni operatoriai (Pikselių skirtumo, Atskirų pikselių skirtumo, Robertso, Previto, Sobelio, Frei-Cheno)	<ul style="list-style-type: none"> • paprastumas; • didelė greitaveika; • briaunų krypties nustatymas (Previto, Sobelio, Frei-Cheno operatoriai). 	<ul style="list-style-type: none"> • labai jautrūs triukšmui; • netikslūs dėl mažų konvoliucinių filtrų ir aproksimuotų konvoliucinių filtrų reikšmių; • negrąžina jokios informacijos apie briaunų kryptį (Pikselių skirtumo, Atskirų pikselių skirtumo, Robertso operatoriai).
Gradiento kompasų operatoriai (Previto kompasų, Kiršo kompasų, Robinsono kompasų)	<ul style="list-style-type: none"> • paprastumas; • didelė greitaveika; • briaunų krypties nustatymas. 	<ul style="list-style-type: none"> • labai jautrūs triukšmui; • netikslūs dėl mažų konvoliucinių filtrų ir aproksimuotų konvoliucinių filtrų reikšmių.
Briaunų aptikimas naudojant antros eilės išvestinę (Laplaso)	<ul style="list-style-type: none"> • didelė greitaveika; • didinant konvoliucinį filtrą mažėja jautrumas triukšmui; • geba nustatyti, ar briauna yra tamsesnėje ar šviesesnėje pusėje. 	<ul style="list-style-type: none"> • labai jautrus triukšmui; • negrąžina briaunų krypties; • didinant konvoliucinio filtro dydį mažėja greitaveika ir didėja tikimybė prarasti briaunų taškus.
Briaunų aptikimas naudojant antros eilės išvestinę (LoG)	<ul style="list-style-type: none"> • didelė greitaveika; • didinant konvoliucinio filtro dydį mažėja jautrumas triukšmui; 	<ul style="list-style-type: none"> • didinant konvoliucinio filtro dydį mažėja greitaveika ir didėja tikimybė prarasti briaunų taškus; • negrąžina jokios informacijos apie briaunų kryptį; • blogai veikia prie vaizdo kampų.
Algoritminis (Kenio)	<ul style="list-style-type: none"> • reikšmių tinkamumo įvertinimas; • nelabai jautrus triukšmui; • briaunos dryžuotumo panaikinimo galimybė; • briaunos krypties ir intensyvumo nustatymas. 	<ul style="list-style-type: none"> • atliekama daug skaičiavimo operacijų; • sparta ir tikslumas priklauso nuo Gauso pasiskirstymo funkcijos standartinio nuokrypio dydžio; • reikalingas vartotojo dviejų ribinių reikšmių filtro parametrų įvertinimas.
Algoritminis (Aktyvaus kontūro)	<ul style="list-style-type: none"> • atpažįsta uždara kontūrą; • nelabai jautrus triukšmui. 	<ul style="list-style-type: none"> • būtina apibrėžti pradinį kontūrą.

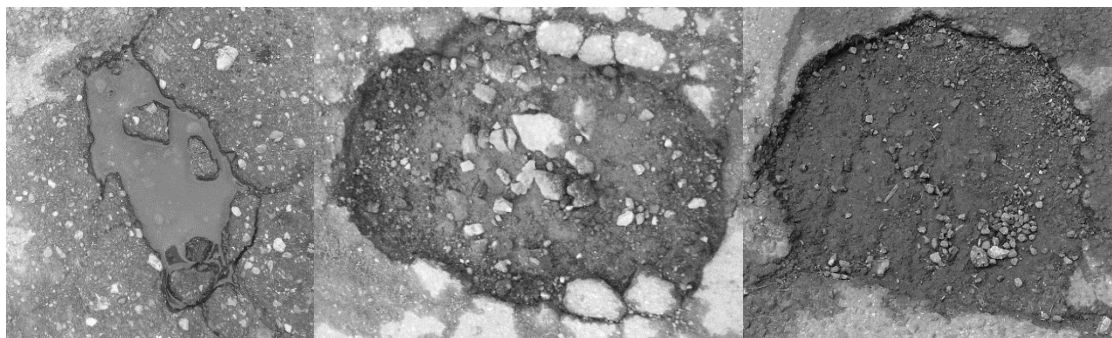
Gradiento operatoriai ir briaunų aptikimas naudojant antros eilės išvestinę pasižymi didele greitaveika ir paprastumu. Jų pagrindiniai trūkumai – didelis jautrumas triukšmui, konvoliucinių filtrų dydis bei koeficientai yra fiksuoti ir negali būti pritaikyti konkrečiam paveiksliukui.

Kenio metodas tiesiogiai priklauso nuo Gauso filtro standartinio nuokrypio reikšmės ir ribinių reikšmių. Didinant standartinio nuokrypio reikšmę didėja ir konvoliucinio filtro dydis bei pašalinama daugiau triukšmo, tačiau didėja tikimybė prarasti briaunų taškus.

Aktyvaus kontūro metodu galima atpažinti uždarą kontūrą galbūt triukšmingame vaizde, tačiau būtina apibrėžti pradinį kontūrą.

1.2 Kelio dangos defektų atpažinimo metodai

Dėl didelio transporto srauto didėja kelio remonto priežiūros poreikis, taip pat keliams daug žalos padaro šaltos žiemos, todėl norint išvengti nelaimingų atsitikimų, reikia kuo skubiau pastebėti šiuos pažeidimus. Keletas pavyzdžių su kelio dangos defektais pavaizduoti 9 paveiksle.



9 pav. Skirtingi kelio dangos defektų – duobių pavyzdžiai.

Dažniausiai sunku įvertinti kelio dangos defektus, nes nėra sukurta įrankių ar įrengimų, kurie leistų išmatuoti kelio dangos pažeidimus vaizde. Šiuo metu visa tai atlieka kelininkai. Kelininkui kelio dangos defektų atpažinimas yra natūralus, tačiau juos atpažinti dirbtine kompiuterizuota sistema yra labai sunku dėl kelių priežasčių:

- **Didelė spalvinė variacija.** Kelio dangos defektų spalva gali visiškai pasikeisti, kai sniega, šviečia saulė ar lyja lietus. Sausas kelio dangos defektas gali būti šviesesnio atspalvio už aplinką ir atvirkščiai: jei kelio dangos defektas šlapias, jis gali būti tamsesnio atspalvio už aplinką. Taip

pat kelio dangos defektas gali būti labai panašios spalvos kaip ir aplinka, o tai dar labiau sunkina jo atpažinimą.

- **Kelio dangos defekto kontūras kiekviename vaizde turi skirtingą formą.** Kelio dangos defektų forma labai įvairi: gali būti panaši į apskritimą, elipsę, kvadratą ar bet kokią kitą figūrą. Pavyzdžiui, sukurti metodai gatvės vertikalioms ženklinimo juostoms ir kelio kraštams atpažinti [9] remiasi tuo, kad forma visada panaši į tiesę. Labai dažnai objektams atpažinti naudojami neuroniniai tinklai. Apmokytais jais galima gan tiksliai atpažinti objektus, turinčius simetrišką išsidėstymą. Kaip pavyzdys, neuroniniais tinklais galima atpažinti žmogaus veidą, nes akys, nosis ir burna yra visada proporcingai išsidėsčiusios tose pačiose vietose. Sukurti metodai randa galvos kontūrą vaizde [7] ir atpažįsta veido taškus [29] [30]. Šie metodai visiškai netinka kelio dangos defektų kontūrams atpažinti.
- **Nevienalytė tekstūra.** Vaizde tarp priekinio ir antrojo planų intensyvumų skirtumai labai nedideli. Įvairiose vietose matyti pašalinių smulkių objektų, atpažįstamų kaip triukšmas. Labai dažnai sunku tiksliai įvertinti, kur yra kelio dangos defekto kraštas, nes asfaltas būna ne vientisas, o sutrūkinėjęs. Netgi ekspertui kartais sunku nustatyti, kur yra defekto krašto pradžia. Taip pat dažnai pasitaiko, kad kelio dangos defektai vienoje pusėje turi labai aiškų kontūrą, tačiau kita kelio dangos defekto pusė visiškai neaiški dėl įvairių sutrūkinėjimų. Tokie sutrūkinėjimai dažniausiai atpažįstami taip pat kaip triukšmas, o tai dar labiau sunkina jų tikslų atpažinimą.
- **Daug pašalinių objektų.** Vaizde pasitaiko daug įvairių pašalinių objektų, kuriuos reikia ignoruoti, kad šie nebūtų palaikyti kontūro taškais, kaip vanduo, sniegas, šuliniai, kelkraščiai, šešėliai ir t. t.

Yra pasiūlyta įvairių alternatyvių būdų spręsti šioms problemoms.

2008 metais Jakobas Eriksonas ir kiti kelio dangos defektų vietai ir gyliui nustatyti pasiūlė naudoti trijų ašių akselerometrą ir GPS imtuvą [31]. Kiek vėliau kelio dangos defektų vietai ir gyliui nustatyti buvo pasiūlyta naudoti išmaniojo telefono akselerometrą [32] [33]. Tai perspektyvu, nes šiais laikais dauguma vairuotojų naudojami išmaniaisiais telefonais, o juose dažniausiai yra įdiegtas akselerometras ir GPS imtuvas. Akselerometras fiksuoja vibraciją, GPS imtuvas nustato vietą. Kelio dangos sudėtį galima pamatyti naudojant praktiškai realizuotą įrangą [34], kuri grindžiama paviršiaus analizės metodais naudojant georadarus (angl. *Ground Penetrating Radar*) [35]. Deja, tokia įranga yra labai brangi. Kelio dangos defektus užfiksuoti galima įmontavus slėgio jutiklius į amortizatorius ir stebint vibraciją [36]. Mertzas siūlo 3D šviesos jutiklius ir vaizdo kameras specialiai įmontuoti į automobilius [37]. Iš surinktų ir išanalizuotų duomenų iš daugelio automobilių galima spręsti apie kelio dangos būklę. Danti's ir kiti siūlo taikyti vaizdų apdorojimą kelio defektams, linijoms ir kelio ženklams atpažinti [38]. Kadangi kelio danga turėtų būti nedidelės spalvinės variacijos, defektams atpažinti siūloma naudoti *K-means* klasterizavimą [39] ir ieškoti įvairių spalvinių neatitikimų. Miraliakbari's ir kiti siūlo metodą, grindžiamą infraraudonųjų spindulių spektrometru, aukštos kokybės RGB kamera ir lazeriniu skeneriu [40]. Infraraudonųjų spindulių spektrometrą naudoti stebėti dangos paviršiaus būklės pablogėjimui, aukštos kokybės RGB kamerą naudoti automatiškai nustatyti asfalto įtrūkimams, o lazerinį skenerį naudoti įtrūkimo dydžiui. Raibagi's ir kiti siūlo naudoti ultragarso jutiklius [41], kurie grindžiami atstumo matavimu, kelio dangos defektams aptikti. Pasiūlyta ir daugiau metodų, grindžiamų įvairių jutiklių naudojimu [42], tačiau dažniausiai jie yra brangūs ir reikalauja papildomos įrangos. Viena iš paprastesnių alternatyvų yra nufotografuoti ar nufilmuoti patį kelio dangos defektą – duobę, jį atpažinti ir parametrizuoti [43] [44] [45].

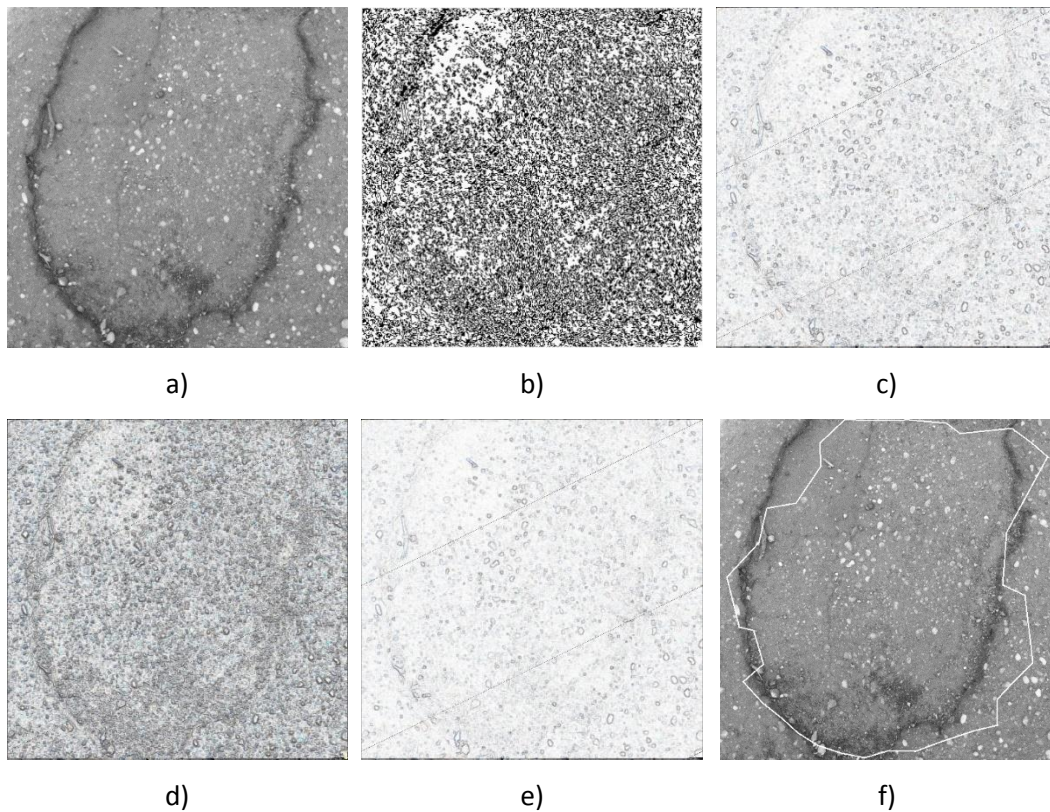
Mobiliaisiais įrenginiais galima fotografuoti geros raiškos vaizdus, mobiliuoju ryšiu galima keisti dideliais duomenų kiekiais, todėl prasminga sukurti metodą, kuris leistų kelininkams ir kitiems eismo dalyviams išmatuoti

kelio dangos pažeidimus ir išsiūsti įstaigoms, remontuojančioms kelius, mobiliaisiais telefonais.

Tolimesniuose poskyriuose pristatomas naujas metodas kelio dangos defektų kontūrams atpažinti bei jo lyginimas su aktyvaus kontūro metodu ir žmogaus apibrėžtais kontūrais.

1.3 Kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas

Realybėje esti įvairiausių kelio dangos defektų. Keletas pavyzdžių, nufotografuotų su išmaniaisiais telefonais, matyti 9 paveiksle.

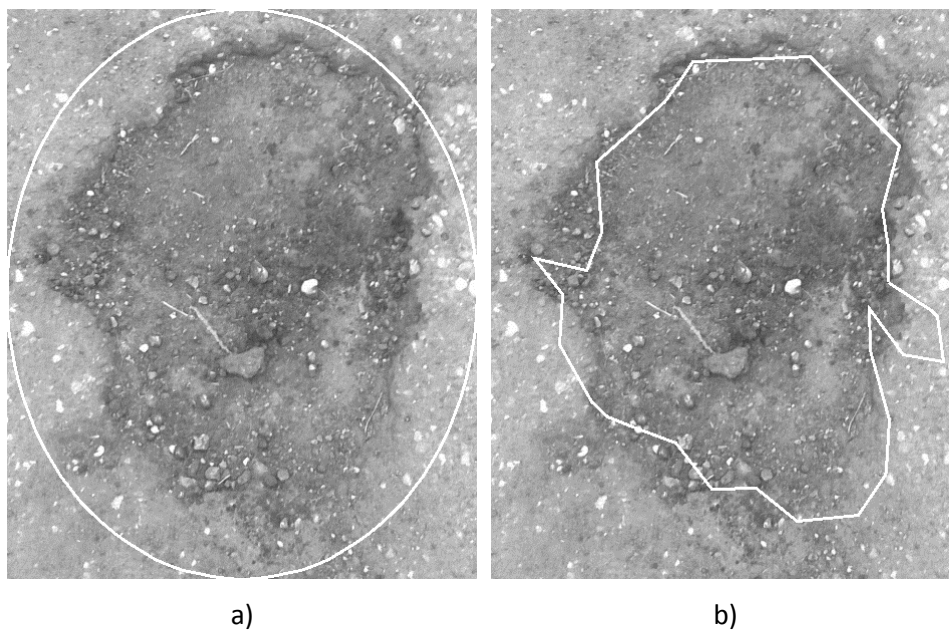


10 pav. Skirtingų metodų rezultatai: a) originalus vaizdas; b) Kenio metodas; c) Sobelio operatorius; d) Kiršo operatorius; e) Previto operatorius; f) Gyvatės metodas.

Atlikus kontūro atpažinimo analizę pasirinkti įprasti, populiariausi kontūrų ir briaunų atpažinimo metodai kelio dangos defektų kontūrams atpažinti, tokie kaip Sobelio, Kiršo, Previto operatoriai, Kenio, aktyvaus kontūro metodai ir kiti.

Norint nustatyti, kuris metodas geriausiai atpažįsta kelio dangos defektų kontūrus, atliktas eksperimentinis tyrimas su 105 skirtingos rezoliucijos kelio dangos defektų vaizdais, kurie padaryti mobiliojo įrenginio fotoaparatu. Keletas eksperimento rezultatų pavyzdžių pateikta 10 paveiksle. Labai gerai matyti, kad įprasti, populiariausi kontūrų ir briaunų atpažinimo metodai šiam sprendžiamam uždaviniui netinka, nes dauguma triukšmo taškų artimi kontūro taškų reikšmėms. Klasikinių gradiento operatorių pagrindinis trūkumas – didelis jautrumas triukšmui. Kenio metodas, aprašytas 1.1.2 poskyryje, tiesiogiai priklauso nuo Gauso filtro standartinio nuokrypio reikšmės ir ribinių reikšmių.

Iš išanalizuotų vaizdinės medžiagos rezultatų nustatyta, kad Gyvatės arba aktyvaus kontūro metodas tiksliausiai atpažino kelio dangos defektų kontūrą, todėl jis bus lyginamas su pasiūlytu kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodu [A1].



11 pav. Gyvatės modelio rezultatas. a) pradinis kontūras; b) galutinis gyvatės modelio kontūras.

Aktyvaus kontūro metodas, aprašytas 1.1.2 poskyryje, taikomas naudojant prisitaikančio binarizacijos slenksčio metodą (angl. *Adaptive threshold*) [15]. Naudojant (8) formulę visi svoriai E_{img} funkcijai padauginėti iš konstantos γ , tai leidžia kontroliuoti vaizdo energijos svarbumą. E_{con} naudojamas tik pradiniam

kontūrai aprašyti. Kadangi daugumos kelio dangos defektų forma yra panaši į ovalo formą, pasirinktas elipsės formos pradinis kontūras. Nubrėžta elipsė matyti 11 a) pavyzdyje, sudaryta iš 100 taškų.

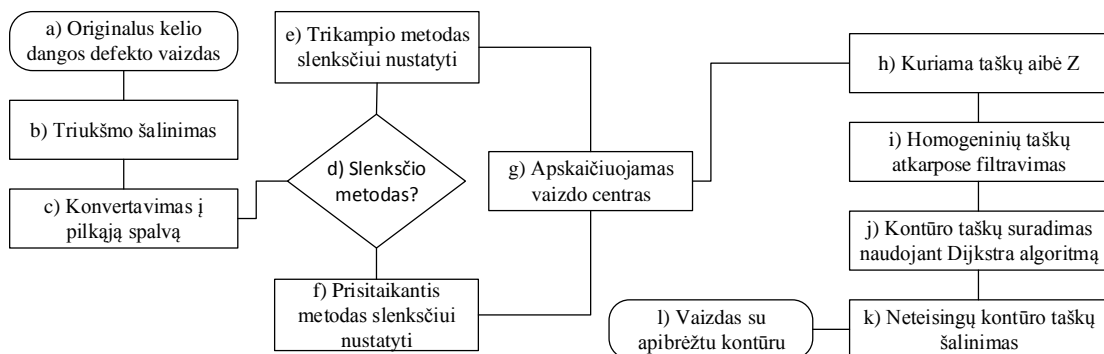
Konstantos α , β , γ apskaičiuojamos atlikus eksperimentinius tyrimus intervale $[0,100]$ žingsneliu 0,1. Geriausi rezultatai gaunami su tokiomis reikšmėmis: $\alpha = 0,1$, $\beta = 0,4$ ir $\gamma = 10$. Galutinis atpažintas kontūras matyti 11 b) pavyzdyje.

Atlikti eksperimentiniai bandymai su visais kelio dangos defektų vaizdais ir palyginti su žmogaus apibrėžtais kontūrais. Keletas pavyzdžių pateikti 21 a) ir b) paveiksluose. Tikslumas vertinamas pagal (11) formulę.

$$C = \begin{cases} \frac{B - A}{B} * 100 \%, & B - A > 0, \\ 0, & B - A \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

čia A yra žmogaus nubrėžto kontūro ir taikant pristatytą metodą programos apskaičiuoto kontūro plotas (geltona spalva); B yra žmogaus apibrėžto kontūro plotas. Rezultatai parodė, kad vidutiniškai iš 105 kelio duobės defektų vaizdų kontūrą atpažino tik 53 % tikslumu. Išsamūs rezultatai aprašyti 1.4 poskyryje.

Iš vaizdinių ir procentaliai išreikštų tikslumo rezultatų nesunku pastebėti, kad kelio dangos defekto kontūras atpažintas labai netiksliai, todėl pasiūlytas ir disertacijoje pristatytas naujas metodas kelio dangos defektų kontūrams atpažinti [A1], kurio schema pavaizduota 12 paveiksle.



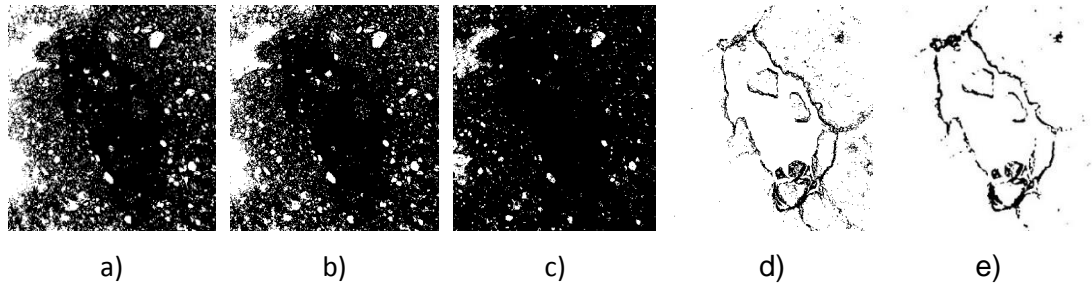
12 pav. Metodo kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo schema.

Šio metodo algoritmo etapai yra tokie:

- a) *Originalus kelio dangos defekto vaizdas*. Naudojami kelio dangos defekto vaizdai, kurių pavyzdžiai matyti 9 pavyzdyje.
- b) *Triukšmo šalinimas*. Sumažinamas vaizdas artimiausio kaimyno interpoliavimo technika [22]. Vaizdo dydis sumažinamas iki 700 pločio ir aukštis apskaičiuojamas proporcingai. Šitoks triukšmo šalinimas sumažina „druskos ir pipirų“ triukšmą (angl. *Salt-and-pepper noise*) ir padidina algoritmo skaičiavimo greitį.
- c) *Konvergavimas į pilkąją spalvą*. Kuriamas pilkos spalvos vaizdas pagal BT.601 rekomendaciją [28], kurios formulė yra (7).
- d) *Slenksčio metodas*. Norint nustatyti objekto (pvz.: namo, mašinos, kelio dangos defekto, medžio šakos lentoje) kontūrą reikia atlikti segmentaciją (versti į binarinį vaizdą) priekinio ir antrojo plano dalių atskyrimo [46] [47] pagal (12) formulę.

$$P(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{if } I(x, y) > T \\ 0 & \text{if } I(x, y) \leq T \end{cases} \quad (12)$$

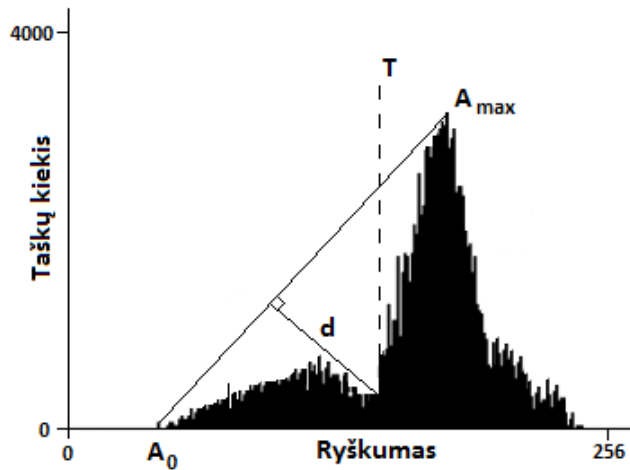
čia T yra vienodas binarizacijos slenkstis kiekvienam vaizdo taškui (x, y) . Sukurta labai daug skirtingų metodų binarizacijos slenkščiui nustatyti, tokių kaip: Huang [48], Intermodes [49], IsoData [50], Li and Lee [51], MaxEntropy [52], Mean [53], MinError [54], Minimum [49], Moments [55], Otsu [56], Percentile [57], RenyiEntropy [52], Shanbhag [58], Trikampio (angl. *Triangle*) [59], Yen, Chang F. and Chang S. [60] ir Pritaikantis (angl. *Adaptive*) [15]. Pagrindinė šių spalvinėmis ypatybėmis grindžiamų metodų problema ta, kad kelio dangos defektų kontūrų apšvietimas nėra pastovus, jis kinta lyjant lietui, šviečiant saulei ir t. t. Dėl to taikant skirtingus binarizacijos slenkščio metodus, dauguma kelio dangos defektų nepatenka į slenkščio ribines reikšmes ir yra atmetami. Pritaikius skirtingus binarizacijos slenkščio metodus šiame darbe naudojamiems kelio dangos defektų vaizdams pastebėta, kad ne visi algoritmai davė gerų rezultatų.



13 pav. Skirtingų metodų pavyzdžiai: a) Huang [48], b) Otsu [56], c) Minimum [49], d) Trikampio [59], e) Prisitaikantis [15].

13 paveiksle pateikta keletas pavyzdžių, kai skirtingi metodai pritaikyti tam pačiam vaizdui. Iš gautų rezultatų matyti, kad geriausi binariniai vaizdai gaunami trikampio ir prisitaikančiu metodais.

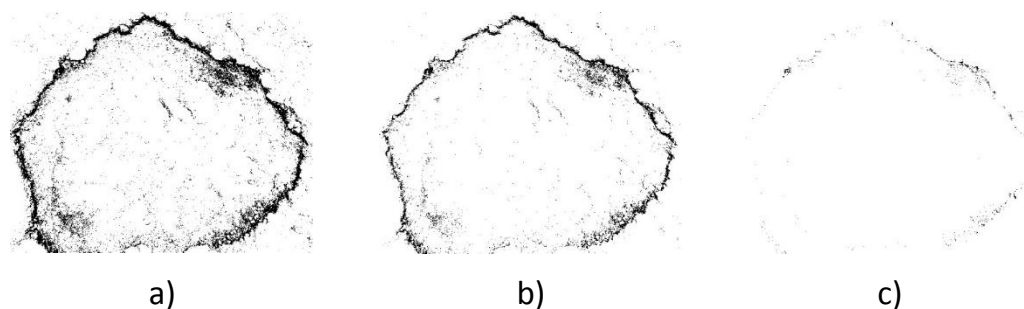
e) *Trikampio metodas slenksčiui nustatyti* (angl. *Triangle threshold*) [59] [A1]. Turime vaizdą su intensyvumų histograma, kaip pavaizduota 14 paveiksle, kur taškas A_{max} yra aukščiausias taškas histogramoje, o A_0 yra pirmo netuščio intensyvumų stulpelio vieta horizontalioje ašyje.



14 pav. Slenksčio nustatymas trikampio algoritmu.

Tuomet nubrėžus atkarpą tarp taškų A_0 ir A_{max} , slenksčio taškas T parenkamas toje vietoje, kur atstumas tarp atkarpos ir intensyvumų yra didžiausias. Po to binarinis vaizdas apskaičiuojamas pagal (12) formulę. Visi taškai, turintys intensyvumą, mažesnį už slenkstį T , laikomi kaip objekto išorė, o visi likę taškai laikomi objekto vidumi arba atvirksčiai.

f) *Prisitaikantis metodas slenksčiui nustatyti*. Šis metodas tinkamesnis vaizdams, kuriuose yra pašalinio triukšmo, šešėlių, kur ieškomas objektas yra neryškus [61]. Dažniausiai slenksčio nustatymo metodai naudoja vieną slenkstį visiems vaizdo taškams kaip trikampio metodas. Tačiau prisitaikantis slenksčio nustatymo metodas (angl. *Adaptive threshold*) [15] [A1] parenka slenksčius kiekvienam vaizdo taškui atskirai. Sugalvota daug būdų dinaminiam slenksčiui $T(x, y)$ apskaičiuoti. Pasirinkto dydžio kaimyninių taškų lange (angl. *kernel*) skaičiuojami vidurkiai, svorio vidurkiai, medianas ir t. t. [62]. Eksperimentai atlikti OpenCV [63] bibliotekoje, kurioje realizuotas prisitaikantis metodas su svorių vidurkiais. Visi svorių vidurkiai gali būti vienodi arba apskaičiuoti remiantis Gauso pasiskirstymu. Šiuo atveju svorių vidurkiai atitinka Gauso glotninimo operatorių. Gauso glotninimo operatorius naudojamas kiekvienam taškui (x, y) ir slenkstis $T(x, y)$ yra svorių vidurkių kryžminės koreliacijos rezultatas naudojant Gauso langą, aprašantį $(k_{size} \times k_{size})$ kaimynų kiekį. Slenkstis $T(x, y)$ Gauso glotninimo operatoriuje priklauso nuo šių parametrų: Gauso glotninimo operatoriaus lango dydžio $(k_{size} \times k_{size})$ ir standartinių nuokrypių σ_x ir σ_y . Realizuotas OpenCV prisitaikantis metodas leidžia automatiškai apskaičiuoti standartinius nuokrypius pagal formulę $\sigma_x = \sigma_y = 0,15 * k_{size} + 0,35$ [63]. Naudodami šią formulę turime pasirinkti tik parametro reikšmę k_{size} . Nustatyti Gauso lango dydžiui atlikti eksperimentiniai tyrimai. Eksperimentams pasirinktas k_{size} intervale $[1, 1500]$ ir rezultatai vizualiai išnagrinėti su visais kelio dangos defektų vaizdais. Rezultatai parodė, kad kelio dangos defektų kraštas gerai matomas ir vaizde triukšmo lieka mažai, kai $k_{size} \in [1001, 1151]$. Rezultatų pavyzdys matyti 15 paveiksle.



15 pav. Priklausomybė prisitaikančio binarizacijos slenkščio metodo branduolio dydžio:

a) $k_{size} = 951$; b) $k_{size} = 1075$; c) $k_{size} = 1201$.

Todėl tolimesniuose tyrimuose naudota vidutinė reikšmė $k_{size} = 1075$ pikseliai. Taip pat svarbu pabrėžti, kad dažnai Gauso lango dydis viršija paveikslėlio dydį, todėl apskaičiuoti slenkstį $T(x, y)$ su Gauso glotninimo operatoriumi vaizdai išplėsti kopijuojant vaizdo kraštus iki Gauso lango dydžio.

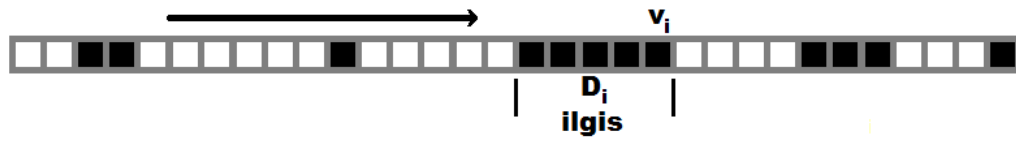
- g) *Apskaičiuojamas vaizdo centras*. Apskaičiuojamas vaizdo centras C kaip pavaizduota 16 paveiksle. Daroma prielaida, kad kažkuri objekto vieta patenka į vaizdo centrą.



16 pav. Vaizdo padalijimas į atkarpas.

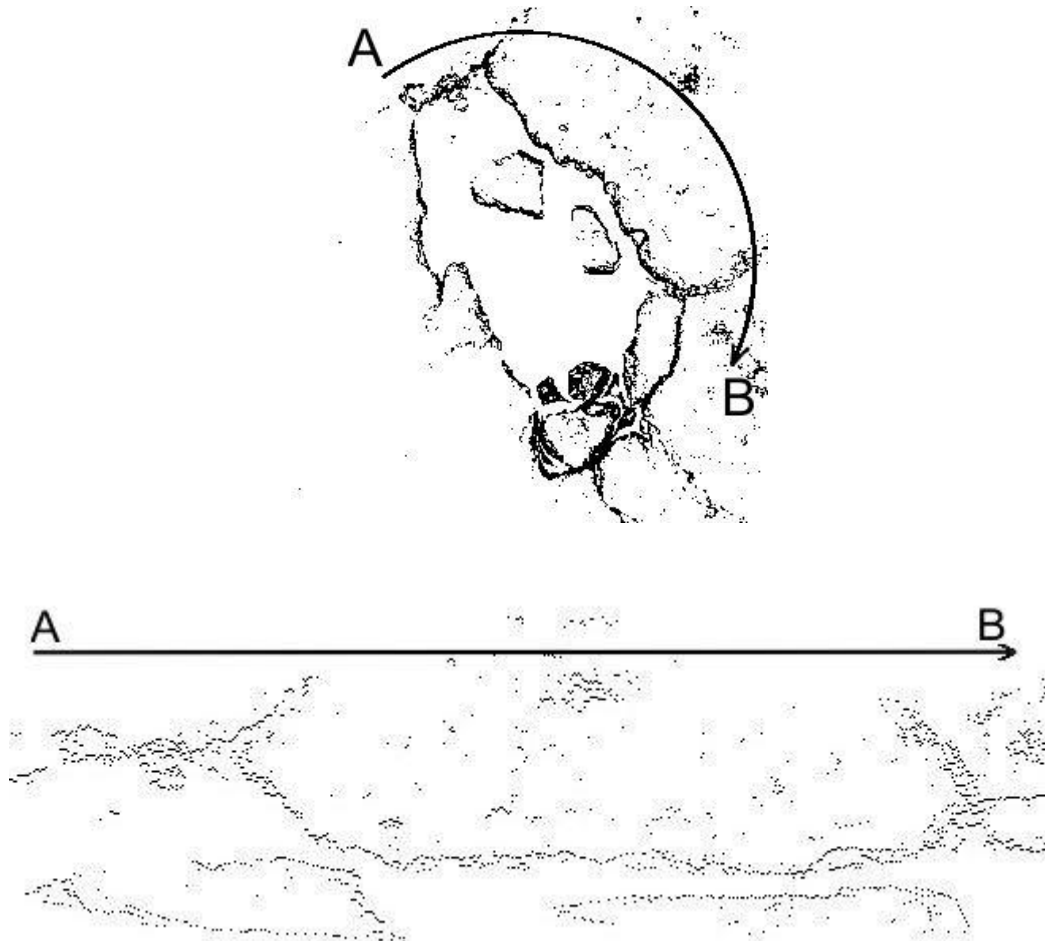
- h) *Kuriama taškų aibė Z* . Brėžiamos atkarpos nuo centro C į kiekvieną vaizdo krašto tašką. 16 paveiksle matome atkarpų brėžimo idėją. Atkarpoms brėžti naudojamas Bresenhamo metodas [64]. Visų atkarpų taškai

surašomi į aibę Z . Kiekviena atkarpa yra baltų ir juodų taškų intensyvumai sąrašė.



17 pav. Atkarpos iš aibės Z pavyzdys.

17 paveiksle pateiktas vienos atkarpos pavyzdys. Rodyklė viršuje atspindi kryptį nuo vaizdo centro į vaizdo kraštą. Lastelės rodo baltų ir juodų dėmių pikselius. Ilgis D_i kiekvienos dėmės gali būti gautas suskaičiavus visas nuosekliai esančias juodas pikselių reikšmes.

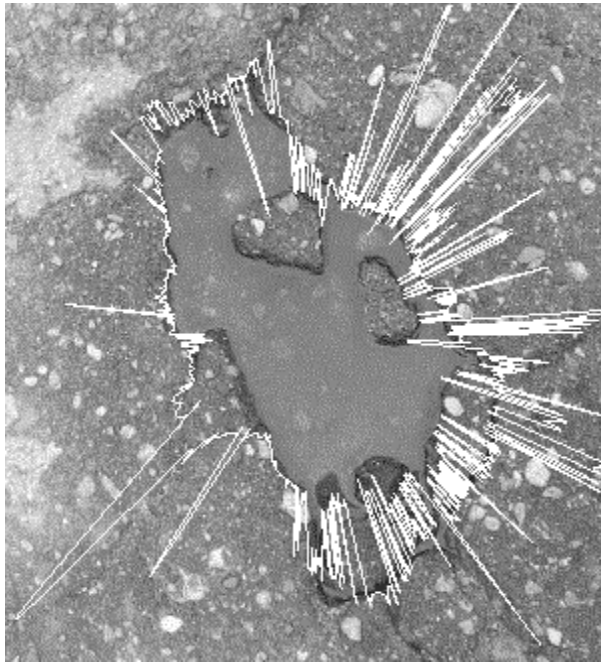


18 pav. Išskleista kelio dangos defektą apibūdinančių pikselių aibė.

- i) *Homogeninių taškų atkarpose filtravimas.* Visos atkarpos, einančios iš vaizdo centro C , dažnai eina per vieną ir tą pačią dėmę, tačiau tikslas yra turėti vieną kartą tą pačią dėmę. Todėl turi būti atliktas homogeninių taškų filtravimas. Tikslui pasiekti randami visi vienodi taškai ir ištrinami, paliekamas tik vidurinis. Taip gaunama nauja aibė Z^* taškų, kurios vaizdas matyti 18 paveiksle. Viršutiniame vaizde kreivė AB atitinka apatiniame vaizde tiesę AB atlikus homogeninių taškų filtravimą.
- j) *Kontūro taškų suradimas naudojant Dijkstra algoritmą.* Nustatyti kontūro taškams naudojamas Dijkstra algoritmas [2]. Kontūrai nustatyti apibrėžiama struktūra $S = (G, L)$. Konstruojamas grafas $G = (V, E)$, kur $V = \{v_i\}$ sudarytas iš viršūnių v_i , paimtų iš aibės Z^* , ir yra kiekvienos atkarpos dėmės tolimiausi taškai, kaip pavaizduota 17 paveiksle, E sudarytas iš briaunų ilgių, sudaromų iš dviejų kaimyninių atkarpų ilgių. $L = \{l_{ij}\}$ yra aibė, sudaryta iš ilgių tarp i – tosios ir j – tosios viršūnių iš aibės V . Ilgiai apskaičiuojami pagal pasiūlytą (13) formulę:

$$l_{ij} = w_1(D_i + D_j) + w_2d_{ij} + w_3(d_{ic} + d_{jc}), \quad (13)$$

čia D_i, D_j yra ilgis atkarpos ruožo i ir j ; d_{ij} yra Euklidinis atstumas tarp viršūnių i ir j ; d_{ic}, d_{jc} – Euklidinis atstumas tarp viršūnės ir vaizdo centro, w_1, w_2, w_3 – svoriai, kur $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$. Visos gautos kontūro viršūnės surašomos į aibę $F = \{v_i\}$. Svoriai w_i parenkami taip, kad kuo tiksliau atitiktų ieškomo kelio dangos defekto kontūro atkarpas. Po eksperimentinių tyrimų svoriai pasirinkti šie: $w_1 = 0,6$; $w_2 = 0,25$; $w_3 = 0,15$. Gauto rezultato pavyzdys matyti 19 paveiksle.



19 pav. Kontūras, gautas naudojant Dijkstros algoritmą.

- k) *Neteisingų kontūro taškų šalinimas.* Šiame etape šalinamos neteisingos kelio dangos defekto kontūro viršūnės. Konstruojama nauja objekto kontūro aibė $F^* = \{f_i\}$ iš aibės F . Iš pradžių imama pirmoji viršūnė v_0 iš aibės F ir įrašoma į aibę F^* , t. y. $f_0 = v_0$. Daroma prielaida, kad viršūnė tikrai priklauso objekto kontūrai. Išrenkama viršūnė, artimiausia viršūnei v_0 iš 10 iš eilės einančių aibės F viršūnių. Rasta viršūnė įrašoma į aibę F^* . Taip kartojama nuo vis naujai gautos viršūnės, kol perrenkamos visos aibės F viršūnės.
- l) *Vaizdas su apibrėžtu kontūru.* Galutinis rezultatas su apibrėžtu kelio dangos defekto kontūru matyti 20 paveiksle.

a)



20 pav. Kelio dangos defekto kontūras.

1.4 Eksperimentinis lyginimas

Šiame poskyryje pateiktas eksperimentinis tyrimas siekiant nustatyti disertacijoje pristatyto kelio dangos defektų kontūro atpažinimo metodo ir aktyvaus kontūro metodo tikslumą, lyginant juos su žmogaus nubrėžtu kelio dangos defektų kontūru [A1].

Eksperimentai atliekami su 105 skirtingos rezoliucijos kelio dangos defektų vaizdais, kurie padaryti mobiliojo įrenginio fotoaparatu.

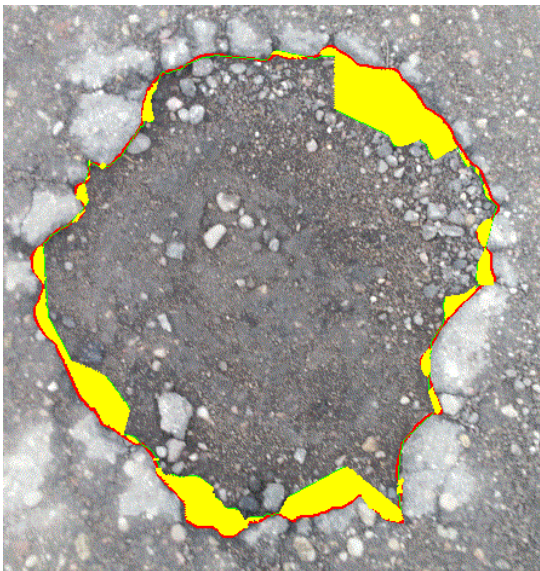
Tikslumas vertinamas pagal (11) formulę. Keletas pavyzdžių pateikti 21 paveiksle. Raudona spalva pavaizduotas žmogaus apibrėžtas kontūras, žalia spalva – programos apibrėžtas plotas, o geltona spalva yra žmogaus nubrėžto kontūro ir taikant pristatytą metodą programos apskaičiuoto kontūro plotas.



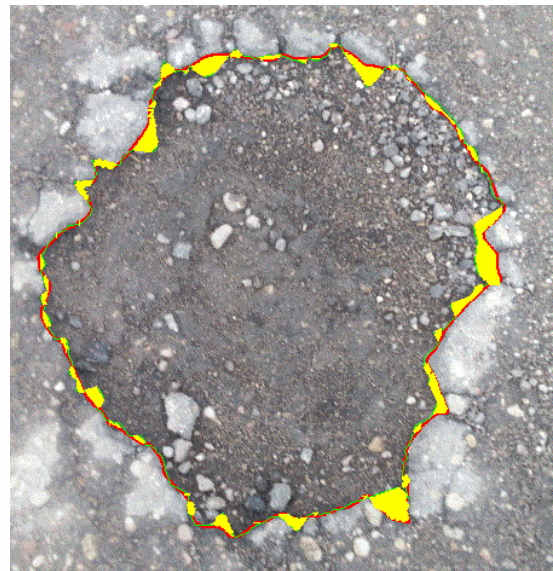
a)



b)



c)



d)

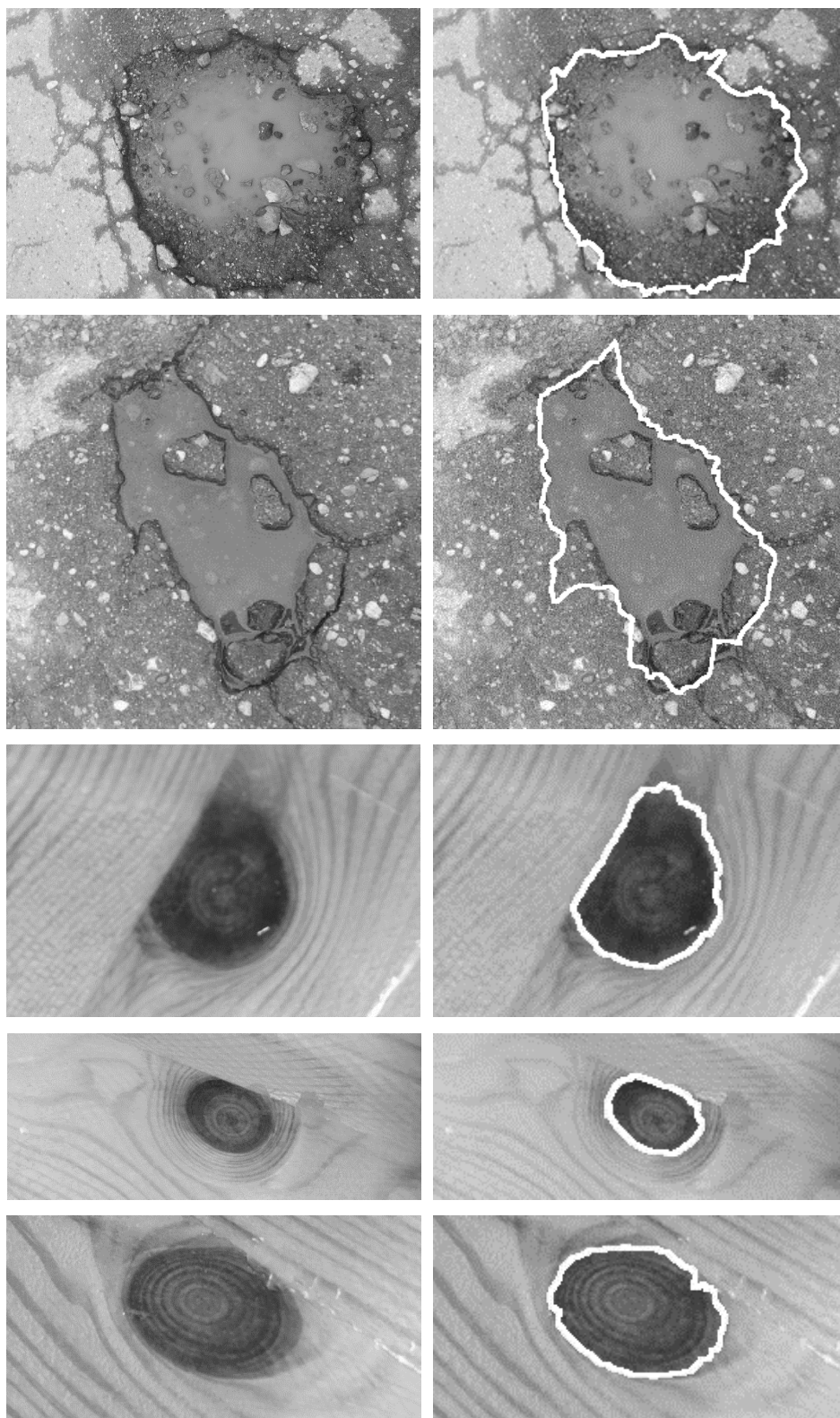
21 pav. Kelio dangos defektų kontūrų atpažinimas skirtingais metodais: a) Gyvatės – Trikampio; b) Gyvatės – Prisitaikantis; c) Pasiūlytas – Trikampio; d) Pasiūlytas – Prisitaikantis.

Renkantis binarizacijos slenksčio metodą gauti du patenkinami rezultatai: trikampio ir prisitaikančiu metodais, gaunamos keturios skirtingos metodų kombinacijos: Gyvatės – Trikampio, Gyvatės – Prisitaikantis, Pasiūlytas – Trikampio ir Pasiūlytas – Prisitaikantis. Rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Metodų tikslumų lyginimas.

Metodas	C=(B-A)/B*100 %										Vidurkis
	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %	
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %	0 %	
Gyvatės – Trikampio	2	7	18	15	20	13	6	7	4	9	52 %
Gyvatės – Prisitaikantis	3	10	11	25	11	13	11	4	2	11	53 %
Pasiūlytas – Trikampio	13	25	25	16	11	4	2	0	1	4	70 %
Pasiūlytas – Prisitaikantis	15	38	25	11	9	2	0	0	0	0	78 %

Iš rezultatų matyti, kad lyginant Gyvatės – Prisitaikantį ir Pasiūlytą – Prisitaikantį metodus, apie 25 % geresni rezultatai gaunami Pasiūlytu – Prisitaikančiu metodu. Geriausias atitikimas gautas kontūrą nubrėžus Pasiūlytu – Prisitaikančiu metodu ir jį lyginant su žmogaus nubrėžtu kontūru buvo 97 %. Tos pačios kombinacijos blogiausias rezultatas buvo 42 %, labiausiai dėl nepakankamo apšvietimo ar pašalinių defektų. Apytikslis tikslumas yra 78 %. 15 vaizdų buvo atpažinti 90 % – 100 % tikslumu, 38 vaizdai atpažinti 80 % – 90 % tikslumu ir tik 2 vaizdai atpažinti 40 % – 50 % ir mažesniu tikslumu.



a)

b)

22 pav. Įvairūs kontūrų pavyzdžiai. a) originalūs vaizdai; b) disertacijoje pasiūlyto kontūro atpažinimo metodo rezultatai.

22 paveiksle a) pusėje pateikta keletas tyrinėjamų objektų kontūrų pavyzdžių, b) pusėje disertacijoje pristatyto kontūro atpažinimo metodu gauti rezultatai.

1.5 Skyriaus išvados

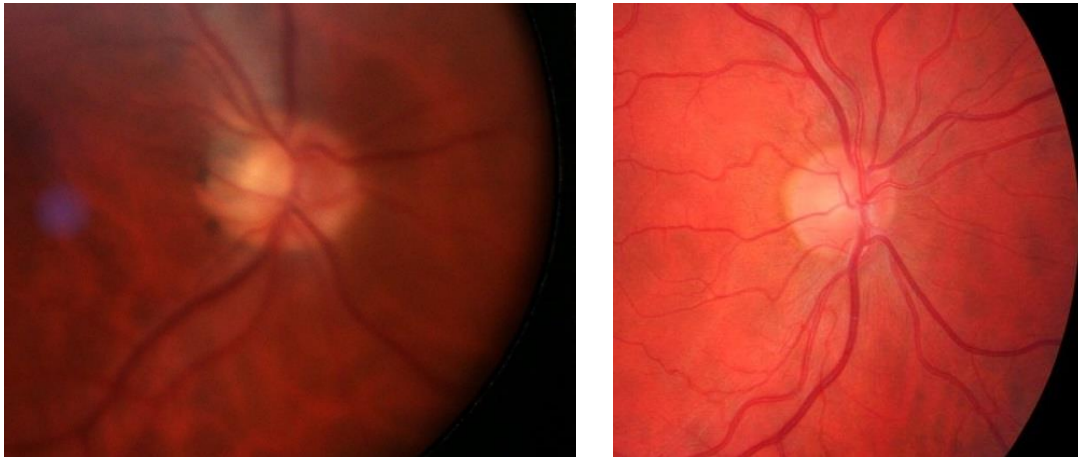
Šiame skyriuje apžvelgti kelio dangos defektų atpažinimo metodai ir pristatytas naujas metodas kelio dangos defektų kontūrams nustatyti. Šis palygintas su aktyvaus kontūro metodu, lyginant abu metodus su žmogaus apibrėžtais kontūrais. Atlikus eksperimentinius tyrimus su 105 vaizdais gauti šie rezultatai:

1. Diferencialiniai operatoriai briaunoms aptikti pasižymi didele greitaveika ir paprastumu, bet labai jautrūs triukšmui.
2. Aktyvaus kontūro metodu galima atpažinti uždara kontūrą galimai triukšmingame vaizde, tačiau būtina apibrėžti pradinį kontūrą.
3. Disertacijoje pristatytas kelio dangos defektų kontūro atpažinimo metodu galima atpažinti sudėtingą uždara kontūrą, neturintį konkrečios formos, spalvos ar turintį pašalinio triukšmo.
4. Disertacijoje pristatytas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas su prisitaikančiu binarizacijos slenksčiu leidžia pasiekti 25 % didesnę tikslumą lyginant su aktyvaus kontūro metodu su prisitaikančiu binarizacijos slenksčiu.
5. Didžiausias tikslumas lyginant disertacijoje pasiūlyto kelio dangos defektų kontūro atpažinimo metodo kontūrą su žmogaus apibrėžtu kontūru – 97 %, o mažiausias – 42 %. Vidutinis pasiūlyto metodo tikslumas – 78 %.

2 Aberacijos ir vaizdų kokybė

Per pastaruosius metus stipriai ištobulėjus skaitmeninių fotoaparatus jutiklių kokybei, labai padidėjo skaitmeninių vaizdų rezoliucija. Dėl to labiau išryškėjo ir įvairūs šalutiniai aberacijų efektai: nesufokusuoti, neryškūs, išblukę vaizdai, atsiradusios papildomos spalvos, objektų briaunos neatitinka fotografuoto vaizdo briaunų ir t. t.

Su šalutiniais aberacijų efektais susiduria ir oftalmologai. Brangūs, dideli, stacionarūs akies dugno fotoaparatai, tokie kaip Topcon TRC-50DX, TRC-NW8 [65] ar Canon CR-2 AF [66], talpina sudėtingą apochromatinių lęšių sistemą. Portatyviniai, maži, pigūs akies dugno fotoaparatai, tokie kaip Volk Pictor Plus Portable Retinal [67], Horus Scope Portable Non-Mydriatic Fundus [68], Optomed SmartScope M5 [69], HFC Handheld Portable Fundus [70], neturi achromatinių, apochromatinių ar difrakcinių lęšių, todėl mažėja vaizdo tikslumas, raiška, atsiranda iškraipymų. Kadangi daugiausia informacijos oftalmologai gauna iš akies dugno vaizdų, iš blogos kokybės vaizdų kur kas sunkiau pastebėti ligos požymius. Aberacijos iškraipymų pavyzdys, pateiktas 23 a) paveiksle, gautas portatyviniu akies dugno fotoaparatu, neturinčiu papildomų lęšių aberacijų efektams šalinti. Gerai matyti, kad kraujagyslės ir regos nervo disko kraštai neryškūs, esti papildomų spalvų. 23 b) paveiksle matomas pavyzdys be šalutinių aberacijos iškraipymų.



a)

b)

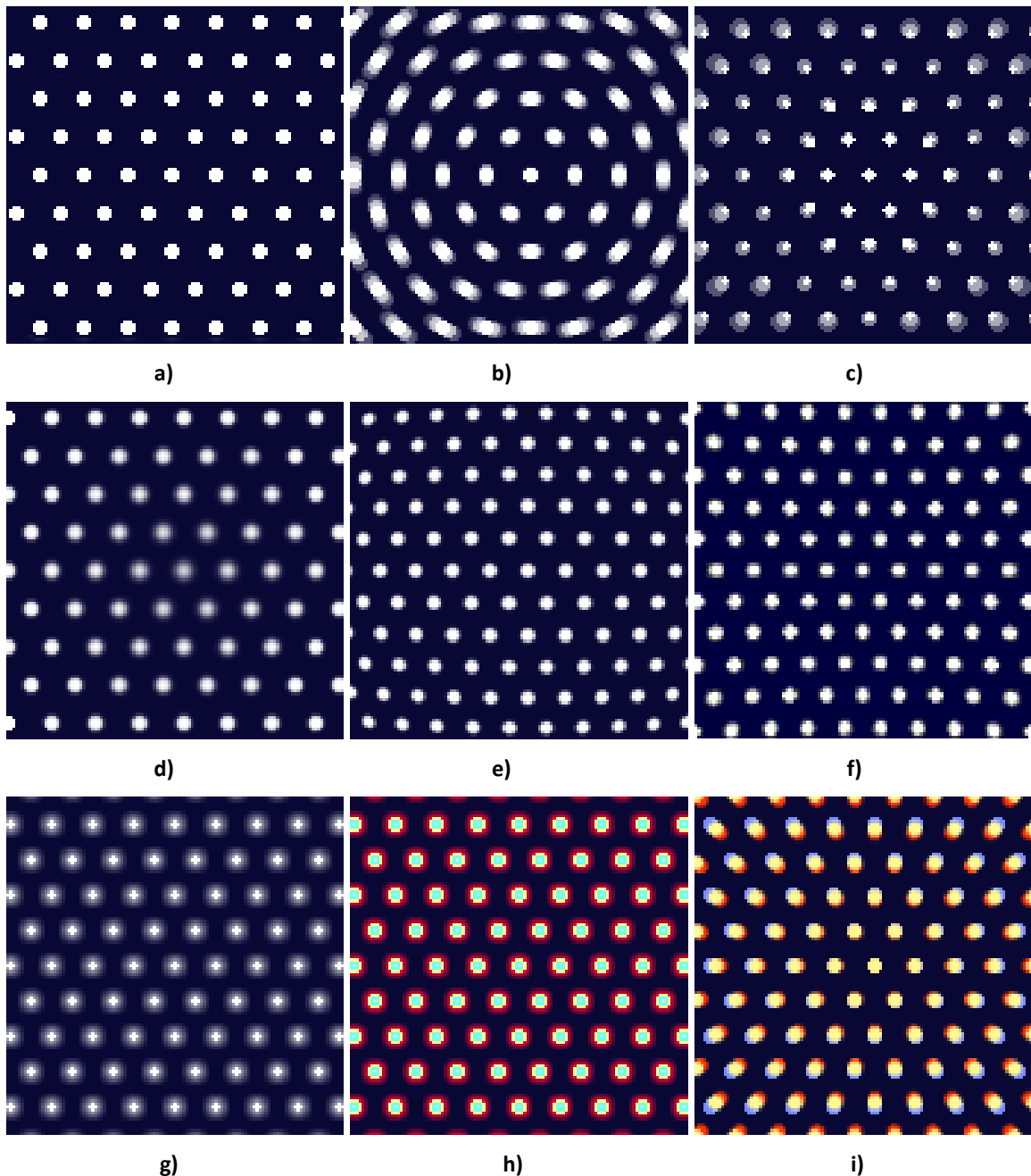
23 pav. Akies dugno vaizdai: a) vaizdas su skersinės chromatinės aberacijos efektu;
b) vaizdas be chromatinės aberacijos efekto.

Pasiūlyta daug įvairių mechaninių ir programinių būdų aberacijoms šalinti, kurie plačiau pristatyti kitame poskyryje. Deja, kol kas nėra sukurta universalios metodikos šalinti įvairioms aberacijoms, kuri tiktų visoms optinėms sistemoms. Todėl šią problemą reikia spręsti priklausomai nuo situacijos. Norint nustatyti aberacijos šalinimo metodų efektyvumą naudojami įvairūs matai, kurie taip pat plačiau pristatyti šiame skyriuje.

2.1 Aberacijų tipai

Aberacijos (lot. *aberratio*, *aberrare* – nuklysti, nukrypti) – tai optinės sistemos ydos, atsirandančios dėl fotografuojamo vaizdo netapatumo fotografuotai scenai, jo defektai atsiradę dėl spindulio nuokrypio nuo tos krypties, kuria turėtų sklisti idealioje optinėje sistemoje [71].

Optinių sistemų aberacijos skirstomos į monochromatines (angl. *Monochromatic aberration*) – vienodo bangos ilgio spindulių aberacijos, ir chromatinės (angl. *Chromatic aberration*) – skirtingų bangų ilgių spindulių aberacijas, kaip pavaizduota 25 paveiksle.

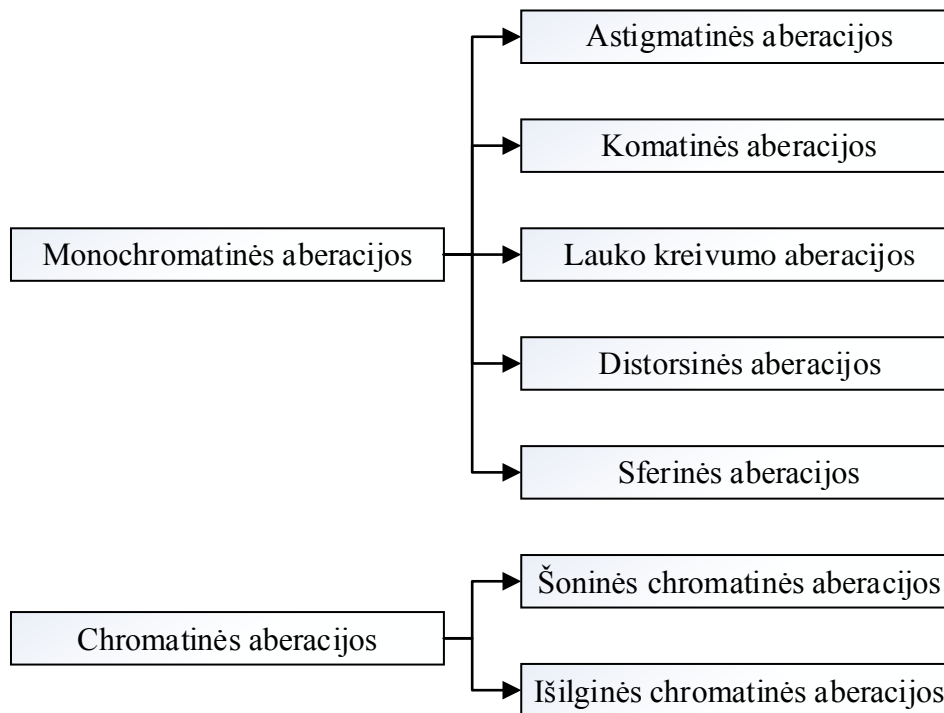


24 pav. Aberacijų tipų pavyzdžiai: a) šabloninis vaizdas; b) astigmatinė; c) komatinė; d) lauko kreivumo; e) įgaubta distorsinė; f) išgaubta distorsinė; g) sferinė; h) išilginė chromatinė; i) skersinė chromatinė. Vaizdai panaudoti iš MacEvoy [72] puslapio.

2.1.1 Monochromatinės aberacijos

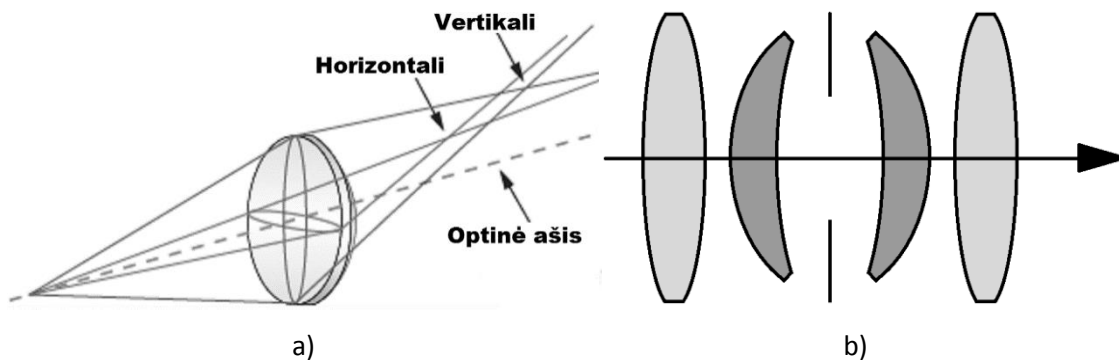
Monochromatinės aberacijos (angl. *Monochromatic aberration*) nusako nuokrypį tarp realaus vaizdo ir gauto vaizdo, kai sklinda griežtai vienodo bangos ilgio spinduliai. Vienas iš pirmųjų šias aberacijas aprašė Ludwigas von Seidelis

1855 metais [73] ir išskyrė jas į penkis tipus: astigmatines (angl. *Astigmatic*), komatines (angl. *Comatic*), lauko kreivumo (angl. *Field curvature*), distorsines (angl. *Distortion*) ir sferines aberacijas (angl. *Spherical aberration*), kurios pavaizduotos 25 paveiksle.



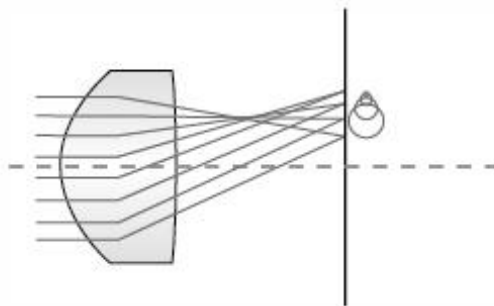
25 pav. Aberacijų tipai.

- **Astigmatinė aberacija** atsiranda, kai šviesos spinduliai, esantys dviejose statmenose, plokštumoje turi skirtingus fokuso taškus. Tai pasireiškia dėl netobulai nušlifuoto lęšio paviršiaus arba nesuderinto objektyvo [71]. Astigmatinės aberacijos veikimo principas pavaizduotas 26 paveikslo kairėje pusėje, o pavyzdys matyti 24 b) paveiksle. Astigmatinę aberaciją galima pašalinti arba sumažinti suderinus objektyvą ir tobulai nušlifavus lęšio paviršių arba panaudojus anastigmatinį lęšį, pavaizduotą 26 b) paveiksle.



26 pav. Astigmatinė aberacija: a) astigmatinės aberacijos principas [74];
b) anastigmatinis lęšis.

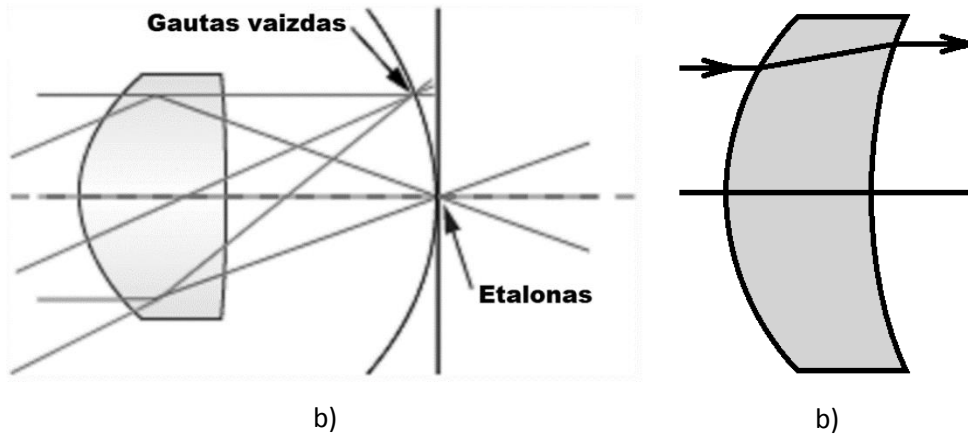
- **Komatinė aberacija** atsiranda vaizdo dalyje, kuri yra nutolusi nuo optinės ašies. Iš objekto spinduliai, sklindantys arčiau prie lęšio krašto, lūžta labiau negu esantys arčiau optinės ašies ir atvaizdo plokštumoje sukuria išsklaidytus apskritimus [71]. Komatinės aberacijos efektas matyti 27 a) paveiksle ir pavyzdys pateiktas 24 c) paveiksle. Taško atvaizdas panašus į kometą. Norint pašalinti komatinę aberaciją reikia atlikti optinės ašies centravimą, sumažinti diafragmos dydį arba panaudoti anastigmatinį lęšį, pavaizduotą 26 b) paveiksle.



27 pav. Komatinės aberacijos principas [74].

- **Lauko kreivumo** arba dar kitaip žinomo kaip Petzvalo paviršiaus [75] aberacija pasireiškia, kai plokščias objektas optinės ašies atžvilgiu negali būti atvaizduotas į plokščią vaizdo plokštumą, jis atvaizduojamas išgaubtas. Lauko kreivumas tiesiogiai susijęs su astigmatine aberacija. Visiškai sukoregavus astigmatinę aberaciją, astigmatinio fokusavimo linijos sutapatinamos ir lęšis pradeda surinkti šviesą į vieną tašką. Tačiau

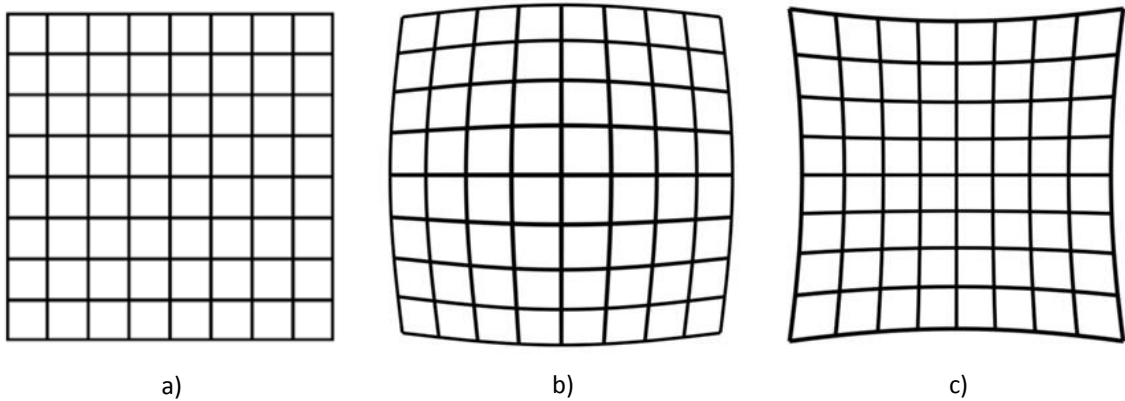
vietoj norimo plokščio gaunamas išlinkęs vaizdas, susidarantis ant Petzvalo paviršiaus. Lauko kreivumo principas matyti 28 a) paveiksle ir pavyzdys pateiktas 24 d) paveiksle. Norint sumažinti lauko kreivumą naudojami stori menisko lęšiai, pavaizduoti 28 b) paveiksle, šie padeda atvaizduoti vaizdą į plokštumą.



28 pav. Lauko kreivumas: a) lauko kreivumo principas [74]; b) storas menisko lęšis.

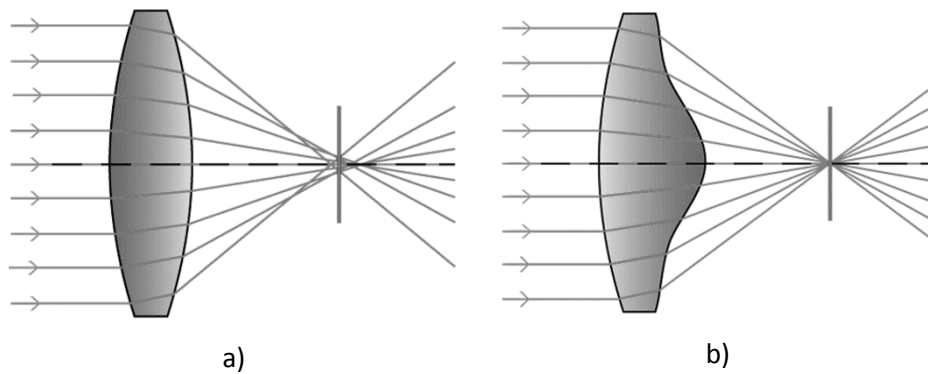
- **Distorsinė aberacija** – tai objekto vaizdo geometrijos iškreipimas. Lęšis turi didelę įtaką geometriniams iškreipimams. 29 paveiksle pavaizduoti objekto geometriniai iškreipimai, matomi naudojant kvadratinį tinklelį. 29 b) paveiksle pavaizduotas iškreipimo principas, gaunamas didėjant teigiamai lęšio galiai; pavyzdys matyti 24 e) paveiksle. Vaizdas padidinamas ir ištempiamas, objekto kraštai įsigaubia, iškreipomas vaizdas centre ir centras atrodo nutolęs nuo objekto kraštų. Pvz., kvadrato figūros atvaizdas įgauna „statinaitės“ formą (angl. *Barrel distortion*). Panašus efektas gaunamas su didelės galios glaudžiamaisiais lęšiais kaip padidinamasis stiklas. 29 c) paveiksle pavaizduotas iškreipimo principas, gaunamas esant neigiamai galiai; pavyzdys matyti 24 f) paveiksle. Vaizdas išsigaubia ir objekto centrinė dalis atrodo arčiau kraštų, nei yra iš tikrųjų. Kvadrato figūros vaizdas įgauna „pagalvėlės“ formą (angl. *Pincushion distortion*). Panašus efektas gaunamas su didelės galios sklaidomaisiais

lęšiais. Dviejų lęšių sistemoje įdėjus diafragmą tarp lęšių galima žymiai sumažinti distorsinės aberacijos efektą [71].



29 pav. Distorsinės aberacijos iškraipymai: a) neiškraipytas objektas, b) iškraipymas, gautas naudojant glaudžiamąjį lęšį; c) iškraipymas, gautas naudojant sklaidomąjį lęšį.

- **Sferinė aberacija** pasireiškia, kai perėjęs pro lęšį šviesos spindulių pluoštas susirenka ne viename taške (židinyje), t. y. kuo toliau spinduliai praeina nuo optinės ašies, tuo jų židinio ilgis trumpesnis [71]. Sferinės aberacijos principas matyti 30 a) paveiksle ir pavyzdys pateiktas 24 g) paveiksle. Taškų kraštai išblukę, neryškūs. Norint pašalinti sferinę aberaciją galima naudoti asferinį lęšį, kaip parodyta 30 b) paveiksle, arba anastigmatinį lęšį, pavaizduotą 26 b) paveiksle. Raudona spalva žymi šviesos spindulius, žalia spalva žymi geriausią fokuso tašką.



30 pav. Sferinė aberacija: a) sferinės aberacijos principas; b) sferinės aberacijos šalinimas [76].

Chromatinės ir monochromatinės aberacijos yra nepriklausomos viena nuo kitos, todėl šioje disertacijoje daugiau monochromatinės aberacijos nebus aptariamos. Plačiau apie monochromatinės aberacijas rašoma [71] [75].

2.1.2 Chromatinės aberacijos

Balta šviesa, praėjusi pro optinių lęšių sistemą, sukuria spalvotą vaizdą. Kadangi kiekvienos spalvos bangos ilgis skiriasi, o visiems optiniams lęšiams būdinga dispersija, šviesos spindulio nuokrypio kampas lūžtančiai lęšyje kiekvienai spalvai skiriasi. Trumpesnės bangos spinduliai glaudžiamajame lęšyje yra užlenkiami, o sklaidomajame – atlenkiami labiau už ilgesnės bangos spindulius, dėl to glaudžiamajame lęšyje violetinių spindulių židiny yra arčiau lęšio negu raudonųjų spindulių. Šis reiškinys vadinamas **chromatine aberacija** (angl. *Chromatic aberration*) (ChA).

Chromatinė aberacija matuojama Abbės skaičiumi V_D . Abbės skaičius yra medžiagos charakteristika, nusakanti medžiagos dispersiškumą – medžiagos lūžio rodiklio priklausomybę nuo kritusios į medžiagą bangos ilgio [77]. Kuo Abbės skaičius didesnis, tuo lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio mažesnė, tuo chromatinės aberacijos mažesnės. Turint lęšio medžiagos lūžio rodiklius n_G geltonajai helio G – linijai (bangos ilgis $587,56 \text{ nm}$), n_M mėlynajai vandenilio M – linijai (bangos ilgis $486,13 \text{ nm}$) ir n_R raudonajai

vandenilio R – linijai (bangos ilgis $656,27 \text{ nm}$), galima apskaičiuoti Abbès skaičių pagal (14) formulę:

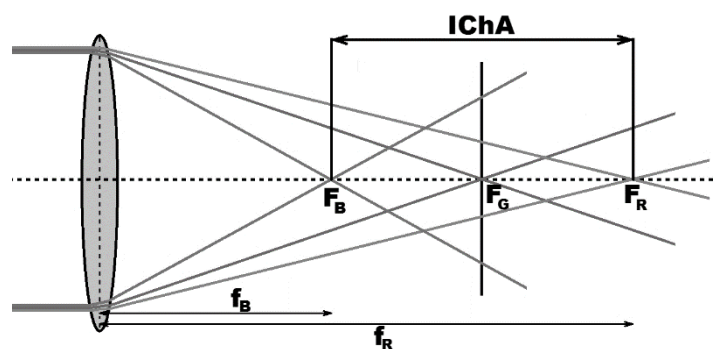
$$V_D = \frac{n_G - 1}{n_M - n_R}. \quad (14)$$

Lęšiai su dideliu Abbès skaičiumi išsklaido mažiau šviesos, o tai sumažina chromatinės aberacijos efektą.

Realybėje neįmanoma sukurti optinės sistemos, kurioje visiškai nebūtų ChA. Visi optiniai lęšiai turi skirtingus ChA iškraipymus. ChA nepasireiškia tik veidrodinės optikos reflektoriniuose veidrodžiuose.

Chromatinės aberacijos skirstomos dar į du tipus: išilginės ir skersinės, kaip matyti 25 paveiksle.

Išilginė chromatinė aberacija (angl. *Axial arba Longitudinal Chromatic Aberration*) (IChA) efektas pasireiškia, kai skirtingos spalvos fokusuojasi skirtingose vietose. 31 paveiksle matyti, kad tik žalia spalva bus sufokusuota, jos fokuso centras yra F_G . F_B yra mėlynos spalvos fokuso centras, o F_R yra raudonos spalvos fokuso centras. f_B – mėlynos spalvos fokuso ilgis nuo lęšio centro, o f_R – raudonos spalvos fokuso ilgis nuo lęšio centro. Kadangi kiekvienos spalvos fokuso centrai yra skirtingose vietose, kad ir kur perkeltume fokuso centrą, vis tiek vaizdas bus išblukęs. 24 h) paveiksle matyti, kad vietoje balto taško susikuria aibė spalvotų apskritimų.



31 pav. Išilginė chromatinė aberacija.

Išilginės chromatinės aberacijos gali būti įvertintos dioptrijomis, šios apskaičiuojamos pagal (15) formulę.

$$IChA = \frac{P}{V_D}, \quad (15)$$

lęšio galia P matuojama dioptrijomis ir apskaičiuojama pagal (16) formulę.

$$P = \frac{1}{f} = \left(\pm \frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \right) * (n - 1), \quad (16)$$

čia r_1 ir r_2 yra lęšio paviršių kreivumo spinduliai. Laikoma, kad $r > 0$, kai paviršius yra iškilasis, ir $r < 0$, kai paviršius yra įgaubtasis, n lęšio lūžio rodiklis, f lęšio židinio nuotolis.

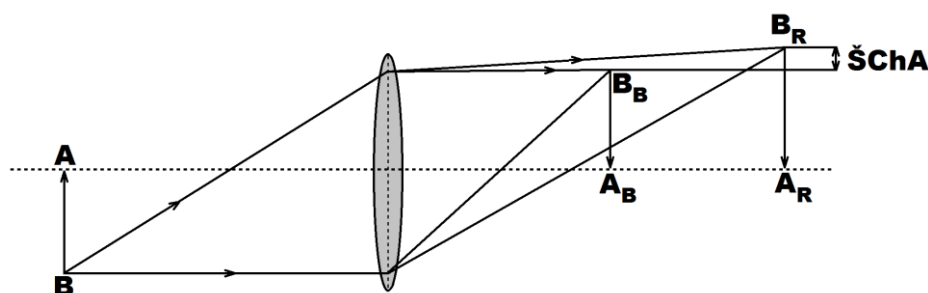
Plačiau apie aberacijos matavimus galima rasti knygoje [78].

Skersinės chromatinės aberacijos (angl. *Lateral or Transverse Chromatic Aberration*) (SChA) atsiranda, kai fokuso ašis pasukta, spalvos sufokusuotos toje pačioje plokštumoje, tačiau kampai nėra išilgai optinės ašies, kaip parodyta 32 pavyzdyje. Šis efektas neatsiranda aberacijos fokuso centre, tačiau kuo toliau nuo centro, tuo daugiau iškraipymų pasireiškia. Jei turime baltą objektą AB , SChA ilgis bus $B_R A_R - B_B A_B$, kur $B_R A_R$ – raudonos spalvos, kurios bangos ilgis $\sim 620 - 740 \text{ nm}$, sufokusuotas objekto AB atvaizdas, $B_B A_B$ – mėlynos spalvos, kurios bangos ilgis yra $\sim 450 - 495 \text{ nm}$, sufokusuotas objekto AB atvaizdas, F_B yra mėlynos spalvos fokuso centras, F_R – raudonos spalvos fokuso centras.

Skersinės chromatinės aberacijos gali būti įvertintos dioptrijomis ir apskaičiuotos pagal (17) formulę [79].

$$SChA = \frac{P}{V_D}, \quad (17)$$

24 i) paveiksle matyti, kad kraštuose spalvos nesutampa, vaizdas nėra detalus, netgi persidengdamos spalvos gali sukurti nesamų objektų.

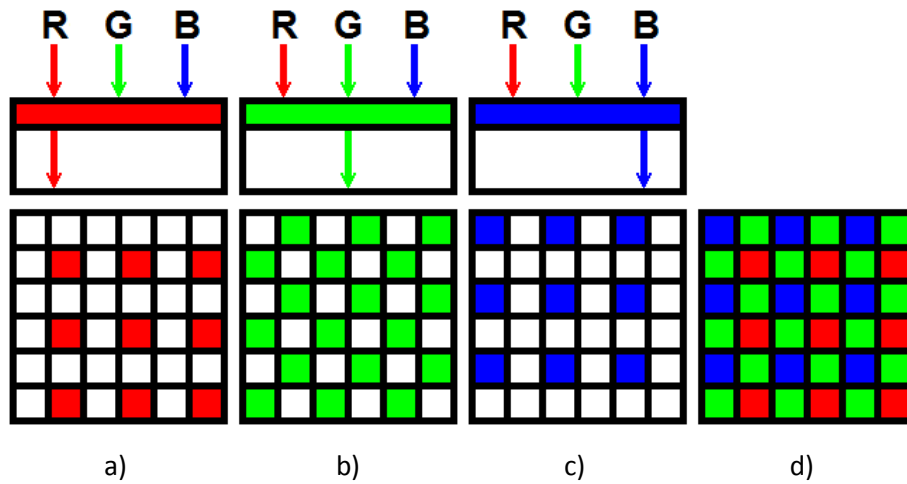


32 pav. Skersinė chromatinė aberacija.

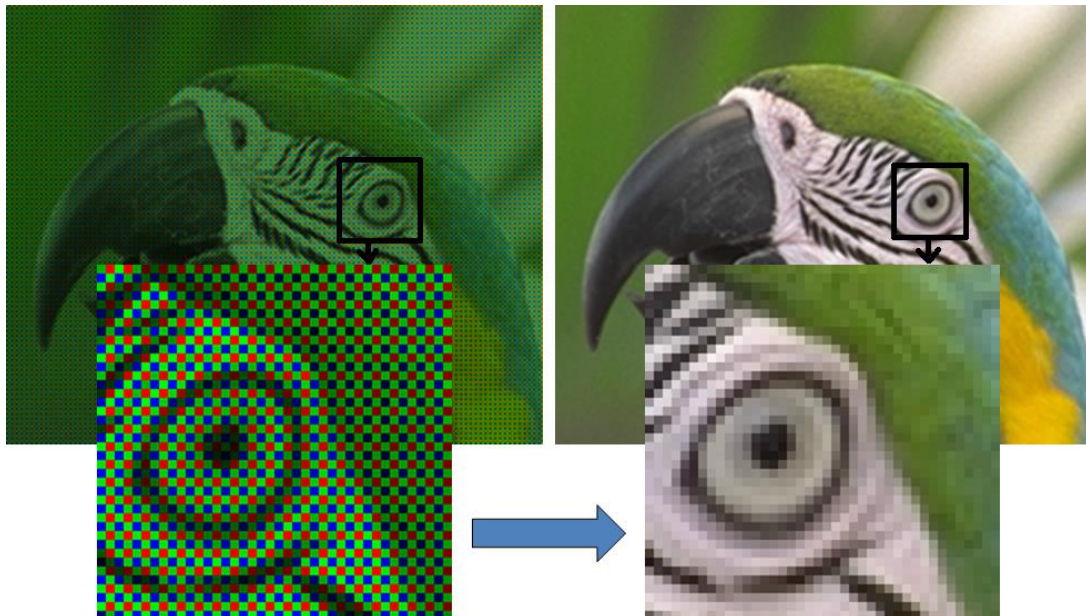
2.1.3 Iškreipimai, atsirandantys dėl vaizdo jutiklių

Nedidelių vaizdo iškreipimų ar triukšmo gali atsirasti ne tik dėl optinių lęšių sistemos, bet taip pat dėl vaizdo jutiklių, spalvų filtrų ir panašiai. Dažniausiai fotoaparatai turi du vaizdo jutiklių tipus, tai CCD (angl. *Charge Coupled Devices*) ir CMOS (angl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [75]. CMOS yra daug pigesni už CCD vaizdo jutikliai, tad dažnai jie įdiegiami mobiliuosiuose telefonuose ar kituose buitiniuose fotoaparatuose. Šiuos vaizdo jutiklius turi ir dauguma portatyvinių akies dugno kamerų. Kadangi CMOS vaizdo jutiklio sistemoje prie kiekvieno šviesai jautraus fotodiodo yra keli tranzistoriai, dalis fotonų prarandami, kai atsimuša į tranzistorius, o ne į fotodiodą; tai yra galima nedidelio triukšmo priežastis. Šviesai jautrūs fotodiodai padengiami skirtingų spalvų filtrais. Dažniausiai naudojama Bayer filtrų mozaika [80], šios veikimo principas pavaizduotas 33 paveiksle. a) b) c) vaizduose matyti raudonos, žalios ir mėlynos spalvų filtrai, praleidžiantys tik tam tikrą vienos spalvos spektrą. Žalios spalvos filtrų yra dvigubai daugiau už raudonos ar mėlynos spalvos filtrus, kadangi žmogus žalią spalvą suvokia stipriau už raudoną ar mėlyną. d) vaizde matyti bendras spalvų filtrų išsidėstymas. Taigi jei turime matricą, sudarytą iš keturių milijonų šviesos diodų, gausime du milijonus žalių, vieną milijoną raudonų ir vieną milijoną mėlynų taškų, kaip pavaizduota 34 paveiksle kairėje pusėje. Todėl didelė šviesos dalis pro spalvos filtrus nepraeina, ir tik atskiras elektromagnetinis spektras gali pasiekti po juo esančius jutiklius. Pavyzdžiui, įrašant vienspalvį raudoną

atspalvį, raiška sumažėja keturis kartus, o įrašant vienspalvį žalią atspalvį – du kartus. Norint atkurti visas spalvas naudojami įvairūs interpoliacijos algoritmai [81] [82] [83], tokie kaip artimiausio kaimyno, linijinio ar kubiniu spline aproksimuojami algoritmai, šių rezultato pavyzdys matyti 34 paveikslo dešinėje pusėje. Tačiau naudojant bet kurį interpoliacijos algoritmą neįmanoma atkurti visiškai tikslaus vaizdo, vis tiek lieka minimalių iškreipymų [75]. Toliau apie šio tipo iškreipimus šioje disertacijoje nebus kalbama, nes jie yra minimalūs, tai yra nedaro didelės įtakos chromatinės aberacijos efektui ir šalinami gali būti tik pakeičiant vaizdo jutiklio tipą.



33 pav. Bayer mozaika: a) raudonos; b) žalios; c) mėlynos spalvų filtrai; d) bendra spalvų filtrų matrica.

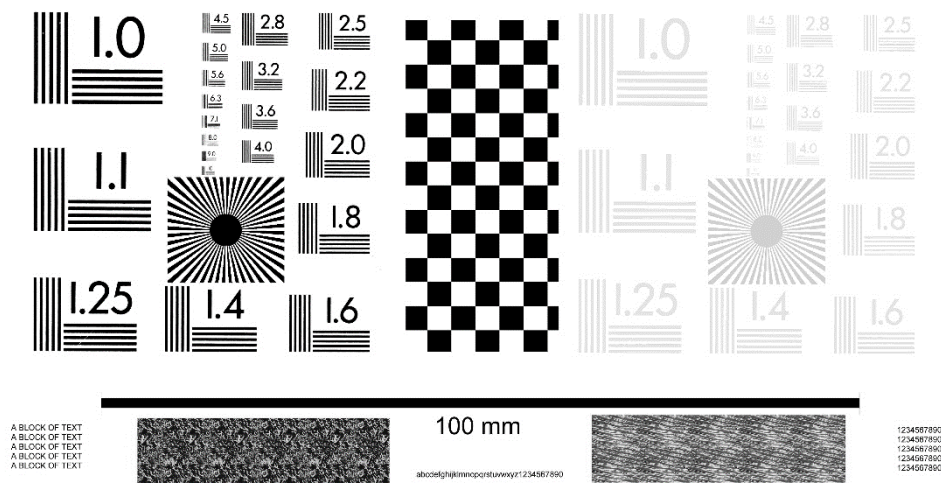


34 pav. Bayer mozaikos spalvų atkūrimas [84].

Kitame poskyryje plačiau pristatyti galimi chromatinės aberacijos šalinimo metodai.

2.2 SmartScope M5 Optomed fotoaparato chromatinės aberacijos tipo nustatymas

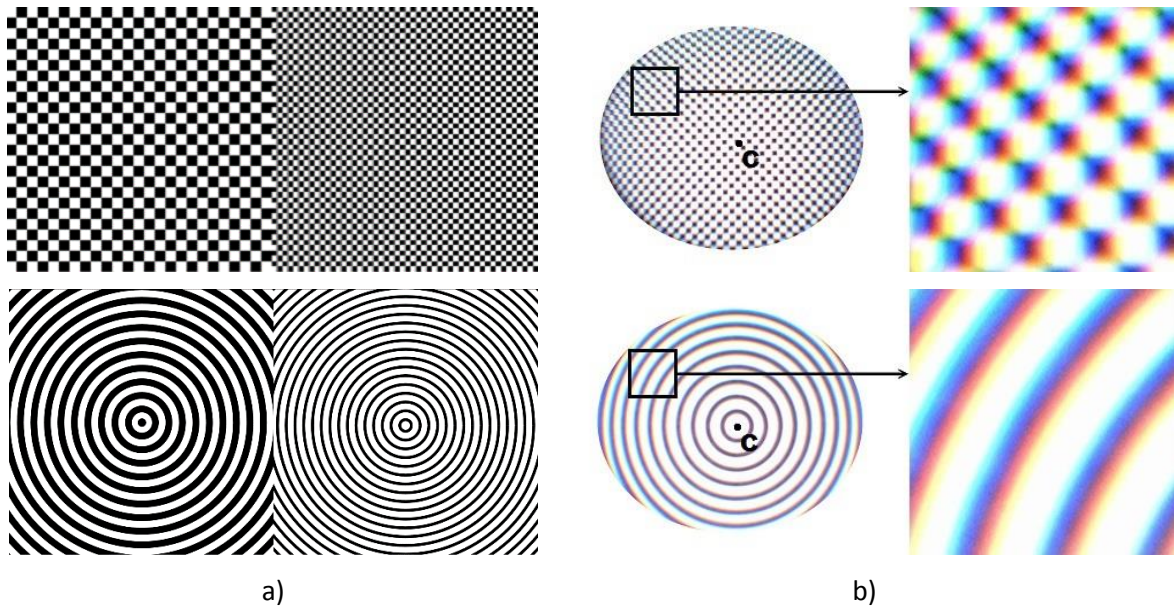
Kiekviena optinė sistema nufotografuotame vaizde palieka mažesnių ar didesnių iškraipymų. Pats paprasčiausias būdas iškraipymams nustatyti – nufotografuoti bet kokį šablono vaizdą ir gautą vaizdą palyginti su šablonu. Žinoma, taip bus sunku pastebėti ir atpažinti daugumą iškraipymų, nes fotografuojamas vaizdas gali jų neparodyti. Norint išsiaiškinti, kokių yra iškraipymų optinėje sistemoje, reikia naudoti kalibravimo šabloninius vaizdus, šių pavyzdys pavaizduotas 35 pavyzdyje. Kalibravimo šabloniniai vaizdai padeda nustatyti, ar objektyvo autofokusavimo sistema tiksliai fokusuoja vaizdą, ar vaizdas kontrastingas, neišblukęs, ar neiškraipytas, ar neatsiradę papildomų spalvų, ar spalvos atvaizduotos tiksliai ir detalai, ar neatsiradę triukšmo (grūdėtumo) ir t. t.



35 pav. Kalibravimo šablonai [85].

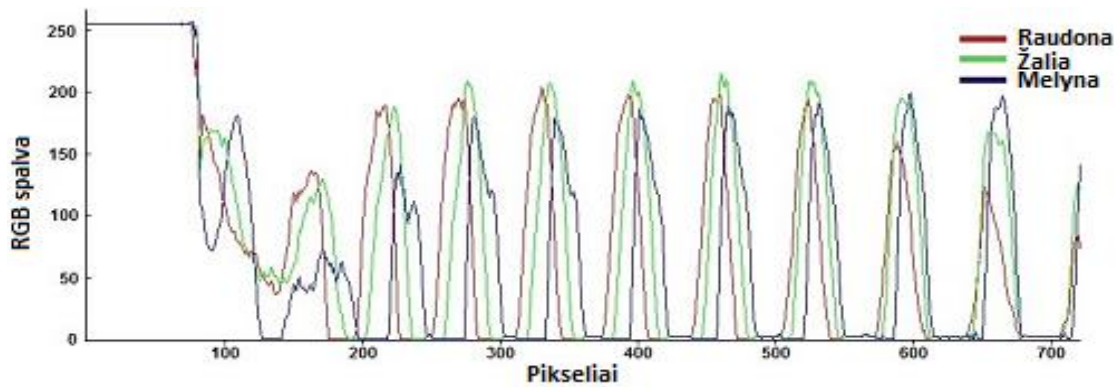
Tyrimo metu SmartScope M5 Optomed fotoaparatu gautuose vaizduose, kurių pavyzdys pavaizduotas 23 a) paveiksle, matyti aberacijų iškraipymai. Kadangi šio tipo fotoaparatai neturi achromatinių, apochromatinių ar difrakcinių lęšių, vaizduose pasireiškia chromatinė aberacija. Norint nustatyti chromatinės aberacijos tipą naudojami vienodo dydžio juodų / baltų kvadratėlių arba vienodo storio apskritimų kalibravimo šablonai, pavaizduoti 36 a) pavyzdyje. Šių

kalibravimo šablonų visiškai pakanka nustatyti chromatinės aberacijos tipui, nes dėl chromatinės aberacijos baltai šviesai praėjus pro optinių lęšių sistemą gaunamas spalvotas vaizdas, tad prie juodų / baltų kalibravimo šablonų vaizdų vietų turi atsirasti spalvotas vaizdas. Nufotografuoti pasirinkti kalibravimo šablonai su SmartScope M5 Optomed fotoaparatu 36 b) pavyzdyje parodė, kad šis fotoaparatas turi SChA [A3].

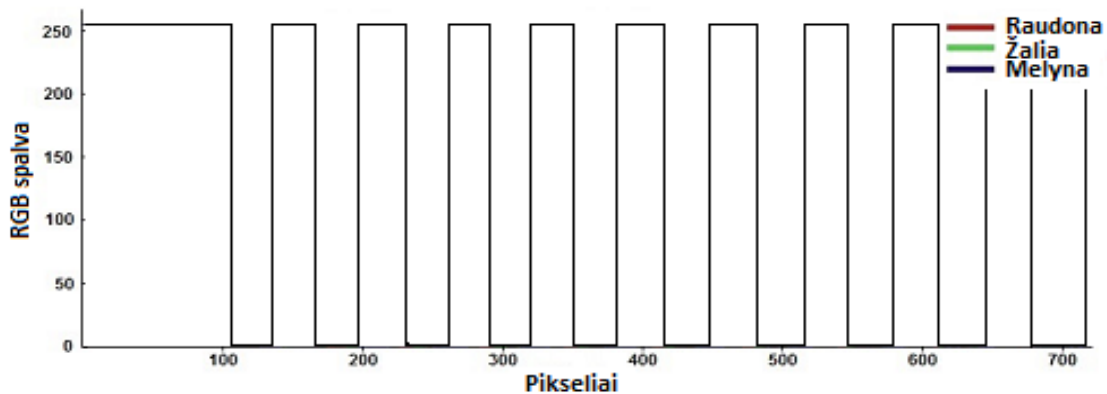


36 pav. Kalibravimo šablonai: a) originalūs kalibravimo šablonai; b) kalibravimo šablonų vaizdai, gauti nufotografavus SmartScope M5 fotoaparatu.

Tai matyti iš 36 b) pavyzdžio juodų / baltų kvadratėlių pjūvio atkarpos nuo centro iki vaizdo krašto. Gauta atkarpa pavaizduota 37 a) paveikslėlyje. Matyti, kad RGB spalvų intensyvumų, kuo toliau nuo centro link vaizdo krašto, neatitikimai didėja. Jei žalios spalvos intensyvumai laikomi atskaitos tašku, matyti, kad raudonos spalvos intensyvumai pasislinkę į kairę, o mėlynos – į dešinę pusę. Tai reiškia, kad raudonos spalvos kanalas turi būti suspaustas, o mėlynos išplėstas. 37 b) paveikslėlio grafikas rodo, kaip vaizdas turėtų atrodyti be aberacijų – visos spalvos perdengiamos.



a)

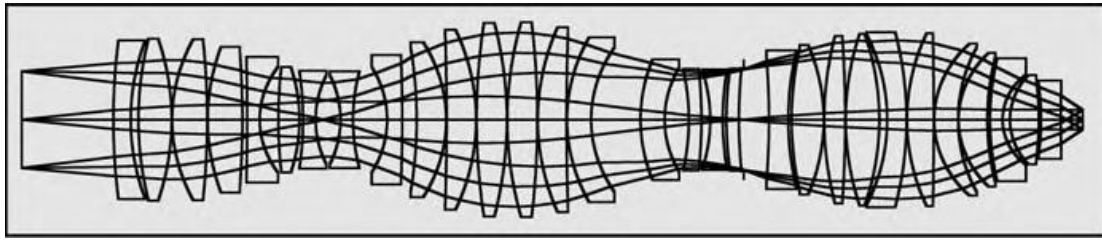


b)

37 pav. Spalvų persidengimas: a) RGB spalvų intensyvumas horizontalios atkarpos nuo centro iki vaizdo krašto; b) RGB spalvos idealiame modelyje.

2.3 Chromatinės aberacijos šalinimo metodai

Įvairių rūšių aberacijas sumažinti galima tik sudėtingomis optinėmis sistemomis, kaip pavaizduota 38 paveiksle, tačiau optiniais lęšiais vienoje optinėje sistemoje vis tiek negalima pašalinti visų aberacijų [75]. Todėl konstruojant optinę sistemą konkrečiam tikslui stengiamasi pašalinti labiausiai nepageidaujamas aberacijas. Tarkime, nedidelio kampinio regėjimo lauko teleskope užtenka pašalinti chromatinę ir sferinę aberacijas, o mikroskope su plačiu regėjimo lauku dar reikia pašalinti distorsiją ir lauko kreivumą. Pasiūlyta nemažai optimalių objektyvo projektavimo būdų sumažinti įvairioms aberacijoms [86] [87] [88]. Netgi pasiūlytas metodas programuojamiems lęšiams, kuris keičia lęšių atstumus priklausomai nuo aberacijos dydžio [89].



38 pav. Lęšių išdėstymo schemos pavyzdys šalinant aberacijas [75].

Disertacijoje naudojamo fotoaparato vaizduose pasireiškia skersinė chromatinė aberacija, todėl toliau bus kalbama tik apie chromatinės aberacijos šalinimo metodus. Chromatinės aberacijos gali būti šalinamos dviem būdais: mechaniškai arba programiškai.

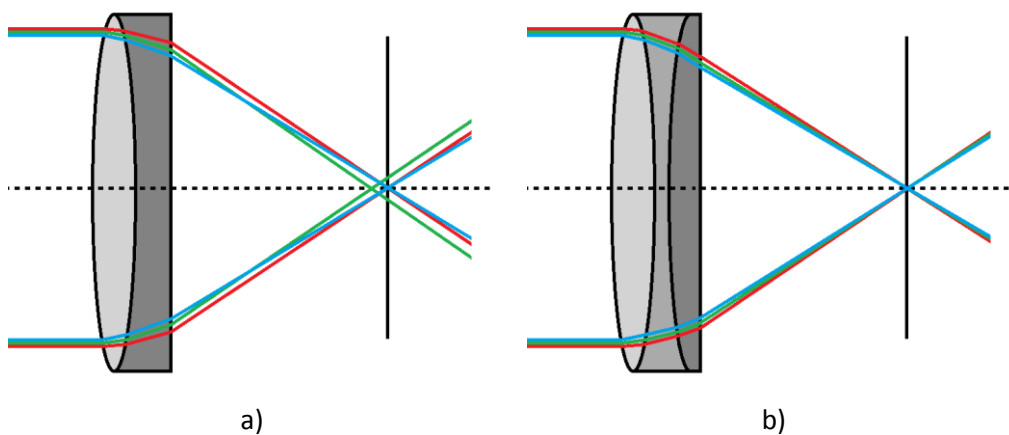
2.3.1 Mechaniniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai

Mechaniškai chromatinės aberacijos efektas gali būti mažinamas optiniuose prietaisuose sudėtingomis sklaidomųjų ir glaudžiamųjų lęšių sistemomis [90] [91]. Pats paprasčiausias mechaniškas metodas, leidžiantis sumažinti chromatinės aberacijos – panaudoti achromatinių lęšių sistemą, pavaizduotą 39 a) paveiksle. Naudojami du ploni susiliečiantys lęšiai – glaudžiamasis ir sklaidomasis (angl. *Crown and Flint*), pagaminti iš skirtingo stiklo, su gerai parinktais lūžio rodikliais ir paviršių kreivumo spinduliais [78]. Abiejų lęšių fokuso ilgiai F_1 ir F_2 apskaičiuojami pagal (18) formulę.

$$F_1 = F_{viso} \frac{V_1 - V_2}{V_1}, F_2 = F_{viso} \frac{V_2 - V_1}{V_2}, \quad (18)$$

čia V_1 ir V_2 yra lęšių Abbès skaičius, F_{viso} yra visas fokuso ilgis nuo lęšio pradžios iki fokuso centro.

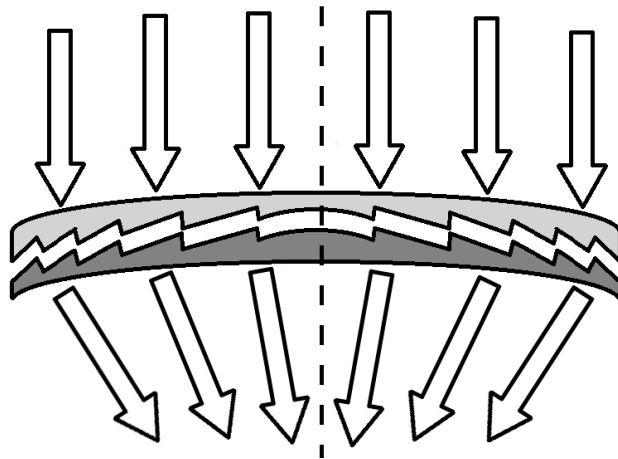
Achromatinio tipo lęšiai yra taip suderinti, kad į fokusą suglaudžia raudonus ir mėlynus spindulius.



39 pav. Optiniai lęšiai: a) achromatinis lęšis; b) apochromatinis lęšis.

Norint dar labiau sumažinti šį efektą naudojama apochromatinių lęšių sistema, pavaizduota 39 b) paveiksle, suvedanti trijų bangų ilgių spindulius į vieną fokuso tašką (paprastai raudonų, žalių ir mėlynų). Ši sistema yra daug brangesnė, užima daugiau vietos ir sunkesnė už achromatinių lęšių sistemą, kadangi papildomas lęšis dažniausiai daromas iš fluorito, pasižyminčio maža dispersija. Taip pat labai stipriai padidėja nesuderinamumo galimybė, nes visi lęšiai turi būti labai tiksliai nušlifuoti, kad nė vienoje vietoje nebūtų jokio tarpelio.

Kaip alternatyva achromatiniams ir apochromatiniams lęšiams yra sukurti difrakciniai lęšiai [92], kurių pavyzdys matyti 40 paveiksle. Difrakcija – bet koks šviesos nuokrypis nuo tiesaus sklidimo, vykstantis ne dėl atspindžio ir lūžio [71]. Šio tipo lęšiai gali netgi labiau sumažinti chromatinę aberaciją nei fluorito naudojimas. Tačiau jų gamyba yra labai sudėtinga, nes reikia labai tiksliai apskaičiuoti, atkartoti ir nupoliruoti kiekvieną lęšio grublėtumą. Kiekvienas lęšio grublėtumo aukštis ir pozicija turi būti mikrono tikslumo (1 mikronas lygus 1/1000 mm).



40 pav. Dviejų sluoksnių difrakcinis lęšis.

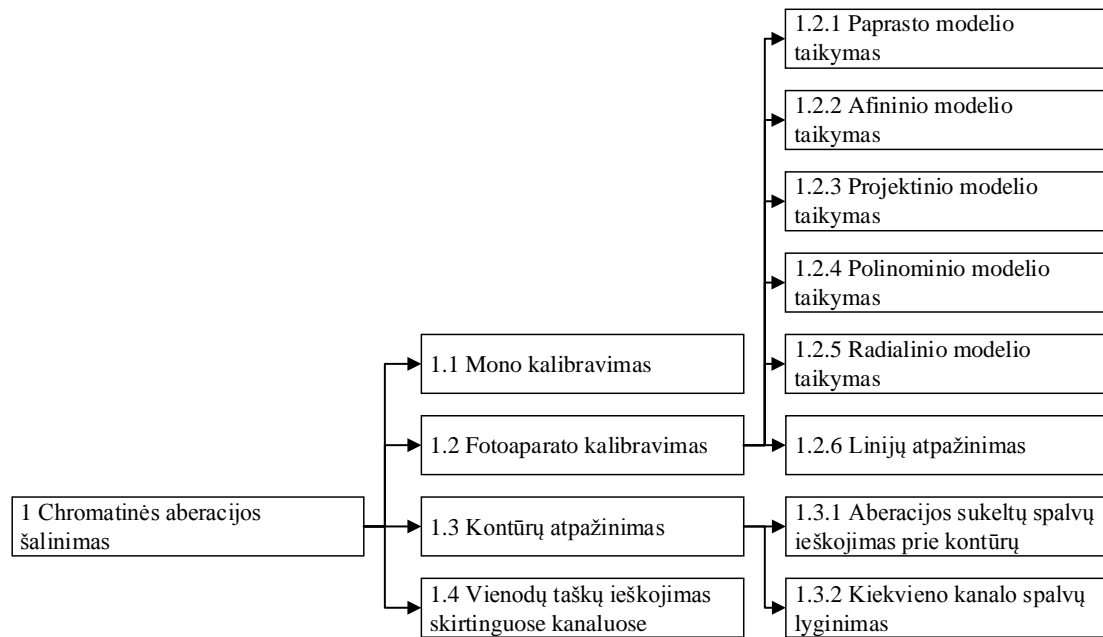
2.3.2 Programiniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai

Kadangi dažniausiai mechaniškai mažinant vieno tipo aberaciją, kito tipo aberacija ryškėja [93], taip pat mechaniškai šalinti ChA brangu, užima daug vietos ir vis dar ne tobula, o kai kuriais atvejais ir neefektyvu, kaip, tarkime, portatyvinėms akies dugno kameroms, tad yra pasiūlyta įvairių alternatyvių programinių būdų sumažinti ChA efektą.

Pagerinti vaizdo kokybę ir taip pat sumažinti kai kurias aberacijas galima klasikiniiais skaitmeninių vaizdų koregavimo metodais:

- Padidinti spalvų toną, jeigu reikia daugiau šviesos ar tamsos.
- Sumažinti triukšmą (angl. *Reduce Noise*), t. y. pašalinti labai mažus objektus.
- Padidinti aštrumą (angl. *Sharpen*), kad vaizdo detalių kampai ir linijos matytųsi aiškiau.

Tačiau dažniausiai ChA po vaizdo korekcijų dar labiau išryškėja. 40 paveiksle pavaizduoti įvairūs galimi ChA šalinimo metodai.



41 pav. Programiniai chromatinės aberacijos šalinimo metodai.

1.1. **Mono kalibravimas**. Willsonas ir Shaferis vieni iš pirmųjų pristatė metodą chromatinei aberacijai mažinti. Jie šį metodą pavadino aktyvaus objektyvo valdymo metodu (angl. *Active lens method*) [94], ir jis susideda iš trijų etapų. Pirmuoju etapu kiekviename kanale ieškomas geriausias fokusas Krotkovo algoritmu [95]. Tuomet atsižvelgiant į skirtingų spalvų bangų ilgius suspaudžiamas arba išplečiamas kiekvienas kanalas. Paskutiniuoju etapu sulygiuojami visi kanalai. Tačiau šis metodas labai nepraktiškas, nes reikia nufotografuoti tris vaizdus kiekvienam kanalui su skirtingais fotoaparato parametrais. Taip pat mėlynas kanalas naudojamas kaip atskaitos taškas, prie kurio lygiuojami kiti kanalai. Autoriai teigia, kad SChA gali būti pašalinama, kur dažniausiai mėlyna spalva yra labiausiai iškraipyta, t. y. prie labiausiai iškraipyto kanalo bandomi privesti mažiau iškraipymų turintys kanalai.

1.2. **Fotoaparato kalibravimas** [3] – tai vienas iš populiariausių būdų chromatinei aberacijai šalinti. Fotoaparatas kalibruojamas kalibravimo šablonais, jų pavydžiai matomi 35 pavyzdyje, ir pagal šiuos nustatomi, kokie yra iškraipymai. Pasirinktu fotoaparatu nufotografuotas pasirinkto kalibravimo šablono vaizdas lyginamas su kalibravimo šablonu. Jei lyginant

vaizdus matyti neatitikimų, taikomi korekcijos modeliai, kuriais du pasirinkti RGB spalvų intensyvumų kanalai bandomi išstampyti taip, kad skirtumas tarp trečio RGB spalvos intensyvumų kanalo būtų minimalus. Dažniausiai pasirenkamas žalias kanalas kaip atskaitos taškas, kadangi žalios spalvos bangos ilgis ($\sim 520 - 570 \text{ nm}$) yra viduryje tarp raudonos ($\sim 620 - 740 \text{ nm}$) ir mėlynos ($\sim 450 - 495 \text{ nm}$) spalvų bangų ilgių, ir dauguma fotoaparatus naudoja Bayer filtrą, o jame yra daugiausia žalios spalvos filtrų, tad žalios spalvos kanalas atvaizduojamas ryškiausiai ir yra geriausiai sufokusuotas. Tuomet dažniausiai raudoną kanalą bandoma suspausti, o mėlyną išplėsti. Metodai, naudojantys fotoaparato kalibravimą, dažniausiai šalina tik SChA, o didžiausias jų trūkumas tas, kad jie negali būti taikomi vaizdams be paties fotoaparato. Fotoaparato kalibravimo metodai naudoja daug skirtingų korekcijos modelių įvairioms optinėms sistemoms SChA šalinti, dažniausiai naudojami modeliai yra:

1.2.1. **Paprastas** (angl. *Simple or Shifts and a scale*) modelis skaičiuojamas pagal (19) formulę.

$$x' = a_0(x - x_f) + a_1; y' = a_0(y - y_f) + a_2. \quad (19)$$

Paprasto modelio koregavimo pavyzdys pavaizduotas 42 a) paveiksle ir turi tris a_0, a_1, a_2 koeficientus. Šis modelis du spalvų kanalus proporcingai vienodai suspaudžia arba išplečia. Pöntinenas [4] arba Johnsonas su Faridu [5] paprastą modelį siūlo naudoti vaizduose, nufotografuotose naudojant žuvies akies lęšį (angl. *Fisheye lenses*). Pöntinenas paprastą modelį lygina su afininiu, projekciniu ir polinominiu ir teigia, kad paprastas modelis yra geriausias naudojant žuvies akies lęšį. Paprastas modelis atlieka skaičiavimus greičiau už afininį, projekcinį ar polinominių, nes turi tik tris parametrus.

1.2.2. **Afininis** (angl. *Affine*) modelis skaičiuojamas pagal (20) formulę.

$$\begin{aligned}x' &= a_0(x - x_f) + a_1(y - y_f) + a_2; \\y' &= a_3(x - x_f) + a_4(y - y_f) + a_5.\end{aligned}\tag{20}$$

Afininio modelio koregavimo pavyzdys pavaizduotas 42 b) paveiksle ir turi šešis a_0, \dots, a_5 koeficientus. Šis modelis du spalvų kanalus geba suspausti, išplėsti ir pasukti. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad juoSChA šalinamas geriau nei paprastu modeliu akies dugno vaizduose.

1.2.3. **Projekcinis** (angl. *Projective*) modelis skaičiuojamas pagal (21) formulę.

$$\begin{aligned}x' &= \frac{a_0(x - x_f) + a_1(y - y_f) + a_2}{a_6(x - x_f) + a_7(y - y_f) + 1}; \\y' &= \frac{a_3(x - x_f) + a_4(y - y_f) + a_5}{a_6(x - x_f) + a_7(y - y_f) + 1}.\end{aligned}\tag{21}$$

Projekcinis modelis turi aštuonis a_0, \dots, a_7 koeficientus.

1.2.4. **Polinominis** (angl. *Polynomial*) modelis skaičiuojamas pagal (22) formulę.

$$\begin{aligned}x' &= a_0(x - x_f) + a_1(y - y_f) + a_2(x - x_f)(y - y_f) + \\& a_3(x - x_f)^2 + a_4(y - y_f)^2 + a_5(x - x_f)^2(y - y_f) + \\& a_6(x - x_f)(y - y_f)^2 a_7; \\y' &= a_8(x - x_f) + a_9(y - y_f) + a_{10}(x - x_f)(y - y_f) + \\& a_{11}(x - x_f)^2 + a_{12}(y - y_f)^2 + a_{13}(x - x_f)^2(y - y_f) + \\& a_{14}(x - x_f)(y - y_f)^2 a_{15}.\end{aligned}\tag{22}$$

Polinominis modelis turi šešiolika a_0, \dots, a_{15} koeficientų.

1.2.5. **Radialinis** (angl. *Radial*) modelis. Šis modelis du spalvų kanalus suspaudžia arba išplečia proporcingai mažindamas korekcijos dydį tolstant spinduliu r nuo aberacijos fokuso centro (x_f, y_f) , kaip pavaizduota 42 c) paveiksle. Sukurta daug skirtingų radialinio modelio variantų, Keletas skirtingų radialinio korekcijos modelių gaunami (23) (24) (25) (26) formulėmis.

$$x' = (x - x_f) * (1 + a_0 * r); \quad (23)$$

$$y' = (y - y_f) * (1 + a_0 * r);$$

$$x' = (x - x_f) * (1 + a_0 * r + a_1 * r^2); \quad (24)$$

$$y' = (y - y_f) * (1 + a_0 * r + a_1 * r^2);$$

$$x' = (x - x_f) * (1 + a_0 * r^2 + a_1 * r^4); \quad (25)$$

$$y' = (y - y_f) * (1 + a_0 * r^2 + a_1 * r^4);$$

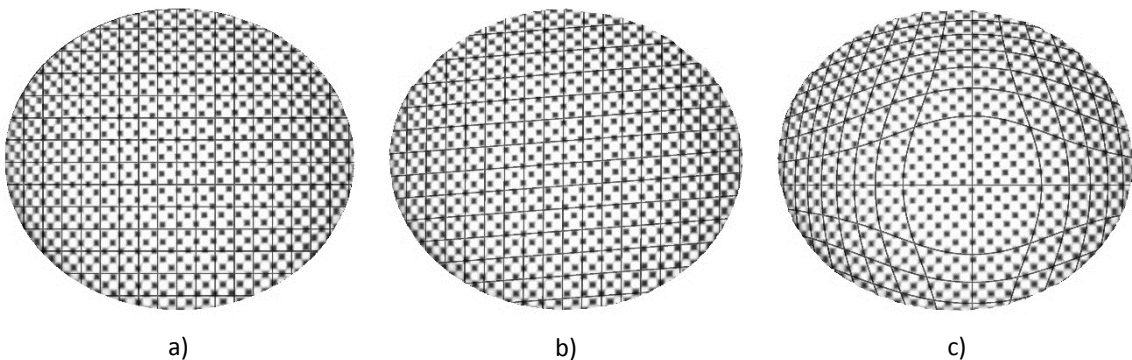
$$x' = (x - x_f) * (1 + a_0 * r^3 + a_1 * r^5); \quad (26)$$

$$y' = (y - y_f) * (1 + a_0 * r^3 + a_1 * r^5),$$

spindulys $r = \sqrt{(x - x_f)^2 + (y - y_f)^2}$.

Dauguma siūlo naudoti kalibravimo šabloninius vaizdus su radialiniu korekcijos modeliu [96] [97] [98] plataus kampo objektyvams. Kiti naudodami radialinį modelį kalibruoja fotoaparata kalibravimo šabloniniais vaizdais, fotografuodami kelis vaizdus skirtingu kampu [99] [3].

1.2.6. **Linijų atpažinimas.** Kadangi labai dažnai dėl aberacijų tiesios linijos išlinksta, Choi, Wongas ir Lamas [100] pasiūlė naudojant kvadratinio tinklelio kalibravimo šabloną, kurio pavyzdys pavaizduotas 29 a) paveiksle, analizuoti linijų nukrypimą ir taikyti radialinį modelį. Nukrypimų parametrai randami Devernay'aus ir Faugeraso linijų nustatymo metodu [101] ir apskaičiuojami neatitikimai tarp tiesios linijos ir gautos kreivės. Toks metodas neveiks be kalibravimo šabloninių vaizdų, kuriose matyti linijos.



42 pav. Korekcijos modeliai: a) paprastas, b) afininis; c) radialinis.

1.3. **Kontūrų atpažinimas.** Sukurta keletas metodų ChA šalinti turint tik vaizdus, šie grindžiami kontūrų atpažinimu:

1.3.1. ***Aberacijos sukeltų spalvų ieškojimas prie kontūrų.*** Vienas iš ChA efektų yra tas, kai prie tamsaus kontūro atsiranda violetinė spalva šviesiame fone. Šis efektas dažniausiai pasireiškia esant IChA. Šį efektą šalinti turint ir nenaudojant jokių kalibravimo šabloninių vaizdų, tik patį vaizdą, pasiūlė Kangas [102] [103]. Vaizde atpažįstami kontūrai ir prie jų kraštų ieškoma violetinės spalvos. Jei violetinė spalva aptinkama, manoma, kad tai aberacija ir bandoma ją pašalinti. Šio metodo trūkumas yra tas, kad juo gali būti panaikinamos ir vietos be aberacijos, kur iš tikrųjų turi būti violetinės spalvos. Kango metodą patobulino Baek-Kyu Kimas ir Rae-Hongas Parkas [104] violetinės spalvos paiešką išplėsdami gradientu. Tačiau tokiu metodu neatvaizduojami ryškių objektų kraštai, matyti pašalinio triukšmo. Yerushalmy's ir Hel-Oras [105] pasiūlė surasti visas vietas, kuriose gali būti violetinės spalvos, atsiradusios dėl ChA. Autoriai pasiūlė suradus visas galimas vietas nustatyti jų dydį, kryptį ir pagal tai apskaičiuoti ChA centrą. Turint ChA centrą ir žinant, kaip ji didėja, atlikti viso vaizdo korekciją. Taip pašalinama ChA ir nepanaikinama violetinė spalva prie kraštų, jei jos iš tikrųjų turi būti. Kadangi šis efektas dažniausiai pasireiškia esant IchA, plačiau apie jį šioje disertacijoje nekalbama.

1.3.2. ***Kiekvieno kanalo spalvų lyginimas.*** Chungas ir kiti pasiūlė metodą [106], atpažįstantį kontūrus ir prie jų kraštų lyginantį kiekvieno kanalo spalvas. Jei tarp spalvų pastebimas didelis neatitikimas, manoma, kad tai aberacija. Šis metodas blogai veiks esant dideliame triukšme.

1.4. **Vienodu taškų ieškojimas skirtinguose kanaluose.** Cecchetto siūlo surasti kiekviename kanale vienodus taškus (angl. *Matching keypoints*) ir juos sulygiuoti pagal vieną spalvą į kažkurią pusę vienodai [107], tačiau šis metodas netinka SChA šalinti, nes centre vaizdas sufokusuotas, o tolstant nuo centro iškraipymų daugėja.

Taip pat sukurta algoritmu, šalinančių ir skersinę, ir išilginę aberacijas fluorescentiniuose elektroniniuose mikroskopuose [108] [109], tačiau jie negali

būti pritaikyti fotoaparatus, nes reikalinga speciali įranga arba specialūs kalibravimo šablonai.

Sukurta nemažai programų, rankiniu arba automatinu būdu leidžiančių atlikti daugumą aukščiau išvardytų korekcijų [110]. Populiariausios yra Adobe PhotoShop [111], Corel PaintShop [112], PTLens [113], PhotoModeler [114], Photoacute Studio [115]. Nėra tiksliai žinoma, kaip jos atlieka ChA šalinimą.

Dauguma išvardytų algoritmų ir programų gerai šalinama ChA tik naudojant kalibravimo šablonus ir kalibruojant patį fotoaparata, arba ryškiuose vaizduose, kuriuose aiškiai matyti kontūrai ar dideli spalvų skirtumai, tačiau blogai šalinama ChA vaizduose, kuriuose matyti pašalinio triukšmo. Šioje disertacijoje pristatytas naujas metodas, dėl kraujagyslių tinklo atpažinimo sumažinantis ChA efektą akies dugno vaizduose tik su pačiais vaizdais be fotoaparato.

2.4 Chromatinės aberacijos šalinimo kokybės vertinimo metodai

Skaitmeniniai vaizdai niekada tiksliai neatspindi realybės, visada atsiranda didesnių ar mažesnių netikslumų dėl aberacijų, nekokybiškai nušlifluoto lęšio, blogo apšvietimo ar blogai sufokusuoto vaizdo, dėl kurio atsiranda iškraipymų arba triukšmo. Taip pat vaizdo kokybė pasikeičia po įvairių korekcijų. Tarkime, keičiant vaizdo dydį, blukinant, suspaudžiant kokybė blogėja, o atlikus įvairių aberacijų šalinimą – gerėja. Todėl reikia matų įvertinti, ar vaizdo kokybė padidėjo po korekcijų. Nemažai sukurta matų vertinti vaizdų kokybę, pagrindiniai iš jų yra: vidutinė kvadratinė paklaida (MSE), šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos (RMSE), didžiausias signalo ir triukšmo santykis (PSNR), struktūrinis panašumas (SSIM) ir pokyčio tarp dviejų spalvų matas (CIELAB ΔE_{ab}) [116]. Plačiau apie juos rašoma tolimesniuose poskyriuose.

2.4.1 Vidutinė kvadratinė paklaida

Vidutinė kvadratinė paklaida (angl. *Mean Squared Error (MSE)*) [116] rodo skirtumą tarp originalių ir koreguotų intensyvumų reikšmių ir skaičiuojama pagal (27) formulę.

$$MSE = \frac{1}{wh} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (A(x, y) - P(x, y))^2. \quad (27)$$

2.4.2 Šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos

Šaknis iš vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. *Root Mean Squared Error (RMSE)*) [116] naudojama įvertinti metodo, naudojamo signalo parametrų įverčiams rasti, kokybę. RMSE yra labai panašus į MSE, tik RMSE gautos reikšmės yra sunormuotos, o MSE gautos reikšmės gali būti labai netolygios. Jis apskaičiuojamas pagal (28) formulę.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{wh} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (A(x, y) - P(x, y))^2}. \quad (28)$$

RMSE matas disertacijoje naudojamas įvertinti skirtumus tarp skirtingų kanalų taškų.

2.4.3 Didžiausias signalo ir triukšmo santykis

Didžiausias signalo ir triukšmo santykis (angl. *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*) [116] nusako santykį tarp maksimalaus signalo ir triukšmų, darančių įtaką signalui:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{MAX_A^2}{MSE} \right), \quad (29)$$

čia MAX_A yra didžiausia galima taško intensyvumo reikšmė.

2.4.4 Struktūrinis panašumas

Struktūrinio panašumo (angl. *Structural Similarity (SSIM)*) [A2] metodas naudojamas vaizdams apdoroti, klasifikuoti, atstatyti ir t. t. Šis metodas

atsižvelgia į tris vaizdo charakteristikas: ryškumą, kontrastą ir struktūrą bei nusako panašumą tarp dviejų vaizdų, kurių dydis yra vienodas $n \times n$. Struktūrinis panašumas apskaičiuojamas pagal (30) formulę.

$$SSIM(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + c_1)(2\sigma_{AB} + c_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + c_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + c_2)}; \quad (30)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_A)(y_i - \mu_B), \quad (31)$$

čia μ_A yra A pilko vaizdo intensyvumų vidurkis, μ_B yra B pilko vaizdo intensyvumų vidurkis; σ_A^2 – A pilko vaizdo intensyvumų dispersija, σ_B^2 – B pilko vaizdo intensyvumų dispersija; σ_{AB} A ir B nepanašumas apskaičiuojamas pagal (31) formulę; $c_1 = (k_1L)^2$, $c_2 = (k_2L)^2$ – kintamieji vardikliai stabilizuoti; $L = 2^{bitai/pikseliui} - 1$ bitų kiekis, konstantos yra lygios $k_1 = 0,01$, $k_2 = 0,03$.

Struktūrinio panašumo matas disertacijoje naudojamas įvertinti vaizdų tarp skirtingų kanalų struktūrai.

Lyginant disertacijoje pasiūlyto metodo, grindžiamo kraujagyslių tinklo atpažinimu, skersinės chromatinės aberacijos mažinimo tikslumą su kalibravimo šablonais, grindžiamais skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodais naudojant struktūrinį panašumą, pastebėta, kad šis metodas ne toks jautrus aberacijos pokyčiams kaip RMSE.

2.4.5 Pokyčio tarp dviejų spalvų matas

Pokyčio tarp dviejų spalvų matas (CIELAB ΔE_{ab}), remiantis Lab koordinacių sistema, matuoja pokytį tarp dviejų spalvų, tiksliau parodo žmonių suvokiamą spalvų skirtumą.

Pirmą kartą (32) formulė sugalvota 1976 metais ir pavadinta CIE76, lygino dvi spalvas (L_1, a_1, b_1) ir (L_2, a_2, b_2) Lab spalvų modelyje skaičiuodama Euklidinį atstumą.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}. \quad (32)$$

Vėliau formulė patobulinta į CIE94 ΔE_{94} , apskaičiuojama pagal (33) formulę, kur dažniausiai $S_L = k_L = k_C = k_H = 1$.

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_1 - L_2}{k_L * S_L}\right)^2 + \left(\frac{C_1 - C_2}{k_C * S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}}{k_H * S_H}\right)^2}; \quad (33)$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}; \quad (34)$$

$$\Delta H_{ab} = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 - (C_1 - C_2)^2}; \quad (35)$$

$$S_C = 1 + 0,045 * C_1; S_H = 1 + 0,015 * C_1. \quad (36)$$

Vėliau ši formulė patobulinta į CIE2000 ΔE_{00} [117], atlikta keletas pataisymų, tokių kaip neutralių spalvų, šviesumų, atspalvių ir t. t. kompensavimas.

Vaizdų kokybei vertinti visi šie matai lygina etaloninį vaizdą su gautu vaizdu po korekcijos. Neturint etaloninio vaizdo šie matai nepakankamai gerai įvertina, ar buvo pašalinta skersinė chromatinė aberacija, tad disertacijoje aprašytam metodui vertinti pasirinkti kokybės vertinimo matai, vertinantys vaizdo kokybę be etaloninio vaizdo. Pastarieji vertina koreguotą vaizdą ir pradinį vaizdą atskirai, t. y. nelygina vaizdų.

Tokių metodų yra keletas: Suliejimo matas (angl. *Blur Metric*), *Chromatic Zipper* ir *Achromatic Zipper*. Plačiau apie juos rašoma tolimesniuose poskyriuose.

2.4.6 Suliejimo matas

Suliejimo matas (angl. *Blur Metric* (M_{BM})) [118] vertina vaizdo išblukimą. Spalvotas vaizdas A konvertuojamas į pilkos spalvos vaizdą I , kurį išblukiname vertikaliai h_v ir horizontaliai h_h pagal (37) formules ir gauname du išblukintus vaizdus B_{ver} ir B_{hor} pagal (38) formules.

$$h_v = \frac{1}{9} * [111111111]; h_h = h_v^T; \quad (37)$$

$$B_{ver} = h_v * I; B_{hor} = h_h * I. \quad (38)$$

Tuomet norint nustatyti pokyčius tarp kaimyninių taškų, skaičiuojamas absoliutus jų skirtumas vaizduose D_{Fver} , D_{Fhor} ir D_{Bver} , D_{Bhor} pagal (39) ir (40) formules.

$$D_{Fver} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |I(x, y) - I(x-1, y)|; \quad (39)$$

$$D_{Fhor} = \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} |I(x, y) - I(x, y-1)|;$$

$$D_{Bver} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B_{ver}(x, y) - B_{ver}(x-1, y)|; \quad (40)$$

$$D_{Bhor} = \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} |B_{hor}(x, y) - B_{hor}(x, y-1)|,$$

čia B_{ver} ir B_{hor} – išblukinti vaizdai.

Tada analizuojami kaimynų pokyčiai išblukintuose vaizduose D_{Vver} ir D_{Vhor} pagal (41) formulę. Jei tie skirtumai dideli, vadinasi, vaizdas ryškus, jei skirtumai maži – vaizdas išblukęs.

$$D_{Vver} = \sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h \max(0, D_{Fver}(x, y) - D_{Bver}(x, y)); \quad (41)$$

$$D_{Vhor} = \sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h \max(0, D_{Fhor}(x, y) - D_{Bhor}(x, y)),$$

čia D_{Fver} , D_{Fhor} , D_{Bver} , D_{Bhor} – absoliutinis skirtumas tarp kaimyninių taškų vaizduose.

Norint palyginti šiuos skirtumus skaičiuojamos visų variantų sumos S_{Fver} , S_{Fhor} , S_{Vver} ir S_{Vhor} pagal (42) ir (43) formules, kurios normalizuojamos b_{Fver} ir b_{Fhor} nuo 0 iki 1 pagal (44) formules.

$$S_{Fver} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} D_{Fver}(x, y); \quad S_{Fhor} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} D_{Fhor}(x, y); \quad (42)$$

$$S_{Vver} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} D_{Vver}(x, y); S_{Vhor} = \sum_{x=1}^{w-1} \sum_{y=1}^{h-1} D_{Vhor}(x, y); \quad (43)$$

$$b_{Fver} = \frac{S_{Fver} - S_{Vver}}{S_{Fver}}; b_{Fhor} = \frac{S_{Fhor} - S_{Vhor}}{S_{Fhor}}, \quad (44)$$

čia D_{Fver} , D_{Fhor} – absoliutinis skirtumas tarp kaimynų taškų vaizduose.
 D_{Vver} , D_{Vhor} – skirtumas tarp kaimynų išblukintuose vaizduose.

Norint gauti vieną rezultatą M_{BM} išrenkama, ar vertikalus b_{Fver} , ar horizontalus b_{Fhor} yra didesnis skirtumas pagal (45) formulę.

$$M_{BM} = \max(b_{Fver}, b_{Fhor}). \quad (45)$$

Jeigu koreguoto vaizdo gautas rezultatas mažesnis už pradinio vaizdo rezultatą, kokybė pagerėjo.

2.4.7 Chromatic ir Achromatic Zipper matai

Chromatic ir *Achromatic Zipper* vaizdų kokybės vertinimo matai [119] ieško vaizdo kiekviename taške spalvų skirtumo tarp labiausiai panašių kaimynų. Vaizdas A konvertuojamas į pilkos spalvos vaizdą I , šiam apskaičiuojamos briaunos naudojant filtras pagal (46) formulę ir gaunamos GV_x ir GH_y matricos.

$$\begin{cases} GV = [-1 \ 1] \\ GH = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (46)$$

čia GV yra horizontalus gradientas, o GH yra vertikalus gradientas.

Horizontalus $SM_{apx}(x, y)$ konvoliucinis filtras apskaičiuojamas pagal (47) formulę. Ta pati formulė taikoma skaičiuojant vertikalių $SM_{apy}(x, y)$ konvoliucinį filtrą, tik vietoj GV_x naudojama GH_y matrica.

$$SM_{apx}(x, y) = \begin{cases} 2, & \text{jei } GV_x(x, y) < 0 \\ 1, & \text{jei } GV_x(x, y) > 9, \\ 0, & \text{visi kiti.} \end{cases} \quad (47)$$

Gauti konvoliuciniai filtrai dauginami iš A vaizdo pagal (48) formulę.
 SM_{apy} apskaičiuojama pagal tą pačią formulę.

$$\text{zipRGB}_x = SM_{apx} \times A. \quad (48)$$

zipRGB_x ir zipRGB_y verčiamos į CIELAB spalvų modelį. Perversti *Chromatic Zipper* (M_{ChZx} ir M_{ChZy}) masyvai apskaičiuojami pagal (50) formulę. *Achromatic Zipper* (M_{AchZx} ir M_{AchZy}) masyvai apskaičiuojami pagal (49) formulę.

$$M_{AchZx}(x, y) = \sqrt{(L(x, y) - L(x, y - 1))^2}; \quad (49)$$

$$M_{ChZx}(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\Delta C(x, y)}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H(x, y)}{S_H}\right)^2}, \quad (50)$$

čia

$$\Delta C(x, y) = \sqrt{a(x, y)^2 + b(x, y)^2} - \sqrt{a(x, y - 1)^2 + b(x, y)^2}; \quad (51)$$

$$\Delta H(x, y) = \Delta E_{ab}^2 - \sqrt{(L(x, y) - L(x, y - 1))^2 - \Delta C(x, y)^2}, \quad (52)$$

čia ΔE_{ab} yra (32) formulė, S_C ir S_H yra (36) formulės; L, a, b yra Lab spalvų modelio kanalų reikšmės.

$$M_{AchZ} = (\text{median}(M_{AchZx}) + \text{median}(M_{AchZy}))/2. \quad (53)$$

Tuomet apskaičiuojamas medianas M_{AchZx} , M_{AchZy} ir išvedus iš jų vidurkį gaunamas *Achromatic Zipper* (M_{AchZ}) pagal (53) formulę. Identiškai apskaičiuojamas ir *Chromatic Zipper* (M_{ChZ}).

Jeigu koreguoto vaizdo gautas rezultatas mažesnis už pradinio vaizdo rezultatą, kokybė pagerėjo.

2.5 Skyriaus išvados

Šiame skyriuje apžvelgti chromatinės aberacijos tipai. Detaliai išanalizuoti chromatinės aberacijos šalinimo metodai ir aptartos jų ypatybės. Iš literatūros analizės nustatyta:

1. Norint aberacijos efektą sumažinti mechaniškai stengiamasi konstruoti optinę sistemą taip, kad labiausiai nepageidaujamų aberacijų būtų kuo mažiau, nes neįmanoma sukurti optinės sistemos, kurioje visiškai nebūtų aberacijų.
2. Norint palyginti vaizdų kokybę tarp etaloninio vaizdo ir pakoreguoto vaizdo, tikslinga taikyti MSE, RMSE, PSNR, SSIM, CIELAB ΔE_{ab} kokybės vertinimo matus.
3. Siekiant įvertinti vaizdo kokybę po korekcijos, tačiau be etaloninio vaizdo taikomi Suliejimo, *Chromatic Zipper*, *Achromatic Zipper* kokybės vertinimo matai.

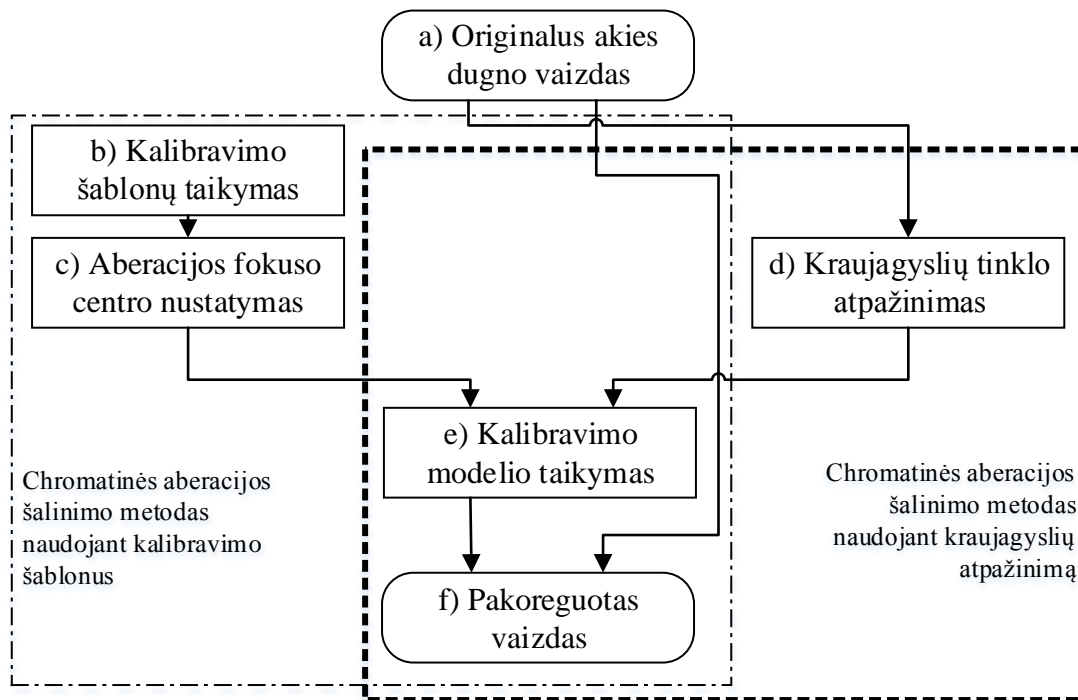
3 Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas

Šiame skyriuje plačiau aprašyti metodai taikyti šalinti skersinei chromatinei aberacijai akies dugno vaizduose.

Šis skyrius parengtas pagal tyrimus, atliktus disertacijos autoriaus – A3, A4 straipsnius.

3.1 Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodai naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą

Šioje disertacijoje naudoti du skirtingi metodai šalinti skersinei chromatinei aberacijai (SChA): kalibravimo šablonais ir disertacijoje pristatytu metodu, pagrįstu kontūrų, šiuo atveju akies dugno kraujagyslių tinklo, atpažinimu. Šie metodai plačiau aprašyti tolimesniuose poskyriuose.



43 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodų naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą schema.

43 paveiksle punktyru apibrėžtoje dalyje pavaizduota skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodo kalibravimo šablonais schema ir šio metodo etapai yra šie:

- a) *Originalus akies dugno vaizdas*. Naudojamas originalus akies dugno vaizdas.
- b) *Kalibravimo šablonų taikymas*. Kadangi šis metodas grindžiamas paties fotoaparato kalibravimu, būtina išsirinkti fotoaparato kalibravimo šablonus, pavaizduotus 35 paveiksle arba 36 b) paveiksle. 2.2 poskyryje aprašyta, kad skersinei chromatinei aberacijai nustatyti pakanka naudoti šachmatų lentos arba apskritimų kalibravimo šablonus.
- c) *Aberacijos fokuso centro nustatymas*. Norint kuo tiksliau sumažinti skersinę chromatinę aberaciją nustatomas aberacijos fokuso centras metodais, aprašytus 3.1.1 poskyryje.
- e) *Kalibravimo modelio taikymas*. Kalibravimo modeliai taikomi norint dviejų spalvų kanalų intensyvumus pakeisti taip, kad šie kuo tiksliau atitiktų trečio

spalvų kanalo intensyvumus. Dažniausiai žalias kanalas pasirenkamas kaip atskaitos taškas, raudoną kanalą reikia suspausti, o mėlyną išplėsti. Tai atliekama minimizuojant kalibravimo modelius. Patys modeliai plačiau aprašyti 2.3.2 poskyryje.

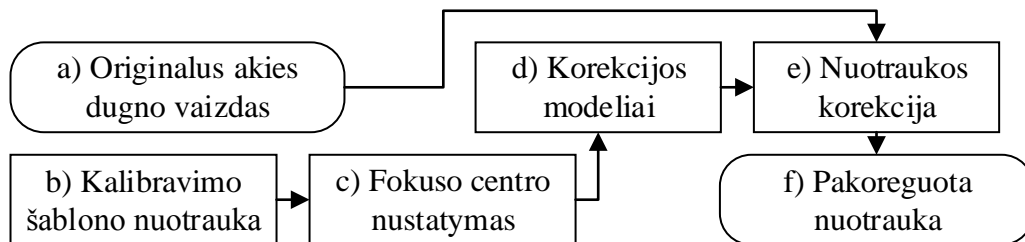
- f) *Koreguotas vaizdas*. Koreguotas vaizdas gaunamas taikant pasirinktą kalibravimo modelį originaliam akies dugno vaizdui su gautais geriausiai koeficientais.

43 paveiksle rėmeliu apibrėžtoje dalyje pavaizduota skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodo, pagrįsto kraujagyslių tinklo atpažinimu, schema ir šio metodo etapai yra šie:

- a) *Originalus akies dugno vaizdas*. Naudojamas originalus akies dugno vaizdas.
- d) *Kraujagyslių tinklo atpažinimas*. Norint išvengti kalibravimo šablonų vaizdų, šiuo atveju taikomas akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimas kiekvienam spalvų kanalui. Šis plačiau aprašytas 3.1.2 poskyryje.
- e) *Kalibravimo modelio taikymas*. Kalibravimo modeliai taikomi norint dviejų spalvų kanalų akies dugno kraujagyslių intensyvumus pakeisti taip, kad kuo tiksliau atitiktų trečio spalvų kanalo akies dugno kraujagyslių intensyvumus. Dažniausiai žalias kanalas pasirenkamas kaip atskaitos taškas, raudoną kanalą reikia suspausti, o mėlyną išplėsti. Tai atliekama minimizuojant kalibravimo modelius. Patys modeliai plačiau aprašyti 2.3.2 poskyryje.
- f) *Koreguotas vaizdas*. Koreguotas vaizdas gaunamas taikant pasirinktą kalibravimo modelį originaliam akies dugno vaizdui su gautais geriausiai koeficientais.

3.1.1 Skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas naudojant kalibravimo šablonus

SChA koregavimo metodo naudojant kalibravimo šablonus (KŠ metodo) [4] [5] [97] [A3] schema pavaizduota 44 pavyzdyje.



44 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo naudojant kalibravimo šablonus metodo schema.

KŠ metodas vykdomas šiais etapais:

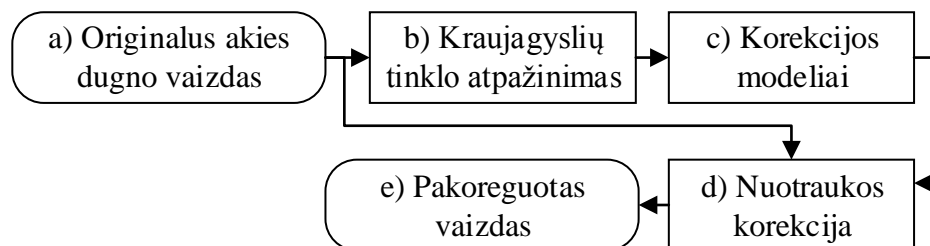
- Originalus akies dugno vaizdas.* Naudojamas akies dugno vaizdas (žr. 49 a).
- Kalibravimo šablono vaizdas.* Naudojami kalibravimo šablonai, fotografuoti fotoaparatu; rezultatai matyti 36 b) pavyzdyje.
- Fokuso centro nustatymas.* SChA fokuso centro (x_f, y_f) nustatymas. SChA fokuso centrui nustatyti galima naudoti 3.1.1 poskyryje pristatytus metodus.
- Korekcijos modeliai.* Naudojami penki skirtingi SChA korekcijos modeliai, kurių formulės yra (19) (20) (21) (23) (24), norint sulygiuoti raudono ir mėlyno kanalo intensyvumus su žalio kanalo intensyvumu.
- Vaizdo korekcija.* Vaizdo korekcijai atlikti korekcijos modelių koeficientai a_0, \dots, a_7 apskaičiuojami minimizuojant RMSE pagal (28) formulę naudojant Levenbergo-Markardo algoritmą [120], kur $A(x, y)$ yra žalio kanalo intensyvumai, o $P(x, y)$ yra mėlyno arba raudono kanalo intensyvumai.
- Koreguotas vaizdas.* Gaunamas koreguotas vaizdas.

Kadangi KŠ metodas negali būti taikomas akies dugno vaizdams, jei neturime fotoaparato, šioje disertacijoje pristatytas naujas SChA koregavimo metodas, grįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu (KA metodas), nereikalaujantis

jokio išankstinio fotoaparato kalibravimo. KA metodas aprašytas 3.1.2 poskyryje.

3.1.2 Pasiūlytas skersinės chromatinės aberacijos koregavimo metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu

Disertacijoje pasiūlyto naujo SChA koregavimo metodo, pagrįsto kraujagyslių tinklo atpažinimu (KA metodo) [A4], schema pavaizduota 45 pavyzdyje.



45 pav. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo, pagrįsto kraujagyslių tinklo atpažinimu, metodo schema.

KA metodas vykdomas šiais etapais:

- Originalus akies dugno vaizdas.* Naudojamas akies dugno vaizdas (žr. 49 a).
- Kraujagyslių tinklo atpažinimas.* Atpažįstamos akies dugno kraujagyslės kiekviename RGB. Akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimo metodas plačiai aprašytas 3.3 poskyryje.
- Korekcijos modeliai.* Naudojami penki skirtingi SChA koregavimo modeliai, kurių formulės yra (19) (20) (21) (23) (24), norint sulygiuoti raudono ir mėlyno kanalo intensyvumus su žalio kanalo intensyvumu.
- Vaizdo korekcija.* Vaizdo korekcijai atlikti koregavimo modelių koeficientai a_0, \dots, a_7 apskaičiuojami minimizuojant RMSE pagal (28) formulę Levenbergo-Markardo algoritmu [120], kur $A(x, y)$ yra žalio kanalo intensyvumai, o $P(x, y)$ yra mėlyno arba raudono kanalo intensyvumai.
- Koreguotas vaizdas.* Gaunamas koreguotas vaizdas.

3.2 Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrų nustatymas

Kadangi ChA centras yra svarbus kuo tikslesnei SChA korekcijai ir dažniausiai nėra pačiame vaizdo centre dėl įvairiausių sudėtingų lęšių sistemų [121], būtina jį nustatyti.

Literatūroje dažniausiai sutinkami keletas ChA fokuso centro nustatymo metodų. ChA fokuso centrui nustatyti Harley ir Kangas pasiūlė naudoti linijų atpažinimą fotografuojant kelis vaizdus skirtingu kampu [122], Wightonas ir kiti pasiūlė naudoti apskritimų arba kvadratėlių kalibravimo šabloninius vaizdus [123]. Kadangi šiame darbe naudojami kvadratėlių kalibravimo šablonai ir fotografuojamas tik vienas vaizdas, pasirinktas Wightono ir kitų chromatinės aberacijos fokuso centro suradimo metodas (FCT metodas). Šio metodo tikslas yra surasti kiekviename kanale kiekvieno apskritimo ar kvadratėlio centrus. Suradus kvadratėlio ar apskritimo centrą kiekviename kanale gaunami trys taškai ir per juos nubrėžiama tiesė. Nubrėžus tieses kiekvienam kvadratėliui ar apskritimui tiesių susikirtimo centre surandamas SChA fokuso centras. FCT metodo žingsniai yra šie:

1. Naudojamas juodų / baltų kvadratėlių kalibravimo šablonas, pavaizduotas 36 a) pavyzdyje.
2. Nustatomas vaizdo centras. Vaizdo, gauto fotoaparatu, pavyzdys matyti 36 b) paveiksle, turi elipsės kontūrą, kuris visada yra toks pat, o jo ašys yra lygiagrečios vaizdo kraštams. Horizontaliais ir vertikaliais skenavimais randami elipsės ašių ilgiai ir apskaičiuojamas elipsės centras.
3. Įbrėžiamas kvadratas $l \times l$ vaizdo centre, kaip pavaizduota 46 a) pavyzdyje. Kvadrato kraštinės ilgis yra $l = \sqrt{2} * a$, kur a – trumpasis elipsės pusašis.
4. Surandami RGB kanaluose kiekvieno kvadratėlio centrai, pavaizduoti 46 b) paveiksle. Matyti, kad vieni RGB kvadratėliai yra labiau nutolę vienas nuo kito nei kiti, ypač tai matyti vaizdo kraštuose.

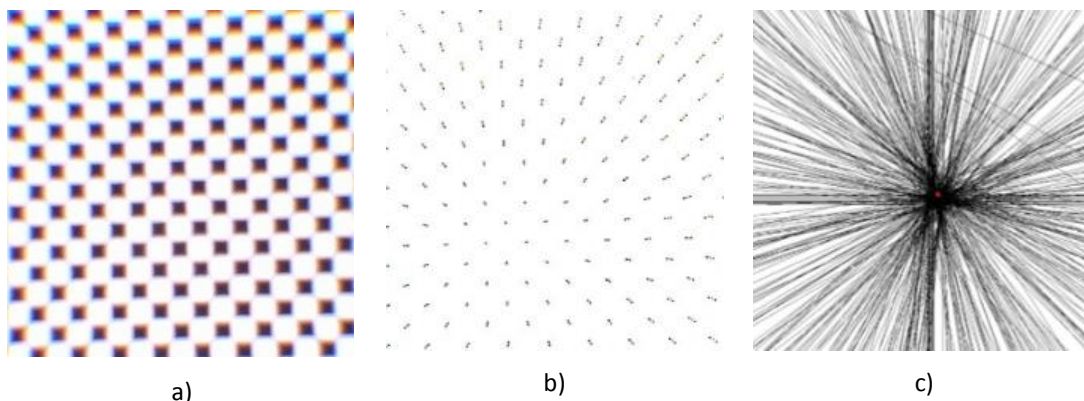
5. Nubrėžiama linija kiekvienam kvadratėliui, pavaizduotam 46 c) paveiksle. SChA fokuso centras yra taškas (x_f, y_f) , gaunamas minimizuojant kiekvienos linijos kvadratinę atstumų sumą pagal (54) formulę.

$$(x_f, y_f) = \operatorname{argmin}_{x,y} \sum_{i=1}^N d_i(x,y)^2, \quad (54)$$

čia $d_i(x,y)$ yra atstumas nuo taško (x,y) iki i -tosios linijos (a_i, b_i, c_i) . Centriui apskaičiuoti panaudota statmena tiesinė regresija (angl. *perpendicular linear regression*) [124], kai (a_i, b_i, c_i) yra žinomi. x_f apskaičiuojamas pagal (56) formulę, o y_f apskaičiuojamas pagal (55) formulę.

$$y_f = \frac{\sum_{i=1}^N b_i c_i \sum_{i=1}^N a_i^2 - \sum_{i=1}^N a_i c_i \sum_{i=1}^N a_i b_i}{(\sum_{i=1}^N a_i b_i)^2 - \sum_{i=1}^N a_i^2 \sum_{i=1}^N b_i^2}; \quad (55)$$

$$x_f = \frac{-y_f \sum_{i=1}^N a_i b_i - \sum_{i=1}^N a_i c_i}{\sum_{i=1}^N a_i^2}. \quad (56)$$



46 pav. Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro suradimas: a) nufotografuotas kalibravimo šablono vaizdas; b) kiekvieno kvadratėlio RGB kanalų centrai; c) nubrėžtos linijos per kiekvieną RGB kanalų centrą.

FCT metodas suranda tik vieną bendrą SChA fokuso centrą. Kadangi SChA šalinama dviejuose kanaluose, t. y. raudonos spalvos kanalas suspaudžiamas ir

mėlynos spalvos kanalas išplečiamas, tai atitinkamai ir SChA fokuso centrai turi būti rasti du.

Disertacijoje pristatomas naujas metodas (FCK metodas) dviem SChA fokuso centrums nustatyti. Visų pirma, vieną vaizdo kanalą turime pasirinkti kaip atskaitos tašką. Pasirinktas žalias kanalas, kadangi žalios spalvos bangos ilgis ($\sim 520 - 570 \text{ nm}$) yra viduryje tarp raudonos ($\sim 620 - 740 \text{ nm}$) ir mėlynos ($\sim 450 - 495 \text{ nm}$) spalvų bangų ilgių. Pasirinktas Optomed SmartScope M5 fotoaparatas su Bayer filtru, turintis daugiausia žalios spalvos filtrų, tad žalios spalvos kanalas atvaizduojamas ryškiausiai ir yra geriausiai sufokusuotas. Kadangi šalinant SChA reikia raudonos spalvos kanalo intensyvumus atimti iš žalios spalvos kanalo intensyvumų (G-R) ir mėlynos spalvos kanalo intensyvumus atimti iš žalios spalvos kanalo intensyvumų (G-B), atitinkamai ir fokuso centrai (G-R) ir (G-B) randami du. Disertacijoje pasiūlyto FCK metodo algoritmo žingsniai yra šie [A3]:

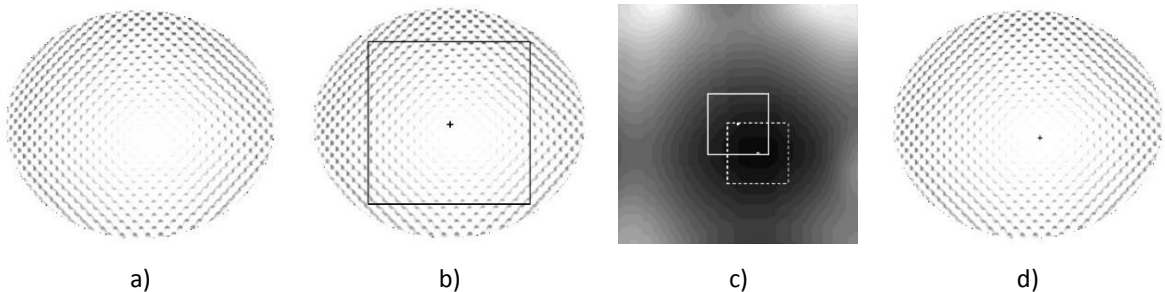
1. Naudojamas juodų / baltų kvadratėlių kalibravimo šablonas, pavaizduotas 36 a) pavyzdyje.
2. Norint pamatyti aberacijas atimami raudonos spalvos kanalo intensyvumai iš žalios spalvos kanalo intensyvumų. Rezultatas yra intensyvumų skirtumai vaizdų G-R, pavaizduoti 47 a) pavyzdyje. Matyti, kad gautuose vaizduose kraštuose esti didžiausi skirtumai, o vaizdo centre skirtumai mažesni. Panaši technika pirmą kartą panaudota Luhmanno [125].
3. Nustatomas vaizdo centras (x_c, y_c) . Vaizdo, gauto fotoaparatu, pavyzdys matyti 36 b) paveiksle, jis turi elipsės kontūrą, šis visada yra toks pat ir ašys yra lygiagrečios vaizdo kraštams. Horizontaliais ir vertikaliais skenavimais randami elipsės ašių ilgiai ir elipsės centras.
4. Įbrėžiamas kvadratas $l \times l$ vaizdo centre, kaip pavaizduota 47 b) pavyzdyje. Kvadrato kraštinės ilgis yra $l = \sqrt{2} * a_l$, kur a_l – trumpasis elipsės pusašis.
5. Naudojamas Gauso blukinimas pagal (5) formulę. Po eksperimentinių

tyrimų intervale [0,100] žingsneliu 1 geriausi standartinio nuokrypio rezultatai gauti $\sigma = 64$, norint gauti tolygų vaizdą, pavaizduotą 47 c) pavyzdyje.

6. Panaudojama (57) funkcija G-R fokuso centrui (x_f, y_f) surasti. Ši funkcija minimizuojama Kvazi-Niutono (angl. *Quasi-Newton*) metodu [126]. 47 c) paveiksle matyti pradžios pozicija (baltas kvadratinis kvadratas) ir rastas naujas G-R fokuso centras (brūkšninis kvadratinis kvadratas). 47 d) paveiksle matyti galutinis rastas SChA G-R fokuso centras (x_f, y_f) .

$$F(x_f, y_f) = \sum_{x=-\frac{l}{8}}^{\frac{l}{8}} \sum_{y=-\frac{l}{8}}^{\frac{l}{8}} I(x + x_f, y + y_f), \quad (57)$$

čia l yra įbrėžto kvadrato dydis, $I(x, y)$ – intensyvumas taške (x, y) , (x_f, y_f) – aberacijos fokuso centro taškas.

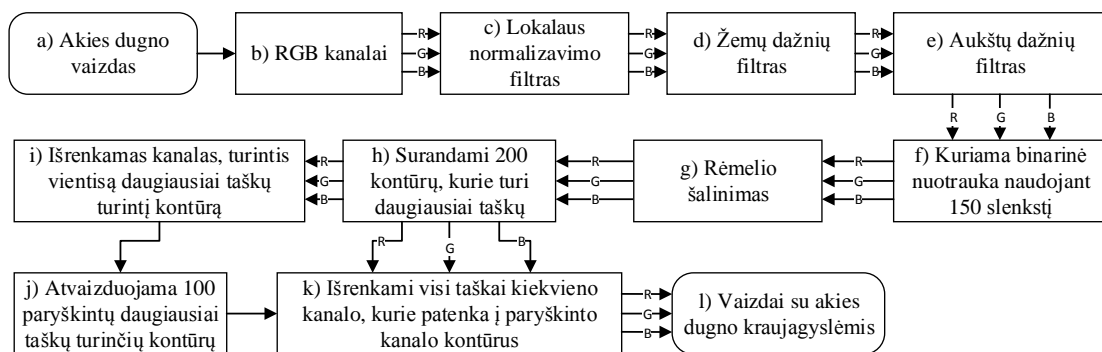


47 pav. Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro suradimas G-R vaizde: a) G-R vaizdas; b) įbrėžtas kvadratas; c) vaizdas, gautas panaudojus Gauso blukinimo filtrą; d) surastas skersinės chromatinės aberacijos centras.

Eksperimentiniai tyrimai, pristatyti 3.4.1 poskyryje, parodė, kad disertacijoje pristatytas FCK metodas dviem SChA fokuso centrams nustatyti skaičiavimus atliko 17 kartų greičiau ir skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrą nustatė labai panašiai kaip ir FCT metodas. Eksperimentas atliekamas naudojant tą pačią programinę įrangą ir su tuo pačiu kompiuteriu abiem atvejais.

3.3 Akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimas

Toliau disertacijoje atliktas tyrimas, aprašytas 3.4.2 poskyryje, parodė, kad taikant įvairius korekcijos modelius tiesiogiai akies dugno vaizdams skersinės chromatinės aberacijos efekto sumažinti negalima. Tad norint atlikti SChA koregavimą akies dugno vaizduose, gautuose Optomed SmartScope M5 fotoaparatu, kuriuose matyti pašalinio triukšmo ir dominuoja raudona spalva, be šabloninių kalibravimo vaizdų, reikia išskirti tam tikrus objektus kiekviename kanale. Akies dugno vaizduose šie objektai yra akies dugno kraujagyslės [A4].

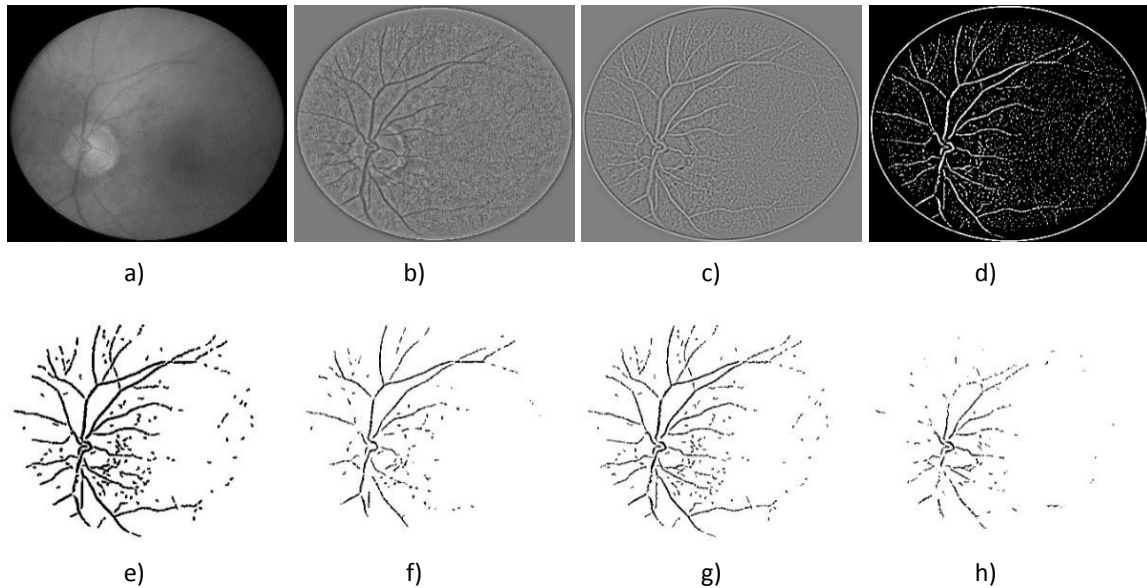


48 pav. Akies dugno kraujagyslių tinklo atpažinimo schema.

Sukurta daug metodų, kuriais galima atpažinti akies dugno kraujagysles [127] [128] [129]. Tačiau kadangi tik pačios didžiausios kraujagyslės yra svarbios, nes jose geriausiai matyti ChA, pasirinktas didelių kraujagyslių atpažinimo metodas [130], šio schema pavaizduota 48 paveiksle ir šio metodo algoritmo žingsniai yra šie:

- Akies dugno vaizdas.* Naudojamas akies dugno vaizdas (žr. 49 a).
- RGB kanalai.* Vaizdas išskirstomas į RGB kanalus: raudoną, žalią ir mėlyną.
- Lokalus normalizavimo filtras.* Naudojamas lokalus normalizavimo filtras (angl. *Local normalization filter*) [131] kiekvienam kanalui sumažinti apšvietimo skirtumams, kaip parodyta. Po eksperimentinių tyrimų intervale [0,100] žingsneliu 1 geriausi rezultatai gauti su šiomis reikšmėmis: $\sigma_1 = 10$ ir $\sigma_2 = 20$ (žr. 49 b).

- d) *Žemų dažnių filtras*. Naudojamas žemų dažnių filtras (angl. *Low-pass filter*) [12]. Po eksperimentinių tyrimų intervale [0,100] žingsneliu 1 geriausi rezultatai gauti su $\sigma = 3$ reikšme.
- e) *Aukštų dažnių filtras*. Naudojamas aukštų dažnių filtras (angl. *High-pass filter*) [12] (žr. 49 c). Po eksperimentinių tyrimų intervale [0,100] žingsneliu 1 geriausi rezultatai gauti su $\sigma = 31$ reikšme.
- f) *Kuriamas binarinis vaizdas naudojant 150 slenkstį* (žr. 49 d).
- g) *Rėmelio šalinimas*. Kadangi nufotografuoti vaizdai turi elipsės kontūrą, kuris visada yra toks pat ir ašys yra lygiagrečios vaizdo kraštams, visi taškai už elipsės vidaus pašalinami, taip panaikinamas rėmelis.
- h) *Sukuriami 200 kontūrų, turintys daugiausia taškų*.
- i) *Išrenkamas kanalas, turintis vienisą daugiausia taškų turintį kontūrą*.
- j) *Atvaizduojami 100 daugiausia taškų turinčių kontūrų*, nes tik didžiausios kraujagyslės yra svarbiausios. Kadangi visuose kanaluose tos pačios kraujagyslės pavaizduotos skirtingose vietose dėl skersinės chromatinės aberacijos efekto, atvaizduoti 100 daugiausiai taškų turintys kontūrai paryškinami, kad apimtų visuose kanaluose esančias kraujagysles. Taškai paryškinami OpenCV *dilate* metodu [132] (žr. 49 e).
- k) *Išrenkami visi taškai kiekvieno kanalo, kurie patenka į paryškinto kanalo kontūrus*.
- l) *Vaizdai su akies dugno kraujagyslėmis*. Gaunami kiekvieno RGB kanalo vaizdai su akies dugno kraujagyslėmis, kurių rezultatai matyti 49 f), g) ir h) pavyzdžiuose. Šie vaizdai parodo kraujagysles kiekviename RGB kanale.



49 pav. Pagrindiniai žingsniai akies dugno kraujagyslių nustatymo: a) originalus vaizdas; b) lokalaus normalizavimo filtras; c) aukštų dažnių filtras; d) binarinis vaizdas panaudojus slenkstį; e) 100 paryškintų kontūrų; f) mėlyno kanalo kontūrai; g) žalio kanalo kontūrai; h) raudono kanalo kontūrai.

3.4 Eksperimentiniai tyrimai

Šiame skyriuje pateikti eksperimentiniai tyrimai:

1. Siekia nustatyti, kuris skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro nustatymo metodas tiksliau ir greičiau nustato skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrą.
2. Siekia nustatyti, ar korekcijos modeliai gali būti taikomi sumažinti skersinei chromatinei aberacijai akies dugno vaizduose tiesiogiai, t. y. be kalibravimo šablonų.
3. Siekia nustatyti, kuris modelis geriausiai sumažina skersinę chromatinę aberaciją (SChA) akies dugno vaizduose kalibravimo šablonais (KŠ).
4. KŠ ir kraujagyslių tinklo atpažinimo (KA) metodai lyginami tarpusavyje ir su originaliu vaizdu siekiant ištirti, kiek sumažėja SChA ir kuris metodas tikslesnis.

Visiems eksperimentams atlikti naudoti juodų / baltų kvadratėlių ir apskritimų kalibravimo šablonai su dviem skirtingais dydžiais (8×8 pikseliai ir 4×4 pikseliai), matomi 36 a) paveiksle. Kalibravimo šablonų rezoliucija – 20,34 pikselių per kvadratinį centimetrą. Šie kalibravimo šablonai nufotografuoti su SmartScope M5 Optomed portatyviu akies dugno fotoaparatu 8 cm atstumu nuo objektyvo. Fotoaparatas turi 5 megapikselių CMOS vaizdo jutiklį. Vaizdai saugojami JPG formatu, 1920×1440 pikselių dydžiu. Eksperimentai atlikti su Windows 8.1 operacine sistema, Intel i7-550U 2,40GHz procesoriumi, 8 GB darbinės atminties C++ programavimo kalba su OpenCV biblioteka.

3.4.1 Skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrų nustatymo metodų lyginimas

Eksperimento tikslas – nustatyti, kuris skersinės chromatinės aberacijos fokuso centro nustatymo metodas skersinės chromatinės aberacijos fokuso centrą nustato tiksliau ir greičiau. Eksperimento metu lyginami du metodai: literatūroje dažnai aprašomas metodas su objektų centrais kiekviename kanale (FCT metodas) ir disertacijoje pasiūlytas metodas ieškant kanalų intensyvumų skirtumų minimumų (FCK metodas).

Naudotas vienodo dydžio juodų / baltų kvadratėlių (4×4 pikselių dydžio) kalibravimo šablonas, matomas 36 a) paveiksle. Eksperimentams atlikti naudotas projekcinis modelis, nes šis davė geriausių rezultatų atliekant SChA šalinimą.

3 lentelė. Korekcijos modelių rezultatai naudojant KŠ metodą.

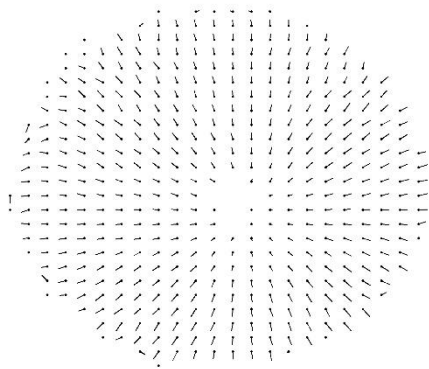
Metodas	Be korekcijos		Projekcinis modelis	Laikas
Naudojant vaizdo centrą	$E_{abr_wc}(G,B)= 59.01$	$E_{abr}(G,B)$	26,44	0s
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,23	
	$E_{abr_wc}(G,R)= 51.55$	$E_{abr}(G,R)$	20,80	
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	2,48	
FCT	$E_{abr_wc}(G,B)= 59.01$	$E_{abr}(G,B)$	22,48	42,55s
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,63	
	$E_{abr_wc}(G,R)= 51.55$	$E_{abr}(G,R)$	18,96	
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	2,72	
FCK	$E_{abr_wc}(G,B)= 59.01$	$E_{abr}(G,B)$	22,49	2,44s
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,62	
	$E_{abr_wc}(G,R)= 51.55$	$E_{abr}(G,R)$	18,98	
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	2,72	

Iš 3 lentelės matyti, kad abu metodai SChA fokuso centrą nustato labai panašiai. Taip pat matyti, kad naudojant vaizdo centrą vietoj SChA fokuso centro RMSE sumažėjo ~12 % prasčiau už SChA fokuso centro nustatymo metodus. Disertacijoje pasiūlytas FCK metodas tik 0,07 % mažiau sumažino RMSE už FCT metodą. Tačiau disertacijoje pasiūlytas FCK metodas skaičiavimus atliko 17 kartų greičiau už FCT metodą. FCT metodas užtrunka labai ilgai, nes atliekama labai daug skaičiavimų, nustatoma daugiau kaip 200 objektų centrai kiekviename kanale ir nubrėžiamos linijos, kadangi pasirinktas labai smulkus kalibravimo šablonas. Teoriškai užtenka nubrėžti dvi linijas ir jų susikirtimas bus skersinės chromatinės aberacijos centras, tad ir skaičiavimo sparta bus didelė, tačiau sumažės tikslumas.

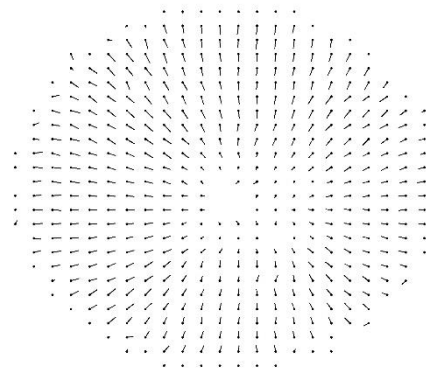
3.4.2 Skersinės chromatinės aberacijos koregavimas taikant korekcijos modelius

Juodai baltų kvadratėlių kalibravimo šablonui, pavaizduotam 36 a) paveiksle, fotografuotam SmartScope M5 Optomed fotoaparatu, pritaikius skersinės chromatinės aberacijos šalinimą, t. y. panaudojus 30×30 tinklelį, ir kiekvienam gautam naujam tinklelio vaizdui pritaikius paprasčiausią (angl.

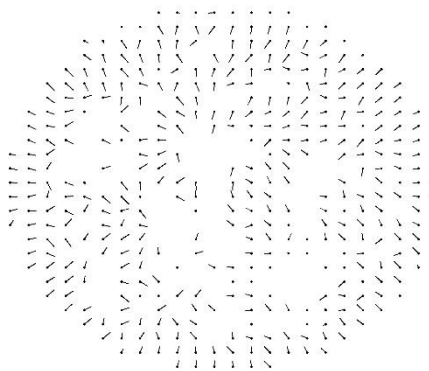
Simple) korekcijos modelį, pavaizduotą 41 paveiksle 1.2.1 dalyje, pagal (19) formules minimizuojamas RMSE (28) Levenbergo-Markardo algoritmu [120] ir gaunami vaizdai, pavaizduoti 50 a) ir b) paveiksluose. Šiuose vaizduose labai aiškiai matyti skersinės chromatinės aberacijos efektas. a) yra raudono ir žalio kanalų skirtumų vaizdas, ir b) yra mėlyno ir žalio kanalų skirtumų vaizdas. Kiekvienas rutuliukas yra tinklelio kiekvieno mažo vaizdo centras, o nuo kiekvieno rutuliuko nubrėžtas vektorius vaizduoja korekcijos kryptį ir ilgį. Vaizdo kraštuose vektoriai ilgiausi, tai reiškia, kad ten aberacija didžiausia, o artėjant link centro vektoriai labai trumpi, ten aberacija mažiausia. Taip pat dauguma vektorių, nukrypusių nuo aberacijos centro raudoname kanale arba link aberacijos centro mėlyname kanale. Visi šie požymiai dar kartą patvirtina, kad gautame vaizde labai aiškiai matyti SChA. Deja, pritaikius tą patį paprasčiausią korekcijos modelį, pavaizduotą 41 paveiksle 1.2.1 dalyje akies dugno vaizdams, kurių rezultatas matyti 50 c) ir d) paveiksle, skersinės aberacijos nustatyti nepavyko dėl pašalinio triukšmo. Kiekvieno tinklelio vaizdo vektorių kryptys skirtingos, o tiek vaizdo centre, tiek vaizdo kraštuose esančių vektorių ilgiai panašūs.



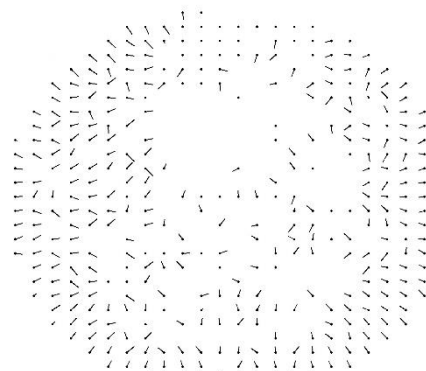
a)



b)



c)



d)

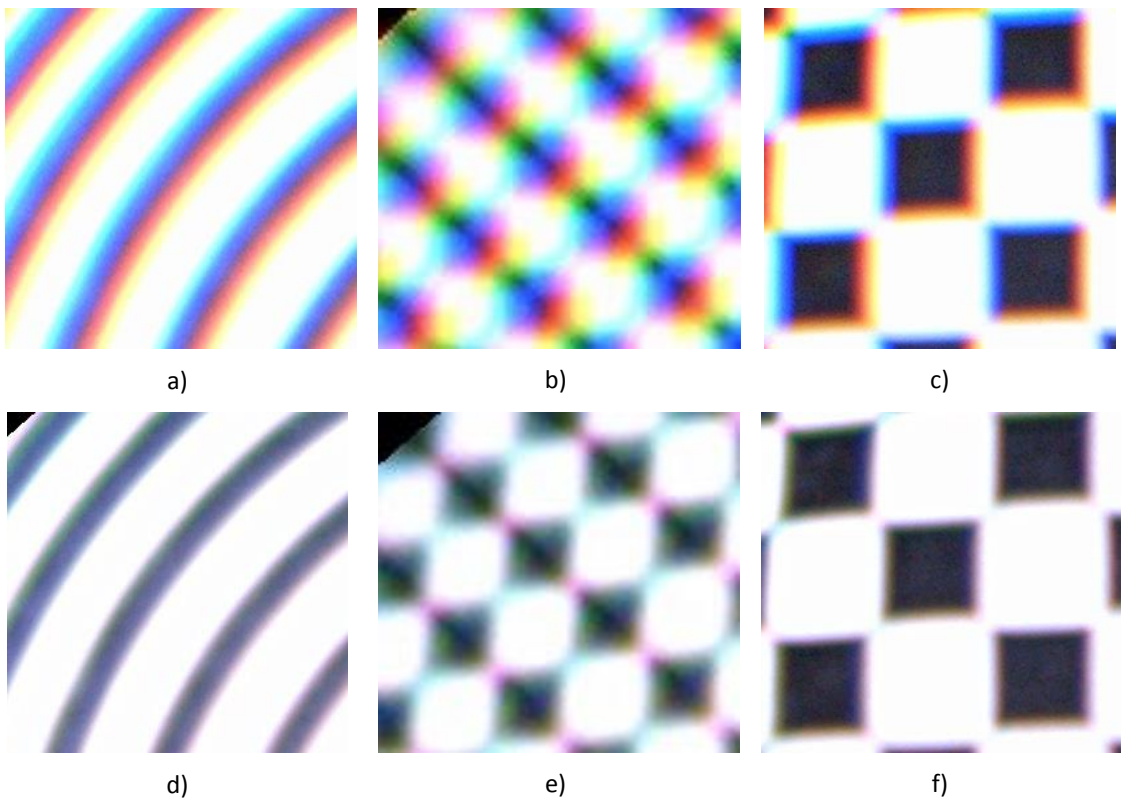
50 pav. Vaizdui, gautam Optomed SmartScope M5 fotoaparatu, panaudotas 30×30 tinklelis bei kiekvienam gautam naujam tinklelio vaizdui pritaikytas paprasčiausias korekcijos modelis naudojant Levenbergo-Markardo minimizavimo algoritmą. a) juodai baltų kvadratėlių kalibravimo šablono vaido raudono ir žalio kanalų skirtumas; b) juodai baltų kvadratėlių šablono vaizdo mėlyno ir žalio kanalų skirtumas; c) akies dugno vaizdo raudono ir žalio kanalų skirtumas; d) akies dugno vaizdo mėlyno ir žalio kanalų skirtumas.

Dėl chromatinės aberacijos baltai šviesai praėjus pro optinių lęšių sistemą dėl dispersijos atsiranda įvairių vaizdo iškreipimų, tad prie juodų / baltų kalibravimo šablonų vaizdų vietų atsiradęs spalvotas vaizdas lengvai atpažįstamas ir koreguojamas korekcijos modeliais. Tačiau taikant korekcijos modelius tiesiogiai akies dugno vaizdams neįmanoma išskirti skersinės chromatinės aberacijos, tad norint atlikti skersinės chromatinės aberacijos korekciją be paties fotoaparato, sukurtas ir disertacijoje pristatytas naujas

skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas, pagrįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu.

3.4.3 Geriausio skersinės chromatinės aberacijos šalinimo modelio nustatymas naudojant kalibravimo šablonus

Eksperto tikslas – nustatyti, kuris modelis labiausiai sumažina SChA akies dugno vaizduose KŠ metodu.

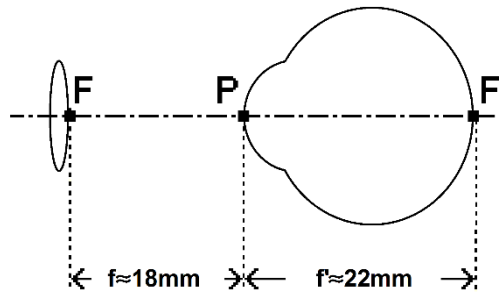


51 pav. Kalibravimo šablonai prieš (viršutinė eilutė) ir po (apatinė eilutė) projekcinio koregavimo. a) ir d) apskritimų, b) ir e) juodų / baltų kvadratėlių 4×4 pikselių dydžio, c) ir f) juodų/baltų kvadratėlių 8×8 pikselių dydžio kalibravimo šablonai.

Naudojant KŠ metodą pasirinkti dviejų tipų kalibravimo šablonai, jų visiškai pakanka nustatyti SChA. Tai juodi / balti kvadratėliai ir apskritimai su dviem skirtingais dydžiais (8×8 pikseliai ir 4×4 pikseliai), matomi 36 a) paveiksle.

Kalibravimo šablonų vaizdai fotografuoti 8 cm atstumu nuo fotoaparato lęšio. Kadangi standartinio suaugusio žmogaus akies židinio nuotolis [133] (vaizdo projekcijos ant tinklainės) $PF' \approx 22mm$, o atstumas nuo fotoaparato

lęšio iki akies lęšio $FP \approx 18 \text{ mm}$, akies lęšis buvo fotografuojamas 4 cm atstumu iki fotoaparato lęšio, kaip pavaizduota 52 paveiksle.



52 pav. Atstumas nuo fotoaparato lęšio iki tinklainės.

Tyrimo metu nustatyta, kad atstumai skiriasi dvigubai, tai visi korekcijos koeficientai turi būti padalyti iš dviejų.

SChA šalinti gautiems vaizdams su SmartScope M5 Optomed portatyviniu akies dugno fotoaparatu naudoti penki skirtingi modeliai:

- paprastas, naudojantis tris a_0, a_1, a_2 koeficientus pagal (19) formulę;
- afininis, naudojantis šešis a_0, \dots, a_5 koeficientus pagal (20) formulę;
- projekcinis, naudojantis aštuonis a_0, \dots, a_7 koeficientus pagal (21) formulę;
- radialinis su vienu a_0 koeficientu pagal (23) formulę;
- radialinis su dviem a_0, a_1 koeficientais pagal (24) formulę.

Žalias kanalas naudojamas kaip atskaitos taškas ir visi modeliai buvo skaičiuojami atskirai raudonam ir mėlynam kanalams minimizuojant RMSE pagal (28) formulę Levenbergo-Markardo algoritmu [120]. Minimizavimas stabdomas atlikus 100 iteracijų arba jei skaičiavimo paklaida $\varepsilon < 0.001$.

4 lentelė. Apskaičiuotų RMSE korekcijos modeliams rezultatai naudojant KŠ metodą.

Kalibravimo šablonai	Be korekcijos		Paprastas	Afininis	Projekcinis	Radialinis 1	Radialinis 2
Apskritimai 4x4 pikselių dydžio	$E_{abr_wc}(G,B)=$ 45,26	$E_{abr}(G,B)$	21,65	21,21	21,18	28,31	24,47
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,09	2,13	2,14	1,60	1,85
	$E_{abr_wc}(G,R)=$ 46,53	$E_{abr}(G,R)$	14,57	13,65	13,65	23,87	17,87
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	3,19	3,41	3,41	1,95	2,60
Juodi / balti kvadratėliai 4x4 pikselių dydžio	$E_{abr_wc}(G,B)=$ 59,01	$E_{abr}(G,B)$	22,54	22,48	22,48	35,49	29,12
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,62	2,63	2,63	1,66	2,03
	$E_{abr_wc}(G,R)=$ 51,55	$E_{abr}(G,R)$	19,1	19	18,96	30,44	21,46
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	2,70	2,71	2,72	1,69	2,40
Juodi / balti kvadratėliai 8x8 pikselių dydžio	$E_{abr_wc}(G,B)=$ 43,01	$E_{abr}(G,B)$	20,07	19,25	19,25	28,53	23,76
		$E_{abr_wc}(G,B)/E_{abr}(G,B)$	2,14	2,23	2,23	1,51	1,81
	$E_{abr_wc}(G,R)=$ 37,24	$E_{abr}(G,R)$	12,98	12,86	12,86	20,16	13,19
		$E_{abr_wc}(G,R)/E_{abr}(G,R)$	2,87	2,90	2,90	1,85	2,82

4 lentelėje E_{abr_wc} – apskaičiuotas RMSE originaliems (be pakitimų) vaizdams, jų pavyzdžiai pavaizduoti 51 pavyzdyje viršutinėje eilutėje, o E_{abr} – apskaičiuotas RMSE vaizdai po korekcijos modelio pritaikymo. Geriausių rezultatų davė projekcinis modelis, šio rezultatų pavyzdžiai pavaizduoti 51 pavyzdyje apatinėje eilutėje. Matyti, kad SChA akivaizdžiai sumažėjo. Geriausi rezultatai mėlynam kanalui yra 2,14 ir 3,41 raudonam kanalui. Pakartojus šiuos bandymus po 20 kartų su skirtingomis atsitiktinėmis pradinėmis korekcijos koeficientų reikšmėmis abiem atvejais vidutinė dispersija gavosi mažesnė už 0,001. Projekcinio modelio RMSE rezultatai yra (33 – 37 %) geresni už radialinio modelio su vienu parametru ir (13 – 18 %) geresni už radialinio su dviem parametrais. Vis dėlto projekcinis modelis tik nežymiai geresnis (0 – 0,09 %) už afininį modelį ir (0,48 – 3,83 %) už paprastą modelį. Afininį arba paprastą modelius geriausiai pasirinkti, kai reikalingas skaičiavimo greitis.

Siekiant nustatyti struktūros skirtumus tarp kanalų rezultatai skaičiuojami taikant SSIM pagal (30) formulę.

5 lentelė. Apskaičiuoti SSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.

Kalibravimo šablonai	Matas	Be korekcijos	Paprastas	Afininis	Projekcinis	Radialinis 1	Radialinis 2
Apskritimai 4x4 pikselių dydžio	SSIM(G,B)	0.7920	0.9638	0.9656	0.9657	0.9241	0.9471
	SSIM(G,R)	0.8025	0.9606	0.9826	0.9827	0.9476	0.9689
Juodi / balti kvadratai 4x4 pikselių dydžio	SSIM(G,B)	0.7958	0.9767	0.9768	0.9768	0.9329	0.9567
	SSIM(G,R)	0.8424	0.9807	0.9810	0.9811	0.9481	0.9750
Juodi / balti kvadratai 8x8 pikselių dydžio	SSIM(G,B)	0.8660	0.9587	0.9661	0.9662	0.9369	0.9535
	SSIM(G,R)	0.8930	0.9812	0.9813	0.9814	0.9629	0.9807

Kadangi skirtumas tarp SSIM indekso rezultatų reikšmių labai mažas, dėl informatyvumo patogiau naudoti atvirkštinį panašumo indeksą (angl. *Inverse Structural Similarity*) (ISSIM) apskaičiuojamą pagal (58) formulę.

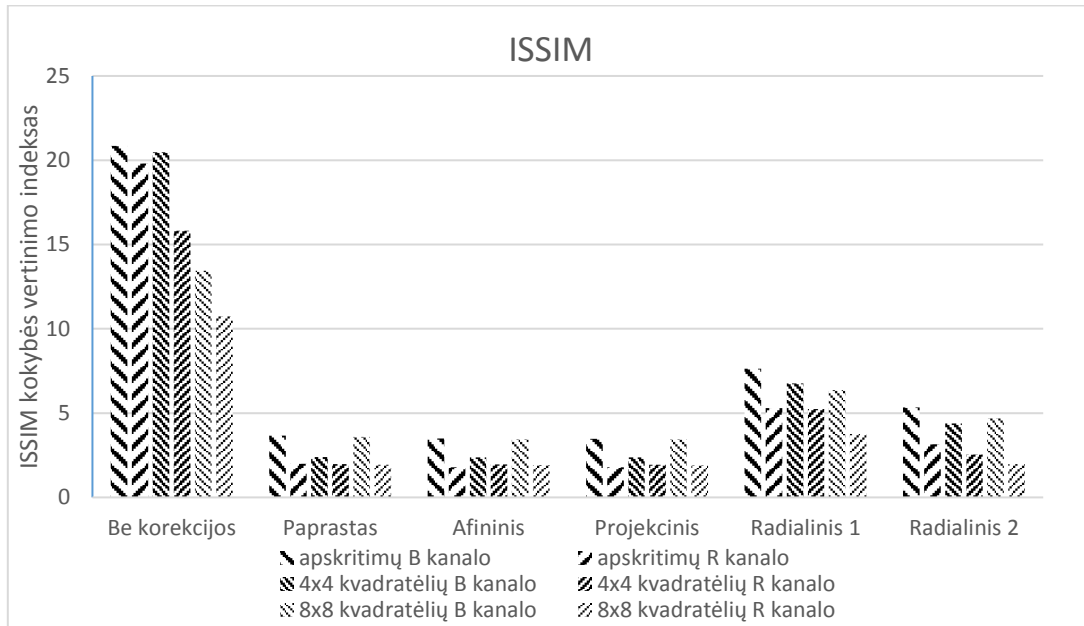
$$ISSIM = (1 - SSIM) * 100. \quad (58)$$

Geresnė vaizdo kokybė yra kai ISSIM indekso reikšmė artėja prie 0.

6 lentelė. Apskaičiuoti ISSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.

Kalibravimo šablonai	Matas	Be korekcijos	Paprastas	Afininis	Projekcinis	Radialinis 1	Radialinis 2
Apskritimai 4x4 pikselių dydžio	ISSIM(G,B)	20.8542	3.6722	3.4904	3.4783	7.6368	5.3393
	ISSIM(G,R)	19.8002	3.9881	1.7870	1.7789	5.2946	3.1621
Juodi/balti kvadratai 4x4 pikselių dydžio	ISSIM(G,B)	20.4724	2.3862	2.3729	2.3716	6.7644	4.3835
	ISSIM(G,R)	15.8100	1.9807	1.9472	1.9382	5.2391	2.5540
Juodi/balti kvadratai 8x8 pikselių dydžio	ISSIM(G,B)	13.4460	3.5836	3.4435	3.4349	6.3623	4.6954
	ISSIM(G,R)	10.7521	1.9295	1.9212	1.9079	3.7617	1.9793

Gauti rezultatai matomi 5 lentelėje naudojant SSIM ir 6 lentelėje naudojant ISSIM.



53 pav. ISSIM kokybės vertinimo indeksai korekcijos modeliams naudojant KŠ metodą.

53 paveiksle diagrama pavaizduoti 6 lentelėje gauti rezultatai. Iš diagramos matyti, kad skersinės chromatinės aberacijos efektas labai sumažėjo su visais metodais. Geriausių rezultatų davė projekcinis modelis. Blogiausi rezultatai gauti su radialiniu metodu su vienu parametru. ISSIM indeksas parodė, kad skirtumas tarp paprasto, afininio ir projekcinio labai mažas.

3.4.4 Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodų lyginimas naudojant kalibravimo šablonus ir kraujagyslių tinklo atpažinimą

Naudoti 58 vaizdai, fotografuoti su Optomed SmartScope M5 fotoaparatu, sumažinti SChA efektui. Norint sumažinti SChA efektą taikytas projekcinis modelis, nes šis davė geriausių rezultatų, kurie aprašyti plačiau 3.4.1 poskyryje.

Kadangi neaišku, kaip iš tikrųjų atrodo akies dugno vaizdai, fotografuoti su Optomed SmartScope M5 fotoaparatu be SChA efekto, kokybei įvertinti naudojami Suliejimo (M_{BM}), *Chromatic Zipper* (M_{ChZ}) ir *Achromatic Zipper* (M_{AchZ}) matai, aprašyti 2.4.6 ir 2.4.7 poskyriuose.

Atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai matyti 7 lentelėje. Pirma eilutė su skaičiais rodo visų vaizdų matų vidurkius be pakitimų. Antra ir trečia eilutės

rodo visų vaizdų matų vidurkius po korekcijos su KŠ ir KA metodais. Jeigu koreguoto vaizdo gautas rezultatas mažesnis už pradinio vaizdo rezultatą, kokybė pagerėjo. Rezultatai parodė, kad vaizdų kokybė pagerėjo su abiem metodais. Be to, KŠ metodas davė geresnių rezultatų visiems matams. Trys paskutinės eilutės parodo visų matų dispersiją ir iš rezultatų matyti, kad jos visos labai panašios.

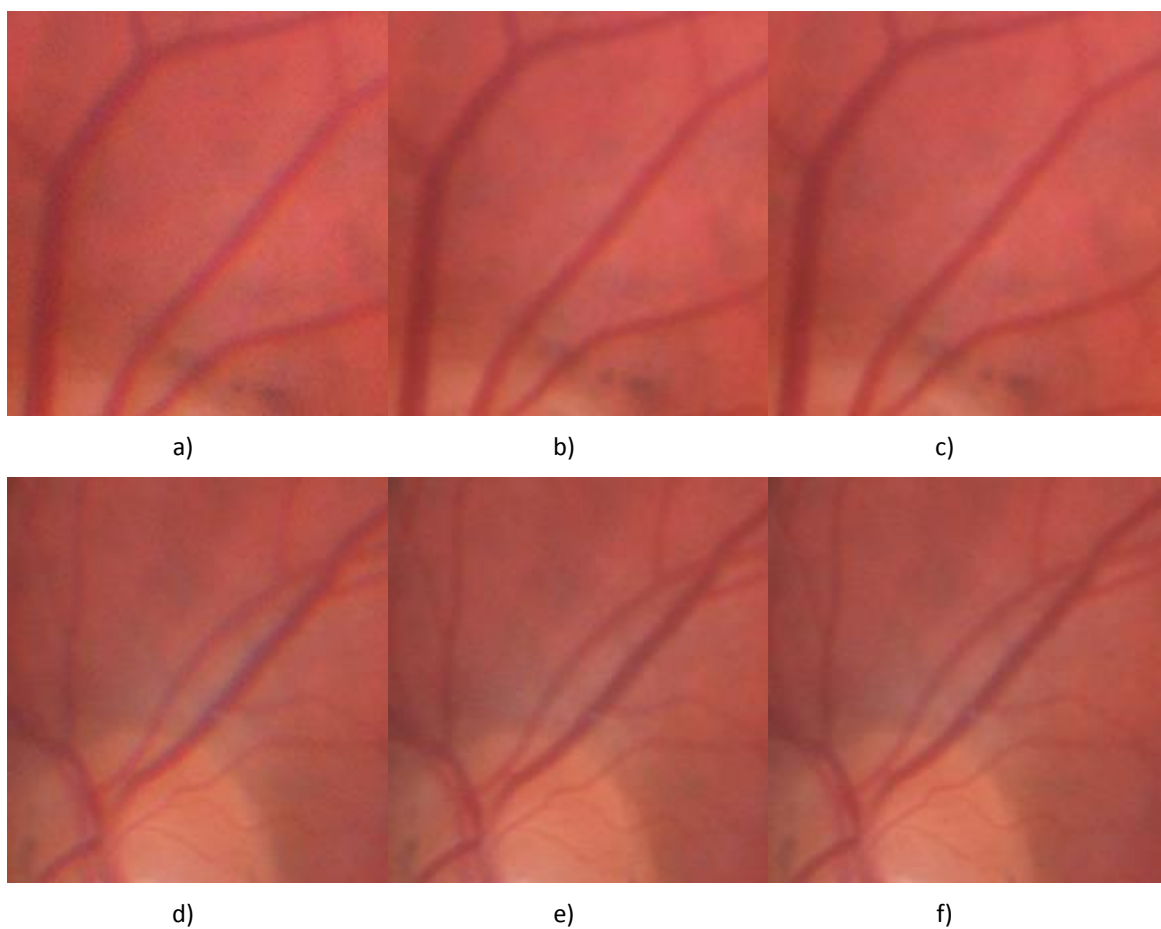
7 lentelė. Skersinės chromatinės aberacijos pašalinimo vertinimo matų rezultatai.

	M_{BM}	M_{ChZ}	M_{AChZ}
Vidurkis originalių vaizdų	0,206	14,633	14,387
Vidurkis vaizdams naudojant KŠ metodą su projekciniu modeliu	0,179	13,855	14,034
Vidurkis vaizdams naudojant KA metodą su projekciniu modeliu	0,192	13,864	14,083
Dispersija originaliems vaizdams	0,00035	0,02411	0,31898
Dispersija vaizdams naudojant KŠ metodą su projekciniu modeliu	0,00050	0,02712	0,42539
Dispersija vaizdams naudojant KA metodą su projekciniu modeliu	0,00047	0,02259	0,49019

Atliktas Studento t-testas [134] siekiant įvertinti, ar matų vidutinės vertės yra lygios prieš ir po korekcijos. 8 lentelėje pateikti rezultatai parodė, kad imant reikšmingumo lygmenį $p = 0,05$, ši hipotezė gali būti atmesta, t. y. matų reikšmės skiriasi reikšmingai tiek originalų vaizdą lyginant su KŠ metodu, tiek ir su KA metodu. Taip pat matyti, kad Studento t-testas parodė, kad hipotezė, kad KŠ ir KA metodų vidurkiai skiriasi reikšmingai, negali būti atmesta, kai naudoti matai M_{ChZ} ir M_{AChZ} . Tačiau naudojant matą M_{BM} gaunami reikšmingi skirtumai. Nors KŠ metodas davė šiek tiek geresnių rezultatų už KA metodą šalinant SChA, KA metodą galima naudoti turint tik vaizdus be paties fotoaparato, su kuriuo gauti vaizdai.

8 lentelē. Studento t-testu rezultāti.

	M_{BM}	M_{ChZ}	M_{AChZ}
T-test originalūs vaizdai su KŠ metodu	3,18E-15	1,78E-22	4,48E-09
T-test originalūs vaizdai su KA metodu	7,94E-10	7,03E-23	9,22E-08
T-test KŠ metodes su KA metodu	3,01E-08	6,55E-01	2,35E-01



54 pav. Korekcijos rezultāti su KŠ ir KA metodais naudojant projekcinį modelį.

a) ir d) vaizdai be pakeitimų; b) ir e) vaizdai atlikus korekciją naudojant KŠ metodą su projekciniu modeliu; c) ir f) vaizdai atlikus korekciją naudojant KA metodą su projekciniu modeliu.

54 a) ir d) pavyzdyje vaizdų fragmentai yra be pakeitimų; b) ir e) vaizdų fragmentai po KŠ metodo korekcijos ir c) ir f) vaizdų fragmentai po KA metodo korekcijos. Labai gerai matyti, kad po abiejų korekcijų SChA labai sumažėjo.

3.5 Skyriaus išvados

Šiame skyriuje pristatytas naujas metodas, grįstas kraujagyslių tinklo atpažinimu skersinei chromatinei aberacijai šalinti akies dugno vaizduose, ir atliktas lyginimas su literatūroje dažniausiai aprašomu skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodu kalibravimo šabloniniais vaizdais. Eksperimentiniai tyrimų rezultatai leidžia teigti, kad:

1. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad disertacijoje pristatytas naujas FCK metodas dviem SChA fokuso centrams nustatyti skaičiavimus atliko 17 kartų greičiau, o RMSE sumažino tik 0,07 % mažiau už literatūroje dažnai naudojamą FCT metodą.
2. Šalinant skersinės chromatinės aberacijos efektą akies dugno vaizduose kalibravimo šablonais, grindžiamais skersinių chromatinių aberacijų šalinimo metodais, eksperimentiniai rezultatai davė geriausių rezultatų su projekciniu modeliu. RMSE sumažėjo 2,14 karto žaliai kanalui su mėlynu kanalu ir 3,14 karto žaliai kanalui su raudonu kanalu. Pakartojus bandymus po 20 kartų su skirtingomis atsitiktinėmis pradinėmis korekcijos koeficientų reikšmėmis abiem atvejais vidutinė dispersija gavosi mažesnė už 0,001. Vis dėlto, projekcinis modelis tik nežymiai geresnis (0 – 0,09 %) už afininį modelį ir (0,48 – 3,83 %) paprastą modelį. Afininį arba paprastą modelius geriausia pasirinkti, kai reikalingas skaičiavimo greitis.
3. Kokybei įvertinti naudotas projekcinis modelis ir lygintas sukurtas ChA šalinimo metodas, grindžiamas kraujagyslių tinklo atpažinimu, su kalibravimo šablonais grindžiamu ChA šalinimo metodu; naudoti M_{BM} , M_{ChZ} ir M_{AchZ} matai. Galima teigti, kad ChA sumažėjo su abiem metodais. Vaizdų kontrastas padidėjo, o kraujagyslės pasidarė ryškesnės. M_{BM} mato rodiklis parodė, kad su KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 13,1 %, o su KA – 6,8 %. M_{ChZ} mato rodiklis parodė, kad su KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 5,32 %, o su KA – 5,25 %. Ir M_{AchZ} mato rodiklis parodė, kad su

KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 2,45 %, o su KA – 2,11 %. Naudojant Studento t-testą ir lyginant KŠ metodą ir KA metodą, reikšmingo skirtumo nepastebėta tarp M_{ChZ} ir M_{AChZ} matų, tik M_{BM} parodė atvirkščiai. Kadangi tarp metodų labai mažas skirtumas, patogiau naudoti KA metodą, nes nereikia kalibravimo šabloninių vaizdų.

4 Bendrosios išvados

1. Pasiūlytas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas kontūrą atpažįsta vidutiniškai 78 % tikslumu lyginant su žmogaus apibrėžtu kontūru.
2. Disertacijoje pristatytas kelio dangos defektų kontūrų atpažinimo metodas grindžiamas prisitaikančiu binarizacijos slenksčiu leidžia pasiekti 25 % didesnę tikslumą už aktyvaus kontūro metodą su prisitaikančiu binarizacijos slenksčiu.
3. Skersinės chromatinės aberacijos efektą šalinant akies dugno vaizduose su kalibravimo šablonais grindžiamais skersinių chromatinių aberacijų šalinimo metodais, tikslinga naudoti geriausias rezultatus užtikrinantį projekcinį modelį. Eksperimentiškai nustatyta, kad skersinės chromatinės aberacijos metodas grindžiamas projekciniu modeliu davė geriausių rezultatų ir RMSE paklaidą vidutiniškai sumažino 2,14 karto mėlynam kanalui ir 3,14 karto raudonam kanalui. Pakartojus bandymus po 20 kartų su skirtingomis atsitiktinėmis pradinėmis korekcijos koeficientų reikšmėmis abiem atvejais vidutinė dispersija mažesnė už 0,001. Blogiausių rezultatų davė radialiniai modeliai. Projekcinio modelio RMSE rezultatai yra 33 – 37 % geresni už radialinio modelio su vienu parametru ir 13 – 18 % geresni už radialinio su dviem parametrais. Nustatyta, kad projekcinis modelis tik nežymiai geresnis (0 – 0,1 %) už afininį ir (0,48 – 3,83 %) paprastą. Afininį arba paprastą modelius geriausiai naudoti, kai reikalingas didesnis skaičiavimo greitis.
4. Skersinės chromatinės aberacijos šalinimo kokybei įvertinti panaudojus Suliejimo (M_{BM}), *Chromatic Zipper* (M_{ChZ}) ir *Achromatic Zipper*

(M_{AChZ}) matus galima teigti, kad kalibravimo šablonais grindžiamas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas su projekciniu modeliu (KŠ) ir sukurtas skersinės chromatinės aberacijos šalinimo metodas, grindžiamas kraujagyslių kontūrų tinklo atpažinimu (KA), leidžia reikšmingai sumažinti skersinės chromatinės aberacijos efektą, o skirtumas tarp abiejų metodų remiantis M_{ChZ} ir M_{AChZ} matais nėra reikšmingas. M_{BM} mato rodiklis parodė, kad su KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 13,1 %, o su KA – 6,8 %. Šis skirtumas remiantis Studento t-testu yra reikšmingas. M_{ChZ} mato rodiklis parodė, kad su KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 5,32 %, o su KA – 5,25 %. Ir M_{AChZ} mato rodiklis parodė, kad su KŠ metodu vaizdo kokybė pagerėjo 2,45 %, o su KA – 2,11 %. Kadangi pagal du iš trijų matų skirtumas tarp metodų yra labai mažas, KA metodą galima naudoti vietoje KŠ, kai norima apsieiti be kalibravimo šabloninių vaizdų.

5 Literatūra

1. Canny, John: A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1986) 679–698
2. Dijkstra, E. .: A Note on Two Problems in Connexion with Graph. *Numerische Mathematik* 1(1), 269–271 (1959)
3. Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11), 1330–1334 (2000)
4. Pöntinen, P.: Study on Chromatic Aberration of two Fisheye Lenses. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* 37, 27 (2012)
5. Johnson, M., Farid, H.: Exposing Digital Forgeries Through Chromatic Aberration., 48-55 (2006)
6. Bovik, A.: *The Essential Guide to Image Processing*. Academic Press, Austin, USA (2009)
7. Rowley, H., Baluja, S., Kanade, T.: Neural Network-Based Face Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20(1), 23–38 (1998)
8. Patel, C., Shah, D., Patel, A.: Automatic Number Plate Recognition System (ANPR): A Survey. *International Journal of Computer Applications* 69(9) (2013)
9. Tribockis, V.: Kelio ženklavimo vertikalinių juostų ir kelio kraštų atpažinimas. (2012)
10. Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D.: Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision* 1 1(4), 321–331 (1988)
11. Sinkevič, E.: Geometriniai ir funkcionaline analize paremti vaizdo segmentavimo metodai. (2014)
12. Gonzalez, R. C., Woods, R. E.: *Digital Image Processing Second Edition edn*. Prentice Hall (2002)
13. Pratt, W.: *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons, Inc., New York (2001)
14. Caponetti, L., Castellano, G.: *Fuzzy Logic for Image Processing*. SpringerBriefs in Electrical

and Computer Engineering (2017)

15. Davies, E. R.: Computer Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Elsevier Inc (2005)
16. Types of edges. In: Apache Technologies Pvt. Ltd. Available at: <http://apachetechnology.in/KC/Multimedia/DIP/EdgeDetection/Edges.aspx>
17. Rimavičius, T.: Vaizdų apdorojimas. (2013)
18. Boyle, R., Thomas, R.: Computer Vision: A First Course. Blackwell Scientific Publications (1988)
19. Prewitt, J. M. S.: Object Enhancement and Extraction. Picture processing and Psychopictorics, 75–149 (1970)
20. Sobel, I., Feldman, G.: A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing. Conference on: Stanford Artificial Intelligence Project (1968)
21. Apdilah, D., Simargolang, M., Rahim, R.: A Study of Frei-Chen Approach for Edge Detection. IJSRSET 3(1) (2017)
22. Kirsch, R.: Computer Determination of the Constituent Structure of Biological Images. Computers and Biomedical Research 4(3), 315–328 (1971)
23. Lindeberg, T.: Edge Detection and Ridge Detection with Automatic Scale Selection. International Journal of Computer Vision 30(2), 117–156 (1998)
24. Kovese, P.: Edges Are Not Just Steps. Proceedings of the Fifth Asian Conference on Computer Vision, 822–827 (2002)
25. Singh, S., Datar, A.: Edge Detection Techniques Using Hough Transform. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 3(6) (2013)
26. Abdulrahman, H., Magnier, B., Montesinos, P.: From Contours to Ground Truth: How to Evaluate Edge Detectors by Filtering. WSCG 25(2)
27. Arbel'aez, P., Fowlkes, C.: Contour Detection and Hierarchical Image Segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 33(5), 898–916 (2011)
28. Recommendation ITU-R BT.601-7 Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios., International Telecommunication Union (2011)
29. Perlibakas, V.: Automatical Detection of Face Features and Exact Face Contour. Pattern Recognition Letters 24(16), 2977–2985 (2003)
30. Ding, L., Martinez, A.: Precise Detailed Detection of Faces and Facial Features. (2008)
31. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., Balakrishnan, H.: The Pothole

- Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. (2008)
32. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G., Selavo, L.: Real Time Pothole Detection Using Android Smartphones with Accelerometers. Researchgate (2011)
 33. Tai, Y.-c., Chan, C.-w., Hsu, J.: Automatic Road Anomaly Detection Using Smart Mobile Device. (2010)
 34. www.roadscanners.com. In: www.roadscanners.com. Available at: <http://www.roadscanners.com>
 35. Jol, H.: Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Elsevier Science (2008)
 36. Balakuntala, S., Venkateshy, S.: An Intelligent System to Detect, Avoid and Maintain Potholes: A Graph Theoretic Approach. Computer Science (2014)
 37. Mertz, C.: Continuous Road Damage Detection Using Regular Service Vehicles. (2011)
 38. Danti, A., Kulkarni, J., Hiremath, P.: An Image Processing Approach to Detect Lanes, Pot Holes and Recognize Road Signs in Indian Roads. International Journal of Modeling and Optimization 2(6), 658–662 (2012)
 39. MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 281–297 (1967)
 40. Miraliakbari, A., Hahn, M., Maas, H.-G.: Development of a Multi-sensor System for Road Condition Mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1, 265–272 (2014)
 41. Raibagi, A., Anand, S., Swetha: Ultrasonic anti crashing system for automobiles. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering 2(4), 1774–1778 (2013)
 42. Jengo, C., Hughes, D., LaVeigne, J., Curtis, I.: Pothole Detection and Road Condition Assessment Using Hyperspectral Imagery. (2005)
 43. Punjabi, H., Nanwani, R., Vaswani, A., Jotwani, R., Kunte, A.: Intelligent Pothole Detection System. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 4(7), 590–595 (2014)
 44. Jahanshahi, M., Masri, S.: Adaptive vision-based crack detection using 3D scene reconstruction for condition assessment of structures. Automation in Construction 22, 567–576 (2012)
 45. Radopoulou, S., Brilakis, I.: Patch detection for pavement assessment. Automation in Construction 53, 95–104 (2015)
 46. Treigys, P., Marcinkevicius, V., Kazlauskas, A.: Analysis of Iris and Pupil Parameters for Stress Recognition. Information Technology and Control 41, 7–14

47. Niakšu, O., Balčiūnaitė, G., Kizlaitis, R., Treigys, P.: Semi-automation of Doppler spectrum image analysis for grading aortic valve stenosis severity. *Methods of information in medicine* 55, 23–30 (2016)
48. Huang, L.-K., Wang, M.-J.: Image thresholding by minimizing the measure of fuzziness. *Pattern Recognition* 28, 41–51 (1995)
49. Prewitt, J. M. S., Mendelsohn, M. L.: The analysis of cell images. *Annals of the New York Academy of Sciences* 128, 1035–1053 (1966)
50. Ridler, T.: Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 8, 630–632 (1978)
51. Li, C., Lee, C.: Minimum Cross Entropy Thresholding. *Pattern Recognition* 26(4), 617–625 (1993)
52. Kapur, J., Sahoo, P.: A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram. *Graphical Models and Image Processing* 29(3), 223–237 (1985)
53. Glasbey: An analysis of histogram-based thresholding algorithms. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing* 55(6), 532–537 (1993)
54. Kittler, J., Illingworth, J.: Minimum error thresholding. *Pattern Recognition* 19(1), 41–47 (1986)
55. Tsai, W. H.: Moment-Preserving Thresholding: a New Approach. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29, 377–393 (1984)
56. Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 9, 62–66 (1979)
57. Doyle, W.: Operation Useful for Similarity-Invariant Pattern Recognition. *Journal of the Association for Computing Machinery* 9(2), 259–267 (1962)
58. Shanbhag, A.: Utilization of Information Measure as a Means of Image Thresholding. *CVGIP: Graphical Models Image Processing* 56(5), 414–419 (1994)
59. Zack, G., Rogers, W., Latt, S.: Automatic Measurement of Sister Chromatid Exchange Frequency. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry* 25(7), 741–753 (1977)
60. Yen, J. C., Chang, F. J., Chang, S.: A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding. *IEEE Trans. on Image Processing* 4(3), 370–378 (1995)
61. Chow, C., Kaneko, T.: Automatic boundary detection of the left ventricle from cineangiograms. *Computers and Biomedical Research* 5(4), 388–410 (1972)
62. Fisher, R., Perkins, S., Walker, A., E., W.: *Hypermedia Image Processing Reference*. HIPR (2000)
63. Bradski, G.: *The OpenCV Library*. Dr. Dobb's Journal of Software Tools (2000)

64. Bresenham, J.: Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter. IBM Systems Journal 4(1), 25–30 (1965)
65. Topcon Corporation: Retinal Cameras. In: Topcon. Available at: www.topconmedical.com/categories/imaging-retinalcameras.htm
66. UK, C.: Retinal Camera. In: Canon. Available at: https://www.canon.co.uk/medical/eye_care/cr-2_af
67. Volk Optical: Ophthalmic Cameras. In: Volk. Available at: <https://volk.com/index.php/volk-products/ophthalmic-cameras/volk-pictor-plus-digital-ophthalmic-imager.html>
68. Jedmed : Portable Ffundus Camera. In: Jedmed. Available at: <https://www.jedmed.com/products/portable-fundus-camera>
69. Optomed Oy (Ltd.): Smartscope Pro Camera. In: Optomed. Available at: <https://www.optomed.com/smartscope-pro-camera>
70. Hanson Instruments: Fundus Camera. In: Hanson. Available at: www.hansoninstruments.co.uk/products/hand-held-non-mydratic-hd-fundus-camera-hfc
71. Šalna, V.: Optika : [vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams]. Vilnius : Enciklopedija, Vilnius (1993)
72. MacEvoy, B.: Part 4: Optical Aberrations. In: Astronomical Optics. Available at: <https://www.handprint.com/ASTRO/ae4.html>
73. Seidel, L.: Astronomische Nachrichten., 289–304 (1856)
74. Edmund Optics Inc: edmundoptics. In: Comparison of Optical Aberrations. Available at: <https://www.edmundoptics.com.tw/resources/application-notes/optics/comparison-of-optical-aberrations/>
75. Fischer, R., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R.: Optical System Design 2nd edn. SPIE Press, New York (2008)
76. Life, P.: Spherical Aberration. In: photographylife. Available at: <https://photographylife.com/what-is-spherical-aberration>
77. Abračinskienė, G.: Naujausių medžiagų, naudojamų akinių lęšiams fizikinių savybių analizė., 1–60 (2014)
78. Kingslake, R., Johnson, B.: Lens Design Fundamentals Second Edition edn. Elsevier (2010)
79. Bhootra, A.: Ophthalmic Lenses., New Delhi (2009)
80. Bayer, B.: Color imaging array. Patent US 3971065 A (1976)
81. Ramanath, R., Bilbro, G., Snyder, W., Sander III, W.: Demosaicking methods for Bayer color

- arrays. *Journal of Electronic Imaging* 11(3), 306–315 (2002)
82. Losson, O., Macaire, L., Yang, Y.: Comparison of color demosaicing methods. *Advances in Imaging and Electron Physics* 162, 173–265 (2010)
 83. Gunturk, B., Glotzbach, J., Altunbasak, Y., Schafer, R., Mersereau, R.: Demosaicking: color filter array interpolation. *Color Image Processing*, 44–54 (2005)
 84. Monno, Y.: Color Image Demosaicking. In: Yusuke Monno's Webpage. Available at: <http://www.ok.sc.e.titech.ac.jp/~ymonno/researches.html>
 85. Atkins, B.: Bob Atkins. In: Camera Lens Testing. Available at: http://bobatkins.com/photography/technical/lens_sharpness.html
 86. Booth, M., Neil, M., Juskaitis, R., Wilson, T.: Adaptive aberration correction in confocal microscope. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88–92 (2002)
 87. Powell, I.: Lenses for correcting chromatic aberration of the eye., 4152–4155 (1981)
 88. Fang, Y.-C., Liu, T.-K., Macdonald, J., Chou, J.-H., Wu, B.-W., Tsai, H.-L., Chang, E.-H.: Optimizing chromatic aberration calibration using a novel genetic algorithm. *Journal of Modern Optics* 53(10), 1411–1427 (2005)
 89. Millán, M., Otón, J., Cabré, E.: Dynamic compensation of chromatic aberration in a programmable diffractive lens. *Optics Express* 14(20) (2006)
 90. Kidger, M.: The Importance of Aberration Theory in Understanding Lens Design., 26–33 (1997)
 91. Gross, H., Blechinger, F.: Aberration Theory and Correction of Optical Systems. In : *Handbook of Optical Systems 3*. Wiley VCH (2007)
 92. Skeren, M., Svoboda, J., Kveeton, M., Hopp, J., Possolt, M., Fiala, P.: Diffractive elements for correction of chromatic aberrations of illumination. *Optics and Measurement International Conference* 48 (2013)
 93. Grey, D.: Aberration Theories for Semiautomatic Lens Design by Electronic Computers. *Journal of the Optical Society of America* 53(6), 672–676 (1963)
 94. Willson, R., Shafer, S.: Active Lens Control for High Precision Computer Imaging. *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on* (1991)
 95. Krotkov, E.: Exploratory visual sensing for determining spatial layout with an agile stereo camera system. *Doctoral Dissertation* (1987)
 96. Hugemann, W.: *Correcting Lens Distortions in Digital Photographs*. (2011)
 97. Rudakova, V., Monasse, P.: Precise Correction of Lateral Chromatic Aberration in Images. *Image and Video Technology* 8333, 12–22 (2013)

98. Kaufmann, V., Ladstädter, R.: Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration. CIPA 2005 XX International Symposium (2005)
99. Ma, L., Chen, Y., Moore, K.: A New Analytical Radial Distortion Model for Camera Calibration. Computer Science (2003)
100. Choi, K., Lam, E., Wong, K.: Source camera identification using footprints from lens aberration. Proceedings of SPIE (2006)
101. Devernay, F., Faugeras, O.: Straight lines have to be straight: automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments., 14–24 (2001)
102. Kang, S.: Automatic removal of purple fringing from images. (2005)
103. Kang, S.: Automatic Removal of Chromatic Aberration from a Single Image., 1–8 (2007)
104. Kim, B.-K., Park, R.-H.: Automatic detection and correction of purple fringing using the gradient information and desaturation. Signal Processing Conference, 2008 16th European (2015)
105. Yerushalmy, I., Hel-Or, H.: Digital Image Forgery Detection Based on Lens and Sensor Aberration. International Journal of Computer Vision 92(1), 71–91 (2011)
106. Chung, S.-W., Kim, B.-K., Song, W.-J.: Removing Chromatic Aberration by Digital Image Processing. Optical Engineering 49(6) (2010)
107. Cecchetto, B.: Correction of Chromatic Aberration from a Single Image Using Keypoints. Computer Science 525 (2014)
108. Kozubek, M., Matula, P.: An Efficient Algorithm for Measurement and Correction of Chromatic Aberrations in Fluorescence Microscopy. Journal of Microscopy 200(3), 206–217 (2000)
109. Freitag, B., Kujawa, S., Mul, P., Ringnalda, J., Tiemeijer, P.: Breaking the Spherical and Chromatic Aberration Barrier in Transmission Electron Microscopy. Ultramicroscopy 102(3), 209–214 (2005)
110. Krause, E.: Determination of chromatic aberration correction parameters. Available at: <http://www.erik-krause.de/index.htm?ca/index.htm>
111. Incorporated, A.: photoshop. In: <http://www.adobe.com>. Available at: <http://www.adobe.com/uk/products/photoshop.html>
112. Corporation, C.: PaintShop. In: <https://www.paintshoppro.com>. Available at: <https://www.paintshoppro.com/en/products/paintshop-pro>
113. Niemann, T.: PTLens/. In: <http://epaperpress.com>. Available at: <http://epaperpress.com/ptlens/>
114. photomodeler: photomodeler. In: <http://www.photomodeler.com>. Available at:

<http://www.photomodeler.com/products/default.html>

115. Almalence: Photoacute Studio. In: <http://photoacute.com>. Available at: <http://photoacute.com/studio/>
116. Salomon, D.: Data Compression 3rd Edition. Springer, New York (2004)
117. Habekost, M.: Which color differencing equation should be used? International Circular of Graphic Education and Research 6 (2013)
118. Cretee-Roffet, F., Thierry, D., Ladret, P., Nicolas, M.: The Blur Effect: Perception and Estimation with a New No-Reference Perceptual Blur Metric. Human Vision and Electronic Imaging XII 6492 (2007)
119. Morón Hernández, D. C., Díaz González, F. A., Triana Correa, J. S., Pinzón Cabrera, P. R.: Quality Evaluation of Chromatic Interpolation Algorithms for Image Acquisition System. Journal of Aerospace Technology and Management 8, 339–351 (2016)
120. More, J.: The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory., 105-116 (1977)
121. Willson, R., Shafer, S.: What is the center of the image? Computer Vision and Pattern Recognition 11(11) (1993)
122. Hartley, R., Kang, S.: Parameter-Free Radial Distortion Correction with Center of Distortion Estimation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 29(8), 1309–1321 (2007)
123. Wighton, P., Lee, T., Lui, H., McLean, D., Atkins, S.: Chromatic aberration correction: an enhancement to the calibration of low-cost digital dermoscopes. Skin Research and Technology 17, 339–347 (2011)
124. Chernov, N.: Circular and Linear Regression: Fitting Circles and Lines by Least Squares. CRC Press (2010)
125. Luhmann, T., Hastedt, H., Tecklenburg, W.: Modelling of Chromatic Aberration for High Precision Photogrammetry. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing 36 (2006)
126. Schoenberg, R.: Optimization with the Quasi-Newton Method. (2001)
127. Soares, J., Leandro, J., Cesar, R., Jelinek, H. F., Cree, M. J.: Retinal Vessel Segmentation Using the 2-D Gabor Wavelet and Supervised Classification. IEEE Transactions on Medical Imaging 25, 14–22 (2006)
128. Yang, Y., Huang, S., Rao, N.: An Automatic Hybrid Method for Retinal Blood Vessel Extraction. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science - Selected Problems of Computer Science and Control 18(3), 399–407 (2008)
129. Zana, F., Klein, J.-C.: Segmentation of vessel-like patterns using mathematical morphology

and curvature evaluation. IEEE Transactions on Image Processing 10, 1010–1019 (2001)

130. Michael, G. K. O., Connie, T., Teoh, A. B. J.: A Contactless Biometric System Using Palm Print and Palm Vein Features. Advanced Biometric Technologies (2011)
131. Sage, D. In: Biomedical Imaging Group. Available at: <http://bigwww.epfl.ch/sage/soft/localnormalization/>
132. In: OpenCv2.4.11.0. Documentation. Dilate method. Available at: <http://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/filtering.html?highlight=dilate#dilate>
133. Grand, L.: Light, Colour and Vision. Chapman and Hall, London (1968) 49
134. Student: The Probable Error of a Mean 6. Biometrika (1908)