

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
RADIOTECHNIKOS KATEDRA

Laimonas Mituzas

**AKIES SUKTIES POSŪKIO MATAVIMAS
VAIZDŲ APDOROJIMO METODU**
Magistro darbas

Vadovas

doc. dr. G. Daunys

ŠIAULIAI, 2005

SANTRAUKA

Mituzas L., Akies sukties posūkio matavimas vaizdų apdorojimo metodu: Elektronikos inžinerijos magistro darbas/mokslinis vadovas doc. dr. G. Daunys; Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas, Radiotechnikos katedra, – Šiauliai, 2005. – 59p.

Dar prieš keletą metų akies sukties posūkiui matuoti buvo teikiama pirmenybė ragenos ričių metodui. Skaitmeninių vaizdų apdorojimo technologijos pranašumai, matuojant erdvinius akies judesius, skatina naudoti videookulografinius metodus. Komercinių matuoklių gamintojai skelbia gerą jų tiekiamų produktų matavimo tikslumą, prilygstantį kontaktinių lęšių metodui. Deja, gamintojai nepublikuoja deklaruojamą tikslumą įrodančių analizių. Sukties matavimui pasirinkome E. Groen (1997) pasiūlytą metodą papildydami jį šablono tapdinimu tarpusavio koreliacijos būdu. Analizės metu sekamas rainelės rašto fragmentų poslinkis kadru atžvilgiu, todėl svarbu išryškinti išskirtines rašto žymes. Atlikti tyrimai padėjo išsiaiškinti koks tinkamiausias rainelės apdorojimas ir kokius optimaliausius koreliacijos parametrus pasirinkti. Rezultatai parodė, kad polinės tarpusavio koreliacijos metodas gali būti taikomas sukties judesių matavimui

SUMAARY

Mituzas L., Eye torsion movement measurement using image processing method: Master thesis of electronics engineer/research advisor Assoc. Dr. G. Daunys; Šiauliai University, Faculty of Technology, Radioengineering Department. – Šiauliai, 2005. – 59p.

Ocular torsion determination using search coils was a preferred method in a past few years. But advantages of the digital image processing techniques allows us to refuse search coils and use video-based techniques instead. The manufactures of the commercial video-based systems declare high accuracy of their product, but they don't publish result analysis in public to improve it. We chose to use E. Greon's (1997) suggested method with additional pattern matching using cross correlation. The landmarks of iris texture is used to track from frame to frame, so its important to enhance them. The researches helped to find out what is the most suitable iris processing and what are the optimal correlation parameters. The results showed, that a polar cross correlation can be applicable for ocular torsion measurement.

TURINYS

ĮŽANGA.....	8
2. AKIES SUKTIES POSŪKIS IR JO MATAVIMO METODAI	10
2.1. Akis ir jos judesiai, sukties posūkis.....	10
2.2. Sukties matavimo metodai.....	13
2.2.1. Ragenos ričių metodas.....	13
2.2.2. Videookulografinis metodas	14
3. SUKTIES POSŪKIO MATAVIMO VAIZDŲ APDOROJIMO METODAS	15
3.1. Vyzdžio nustatymas.....	15
3.2. Polinė transformacija.....	15
3.3. Filtravimas	17
3.3.1. Filtravimas sąsūkos metodu	18
3.4. Žymių parinkimas.....	19
3.5. Tapdinimas	19
3.5.1. Furjė transformacija.....	20
3.5.2. Vaizdo Furjė analizė.....	21
3.5.3. FFT sąsūka.....	22
4. PAKLAIDŲ ŠALTINIAI	25
4.1. Reikalavimai kadro kokybei	25
4.2. Sistemos paruošimas ir kalibravimas	25
4.3. Akies obuolio transformacija	26
4.4. Rainelės parašo išskyrimas	26
4.5. Išvados	27
5. MODELIAVIMAS	28
5.1. Modeliavimas matematinio paketu.....	28
5.2. Modeliavimo algoritmas ir parametrų parinkimas	28
5.3. Optimalaus filtravimo parinkimas	30
5.4. Metodo tikslumo priklausomybė nuo pasirinktų parametrų.....	47
5.5. Išvados	51
6. METODO PROGRAMINĖS ĮRANGOS ALGORITMŲ STRUKTŪRA.....	53
IŠVADOS IR SIŪLYMAI.....	57
LITERATŪRA	58

LENTELĖS

5.1. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 1-ojo filtravimo varianto	31 p.
5.2. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 1-ojo filtravimo varianto	32 p.
5.3. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 2-ojo filtravimo varianto	32 p.
5.4. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 2-ojo filtravimo varianto	33 p.
5.5. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 3-ojo filtravimo varianto	33 p.
5.6. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 1-ojo filtravimo varianto	34 p.
5.7. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 4-ojo filtravimo varianto	35 p.
5.8. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 4-ojo filtravimo varianto	35 p.
5.9. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 5-ojo filtravimo varianto	36 p.
5.10. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 5-ojo filtravimo varianto	36 p.
5.11. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 6-ojo filtravimo varianto	37 p.
5.12. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 6-ojo filtravimo varianto	37 p.
5.13. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 7-ojo filtravimo varianto	39 p.
5.14. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 7-ojo filtravimo varianto	39 p.
5.15. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 8-ojo filtravimo varianto	40 p.
5.16. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 8-ojo filtravimo varianto	40 p.

5.17. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 9-ojo filtravimo varianto	41 p.
5.18. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 9-ojo filtravimo varianto	41 p.
5.19. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 10-ojo filtravimo varianto	42 p.
5.20. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 10-ojo filtravimo varianto	42 p.
5.21. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 11-ojo filtravimo varianto	42 p.
5.22. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 11-ojo filtravimo varianto	43 p.
5.23. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 12-ojo filtravimo varianto	43 p.
5.24. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 12-ojo filtravimo varianto	44 p.
5.25. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių papildomo bandymo metu	46 p.
5.26. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių papildomo bandymo metu	47 p.
5.27. Rezultatai, kai $\alpha = 14,80^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai	48 p.
5.28. Rezultatai, kai $\alpha = 14,85^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai	48 p.
5.29. Rezultatai, kai $\alpha = 14,90^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai	49 p.
5.30. Rezultatai, kai $\alpha = 14,95^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai	49 p.
5.31. Rezultatai, kai $\alpha = 14,80^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai	49 p.
5.32. Rezultatai, kai $\alpha = 14,85^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai	50 p.
5.33. Rezultatai, kai $\alpha = 14,90^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai	50 p.
5.34. Rezultatai, kai $\alpha = 14,95^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai	50 p.
5.35. 2-D FFT laiko ir skaičiavimo sąnaudos	51 p.

PAVEIKSLAI

2.1 pav. Akies obuolio sandara	10 p.
2.2 pav. Akies sukimosi ašys	11 p.
2.3 pav. Akį judinantys raumenys	12 p.
2.4 pav. Tiesiųjų ir įstrižųjų raumenų veikimo linijos	12 p.
3.1 pav. Transformacija iš Dekarto į polinę koordinačių sistemą	16 p.
3.2 pav. Polinės transformacijos rezultatas	17 p.
3.3 pav. Rainelės juostos fragmentas su parinktomis kaukių vietomis po filtravimo	17 p.
3.4 pav. Filtrų branduolių pavyzdžiai	18 p.
3.5 pav. Originalus vaizdas ir FFT rezultatai	22 p.
3.6 pav. Vaizdo filtravimas dažnių srityje	23 p.
3.7 pav. MATLAB 6.1 paketu gautas koreliacijos rezultatas	24 p.
4.1 pav. Rainelės rašto lankai	27 p.
5.1 pav. Tapdinamo segmento ir kaukės pavyzdys	29 p.
5.2 pav. <i>Gauss'o</i> filtro analitinė išraiška ir filtro branduolys kai $\sigma = 1,4$	30 p.
5.3 pav. <i>Unsharp</i> filtro analitinė išraiška ir filtro branduolys kai $\alpha = 0,8$	30 p.
5.4 pav. Krašto aptikimo filtro branduolys	30 p.
5.5 pav. Originali transformuota rainelės juosta ir rankiniu būdu parinktomis kaukių vietomis	31 p.
5.6 pav. <i>Moving average</i> filtro branduolys	32 p.
5.7 pav. <i>Laplacian</i> filtro branduolys, kai $\alpha = 0,8$	33 p.
5.8 pav. <i>Prewitt horizontal</i> filtro branduolys	36 p.
5.9 pav. Horizontalaus <i>Prewitt</i> filtravimo rezultatas ir kaukių sutapimo vietos po koreliacijos	37 p.
5.10 pav. <i>Prewitt vertical</i> filtro branduolys	37 p.
5.11 pav. Vertikalaus <i>Prewitt</i> filtravimo rezultatas ir kaukių sutapimo vietos po koreliacijos	38 p.
5.12 pav. Horizontalaus <i>Prewitt</i> filtravimo ir vertikalaus <i>Prewitt</i> filtravimo sumos rezultatas bei kaukių sutapimo vietos po koreliacijos	39 p.
5.13 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kraštinės ilgio	44 p.
5.14 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kaukės dydžio	45 p.
5.15 pav. Horizontalaus ir vertikalaus <i>Prewitt</i> filtravimo rezultatas bei kaukių sutapimo vietos po koreliacijos	45 p.
5.16 pav. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie didesnių kraštinės ilgių	46 p.

5.17 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kaukės dydžio prie didesnių kraštinės ilgių	47 p.
6.1 pav. Apibendrinta programos veikimo algoritmo schema	53 p.
6.2 pav. Išsami analizės etapo algoritmo schema	54 p.
6.3 pav. Išsami tarpusavio koreliacijos algoritmo schema	55 p.

IŽANGA

Šiame darbe nagrinėjamas akies sukties posūkio (*angl. torsion*) matavimas naudojant vaizdų apdorojimo metodą.

Darbo tikslas - sukurti ir patikrinti algoritmą akies sukties judesių registravimui koreliaciniu metodu.

Darbo tikslai:

- susipažinti ir išnagrinėti esamus akies sukties posūkio matavimo metodus;
- sukurti patobulintą koreliacinio metodo algoritmą;
- įgyvendinti sukurtą algoritmą programinėje įrangoje;
- ištirti algoritmo efektyvumą.

Intensyvūs akių judesių tyrimai buvo pradėti daugiau kaip prieš tris dešimtmečius. Gautų rezultatų aptarimui kasmet Europoje ir JAV yra organizuojamos konferencijos. Lietuvoje šie tyrimai pradėti 1975 m. Kauno politechnikos instituto (KPI) Šiaulių fakultete (dabartinis ŠU technologijos fakultetas) vadovaujant prof. K.Kriščiūnui. Bendradarbiaujant su eile garsių buvusios Tarybų Sąjungos universitetų, buvo vykdomi moksliniai tyrimai operatoriaus darbo, atliekant regos uždavinius, analizei. Jiems buvo naudojami KPI Šiaulių fakultete suprojektuoti ir pagaminti akių, galvos judesių bei regos linijos krypties registravimo įtaisai, programinė įranga.

Visi akių judesių matavimo metodai yra kompromisiniai ir nei vienas iš jų nėra pritaikytas visoms situacijoms. Idealiai matavimo įrenginiui yra keliami tokie reikalavimai:

- neturėti kontakto su tiriamuoju;
- neriboti tiriamojo stebėjimo laiko;
- matavimo neapibrėžtis turi būti ne mažesnė už kelias laipsnio minutes (paprastai matavimo tikslumo neleidžia padidinti triukšmai, netiesiškumas, inertiškumas ir t.t.);
- didelis matavimo kampo diapazonas;
- judesių matavimo galimybė realiame laike;
- matuojamos trys akies kampines koordinatas;
- pritaikomas kiekvienam tiriamajam;
- suderinamumas su kūno ir galvos judesių matavimo prietaisais;

Daug metų akies sukties judesių matavimui ir analizei tarnavo kontaktinių ričių metodas, kuris pasižymi dideliu tikslumu bei plačiu matuojamo kampo diapazonu. Šio metodo savybės padėjo pagrindą akies mikrojudešių matavimui ir šiandien išlieka labai svarbios mikrojudešių matavimui, nors šis metodas yra invazinis tiriamojo atžvilgiu (reikalingi lęšiai, kurie yra dedami ant tiriamojo akies). Tiriamajam reikalinga anestezija eksperimento metu. Net ir naudojant tam skirtas specialias priemones išlieka galimybė pažeisti viršutinius akies audinius.

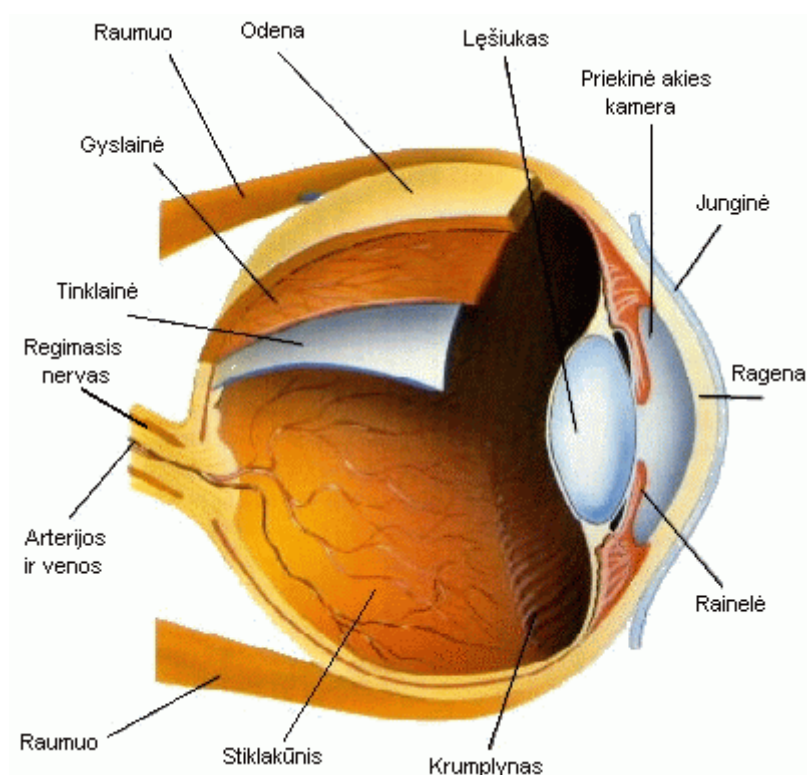
Dauguma akių judesių tyrinėtojų pastaraisiais metais atsisakė invazinio akių judesių matavimo metodo pereidami prie matavimų pagrįstų video metodais. Komercinių videookulografinių matuoklių gamintojai skelbia gerą jų tiekiamų produktų matavimo tikslumą, prilygstantį kontaktinių lęšių metodui. Deja, gamintojai nepublikuoja deklaruojamą tikslumą įrodančių analizių.

Šį darbo sudaro keletas skyrių, kuriuose pristatomi akių sukties judesiai bei jų matavimo metodai, išnagrinėtas matavimo metodas naudojant vaizdų apdorojimą, analizuojami matavimo paklaidų šaltiniai, sukties modeliavimo tyrimai ir analizė. Darbas baigiamas pateiktomis programinės įrangos algoritmų struktūrinėmis schemomis ir darbo išvadomis.

2. AKIES SUKTIES POSŪKIS IR JO MATAVIMO METODAI

2.1. Akis ir jos judesiai, sukties posūkis

Akis – svarbiausias žmogaus jutimo organas. Akis priima iš aplinkos daugiausia informacijos. Jos pagalba žmogus orientuojasi aplinkoje ir pažįsta pasaulį. Regos organo veikla paremta šviesos, spalvos, formos, dydžio ir kitų požymių analize. Regos organą sudaro akies obuolys su akies priediniais organais (akies obuolys priima tam tikro ilgio šviesos bangas). Regimoju nervu nerviniai impulsai sklinda į nervinius regos centrus galvos smegenyse. Regos analizavimo centrai yra vidurinėse ir tarpinėse smegenyse bei galvos smegenų žievės pakaušinėje skiltyje. Detalesnė akies obuolio sandara pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Akies obuolio sandara [1]

Matuojant akies sukties judesius naudojat video matavimo metodą svarbiausia akies obuolio dalis yra rainelė.

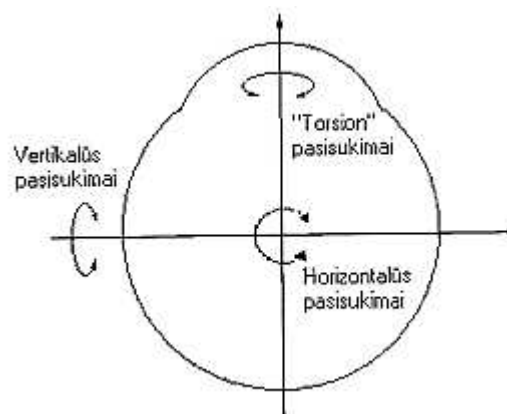
Rainelė (*angl. iris*) - priekinė akies obuolio kraujagyslinio dangalo dalis. Ji skiria priekinę akies kamerą nuo užpakalinės. Rainelė sudaryta iš dviejų sluoksnių: priekinio - strominio (mezoderminės kilmės) ir užpakalinio - pigmentinio epitelio (ektoderminės kilmės). Pastarasis apsaugo akį nuo per didelės šviesos. Akies optinėje sistemoje rainelė atlieka diafragmos vaidmenį. Rainelės centre yra apvali anga - vyzdys, reguliuojanti į akį patenkančios šviesos srautą. Rainelės stromos vyzdinėje dalyje esantis vyzdžio sutraukiamasis raumuo (*med. sphincter*

pupillae), inervuojamas parasimpatinio nervo skaidulų, ir krumplyninėje dalyje esantis vyzdžio plečiamasis raumuo (*med. dilatator pupillae*), inervuojamas simpatinio nervo skaidulų, reguliuoja vyzdžio plotį. [2]

Rainelės požymiai:

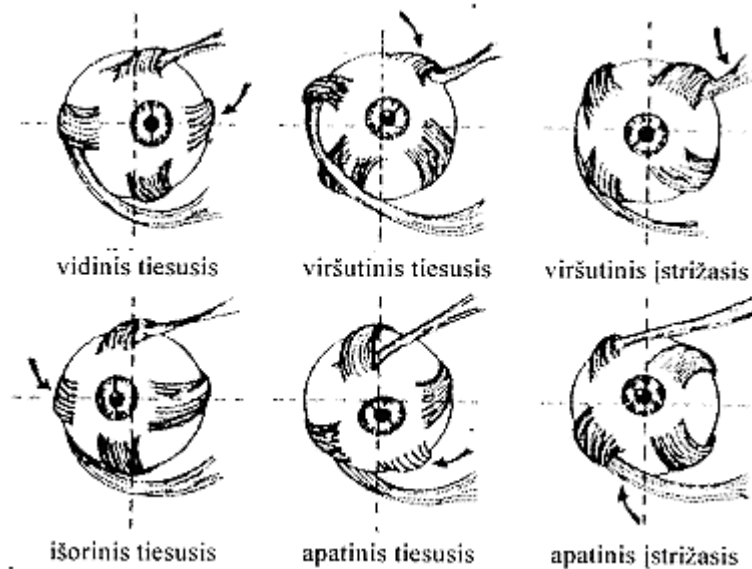
- rainelės paviršių raižo daugybė spinduliais išsidėsčiusių iškylių ir įdubų, kurios sudaro rainelės reljefą,
- paprastai abiejų akių rainelių spalva yra vienoda,
- visi baltaodžiai gimsta su melsvomis rainelėmis, nes pigmentinės ląstelės pradeda vystytis tik pirmaisiais-antraisiais gyvenimo metais,
- tiek išnešiotų, tiek neišnešiotų naujagimių vyzdys dažniausiai plečiasi blogai, nes vyzdžio plečiamasis raumuo pradeda vystytis vėliau. [2]

Žmogaus akies raumenų sistemą išsivystė taip, kad tiktų mus supančios trimatės erdvės stebėjimui ir orientavimuisi joje. Akies optinė ir raumenų sistema nuolat veikia besistengdama stebimo objekto ar objektų visumos projekciją nukreipti į jautriausią tinklainės sritį – geltonąją duobutę (*angl. fovea*). Išlaikyti stabilų stebimą vaizdą padeda ne tik horizontalūs ir vertikalūs akių judesiai, bet ir sukstis (*angl. torsion*). Pastaroji egzistuoja kaip posūkis apie žiūros liniją ir pasireiškia esant galvos ar kūno pakrypimams. Žmogaus akių suksties posūkis nėra didelis: vidutiniškai suksties reakcija siekia iki 6°. Akies sukimosi ašys pavaizduotos 2.2 paveiksle.



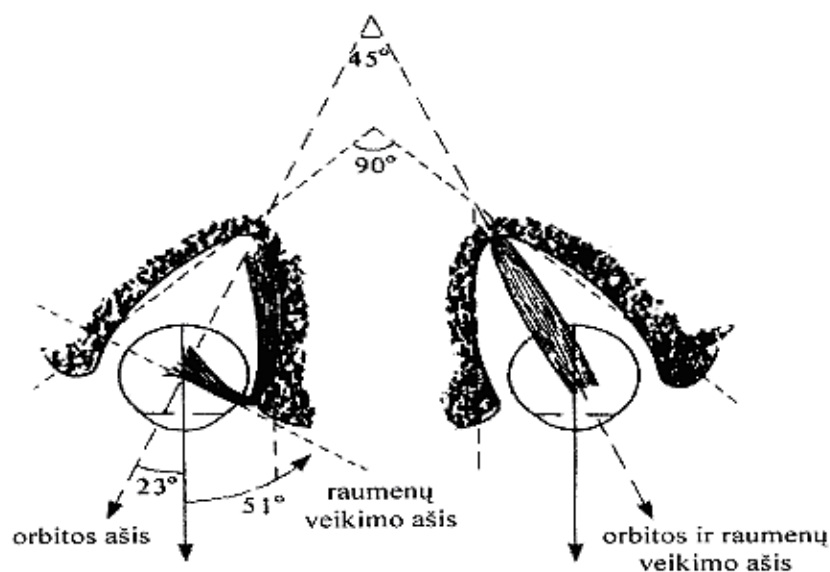
2.2 pav. Akies sukimosi ašys

Akies obuolį įvairiomis kryptimis sukinėja šeši raumenys (žr. 2.3 pav.). Keturi iš jų yra tiesieji: vidinis tiesusis (*lot. rectus medialis*), išorinis tiesusis (*lot. rectus lateralis*), viršutinis tiesusis (*lot. rectus superior*), apatinis tiesusis (*lot. rectus inferior*). Du raumenys įstrižieji: viršutinis įstrižasis (*lot. rectus abliquus superior*), apatinis įstrižasis (*lot. rectus abliquus inferior*).[3]



2.3 pav. Akį judinantys raumenys [3]

Išorinis tiesusis raumuo suka akį į išorę, o vidinis tiesusis – į vidaus pusę nosies link. Viršutinio ir apatinio raumenų veikimo linija sudaro 23 laipsnių kampą su linija, statmena veido plokštumai, kuri vadinama pirmine linija (žr. 2.4 pav.). Todėl viršutinis tiesusis raumuo kelia akies obuolį į viršų ir kartu suka į vidinę pusę. Apatinis tiesusis raumuo suka akies obuolį žemyn ir taip pat, kaip viršutinis tiesusis, suka į vidinę pusę. Įstrižiniai raumenys sukelia akių sukties judesius. Viršutinio bei apatinio įstrižųjų raumenų veikimo linija sudaro su pirmine linija 53 laipsnių kampą. Todėl jie ne tik suka akį apie pirminę liniją, bet taip pat suka akį horizontalia kryptimi. Normaliose sąlygose, akies raumenys yra susiję su vizualinio pasaulio sekimu, vaizdo fiksavimu ir verguojamaisiais judesiais, kurie garantuoja stabilią abiakę (*angl. binocular*) fiksaciją. Skersiniai raumenys sukelia didelius akies posūkius. Įstrižiniai raumenys sukelia ribotus sukties – slenkamuosius akies judesius.



2.4 pav. Tiesiųjų ir įstrižųjų raumenų veikimo linijos [3]

Akis, kaip kietas kūnas, turi tris sukamųjų judesių laisvės laipsnius, todėl jos erdvinė orientacija aprašoma trimis kampais. Atrodytų, kad žiūros linijos orientacijai nustatyti pakanka tik dviejų kampų, kadangi trečiasis posūkis apie pačią žiūros liniją, vadinamas suktimi (*angl. torsion*), nėra didelis. Suktis pasidaro didesnė, kai stebimas objektas yra arti mūsų. Tuomet tarp akių padidėja vergencijos kampas. Sukties kampas yra proporcingas vergencijos kampo ir vertikalaus kampo sandaugai [4]. Sukties matavimas yra dar labiau aktualesnis, kai tiriamojo galva gali laisvai judėti, nes galvos pakreipimas į šoną sukelia tokio pat kampo akies sukčių.

Gyvūnams, turintiems akis šonuose (kiškis, elnias), įstrižieji raumenys atlieka elementarią funkciją, t.y. sukamuoju judesiu atstato akių padėtį vykstant kūno arba galvos sukinėjimams ar kraipymams [5]. Gyvūnams, turintiems akis galvos priekyje, tame tarpe ir žmogui, įstrižieji raumenys atlieka daugiau funkcijų. Evoliucijos eigoje įstrižieji raumenys prisitaikė prie išsivysčiusio abiakio (*angl. binocular*) regėjimo. Elementarioji funkcija – tai staigūs sukamieji sakadiniai judesiai, kurie atstato akis į pradinę padėtį įvykus kūno ar galvos pakrypimams. Šalia elementarių sukties judesių, įstrižųjų raumenų dėka, gaunami sukamieji verguojamieji (*angl. cyclovergence*) judesiai (akys juda priešingomis kryptimis ir abi sukamos apie savo ašį į vidinę arba į išorinę pusę) ir sukamieji apgręžiamieji (*angl. cycloverversion*) judesiai (akys juda ta pačia kryptimi, abi sukamos apie savo ašį, tik viena į vidinę, o kita į išorinę pusę). Žmogaus įstrižinių raumenų, tuo pačiu ir sukties, kontroliavimo sistema sukuria minėtus judesius, tuo palengvindama stereoskopinį vaizdo suvokimą. Kadangi sukties judesiai padeda suvokti stereoskopinį vaizdą, su sukties matavimu diagnozuojamas strabizmas ir kitos neurologinės ar patologinės ligos [5].

2.2. Sukties matavimo metodai

Sukties matavimui naudojami du pagrindiniai metodai: elektromagnetinis ričių metodas (*angl. search coil*) [6] ir videookulografinis metodas [7].

2.2.1. Ragenos ričių metodas

Elektromagnetinį kontaktinių ragenos ričių metodą 1963 metais pasiūlė D.A. Robinson'as [8]. Matavimo principas pagrįstas mažų ričių magnetine indukcija. Naudojamos mažos, labai jautrios magnetiniam laukui kilpos, kurios tvirtinamos ant kontaktinio lęšio. Matuoti sukties posūkiui naudojama papildoma aštuoniukės formos ritė. Toks lęšis dedamas ant tiriamojo asmens akies. Aukšto dažnio kintantį magnetinį lauką suformuoja 3 poros elektromagnetinių ričių, kurios pritvirtintos prie 1 metro dydžio kubo briaunų. Tiriamasis asmuo talpinamas tokio kubo viduje. Dvi ritės esančios ant priešingų sienelių generuoja to paties dažnio magnetinį lauką. Vijos esančios tiriamojo kairėje ir dešinėje generuoja horizontalios krypties magnetinį lauką. Vijos

esančios virš tiriamojo ir apačioje – vertikalios krypties lauką, o vijos esančios prieš ir už tiriamojo – statmeną abiem laukam. Judant akiai kontaktinio lęšiuko ritėse dėl elektromagnetinės indukcijos fiksuojamas elektromagnetinio lauko pasikeitimas, kuris yra proporcingas kampiniam akies posūkiui.

Šiaulių universiteto Technologijos fakulteto inžinieriai savo tyrimuose [9] naudojo komercinę *Skalar Medical bv* matavimo įrangą [10].

Dėl pasiekiamo didelio tikslumo, dar prieš keletą metų buvo teikiama pirmenybė šiam ragenos ričių metodui, neatsižvelgiant į didelius šio metodo trūkumus: ritės slydimas (esant suktyies posūkiams), ribotas eksperimento laikas (dėl akių nuovargio ir skausmo iki 40 min.), brangūs kontaktiniai lęšiai. Šie apribojimai ir skaitmeninių vaizdų apdorojimo technologijos pranašumai matuojant erdvinius akies judesius skatina naudoti videookulografinius metodus.

2.2.2. Videookulografinis metodas

Akies judesių matavimo vaizdo apdorojimo sistemos pasidalino į dvi kategorijas: į tas, kurios judesių sekimui naudoja natūralias arba dirbtines akies žymes; ir į sistemas, kurios naudoja įvairius tarpusavio koreliacijos (*angl. cross-correlation*) variantus. Pastaruoju atveju suktyies nustatymui naudojami lanku išsidėstę rainelės paviršiaus intensyvumo taškai.

Tarpusavio koreliacijos metodas pagrįstas natūraliu lanko formos rainelės rašto sekimu, be abejonės yra taikytinas didesniai tiriamųjų individų ratui, esant galybei rainelės rašto variantų tarp skirtingų individų. Tarpusavio koreliacija labai tiksliai išmatuoja suktyies judesius nesant horizontalių ir vertikalų akies deviacijų, bet rezultatai žymai pablogėjai jei neatsižvelgiama į akies obuolio geometrinę sferos formą, akiai esant šoninėse padėtyse. Koreliacija pasirinkta dėl to, kad šis metodas yra išnagrinėtas ir naudojamas [11], [12]. Be abejo bus ieškoma kitokių koreliacijos variantų ar kitokių matematinių metodų.

Rezultatų kokybę įtakoja netik naudojamų matematinių metodų pasirinkimas. Paklaidų dydžius lemia techninės įrangos ypatybės, natūralios akies savybės: akies geometrinė forma, ragenos optinis efektas, natūralūs akies judesiai, ašarų liaukos įnešamas drėkinimas. Darbe aptariami ir kiti galimi klaidų šaltiniai.

3. SUKTIES POSŪKIO MATAVIMO VAIZDŲ APDOROJIMO METODAS

Akies sukties matavimas susideda iš dviejų vienas po kito sekančių etapų: akies atvaizdo gavimo (*angl. image acquisition*) ir gauto atvaizdo apdorojimo (*angl. image processing*). Tiriamojo akies judesiai fiksuojami skaitmenine juodai-balta vaizdo kamera prijungta prie kompiuterio, kuriame atliekamas gautų atvaizdų apdorojimas.

Tiriamojo galva eksperimento metu fiksuojama specialiame įtvare. Gerai kadro kokybei būtinos kelios sąlygos: pakankamas apšvietimas, minimalus atspindinčių daiktų kiekis. Užfiksuotas akies atvaizdas perduodamas į kompiuterį tolimesniam apdorojimui. Deja šiandienos kompiuterinė technika neleidžia vaizdo apdoroti realiame laike, šiai problemai išspręsti turėtų būti naudojami specializuoti integriniai grandiniai.

Užfiksuotą kadra nuo rezultatų skiria keltas apdorojimo etapų pasiūlytų Eric Groen [13]. Pritaikius juos sau, visą procesą sudarytų šeši žingsniai:

- 1) akies vyzdžio centro koordinacių ir vyzdžio kontūro nustatymas;
- 2) rainelės išskyrimas iš kadro ir jos polinė transformacija;
- 3) rainelės juostos filtravimas;
- 4) išskirtinių žymių parinkimas;
- 5) šablono tapdinimas (*angl. pattern matching*) naudojant tarpusavio koreliaciją;
- 6) sukties posūkio reikšmės apskaičiavimas.

3.1. Vyzdžio nustatymas

Vyzdžio kontūro nustatymas svarbi procedūra tiriant akies mikrojudesius. Pagal vyzdžio kontūro reikšmes apskaičiuojamos vyzdžio centro koordinatės, kurios ir yra aktualiausi duomenys šiame žingsnyje nulemiantys tolimesnių rezultatų tikslumą. Koordinatėms nustatyti buvo pasirinktas aproksimacijos apskritimu algoritmas išnagrinėtas N. Ramanausko darbuose [14], [15].

3.2. Polinė transformacija

Turėdami vyzdžio centro koordinates ir vyzdžio spindulį, žinome rainelės lokalizacijos vietą kadre. Galime atlikti rainelės transformaciją iš Dekarto į polinę koordinacių sistemą (žr. 3.1 pav.). Transformacijos rezultatas pavaizduotas 3.2 paveiksle.

Lokalizavę rainelės vietą kadre, apibrėžiame žiedinę rainelės zoną pagal jos vidinę ir išorinę kraštinę. J.Daugman pasiūlyta rainelės transformacija [16] iš Dekarto koordinacių

sistemos į polinę sistemą leidžia dominančią rainelės sritį pateikti stačiakampio pavidalu (žr. 3.2 pav.). Tokios transformacijos dėka kompensuojamas rainelės rašto tempimasis keičiantis vyzdžio dydžiui ir išskleidžiama dažninė informacija užkoduota žiedinėje rainelės tekstūroje. Tuo pačiu, gauname įprastą duomenų apdorojimo formą. Parametras θ ($\theta \in [0; 2\pi]$) nusako kampą, o parametras ρ ($\rho \in [0; 1]$) apibūdina polinę koordinačių sistemą. Taigi sekancios lygtis realizuoja polinės transformacijos išraišką $I(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta)) \rightarrow I(\rho, \theta)$:

$$\begin{cases} x(\rho, \theta) = (1 - \rho) * x_p(\theta) + \rho * x_i(\theta), \\ y(\rho, \theta) = (1 - \rho) * y_p(\theta) + \rho * y_i(\theta); \end{cases} \quad (3.1)$$

Kur:

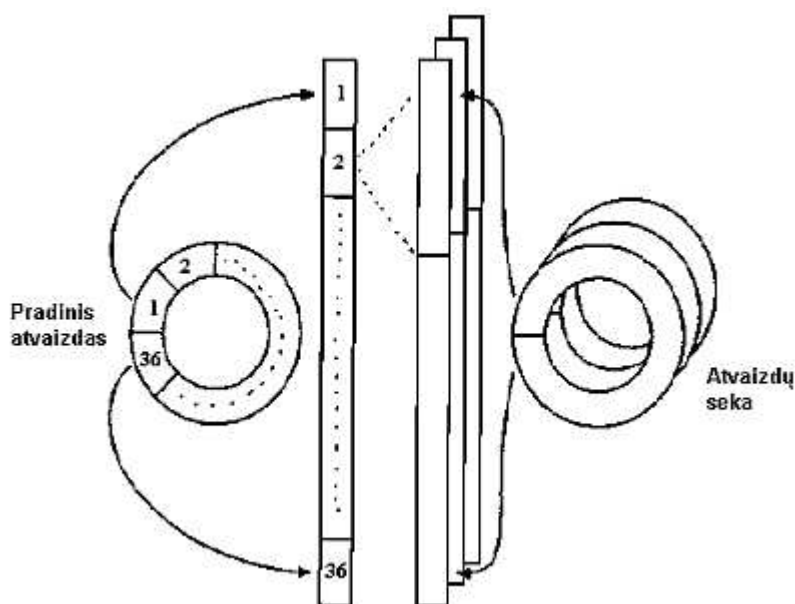
$$\begin{cases} x_p(\theta) = x_{p0}(\theta) + r_p * \cos(\theta), \\ y_p(\theta) = y_{p0}(\theta) + r_p * \sin(\theta); \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} x_i(\theta) = x_{i0}(\theta) + r_i * \cos(\theta), \\ y_i(\theta) = y_{i0}(\theta) + r_i * \sin(\theta); \end{cases} \quad (3.2)$$

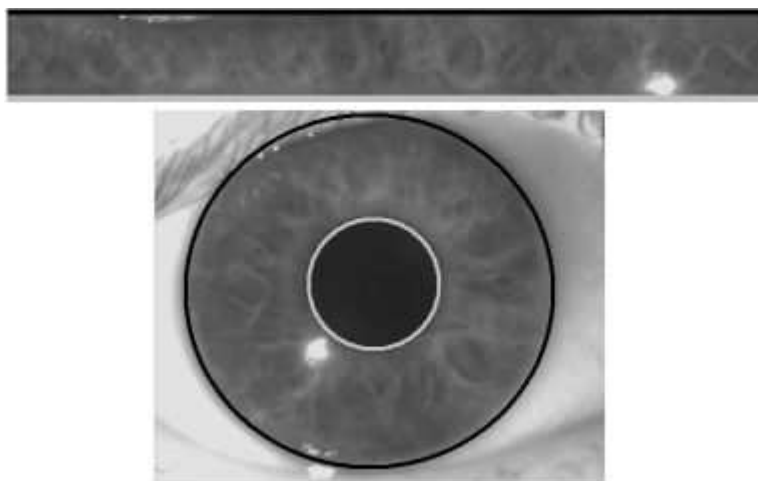
čia r_p ir r_i atitinkamai yra vyzdžio (*angl. pupil*) ir rainelės (*angl. iris*) spinduliai, o $(x_p(\theta), y_p(\theta))$ ir $(x_i(\theta), y_i(\theta))$ yra vyzdžio ir limbo kraštų koordinatės kryptimi θ .

Ribinės zonos (rainelės/vyzdys ir rainelė/odena) neištraukiamos į rainelės žiedą transformacijai. Taip daroma siekiant išvengti pašalinių tekstūrų intervencijos į rainelės raštą, kadangi minėtosios ribinės zonos dažnai pasižymi aukšto intensyvumo reikšmėmis.

Kampas θ kvantuojamas į $0,25^\circ$ pločio elementus (suapvalintas iki artimiausio taško laipsnio rodiklio), radialinis žiedas išskaidomas į 39 dalis. Galiausiai, rainelę sudaro 39×1440 elementų stačiakampis. Pasirinkus kvantavimo kampą (žingsnį) lygų $0,25^\circ$, gaunama rainelės juosta, kurios aukštis - 100 taškų (pikselių), o ilgis 1440 taškų.



3.1 pav. Transformacija iš Dekarto į polinę koordinačių sistemą



3.2 pav. Polinės transformacijos rezultatas: šviesi horizontali linija juostos apačioje žymi rainelės ribą su vyzdžiu, o tamsi viršuje - išorinę rainelės ribą.

3.3. Filtravimas

Filtravimo esmė - gauti rainelės juostą su ryškiai pasižyminčiu raštu. Juosta filtruojama trimis etapais erdvinėje srityje (*angl. spatial domain*) sąsūkos (*angl. convolution*) būdu. Tam naudojamas 3×3 dydžio filtrų tripletas. Bandymų metu, kurių rezultatai pateikiami 5 skyriuje, buvo nustatyta, kokia filtravimo kombinacija tinkamiausia. Pirmiausia naudojamas *Gauss'o* glotninimo filtras (*angl. Gaussian smoothing*), kuris pašalina triukšmus ir radialines linijas po transformacijos. Sekančiam apdorojimo etapui, po atliktų bandymų, buvo pasirinktas *Prewitt* horizontalus ir vertikalus filtravimas. Gautą rezultatą galiausiai filtruojame *unsharp* tipo filtru, kad paryškinti gautą raštą. Filtravimo rezultato fragmentas pavaizduotas 3.3 paveiksle.

Vaizdo apdorojimas pagrįstas tomis pačiomis dvejomis technikomis kaip tradiciniame skaitmeninių signalų apdorojime: *sąsūka* ir *Furjė analize*. Kadangi vaizduose užkoduota informacija yra erdvinėje srityje, sąsūka yra aktualesnė. Naudodami tiesinį vaizdų filtravimą galime daugeliu būdu juos pagerinti: paaštrinti objektų kraštai, pašalinimas atsitiktinis triukšmas, koreguojamas netolygus apšvietimas, susiliejimas ir judesys. Šios operacijos atliekamos sąsūkos būdu naudojant originalų atvaizdą ir atitinkamą sąsūkos filtro branduolį. Pagrindinė vaizdų sąsūkos problema – milžiniški skaičiavimų kiekiai, kuriuos reikia atlikti ir iš to išaugančios laiko sąnaudos operacijai atlikti. Dėl to pasitelkiami labai maži filtrų branduoliai, dažniausiai 3×3 taškų dydžio. Toks filtro branduolio dydis pakankamas, kad paveiktų atvaizdo kraštus.



3.3 pav. Rainelės juostos fragmentas su parinktomis kaukių vietomis po filtravimo

3.3.1. Filtravimas sąsūkos metodu

Sąsūka - kaimyninė operacija, kurios rezultatas – gretimų taškų svorių suma. Svorius nurodo sąsūkos branduolys. Tai atliekama perskaičiuojant kiekvieną tašką rezultato atvaizde dauginant ir sumuojant atitinkamus 9 taškus originaliame atvaizde. Vaizdų sąsūka veikia lygiai taip pat kaip ir vienmatė sąsūka. Šiuo požiūriu atvaizdai gali būti laikomi impulsų suma.

Kai atvaizdas filtruojamas 3×3 dydžio delta funkcija (vienetas apsuptas aštuonių nulii) (žr. 3.4 a pav.), atvaizdas lieka nepakitęs.

0	0	0
0	1	0
0	0	0

Delta funkcija

a)

0	0	0
0	1	0
0	0	-1

Postūmis ir atimtis

b)

-1/8	-1/8	-1/8
-1/8	1	-1/8
-1/8	-1/8	-1/8

Krašto aptikimas

c)

-k/8	-k/8	-k/8
-k/8	k+1	-k/8
-k/8	-k/8	-k/8

Krašto sustiprinimas

d)

3.4 pav. Filtrų branduolių pavyzdžiai

Filtru, kurio branduolys sudarytas iš vieneto centre ir vieno neigiamo vieneto (žr. 3.4 b pav.), atliekama postūmio ir atimties operaciją (*angl. shift and subtract*), kadangi pastumta atvaizdo versija (atitinka -1) yra atimama iš originalaus atvaizdo (atitinka 1). Apdorojimas tokiu filtru sudaro vaizde optinę apgaulę, kad kai kurie objektai yra arčiau arba toliau nei fonas, taip susidaro 3D efektas.

Kitas filtras atlieka krašto aptikimo (*angl. edge detection*) procedūrą (žr. 3.4 c pav.). Kiekvienas kraštelis originaliame atvaizde yra transformuojamas į siauras tamsias ir šviesias juostas einančias lygiagrečiai originaliam kraštui. Slenksčio analizė atvaizde izoliuotų tamsias arba šviesias juostas, taip gaunamas paprastas algoritmas aptikti kraštams paveikslėlyje.

Įprasta vaizdo apdorojimo procedūra – krašto sustiprinimas (*angl. edge enhancement*) atliekamas ketvirtuoju filtru (žr. 3.4 d pav.). Ši operacija dar vadinama aštravimo (*angl. sharpening*) operacija.

Supaprastinta sąsūkos išraiška vienamačių diskretinių signalų atveju:

$$y[i] = h[i] * x[i]; \quad (3.1)$$

čia $y[i]$ išėjimo signalas, $h[i]$ sąsūkos branduolys arba sistemos impulso reakcija, $x[i]$ pradinis signalas.

Vienamačiu atveju signalų sąsūkos sumos išraiška:

$$y[i] = \sum_{j=0}^{M-1} h[j] \cdot x[i - j]; \quad (3.2)$$

čia $h[n]$ yra M taškų ilgio signalas, i nurodo kuri išėjimo signalo imtis yra skaičiuojama, indeksas j naudojamas sąsūkos „mašinos“ viduje. Kai j keičiasi nuo 0 iki $M-1$, kiekviena imtis impulso reakcijoje, $h[j]$, yra dauginama iš atitinkamos įėjimo signalo imties, $x[i-j]$. Visi šie daugybos rezultatai sudaro išėjimo signalo imtį.

Vaizdų sąsūkos analitinė išraiška atrodo taip [16]:

$$y[r, c] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} h[k, j] \cdot x[r-k, c-j]; \quad (3.3)$$

čia vaizdas $y[]$ gaunamas sąsūkos metodu sudauginus vaizdus $h[]$ ir $x[]$. Vaizdas $h[]$ yra $M \times M$ taškų dydžio, kur indeksas keičiasi nuo 0 iki $M-1$. Indeksai j ir k naudojami masyvo $h[]$ ciklui per eilutes ir stulpelius.

Reikia pastebėti, kad po vaizdo filtravimo sąsūkos būdu keičiasi vaizdo dydis. Jei turime $N \times N$ filtro branduolį ir $M \times M$ vaizdą, tai rezultato vaizdas bus $(N+M-1) \times (N+M-1)$ dydžio.

3.4. Žymių parinkimas

Po filtravimo juosta padalinama į 36 segmentus, kurių kiekvienas 40 taškų ilgio ir 100 taškų aukščio. Kiekvienam tokiam segmentui parenkama viena žymė. Tokia žymė galėtų būti žemą ir aukštą intensyvumą turinčių plotų sankirta. Tokios sankirtos taškas taps kaukės (*angl. mask*) centru. Kaukės dengiančių požymių lokalizavimas kitame kadre ir jų padėčių skirtumas, tarp prieš tai buvusio kadro ir esamo, įgalina spręsti apie sukties dydį. Reikia paminėti apie du galimus žymių parinkimo atvejus: kai žymės parenkamos pradiniam atvaizde (*angl. reference image*) ir ieškomos visuose kituose kadruose, arba žymės parenkamos iš prieš tai buvusio kadro kaskart pereinant prie naujo kadro analizės.

3.5. Tapdinimas

Šablono tapdinimas – paskutinis etapas surandant sukties posūkio dydį. Šiuo atveju šabloną atitinka anksčiau minėta kaukė, kurios rekomenduojamas dydis nuo 25×25 iki 37×37 taškų. Tapdinimo esmė – surasti kaukės sutapimo su rainelės tekstūra vietą, tam naudojant tarpusavio koreliaciją. Kaukės ir tam tikros rainelės srities koreliacija duoda piką toje vietoje, kurioje įvyksta maksimalus sutapimas. Siekiant pagreitinti pačia operaciją, kadangi kiekvienam kadru atliekamos 36 tarpusavio koreliacijos, kaukė ir paieškos zona koreliuojamos dažnių srityje (*angl. frequency domain*). Sąsūka erdvinėje srityje atitinka daugybą dažnių srityje, o daugyba žymiai paprastesnė matematinė operacija.

3.5.1. Furjė transformacija

Furjė teorema sako, kad kiekvieną periodinį signalą galime išskaidyti į dedamąsias. Furjė transformacijos funkcija analitinėje formoje atrodo taip:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-2\pi ft} dt ; \quad (3.4)$$

čia $H(f)$ dažninė funkcija, $h(t)$ laiko funkcija.

Dvimačio signalo atveju transformacijos funkcija:

$$H(f, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \varphi) e^{-i2\pi(ft + \omega\varphi)} dt d\varphi ; \quad (3.5)$$

atvirkštinė Furjė transformacija dvimačiam atvejui:

$$h(t, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(f, \omega) e^{i2\pi(ft + \omega\varphi)} df d\omega ; \quad (3.6)$$

Diskretinė Furjė transformacija, sutrumpintai DFT, aprašoma kaip diskretinė funkcija $f(m, n)$, kuri turi reikšmes baigtinėje srityje $0 \leq m \leq M$ ir $0 \leq n \leq N-1$. Dvimatė $M \times N$ DFT ir atvirkštinė $M \times N$ DFT susijusi sekančiais:

$$F(p, q) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) e^{-j(2\pi/M)pm} e^{-j(2\pi/N)qn} ; \quad (3.7)$$

čia: $p = 0, 1, \dots, M-1;$
 $q = 0, 1, \dots, N-1.$

Atvirkštinė:

$$f(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} F(p, q) e^{-j(2\pi/M)pm} e^{-j(2\pi/N)qn} ; \quad (3.8)$$

čia: $m = 0, 1, \dots, M-1;$
 $n = 0, 1, \dots, N-1.$

Reikia paminėti, kad kaukė prieš konvertuojant į dažnių sritį filtruojama krašto radimo (*angl. edge detection*) filtru. Bandymų rezultatai patvirtino tokio filtravimo būtinumą.

3.5.2. Vaizdo Furjė analizė

Furjė analizė vaizdų apdorojime naudojama beveik lygiai taip pat kaip ir vienmačių signalų apdorojime. Beje, vaizdai neturi užkoduotos informacijos dažninėje srityje, todėl dažninių filtrų modeliavimas yra visiškai nenaudingas vaizdų apdorojime. Pagrindinė bet kokio atvaizdo savybė – riba skirianti vieno objekto kontūrą nuo kito. Būtent objektų kraštai sudaryti iš plataus spektro dažnio dedamųjų, todėl modifikuoti atvaizdą manipuliuojant dažnių spektrą yra netikslinga. Vaizdų apdorojimo filtrai projektuojami erdvinėje srityje.

Nežiūrint į tai, Furjė vaizdų analizė turi keletą svarbių savybių. Pavyzdžiui, sąsūka erdvinėje srityje atitinka daugybą dažnių srityje. Tai svarbu, kadangi daugyba yra paprastesnė matematinė operacija nei sąsūka.

Norint rasti vaizdo dažninį spektrą, būtina, kad originalų vaizdą sudarytų N eilučių ir N stulpelių, kur N yra antro laipsnio kartotinis, t.y. sudarytų 256, 512, 1024 ir t.t. taškų. Jei vaizdo dydis yra mažesnis, trūkstamos reikšmės užpildomos nulinės reikšmės taškais. Vienas tokio dydžio masyvas sudarys realiųjų vaizdo masyvą, antrasis – tokio paties dydžio menamąjį vaizdo masyvą.

Vaizdų Furjė transformacijos algoritmas yra gana paprastas: atliekamos vienmatės Furjė transformacijos vaizdo eilutėms, o paskiau vienmatės Furjė transformacijos vaizdo stulpeliams. Pirmos eilutės Furjė transformacijos realusis rezultatas patalpinamas į pirmąją realiojo masyvo eilutę, o menamasis rezultatas į menamojo masyvo pirmąją eilutę. Taip transformacija atliekama visoms vaizdo N eilutėms, o vėliau ir visiems N vaizdo stulpeliams.

Kadangi vaizde vertikali ir horizontali kryptys yra ekvivalentiškos, šis algoritmas gali būti atliktas pirmiau transformuojant stulpelius, o paskui eilutes. Nepriklausomai nuo eiliškumo, rezultatas identiškasis. FFT duomenis išdėsto taip, kad žemos amplitudės dažnio dedamosios išsidėsto dvimačio spektro masyvo kampuose, o aukštos amplitudės dažnio dedamosios išsidėsto masyvo centre. Atvaizdo atvirkštinė Furjė transformacija apskaičiuojama gaunant kiekvienos eilutės atvirkštinę Furjė transformaciją, ir vėliau kiekvieno stulpelio atvirkštinę Furjė transformaciją (arba atvirkščiai).

Kiekviena pora taškų dažninėje srityje atitinka sinusoidę erdvinėje srityje. Reikšmė atitinkanti masyvo ląstelę $[0,0]$, atitinka nulinio dažnio sinusoidę erdvinėje srityje, t.y. vaizdo pastovią dedamąją komponentę. Kitos taškų poros atitinka dvimates sinusoides, kurios atrodo panašiai kaip bangelės vandens paviršiuje. Vienmatės sinusoidės apibūdinamos dažniu, faze ir amplitude, o dvimatis sinusoidės turi dar ir kryptį nurodantį parametras. Kiekvienos sinusoidės dažnis ir kryptis nustatoma pagal taškų poros vietą dažninėje srityje.

3.5.3. FFT sąsūka

Nors Furjė transformacija ir lėtoka, vis dėlto tai pats greičiausias būdas filtruoti vaizdą su dideliais filtrų branduoliais. Pavyzdžiui filtruojant 512×512 taškų dydžio vaizdą su 50×50 taškų dydžio branduoliu naudojant FFT yra 20 greičiau nei naudojant įprastą sąsūką.

Tarkime atvaizde reikia surasti tam tikros žymės vietą. Jei atvaizdas ir žymė yra žinomi, tai paprasčiausias būdas problemai išspręsti – tarpusavio koreliacija atliekama pasitelkiant sąsūką. Prieš atliekant sąsūką turi būti atliktos kelios modifikacijos: viena jų – pasukti taikinio žymę 180° . Žymiai paprasčiau yra surasti tam tikro objekto kraštus nei pati objektą. Šis žingsnis nėra būtinas, bet rezultatas gaunamas geresnis. Patartina prieš tarpusavio koreliaciją tiek originalą tiek ieškomą fragmentą filtruoti krašto sustiprinimo filtru (*angl. edge enhancement*) (žr. 3.4 d pav.).

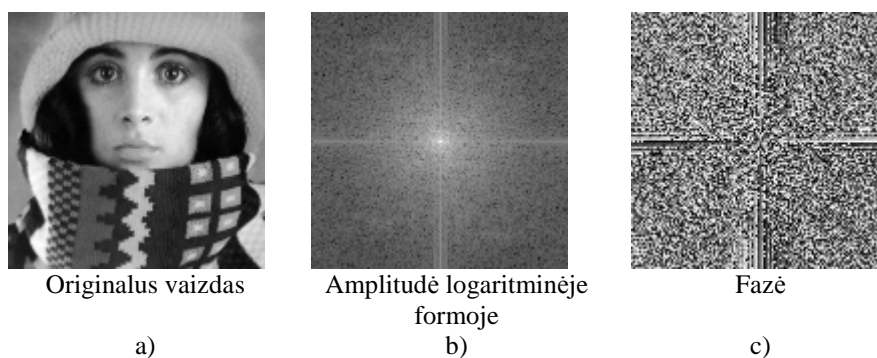
Kiekvieno taško reikšmė koreliacijos rezultate nurodo sutapimo dydį, kaip smarkiai žymė sutampa su originalo atvaizdu tame taške.

Apdoroti diskretiniams vaizdo taškų duomenims, naudojama diskretinė Furjė transformacijos versija vadinama greitąja Furjė transformacija (*angl. Fast Fourier Transform*), sutrumpintai FFT. Ji yra viena pagrindinių Furjė transformacijos algoritmų naudojamų vaizdų apdorojime.

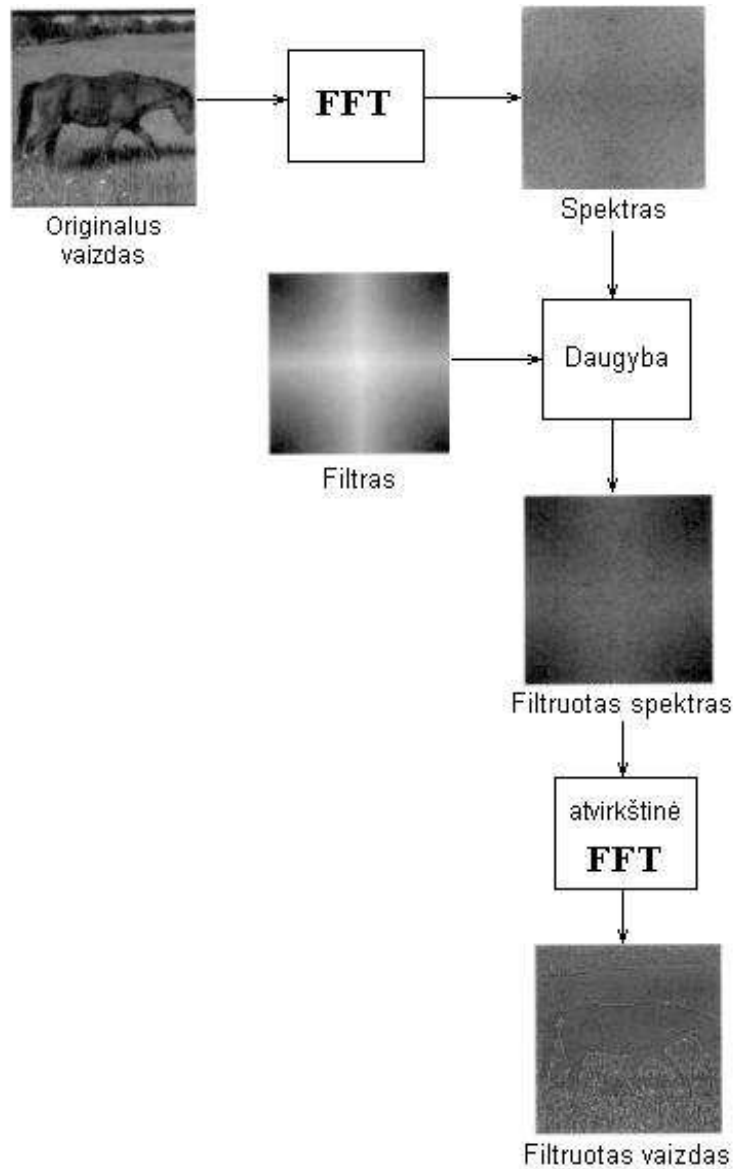
Bet kuris vaizdas gali būti atvaizduotas dvimate Furjė transformacija, kuris gali būti laikomas vaizdu su realiąja ir kompleksine dalimi. Dvimatė FFT tai lyg vaizdo taškų atvaizdavimas erdvinėje dažnų srityje. Atlikdami dvimatę vaizdo FFT, sukuriame dvimatį visų vaizdo erdvinių dažnių žemėlapi.

Vaizdo FFT transformacijos rezultato taškas, kaip FFT transformacijos rezultatas, turi atitinkamą realiąją ir menamąją dalį. Galime įsivaizduoti, kad taškas realioje dalyje atitinka erdvinių dažnių amplitudę, o taškas menamojoje dalyje – fazę.

3.5 paveiksle pateiktas vaizdo Furjė transformacijos pavyzdys. 3.5 paveikslo a dalyje pateiktas originalus vaizdas, b dalyje – realioji transformacijos rezultato dalis logaritminėje formoje, c dalyje – menamoji transformacijos rezultato dalis.



3.5 pav. Originalus vaizdas ir FFT rezultatai [18]



3.6. pav. Vaizdo filtravimas dažnių srityje [19]

3.6 paveiksle pavaizduotas vaizdo filtravimas naudojant Furjė transformacijos savybes. Originalus vaizdas iš erdvinės srities Furjė transformacijos pagalba konvertuojamas į dažnių sritį ir sudauginamas su norimu filtru. Filtras pateiktas dažnių srityje. Po daugybos operacijos gaunamas filtruotas vaizdas dažnių srityje. Gautam rezultatui atliekama atvirkštinė Furjė transformacija, rezultatas – filtruotas vaizdas erdvinėje srityje.

Koreliacija matematiškai artima sąsūkos operacijai. Koreliacijos branduolys yra sąsūkos branduolys, kuris pasuktas 180° . Išraiška (3.9) nusako dviejų vaizdų koreliaciją sąsūkos būdu:

$$h(x, y) * i(x, y) = g(x, y); \quad (3.9)$$

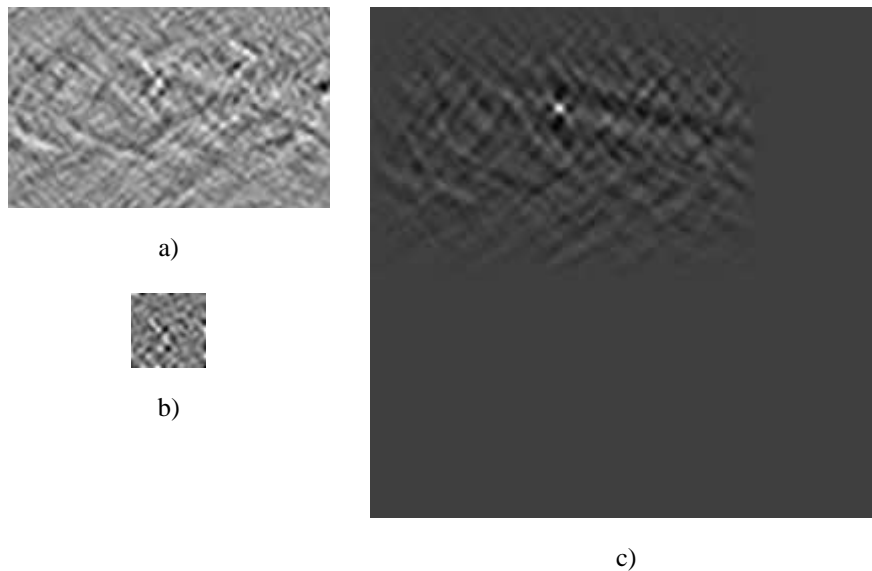
čia $h(x, y)$ – vaizdo fragmentas pasuktas 180° , $i(x, y)$ – vaizdas, $g(x, y)$ – koreliacijos rezultatas.

Sekanti išraiška nusako vaizdų koreliaciją dažnių srityje:

$$F(h(x, y)) \cdot F(i(x, y)) = F^{-1}(g(x, y)); \quad (3.10)$$

čia F – tiesinė Furjė transformacija, F^{-1} – atvirkštinė Furjė transformacija.

3.7 paveiksle pateiktas *Mathworks* MATLAB 6.1 paketu gauta paieškos zona, tapdinama kaukė, kuri pasukta 180° , ir jų koreliacijos rezultatas. 3.7 paveikslo a dalyje pavaizduota paieškos zona iš transformuotos ir filtruotos rainelės juostos. 3.7 paveikslo b dalyje pavaizduota iškirpta 180° pasukta kaukė iš tos pačios paieškos zonos dalies. Baltas taškas paveikslo c dalyje žymi koreliacijos maksimumą, t.y. kaukės sutapimo vietą paieškos zonoje.



3.7 pav. MATLAB 6.1 paketu gautas koreliacijos rezultatas

4. PAKLAIDŲ ŠALTINIAI

4.1. Reikalavimai kadro kokybei

Užfiksuoto kadro ir tuo pačiu rainelės rašto kokybė yra itin svarbi dėl pasirinkto vaizdų tarpusavio koreliacijos metodo. Pasiiekti maksimalią kokybę leistų keletas pateiktų reikalavimų:

- pakankamas apšvietimas su minimaliais šešėliais krentančiais nuo apatinio ir viršutinio vokų;
- sausas akies obuolys ir geras vaizdo fokusavimas;
- pašalinti visus atspindį į akies obuolį formuojančius daiktus;
- kuo plačiau atmerkta tiriamojo akis;
- kuo lėtesni akies judesiai pereinant iš vienos padėties į kitą

4.2. Sistemos paruošimas ir kalibravimas

Matavimus atliekant ne tamsoje, iškyla šio metodo trūkumas – keičiantis akies padėčiai keičiasi krintančių į akį šviesos spindulių srautas, kuris įtakoja vyzdžio diametro kaitą. Todėl matavimai atliekami visiškoje tamsoje, apšviečiant akį infraraudonaisiais spinduliais, tam naudojant infraraudonuosius šviesos diodus. Matuojant vertikalius ir horizontalius akies judesius, vyzdžio diametro pokytis neįtakoja vyzdžio centro poslinkio skaičiavimų, nepriklausomai koks vyzdžio centro nustatymo algoritmas pasirenkamas. Keičiantis vyzdžio diametrai deformuojasi ir rainelės paviršiaus raštas, o tai visiškai netoleruotina atliekant akies suktes posūkio matavimus, kai posūkiui matuoti remiamasi rainelės raštu. Tokiu atveju, rezultatai įgyja negalimas reikšmes ir matavimas tokiomis sąlygomis neturi prasmės. Siekiant matavimo metu turėti kuo mažesnę vyzdį, o rainelės plotą maksimaliai didelį, bandymai atliekami tamsoje. Jei bandymai atliekami esant geram apšvietimui, gali būti naudojamos medicininės priemonės: akies raumens sutraukėjas (2% pilokarpino hidrokloridas). Tačiau išskyla atspindžių, nuo pašalinių objektų, integracija į akies obuolio paviršių, kurie yra nepageidaujami dėl tiesioginio poveikio suktes posūkio rezultatui iš paveiktų segmentų.

Prieš pradėdant atlikti bandymus, svarbu sukalibruoti matavimo sistemą. Kalibravimas reikalingas optinės video sistemos kadro ribų nustatymui, kad akis (ypatingai vyzdys) bet kokioje padėtyje išliktų kadro ribose. Tiriamas subjektas paprašomas paeiliui žiūrėti į penkis taškus kurių vienas yra tiesiai prieš jį, kitas viršuje, apačioje, kairėje ir dešinėje. Kampas nuo centro iki keturių kraštinių padėčių pasirenkamas priklausomai nuo įrangos galimybių.

Matavimų tikslumą lemia ir techninės įrangos savybės. Be aparatūros įnešamų trikdžių (į atvaizdą įnešamas triukšmas) pagrindinis tikslumą ribojantis faktorius yra informacijos

kvantavimas transformacijų metu: vaizdas – video signalas, video signalas – duomenys. Šiuos keitimus atitinkamai įtakoja kameros skiriamoji geba ir vaizdo plokštės maksimali įvedamo vaizdo geba. Paklaidos priklauso ir nuo analoginių – skaitmeninių keitiklių kokybės, vaizdo kameros perduodamo vaizdo stabilumo, inertiškumo. Įtakos turi ir aprėpiamo akies ploto dydis.

4.3. Akies obuolio transformacija

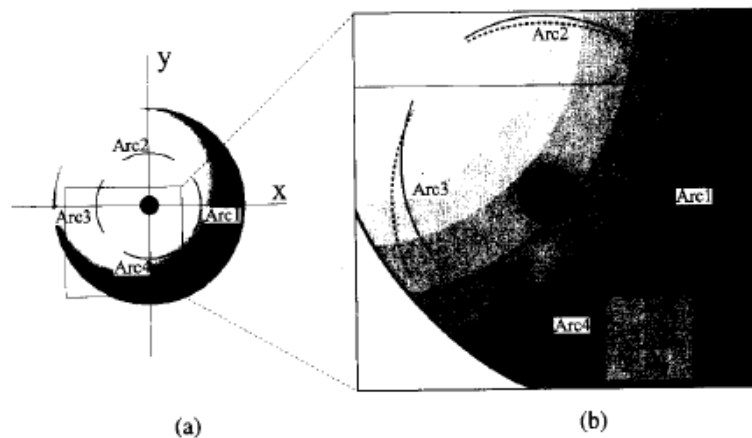
Viena iš matavimo problemų – akis nėra idealios geometrinės sferos formos. Dėl vergencijos, akies lateralinė transformacija gali pasislinkti $200\mu\text{m}$ į šoną akies orbitoje, kas atitiktų tam tikro dydžio horizontalų posūkį, priklausomai nuo video sistemos parametrų. Neatsižvelgus į tokią klaidingą transformaciją kaip posūkį, sistema gali indikuoti atitinkamo dydžio sukties posūkio paklaidą.

Labai svarbu kokia akies atvaizdo projekcija yra naudojama. Jei atstumas tarp akies centro ir kameros lęšio plokštumos yra žymiai didesnis už atstumą tarp vyzdžio centro ir akies centro, vietoje sudėtingos perspektyvinės projekcijos gali būti naudojama stačiakampė projekcija. Ši prielaida buvo ištirta Moore (1996) [7], nustatinėjant vyzdžio centro koordinatų vaizdo plokštumoje paklaidas jei naudojama stačiakampė projekcija.

4.4. Rainelės parašo išskyrimas

Dėl įnešamų natūralių iškraipymų: vaizdą iškraipo krintančios viršutinės blakstienos, apatinės dalies vaizdas suliejamas dėl akies ašarų liaukos drėkinimo, nėra efektyviai išnaudojamas visas rainelės juosto ilgis. Aukšto intensyvumo reikšmės rainelės juostoje, dėl pašalinių artefaktų atspindžių, koreliacijos koeficientų plokštumoje maksimumą duoda būtent tose vietose. Netgi ne visada papildomai apdorojant rainelės juostą filtrais, nepavyksta pašalinti šio trūkumo. Dėl to rezultatas turi būti papildomai įvertinamas kitų rezultatų atžvilgiu.

Thomas Haslwanter ir Steven T. Moore savo aprašytame metode [12] naudojo rainelės rašto lankus. Kai akis yra šoninėje padėtyje, taškų lango (*angl. sampling window*) projekcija į vaizdo plokštumą skiriasi nuo originalios formos. Paprasčiausiai transformuojant originalų duomenų lanką į vaizdo plokštumą, rainelės raštas bus išskiriamas iš neteisingos rainelės vietos. Taip įvyksta dėl neįvertintų geometrinių iškraipymų. Kai šis blogas rainelės rašto lankas koreliuojamas su pradiniu rainelės rašto lanku, gaunamas klaidingas akies sukties rezultatas. Tokie, paprasčiausiai perkelti, raštų lankai vadinami geometriškai nekompensuotais rainelės intensyvumo taškų langais.



4.1 pav. Rainelės rašto lankai [12]

Paveikslėlyje 4.1 (a) pavaizduotas akių eskizas pradinėje padėtyje, pav. 4.1 (b) vaizduoja tą pačią akį pasuktą 20° laipsnių į dešinę ir 20° žemyn. Ištisinė ir punktyrinė linijos atitinkamai žymi kompensuotą ir nekompensuotą taškų lanką. Galime matyti, kad kompensuotas taškų lankas patiria netiesinę transformaciją ir originalios formos deformaciją. Ši deformacija priklauso nuo akių padėties, kaip ir taškų lanko originali padėtis ir dydis. [12]

4.5. Išvados

Iš visų potencialių video matavimų paklaidų šaltinių naudojant koreliaciją aktualiausias yra vaizdo geometrinis iškraipymas. Sistemos tikslumas priklauso nuo vyzdžio centro radimo algoritmo, kompensacijos tarp optinės ir vizualinės ašių, nuo kameros padėties akių atžvilgiu, sistemos kalibravimo, rainelės apšvietimo ir nuo video atvaizdo kokybės. Jei siekiamas maksimalaus tikslumo, reikia atsižvelgti ir dar į keletą aspektų: akių formos nukrypimo nuo idealios sferos ir kameros lęšių optinio efekto.

Pasirinktame metode nenaudojame rainelės rašto lankų, bet vietoje jų, analizei naudojame maksimalų naudingą rainelės plotą – rainelės juostą. Rainelės juosta dalinama į 36 segmentus, kurių kiekvienas nepriklausomai duoda sukities posūkio rezultatą. Segmentai, kurie turi išorinių šviesos šaltinių artefaktų ar kitokių iškraipymų, gali būti įvertinami prieš koreliaciją ir nenaudojami. Kitu atveju galime atmesti tam tikrų segmentų koreliacijos rezultatus įvertinę rezultatų dispersiją.

5. MODELIAVIMAS

5.1. Modeliavimas matematinu paketu

Modeliavimas arba imituotos sukties posūkio nustatymas buvo atliekamas norint įvertinti visų pirma pačios koreliacijos proceso patikimumą. Norėta iširti: koks filtravimas rainelės juostai yra efektyviausias; koks tinkamiausias kaukės dydis, bei koks turėtų būti paieškos zonos dydis esant įvairiam imituotos sukties dydžiui.

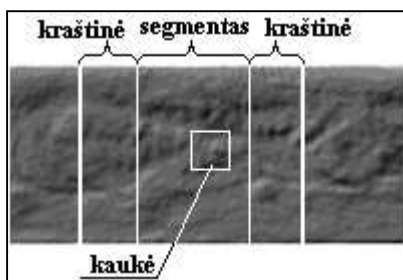
Kiekvienos imitacijos metu esant kitam kampui buvo bandomi įvairūs paieškos zonos dydžiai, bei 10 kaukės dydžių kiekvienam zonos dydžiui. Priminsime, kad prie kiekvienos tripleto kombinacijos (filtravimas, paieškos zonos dydis, kaukės dydis) gaunami 36 koreliacijos rezultatai. Kadangi imituojamas kampas yra žinomas, tai vertinimas buvo vykdomas pagal teisingų rezultatų kiekį.

Modeliavimas buvo atliekama pasitelkus *MathWorks, Inc* MATLAB 6.1 paketą.

5.2. Modeliavimo algoritmas ir parametrų parinkimas

Algoritmo aprašymas:

- a) perskaitomas vienas kadras, vadinkime jį paradiniu vaizdu A;
- b) pradiniam vaizde randamas vyzdžio centras, vaizdas laikrodžio rodyklės kryptimi centro atžvilgiu pasukamas kampu α , gauname vaizdą B. Tyrimo metu naudotos 7 pagrindinės pasukimo kampo α reikšmės: 0° , 0.25° , 0.5° , 1° , 5.50° , 10° , 15° . Išsamesniam tyrimui naudota papildomai 12 kampo α reikšmių: 2° , 3° , 4° , 5° , 6° , 7° , 8° , 9° , 11° , 12° , 13° , 14° .
- c) iš vaizdų A ir B iškerpami rainelių žiedai ir transformuojami į polinę koordinatinių sistemą. Gaunamos vaizdų A ir B rainelių juostos.
- d) A ir B vaizdų rainelės juostos filtruojamos pasirinkta filtrų kombinacija;
- e) rainelės juostoje, iš pradinio vaizdo A, parenkamos 36 kaukių centro koordinatės, kurios bus tapdinamos su B vaizdo rainelės juostos fragmentais tam tikruose apibrėžtuose 36 segmentuose. Kaukės kraštinės dydis gali kisti nuo 5 iki 41 taško, kaukės ilgis ir aukštis yra vienodas nelyginis taškų dydis. Bandymų metu naudota 10 skirtingų kaukės kraštinės ilgių: 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41;
- f) paeiliui atliekamos 36 tarpusavio koreliacijos. 36 B vaizdo rainelės segmentai koreliuojami su pariktomis 36 kaukėmis iš A vaizdo rainelės juostos, žr. 5.1 pav. Tarpusavio koreliacijos rezultatas – koreliacijos koeficientų plokštuma, kurioje maksimali reikšmė indikuoja sutapimo vietą.



5.1 pav. Tapdinamo segmento ir kaukės pavyzdys

Kraštinė – papildoma rainelės juostos dalis, kuri jungiama prie koreliuojamo segmento iš abiejų pusių, kad, esant didelei posūkio reikšmei, ieškoma tapati kaukės vieta liktų fragmento ribose. Pradinio vaizdo rainelės segmentas ir jį lydinčios tam tikro dydžio kraštinės sudaro paieškos arba tapdinimo zoną.

Pradiniai tyrimai parodė, kad nenaudojant jokio papildomo filtravimo, algoritmas neduoda teisingų rezultatų esant vaizdo pasukimui lygiam 0° . Remiantis rekomendacijomis [17], buvo pasirinkta naudoti rainelės juostos filtravimą ir papildomą kaukės filtravimą. Dėl ypatingos rainelės tekstūros, kuri nepasižymi jokiais išskirtinėmis savybėmis, t.y. aiškiai išsiskiriančiais raštais, ir pradinių tyrimų rezultatų, buvo nuspręsta rainelės juostą filtruoti net keletą kartus. Filtravimą sudaro trys etapai: pradinis filtravimas (triukšmo pašalinimui), tarpinis filtravimas (filtravimui naudojamas pasirinktas optimalus filtras ar filtrų kombinacija) ir galutinis filtravimas (rašto paryškinimui). Filtravimas atliekamas tiek pradinio vaizdo rainelės juostai, tiek rainelės juostai, kurioje imituotas sukities posūkis.

Rainelės juostos tekstūros bruožų išryškimui, pasirinktas filtravimas naudojant aukšto dažnio (*angl. unsharp*) filtrą [20]. Naudojant tokio tipo filtrą išryškinami regionai, kuriuose yra staigus intensyvumo pokytis. Aukšto dažnio filtravimas dažnai taikomas objektų kraštų aptikimui vaizdui. Bet prieš atliekant filtravimą Laplaso filtru, turi būti sumažinamas jautrumas triukšmui, kuris pašalinimas *Gauss'o* filtru [21]. *Gauss'o* filtras – paprastas vidurkinimo filtras su *Gauss'o* skirstiniu. Tokiam filtrui parenkama standartinė deviacija σ (*sigma*) lygi 1,4. 5.2 paveiksle pavaizduota *Gauss'o* filtro analitinė išraiška dvimačiam atvejui ir filtro branduolys, kai $\sigma = 1,4$. 5.3 paveiksle pavaizduota aukšto dažnio filtro (*angl. unsharp*) analitinė išraiška ir filtro branduolys, kai α (*alpha*) lygi 0,8.

Papildomas kaukės filtravimas atliekamas krašto aptikimo (*angl. edge detection*) filtru. 5.4 paveiksle pateiktas krašto aptikimo filtro branduolys. Krašto aptikimo filtras vaizde išryškina objektų kontūrus, sudarydamas nuo objekto krintančio šešėlio efektą. Rainelės rašto sekimas gana sudėtingas, dėl savo rašte neišsiskiriančiais požymiais, kurie formuotų vienokius ar kitokius objektus ar jų grupes. Kiekvieno individo akių rainelės raštai yra individualūs. Netgi to paties

asmens kairiosios akies rainelės raštas skiriasi nuo dešinėsios. Tad visada išlieka galimybė, kad rainelė pasižymės koku nors ypatingu rašto fragmentu.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

0.0924	0.1192	0.0924
0.1192	0.1538	0.1192
0.0924	0.1192	0.0924

5.2 pav. Gauss'o filtro analitinė išraiška ir filtro branduolys kai $\sigma = 1,4$

$$\frac{1}{(\alpha+1)} \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha-1 & -\alpha \\ \alpha-1 & \alpha+5 & \alpha-1 \\ -\alpha & \alpha-1 & -\alpha \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

-0.4444	-0.1111	-0.4444
-0.1111	3.222	-0.1111
-0.4444	-0.1111	-0.4444

5.3 pav. Unsharp filtro analitinė išraiška ir filtro branduolys kai $\alpha = 0,8$

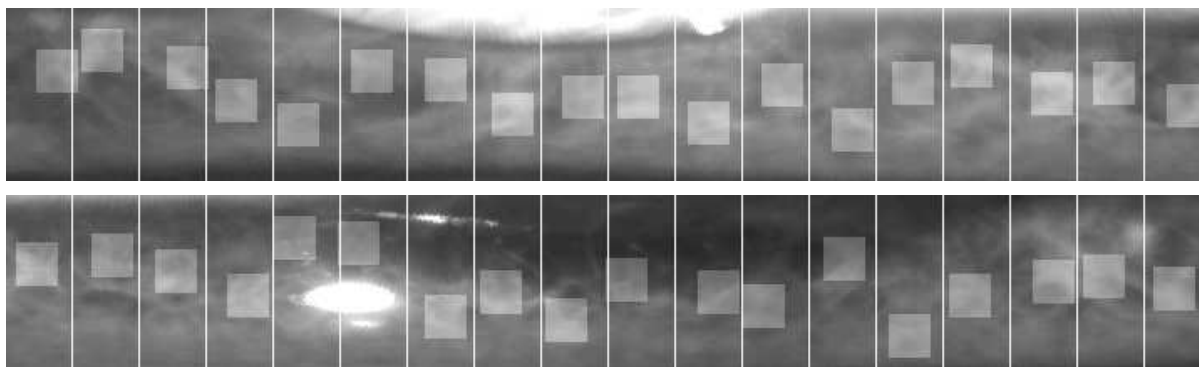
-0.1250	-0.1250	-0.1250
-0.1250	1	-0.1250
-0.1250	-0.1250	-0.1250

5.4 pav. Krašto aptikimo filtro branduolys

5.3. Optimalaus filtravimo parinkimas

Bandymų keliu buvo išbandyta daugiau 20 įvairiausių filtravimo variantų. Kai kurių filtravimo variantų buvo atsisakyta išanalizavus pirmuosius tyrimo rezultatus. Vienas pagrindinių kriterijų – teisingų rezultatų kiekis esant nuliniam modeliuojamam sukties posūkiui. Kadangi ieškant tinkamos filtrų kombinacijos, buvo ieškoma ir kitų optimalių parametru tarpusavio koreliacijai atlikti, buvo sudaryta speciali vertinimo sistema. Kiekvienai tripleto kombinacijai, t.y.: filtravimas, kaukės ilgis ir kraštinės ilgis prie tam tikro modeliuojamo sukties posūkio kampo, buvo skaičiuojamas teisingų rezultatų kiekis, kadangi posūkio kampas yra žinomas. Prie skirtingų kraštinės dydžių visiems tirtiems kaukės dydžiams maksimalus rezultatas – 360, o prie skirtingų kaukės dydžių visiems tirtiems kraštinių dydžiams maksimalus rezultatas – 252.

Vizualiniam filtravimo įvertinimui, pateikiama keletas rainelės juostos filtravimo rezultatų, kai modeliuojamas sukties kampas lygus 0° . 5.5 paveiksle pavaizduota originali į dvi dalis padalinta transformuota rainelės juosta su pažymėtais 36 segmentais ir rankiniu būdu parinktomis kaukėmis. Vienam segmentui priskiriama viena kaukė.



5.5 pav. Originali transformuota rainelės juosta ir rankiniu būdu parinktomis kaukių vietomis

Žemiau pateikiami filtravimo variantai bei gauti tyrimų rezultatai. Kiekvieno filtravimo įvertinimui pateikiamos dvi rezultatų lentelės. Abiejų lentelių eilutėse pateikiami rezultatai prie nurodytų modeliujamų kampų. Pirmosios lentelės stulpeliuose nurodyta prie kokių kraštinės ilgių pateikiami rezultatai. Rezultatą sudaro bendras teisingų atsakymų skaičius visiems 10 kaukių dydžių. Maksimalus teisingų rezultatų kiekis – $36 \times 10 = 360$. Antroje lentelėje – priešingai. Stulpeliuose nurodyta prie kokių kaukių dydžių gauti rezultatai. Šiuo atveju, rezultatą sudaro bendras teisingų atsakymų skaičius visiems 7 kraštinių ilgimas. Maksimalus teisingų rezultatų kiekis – $36 \times 7 = 252$. Įvertinant filtravimo variantų rezultatus svarbu atsižvelgti kaip rezultatai pasiskirsto esant laipsnio dalies modeliujamam posūkiui.

1. Filtravimas be tarpinio rainelės juostos filtro:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$

Tarpinis filtras: Nėra

Galutinis filtras: *Unsharp*, $\alpha = 0,8$

Kaukės filtras: *Edge detection*

5.1 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 1-ojo filtravimo varianto

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	6	3	3	3	3	2	2
0,25	4	4	4	4	4	3	3
0,5	7	5	5	5	5	4	3
1	9	6	6	6	6	5	4
5.50	5	7	8	7	5	3	2
10	0	0	0	4	4	4	2
15	0	0	0	0	0	0	0

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 1-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	0	0	0	5	0	0	0	8	7	2
0,25	0	5	0	0	0	7	0	0	7	7
0,5	0	12	0	0	6	7	0	0	9	0
1	0	19	0	6	0	7	0	2	7	1
5.50	8	1	0	7	5	6	1	1	5	3
10	1	5	1	0	3	2	1	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gauti duomenys rodo, kad rezultatai visiškai netenkina reikalavimų. Teisingų rezultatų kiekis siekia tik kelis procentus galimų. Dėl gautų rezultatų, esant nuliniam sukities posūkio modeliavimui, toks rainelės juostos apdorojimas – atmetamas. Akivaizdu, kad būtina parinkti tarpinį filtravimą, kuris išryškintų tam tikrus rainelės rašto bruožus.

2. Filtravimas su slenkančio vidurkio tarpiniu rainelės juostos filtru:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$
 Tarpinis filtras: *Moving average*
 Galutinis filtras: *Unsharp, \alpha = 0,8*

Kaukės filtras: *Edge detection*

0.1111	0.1111	0.1111
0.1111	0.1111	0.1111
0.1111	0.1111	0.1111

5.6 pav. *Moving average* filtro branduolys

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 2-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	6	4	4	4	4	2	2
0,25	4	4	4	4	4	3	3
0,5	6	4	4	4	4	3	3
1	12	9	9	9	9	8	6
5.50	5	6	7	6	5	3	3
10	0	0	1	5	5	5	2
15	0	0	0	0	0	0	0

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 2-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	0	5	0	5	0	0	0	7	7	2
0,25	0	5	0	0	0	7	0	7	7	0
0,5	0	5	0	0	7	7	0	0	9	0
1	7	19	0	6	6	14	0	2	7	1
5.50	8	1	0	1	9	3	1	1	8	3
10	6	5	1	0	3	2	0	0	1	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rainelės juostos apdorojimas slenkančio vidurkio tarpiniu filtru gautais rezultatais mažai skiriasi nuo atvejo kai apdorojimui nebuvo taikomas joks tarpinis filtras.

3. Filtravimas *Laplacian* tarpiniu rainelės juostos filtru:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$

Tarpinis filtras: *Laplacian*, $\alpha = 0,8$

Galutinis filtras: *Unsharp*, $\alpha = 0,8$

Kaukės filtras: *Edge detection*

0.4444	0.1111	0.4444
0.1111	-2.2222	0.1111
0.4444	0.1111	0.4444

5.7 pav. *Laplacian* filtro branduolys, kai $\alpha = 0,8$

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 3-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai							
	10	15	20	25	30	35	40	
0	304	298	294	291	287	283	278	
0,25	24	23	22	21	22	22	21	
0,5	185	180	178	176	174	172	167	
1	227	224	216	215	213	213	206	
5.50	183	212	218	222	221	217	205	
10	0	33	81	146	200	216	217	
15	0	0	0	0	0	28	75	

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 3-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	44	158	184	203	223	250	245	245	245	238
0,25	8	13	14	17	21	26	14	14	14	14
0,5	1	36	64	118	159	155	174	168	182	175
1	1	59	115	159	173	180	197	209	210	211
5.50	1	39	101	136	159	191	195	213	222	221
10	2	20	56	80	99	108	122	128	138	140
15	1	2	2	6	0	14	16	17	17	18

Filtravimas aukšto dažnio filtru duoda žymiai geresnius rezultatus, nei prieš tai nagrinėtuose filtravimo atvejuose. Iš rezultatų lentelės matyti, kad teisingų rezultatų kiekis siekia apie 75% galimų teisingų atsakymų. Esant nuliniam kampui rezultatai siekai 80,5 ir 95 % teisingų rezultatų. Toks filtravimo būdas būtų tinkamas, bet netenkina rezultatų pasiskirstymas esant laipsnio dalies modeliuojamam kampui. Uždavus 0,25° kampą, teisingų rezultatų kiekis siekia tik 6% visų galimų teisingų atsakymų. Parinkus kampą lygų 0,5°, teisingų rezultatų kiekis siekia 50-60%.

Galima padaryti pirmąsias išvadas apie kraštinės ilgio ir kaukės dydžio įtaką rezultatams. Akivaizdu, kad kraštinės ilgis nėra aktualus esant mažiems modeliuojamiems posūkio kampams. Tačiau esant posūkio kampui didesniai nei 10°, kraštinės ilgis turėtų būti ne mažesnis kaip 30 taškų, o kampui esant lygiam 15° – ne mažiau kaip 40 taškų. O kaukės dydis proporcingai priklauso nuo modeliuojamo kampo dydžio. Kaukės dydis lygus 5 taškams, kaip ir parodys tolimesni bandymai, visiškai netinka tarpusavio koreliacijai, dėl prastų rodomų rezultatų. Taip pat, iš rezultatų pasiskirstymo peršasi išvada, kad kaukės dydis neturėtų būti mažesnis nei 25 taškai.

4. Filtravimas *Average* ir *Laplacian* tarpiniu rainelės juostos filtru:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}$, $\sigma = 1,4$
 Tarpinis filtras: *Average*, *Laplacian*, kai $\alpha = 0,8$
 Galutinis filtras: *Unsharp*, $\alpha = 0,8$

Kaukės filtras: *Edge detection*

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 4-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	290	283	281	274	270	269	262
0,25	151	148	144	142	139	139	131
0,5	215	212	204	199	197	193	186
1	231	226	219	216	216	211	203
5.50	185	218	222	228	228	222	208
10	0	26	78	139	188	212	214
15	0	0	0	0	0	21	70

5.8 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 4-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	29	128	174	188	213	231	245	245	245	231
0,25	15	40	91	99	124	134	121	112	133	125
0,5	7	49	104	133	162	166	183	189	210	203
1	7	49	115	156	163	194	204	213	210	211
5.50	3	55	99	146	164	186	201	213	224	220
10	1	25	52	81	90	100	116	124	132	136
15	2	3	4	4	0	10	15	16	14	18

Naudojant slenkančio vidurkio filtrą ir kartu aukšto dažnio filtrą, sumažėja neigiamo efekto įtaka rezultatams kai modeliuojamas kampas lygus $0,25^\circ$, tačiau rezultatų skirtumas vis tiek išlieka žymus kitų rezultatų atžvilgiu.

5. Filtravimas horizontaliu *Prewitt* tarpiniu rainelės juostos filtru:

Prewitt filtravimo metodas randa kraštus gražindamas *Prewitt* pokyčio skirtumo aproksimaciją. Gražinami kraštai tų taškų, kurių intensyvumo gradientas yra maksimalus. *Prewitt* sugeneruoja vaizdą iš reikšmių, kur aukštesnio intensyvumo reikšmės žymi krašto buvimą tarp dviejų objektų. Tai vienas populiariausių krašto aptikimo filtrų [22]. Horizontalus *Prewitt* filtras paryškina horizontalius kraštus aproksimuodamas vertikalų intensyvumo gradientą. Ir atvirkščiai, vertikalus *Prewitt* filtras paryškina vertikalius kraštus aproksimuodamas horizontalų intensyvumo gradientą.

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$
 Tarpinis filtras: *Prewitt horizontal*
 Galutinis filtras: *Unsharp, \alpha = 0,8*

Kaukės filtras: *Edge detection*

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

5.8 pav. *Prewitt horizontal* filtro branduolys

5.9 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 5-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	234	230	226	215	212	209	209
0,25	212	210	207	197	195	192	192
0,5	212	210	206	197	194	190	190
1	219	215	211	204	198	197	195
5.50	110	141	175	191	192	189	183
10	0	11	34	61	95	136	173
15	0	0	0	0	0	7	30

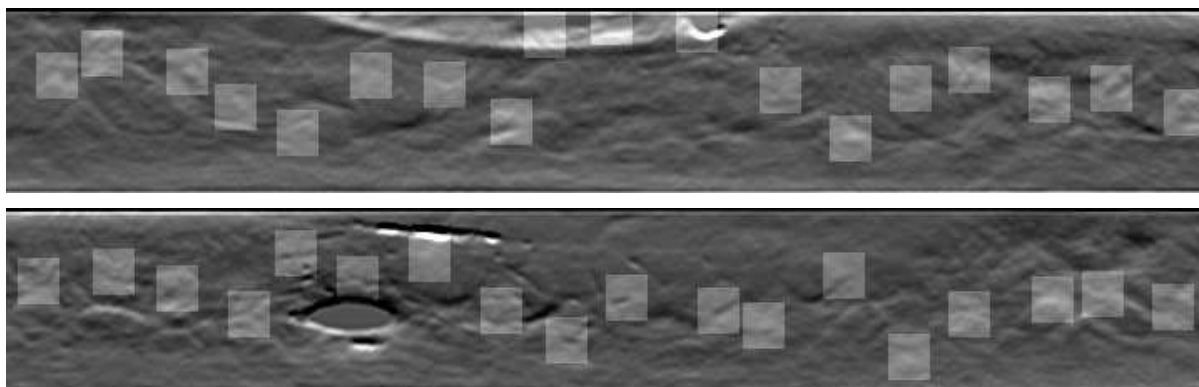
5.10 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 5-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	0	28	99	141	169	199	195	228	241	235
0,25	0	18	78	115	143	195	180	207	234	235
0,5	0	18	73	108	148	188	180	207	241	236
1	0	20	79	121	149	189	191	213	242	235
5.50	10	24	55	91	122	161	151	164	202	201
10	4	8	33	41	55	62	68	61	80	98
15	0	2	2	2	0	2	6	6	6	9

Rezultatai beveik analogiški prieš tai atliktam tyrimui – nežymus efektas prie laipsnio dalies kampo. Procentiškai šiek tiek geresni gauti rezultatai visiems kraštinių dydžiams, kur modeliuojamas kampas nėra didelis, o kaukės dydis 37, 41 taškas. Rezultatai prie didelių modeliuojamų kampų – prastesni.

Paveiksle 5.9 pavaizduota į dvi dalis padalinta rainelės juosta po filtravimo ir rastos kaukių sutapimo vietos po tarpusavio koreliacijos, kur tarpiniam filtravimui naudotas horizontalus *Prewitt* filtras.

5.9 pav. Horizontalaus *Prewitt* filtravimo rezultatas ir kaukių sutapimo vietos po koreliacijos6. Filtravimas vertikaliu *Prewitt* tarpiniu rainelės juostos filtru:Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}$, $\sigma = 1,4$ Tarpinis filtras: *Prewitt vertical*Galutinis filtras: *Unsharp*, $\alpha = 0,8$ Kaukės filtras: *Edge detection*

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

5.10 pav. *Prewitt vertical* filtro branduolys

5.11 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 6-ojo filtravimo varianto

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	287	285	279	275	269	267	256
0,25	166	164	158	156	153	151	140
0,5	189	185	182	181	177	175	164
1	234	227	225	225	222	216	206
5.50	190	230	235	236	238	231	220
10	0	29	84	145	192	216	221
15	0	0	0	0	0	24	74

5.12 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 6-ojo filtravimo varianto

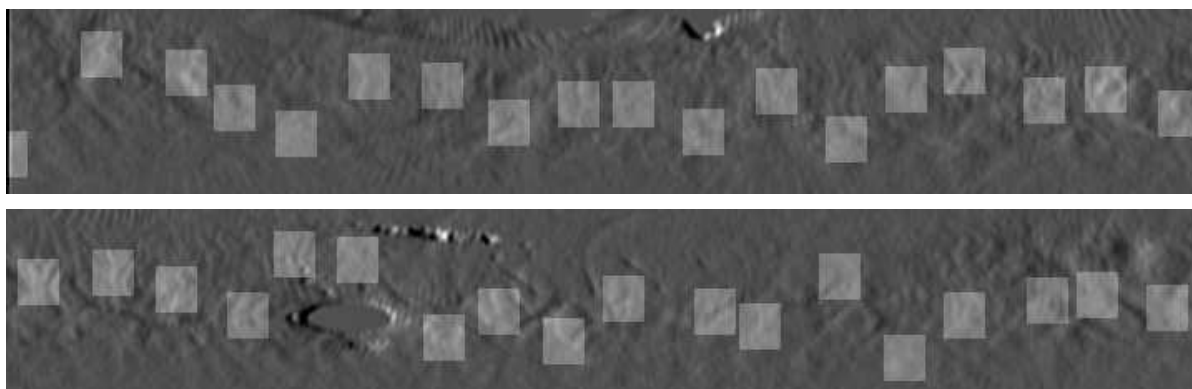
Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	31	98	162	203	213	237	244	242	244	244
0,25	8	38	86	104	116	135	160	144	146	151

5.12 lentelės tęsinys kitame puslapyje

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0,5	18	31	67	114	142	166	188	172	174	181
1	13	46	131	159	160	195	216	203	223	209
5.50	21	44	111	144	177	200	206	224	224	229
10	12	25	43	87	94	112	115	127	133	139
15	2	0	2	6	0	9	15	17	19	21

Dėl didesnio procentinio teisingų rezultatų kiekio, galima teigti, kad šiuo atveju rezultatai geresni už filtravimo horizontaliu *Prewitt* filtru atvejį, nors laipsnio dalių posūkio efektas čia žymesnis. Pagal visus kitus rezultatus šis filtravimo variantas lenkia minėtąjį variantą. Reikia pastebėti, kad laipsnio dalių efekto problema mažesnė, už atvejus kai tarpiniu rainelės juostos filtru buvo naudojamas aukšto dažnio ir slenkančio vidurkio filtrai.

5.11 paveiksle pavaizduota į dvi dalis padalinta rainelės juosta po filtravimo ir pavaizduotos kaukių sutapimo vietos po tarpusavio koreliacijos, kai tarpiniam filtravimui naudojamas vertikalus *Prewitt* filtras.



5.11 pav. Vertikalaus *Prewitt* filtravimo rezultatas ir kaukių sutapimo vietos po koreliacijos

7. Filtravimas, kai vietoje tarpinio rainelės juostos filtro naudojamas filtravimų *Prewitt* horizontalaus filtro ir *Prewitt* vertikalų filtrų rezultatų suma:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$
Tarpinis filtras: *Prewitt horizontal* + *Prewitt vertical*
Galutinis filtras: *Unsharp*, $\alpha = 0,8$

Kaukės filtras: *Edge detection*

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 7-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	261	257	246	239	236	234	223
0,25	195	192	182	176	175	174	167
0,5	201	195	185	176	174	173	165
1	209	202	195	190	190	189	182
5.50	151	179	197	207	209	207	196
10	0	18	52	97	152	172	192
15	0	0	0	0	0	17	46

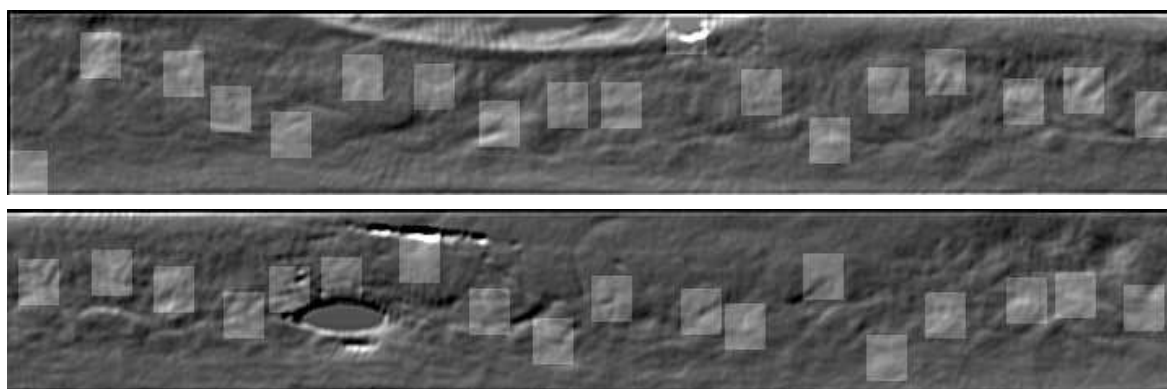
5.14 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 7-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	26	72	127	156	174	201	217	243	244	236
0,25	8	43	81	99	141	144	175	181	202	187
0,5	9	29	70	95	136	152	168	199	202	209
1	2	35	74	97	145	173	189	215	217	210
5.50	7	32	71	116	160	151	182	195	214	218
10	1	15	37	59	68	76	86	95	119	127
15	1	1	3	3	0	7	6	10	12	16

Šio filtravimo atvejo rezultatai artimi atvejui filtruojant horizontaliu *Prewitt* filtru, bet prastesni nei atveju filtruojant vertikaliu *Prewitt* filtru. Laipsnio dalies posūkio rezultatai geresni nei vertikalaus *Prewitt* filtravimo atveju, bet prastesni nei horizontalaus *Prewitt* filtravimo atveju.

Paveiksle 5.12 pavaizduota į dvi dalis padalinta rainelės juosta po filtravimo ir kaukių sutapimo vietos po tarpusavio koreliacijos, kai tarpiniam filtravimui naudota filtravimo vertikaliu *Prewitt* ir horizontaliu *Prewitt* filtrais filtravimo rezultatų suma.



5.12 pav. Horizontalaus *Prewitt* filtravimo ir vertikalaus *Prewitt* filtravimo sumos rezultatas bei kaukių sutapimo vietos po koreliacijos

8. Nuoseklus *Prewitt* horizontalus ir vertikalus filtravimas be kaukės filtravimo:

Pradinis filtras:	$2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$
Tarpinis filtras:	<i>Prewitt horizontal, Prewitt vertical</i>
Galutinis filtras:	<i>Unsharp, $\alpha = 0,8$</i>

Kaukės filtras: Nėra

5.15 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių po 8-ojo filtravimo varianto

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	281	273	266	260	258	254	252
0,25	264	256	249	243	241	240	234
0,5	253	273	266	260	258	254	252
1	258	247	244	236	235	233	230
5.50	220	246	253	252	248	243	240
10	0	18	80	147	201	218	227
15	0	0	0	0	0	20	70

5.16 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 8-ojo filtravimo varianto

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	9	52	132	187	224	243	247	247	251	252
0,25	4	45	110	159	204	218	244	240	251	252
0,5	4	26	99	159	201	226	234	239	245	245
1	0	29	110	169	207	235	245	246	244	245
5.50	4	37	82	159	219	231	237	239	247	247
10	0	15	36	79	99	111	128	135	140	148
15	0	0	1	4	7	9	13	16	19	21

Tyrimo rezultatai patvirtino prielaidą, kad nuoseklus rainelės juostos filtravimas *Prewitt* horizontaliu ir *Prewitt* vertikaliumi filtrais turėtų duoti gerus rezultatus. Deja, šis filtravimo variantas nepadėjo visiškai išvengti laipsnio dalies kampo efekto, nors šis nėra didelis lyginant su visais prieš tai tyrinėjtais filtravimo būdais.

9. Nuoseklus *Prewitt* horizontalus ir vertikalus filtravimas be pradinio ir galutinio filtro:

Pradinis filtras:	Nėra
Tarpinis filtras:	<i>Prewitt horizontal, Prewitt vertical</i>
Galutinis filtras:	Nėra

Kaukės filtras: *Edge detection*

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 9-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai							
	10	15	20	25	30	35	40	
0	316	310	307	307	306	304	305	
0,25	91	91	87	87	86	83	84	
0,5	206	203	200	198	195	193	191	
1	243	240	235	233	232	230	230	
5.50	229	251	257	254	253	250	247	
10	0	30	95	169	220	238	243	
15	0	0	0	0	0	26	87	

5.18 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 9-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	46	170	197	231	251	252	252	252	252	252
0,25	8	55	71	56	63	79	77	77	68	55
0,5	5	51	106	143	163	154	176	189	196	203
1	12	67	130	148	186	212	211	217	222	238
5.50	0	45	139	180	203	214	232	238	241	249
10	6	35	62	94	97	130	133	143	144	151
15	0	1	5	9	0	15	15	17	19	21

Rezultatai beveik tapatūs ankstesniam filtravimo atvejui, išskyrus keletą aspektų. Akivaizdus 15% teisingų rezultatų kiekio padidėjimas kraštinių ilgio tyrime visiems kaukių dydžiams, kai modeliuojamas sukties kampas lygus 0°. Galima daryti prielaidą, kad tokį bandymo rezultatą davė kaukės krašto aptikimo filtras, kurio ankstesniame bandyme buvo atsisakyta. Tačiau šio bandymo metu buvo atsisakyta pradinio ir galutinio filtro, dėl šio priežasties gautas žymus laipsnio dalies poaūkio efektas, kuris yra nepageidaujamas. Aišku, kad norėdamas užtikrinti rezultatų stabilumą, negalime rainelės juostos apdorojime atsisakyti naudoti pradinį ir galutinį juostos filtravimą, bei kaukės filtravimą. Tai patvirtina tolimesni du bandymai. Vienu atveju atsisakyta pradinio filtravimo, kitu – galutinio.

10. Nuoseklus filtravimas *Prewitt* horizontaliu ir *Prewitt* vertikaliu filtrais be pradinio filtravimo:

Pradinis filtras: Nėra
 Tarpinis filtras: *Prewitt horizontal, Prewitt vertical*
 Galutinis filtras: *Unsharp, $\alpha = 0,8$*

Kaukės filtras: *Edge detection*

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 10-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	322	318	317	314	310	309	308
0,25	14	14	13	13	12	12	12
0,5	173	169	166	162	159	159	158
1	219	216	214	214	212	209	210
5.50	215	235	244	245	241	240	237
10	0	27	88	154	204	217	224
15	0	0	0	0	0	20	76

5.20 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 10-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	65	179	213	230	251	252	252	252	252	252
0,25	2	18	14	7	14	7	7	7	7	7
0,5	17	38	74	106	127	148	153	161	168	154
3	12	78	107	134	157	175	182	203	215	231
5.50	11	21	114	165	193	211	226	233	236	247
10	5	23	51	76	94	114	129	135	140	147
15	0	2	5	6	0	13	13	14	16	19

Labai prasti rezultatai prie laipsnio dalies modeliuojamo kampo.

11. Nuoseklus filtravimas *Prewitt* horizontaliu ir vertikaliu filtrais be galutinio filtro:

Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}$, $\sigma = 1,4$
 Tarpinis filtras: *Prewitt horizontal*, *Prewitt vertical*
 Galutinis filtras: Nėra

Kaukės filtras: *Edge detection*

5.21 lentelė

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 11-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	316	310	307	307	306	304	305
0,25	91	91	87	87	86	83	84
0,5	206	203	200	198	195	193	191
1	243	240	235	233	232	230	230
5.50	229	251	257	254	253	250	247
10	0	5	14	25	30	34	35
15	0	0	0	0	0	26	87

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių
po 11-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	46	170	197	231	251	252	252	252	252	252
0,25	8	55	71	56	63	79	77	77	68	55
0,5	5	51	106	143	163	154	176	189	196	203
3	12	67	130	148	186	212	211	217	222	238
5.50	0	45	139	180	203	214	232	238	241	249
10	6	35	62	94	97	130	133	143	144	151
15	0	1	5	9	0	15	15	17	19	21

Prasti rezultatai prie laipsnio dalies modeliuojamo kampo.

12. Nuoseklus filtravimas *Prewitt* horizontaliu ir *Prewitt* vertikaliu filtrais vietoje tarpinio rainelės juostos filtro.

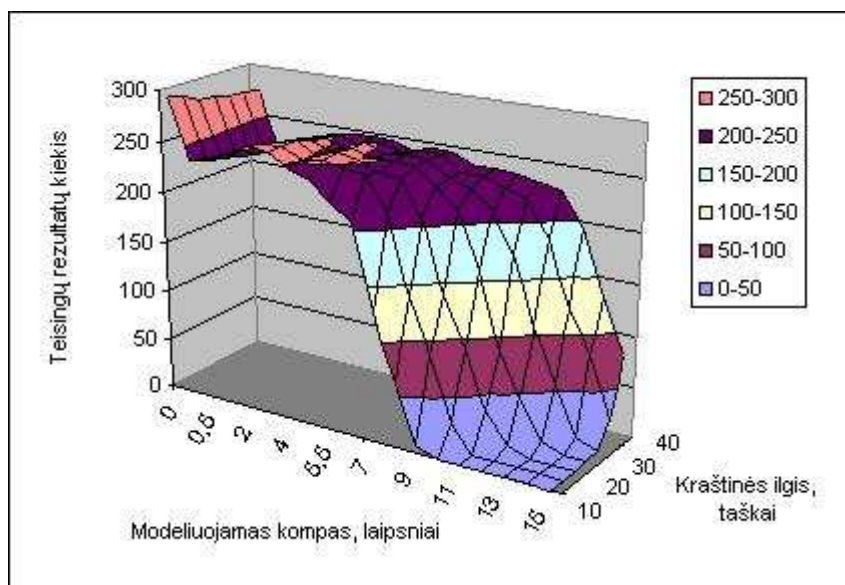
Pradinis filtras: $2 \times \text{Gaussian}, \sigma = 1,4$
 Tarpinis filtras: *Prewitt horizontal, Prewitt vertical*
 Galutinis filtras: *Unsharp, $\alpha = 0,8$*

Kaukės filtras: *Edge detection*

**Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių
po 12-ojo filtravimo varianto**

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai						
	10	15	20	25	30	35	40
0	297	291	284	282	278	277	276
0,25	237	234	231	231	225	222	221
0,5	241	238	234	231	229	228	226
1	251	249	240	241	239	237	235
2	261	258	254	252	249	246	243
3	259	259	259	255	252	250	245
4	247	250	248	248	246	242	246
5	239	252	256	253	254	250	247
5,5	223	248	251	248	246	242	240
6	208	247	244	250	249	248	244
7	126	215	242	247	248	247	245
8	64	140	208	231	233	233	235
9	7	89	139	212	228	234	236
10	0	27	91	160	210	225	234
11	0	0	35	86	173	220	230
12	0	0	7	46	107	186	225
13	0	0	0	7	56	123	194
14	0	0	0	0	9	82	131
15	0	0	0	0	0	23	79

Išsamesnei pasirinkto filtravimo būdo analizei, buvo atlikti bandymai su didesniu skaičiumi modeliujamų kampų. Grafiniam rezultatų įvertinimui pateikiamas grafikas 5.13 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad siekiant užtikrinti teisingų rezultatų kiekį prie modeliujamų didesnių sukties kampų, kad prognozavimas vyktų teisingai, tikslinga didinti kraštinės ilgi. Įvertinimui, kaip rezultatai pasiskirsto, kai kraštinės ilgis siekia iki 60 taškų, atlikti papildomi bandymai, kurių rezultatai pateikiami papildomose lentelėse ir grafikuose, žr. 5.16 ir 5.17 pav.



5.13 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kraštinės ilgio

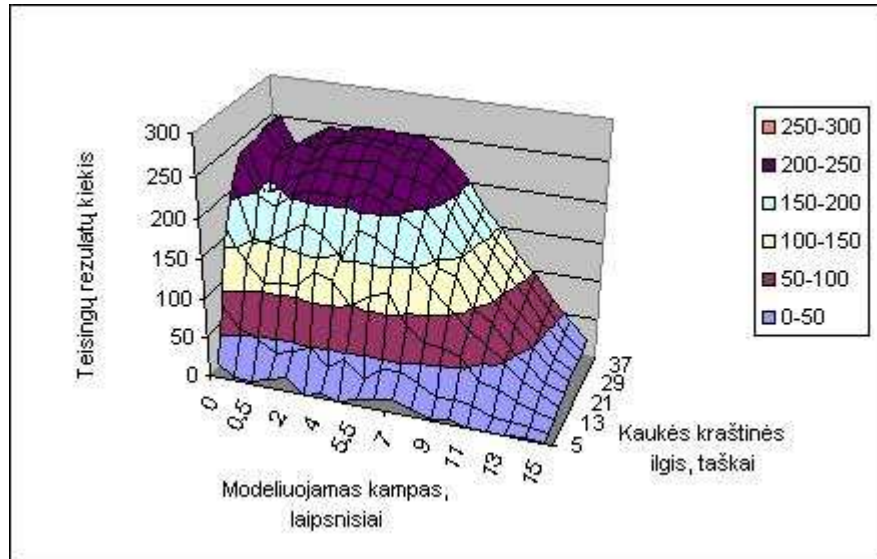
5.24 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių po 12-ojo filtravimo varianto

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai									
	5	9	13	17	21	25	29	33	37	41
0	19	84	173	217	244	247	245	252	252	252
0,25	3	57	132	145	196	182	224	224	222	216
0,5	4	46	108	153	185	207	231	238	224	231
1	11	34	114	165	205	219	223	233	243	245
2	17	41	115	181	212	230	238	244	242	243
3	0	49	137	171	212	228	234	249	248	251
4	5	28	127	147	208	225	236	249	247	250
5	0	44	99	186	219	225	241	245	244	248
5,5	7	21	117	176	212	212	227	234	243	249
6	13	39	125	161	199	204	225	239	240	245
7	18	41	89	151	184	197	215	225	221	229
8	8	31	69	129	143	172	191	196	201	204
9	0	17	69	107	135	152	156	164	172	173
10	6	19	61	84	99	120	128	139	143	148
11	1	16	34	67	84	94	99	112	119	118
12	1	6	29	51	58	73	79	87	92	95
13	0	5	16	31	38	49	53	58	64	66
14	3	2	8	19	20	28	28	35	38	41

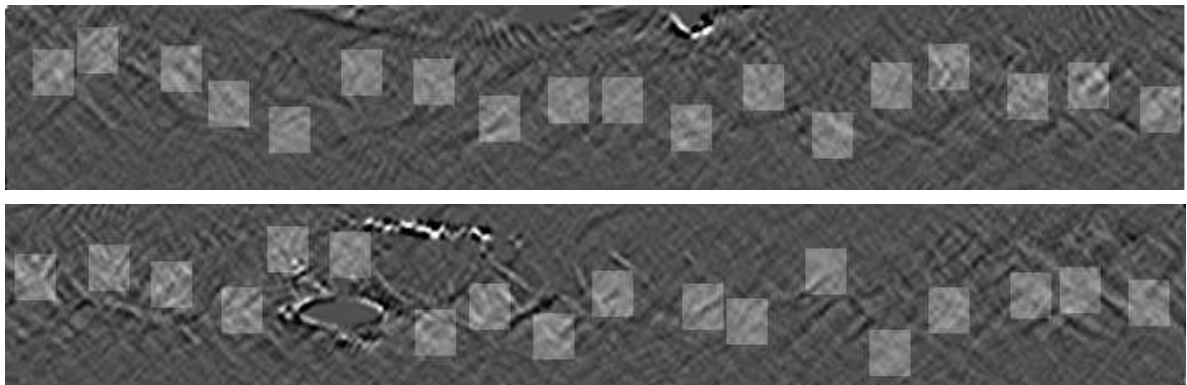
15	0	0	3	6	11	14	14	15	18	21
----	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

Taip pat atlikti papildomi bandymai kaukės dydžio įtakai įvertinti. Grafiniam rezultatų įvertinimui pateikiamas grafikas 5.14 paveiksle. Tokių rezultatų pasiskirstymą lemia per trumpas kraštinės ilgis. Kaukės dydis papildomais bandymais įvertintas prie ilgesnių, nei tyrinėta, kraštinės ilgių. Rezultatai pateikiami papildomoje 5.26 lentelėje ir grafike, žr. 5.17 pav.



5.14 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kaukės dydžio

5.15 paveiksle pavaizduota į dvi dalis padalinta rainelės juosta po filtravimo ir kaukių sutapimo vietos po tarpusavio koreliacijos, kai vietoje tarpinio filtro naudotas nuoseklus filtravimas *Prewitt* horizontaliu ir *Prewitt* vertikaliu filtrais.



5.15 pav. Horizontalaus ir vertikalus *Prewitt* filtravimo rezultatas bei kaukių sutapimo vietos po koreliacijos

Atlikti tyrimai parodė, kad rezultatai tapatūs, ar pirmiau atliekamas *Prewitt* horizontalus filtravimas, ar *Prewitt* vertikalus filtravimas.

Taip pat rezultatai parodė, kad daugiausiai teisingų rezultatų, esant skirtingiems modeliavimo posūkio kampo reikšmėms, davė tarpiniam filtravimui naudojant nuoseklų horizontalų ir vertikalų *Prewitt* filtravimą.

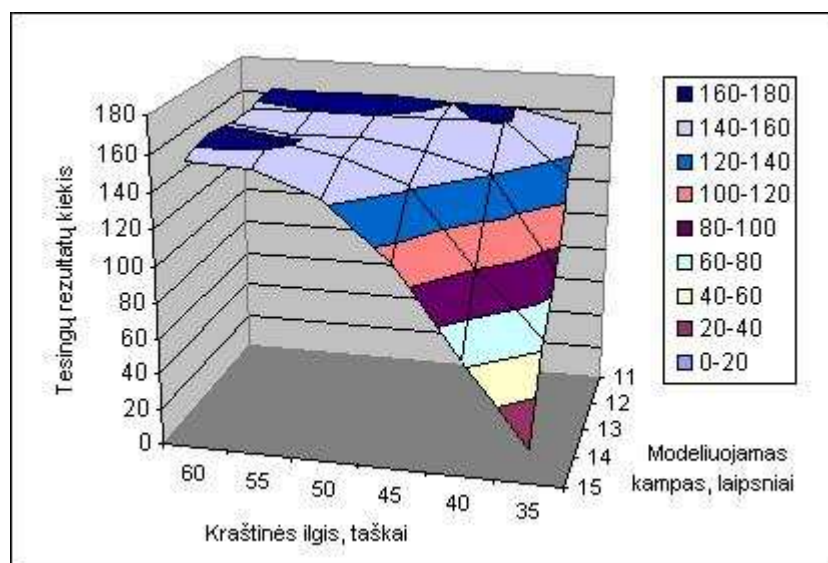
5.25 lentelėje pateikti papildomų bandymų rezultatai. Papildomo bandymo metu siekta išsiaiškinti kaip pasikeis teisingų rezultatų kiekis prie tų pačių, jau anksčiau tirtų modeliuojamų kampų, padidinus kraštinės ilgį. Papildomai tirti 6 kraštinės ilgiai (35, 40, 45, 50, 55, 60 taškų) ir tik 5 kaukės dydžiai (25, 29, 33, 37, 41 taškas). 5.26 lentelėje pateiktas rezultatų pasiskirstymas nuo skirtingų kaukės dydžių, prie didesnių papildomų kraštinės ilgių. Paprastesniam vizualiniam įvertinimui pateikiami grafikai 5.16 ir 5.17 paveikslėliuose.

5.25 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kraštinės ilgių papildomo bandymo metu

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kraštinės ilgis, taškai					
	35	40	45	50	55	60
11	151	160	160	162	162	162
12	132	161	159	160	160	159
13	90	141	151	156	155	159
14	65	100	142	155	162	162
15	19	63	112	143	156	158

Gauti duomenys rodo, kad kraštinės ilgio didinimas pasiteisino prie didesnių modeliuojamų suktes kampų. Esant posūkio kampui 15° ir dideliame kaukės kraštinių ilgiui segmento kraštinės ilgis turėtų būti apie 60 taškų, o ne 40 taškų kaip pasirinktuju atveju., kadangi kvantavimo žingsnis vienam taškui atitinka $0,25^\circ$. Jei kaukė būtų parinkta arti segmento krašto, esant tokiam posūkiui, ji atsidurtų už paieškos zonos ribų. Grafiniam rezultatų įvertinimui pateikiamas grafikas 5.16 paveiksle ir grafikas 5.17 paveiksle.



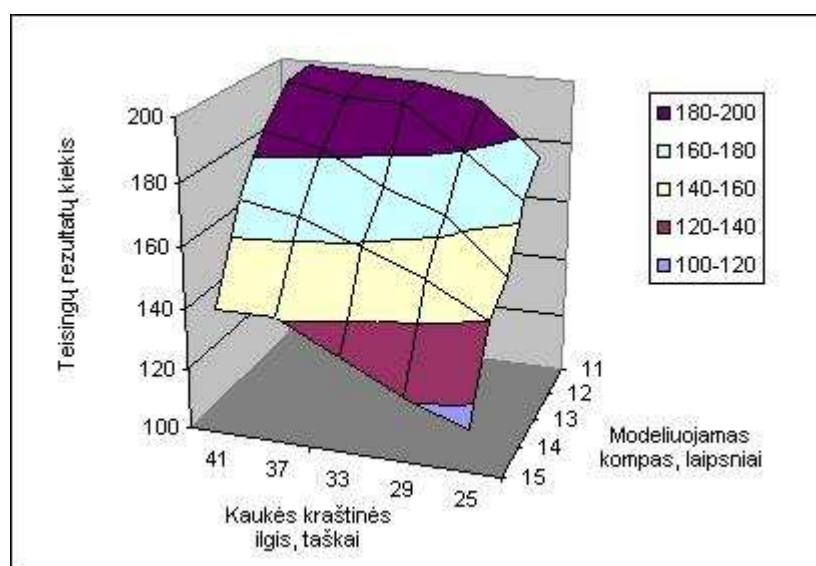
5.16 pav. Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie didesnių kraštinės ilgių

5.26 lentelė

Teisingų rezultatų pasiskirstymas prie skirtingų kaukės dydžių papildomo bandymo metu

Modeliuojamas kampas, laipsniai	Kaukės dydis, taškai				
	25	29	33	37	41
11	174	191	196	197	199
12	165	180	194	194	198
13	147	165	172	182	186
14	140	151	159	166	170
15	114	121	131	141	141

Rezultatai rodo, kad tikslinga naudoti kaukės ilgį ne mažesnę kaip 25 taškai ir ne didesnę 41 tašką, kadangi tokio dydžio kaukė savo ilgiu dengtų visą segmentą.



5.17 pav. Teisingų rezultatų priklausomybė nuo kaukės dydžio prie didesnių kraštinės ilgių

5.4. Metodo tikslumo priklausomybė nuo pasirinktų parametrų

Dėl pasirinkto polinės transformacijos kvantavimo žingsnio, kuris lygus $0,25^\circ$, o tai reiškia, kad vienas taškų stulpelis rainelės juostoje atitinka $0,25^\circ$ kampą ne transformuotame vaizde, rezultatas gana tiksliai prognozuojamas, kai modeliuojamas sukities kampas yra $0,25$ kartotinis. Siekiant išsamiau išsiaiškinti kaip algoritmas elgiasi esant laipsnio dalies modeliuojamo kampo atveju, buvo atlikti tyrimai, kurių rezultatai pateikiami 5.27 – 5.34 lentelėse.

Reikia pastebėti, kad prieš atliekant tyrimą buvo tikėtasi tokių rezultatų:

- uždavus modeliuojamus kampus lygius – $14,80^\circ$ ir $14,85^\circ$, rezultatas bus $14,75^\circ$;
- uždavus modeliuojamus kampus lygius – $14,90^\circ$ ir $14,95^\circ$, rezultatas bus $15,00^\circ$.

Tyrimas buvo atliekamas su dviem skirtingais kaukių dydžiais: 33 ir 37 taškai. Kraštinių ilgių, tyrimo metu, pasirinkti tokie: 45, 50, 55 ir 60 taškų. Kiekvieno bandymo metu prie vieno kraštinės ilgio maksimalus teisingų rezultatų skaičius – 36. Antrajame lentelės stulpelyje pateikiamas dominuojantis rezultatas, o trečiajame – jo pasikartojimo skaičius.

1. Rezultatai, kai kaukės kraštinės ilgis 33 taškai:

5.27 lentelė

Rezultatai, kai α – 14,80°, kaukės dydis – 33 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	27
50	14,75	30
55	14,75	32
60	14,75	32

Iš lentelės matyti, kad didėjant kraštinės ilgiui, prognozuojamo teisingo rezultato kiekis didėja. Peršasi išvada, kad tolimesniuose tyrimuose tikslinga didinti kraštinės ilgį.

5.28 lentelė

Rezultatai, kai α – 14,85°, kaukės dydis – 33 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	27
50	14,75	30
55	14,75 15,00	27 5
60	14,75 15,00	26 7

Iš lentelės paskutinių dviejų eilučių matyti, kad parinkus kraštinės ilgį didesnę už 50 taškų, prognozuojamas vis didesnis neteisingo rezultato kiekis, tačiau jis nėra pavojingas, kadangi atsižvelgiama į dominuojantį rezultatą.

5.29 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,90^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	18
	15,00	9
50	14,75	22
	15,00	8
55	14,75	11
	15,00	21
60	14,75	5
	15,00	27

Iš rezultatų matyti, kad esant kraštinės ilgiui 45 ir 50 taškų, dominuoja rezultatas 14,75°, nors tyrimo pradžioje tikėjomės 15°, esant užduotam modeliujamam kampui.

5.30 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,95^\circ$, kaukės dydis – 33 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	4
	15,00	23
50	14,75	7
	15,00	23
55	14,75	2
	15,00	30
60	14,75	1
	15,00	31

Iš gautų duomenų matyti, kad gauti rezultatai tenkina tyrimo pradžioje iškeltas sąlygas.

2. Rezultatai, kai kaukės kraštinės ilgis 37:

5.31 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,80^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	28
50	14,75	32
55	14,75	33
60	14,75	33

Gauti rezultatai atitinka iškeltus reikalavimus.

5.32 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,85^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	29
50	14,75	32
55	14,75	32
	15,00	1
60	14,75	30
	15,00	3

Lyginant gautus rezultatus su rezultatais, kai kaukės ilgis 33 taškai, matyti, kad neteisingas rezultatas prognozuojamas mažiau kartų esant tam pačiam modeliujamam posūkio kampui.

5.33 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,90^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	20
	15,00	9
50	14,75	23
	15,00	9
55	14,75	15
	15,00	18
60	14,75	8
	15,00	25

Kaip ir atveju, kai kaukės ilgis – 33 taškai, neteisingas rezultatas dominuoja esant kraštinės ilgiui 45 ir 50 taškai. Šio bandymo metu teisingo rezultato kiekis keliomis reikšmėmis didesnis, kai kraštinės ilgis lygus 55 ir 60 taškų.

5.34 lentelė

Rezultatai, kai $\alpha = 14,95^\circ$, kaukės dydis – 37 taškai

Kraštinės ilgis, taškai	Rezultatas, laipsniai	Pasikartojimo skaičius
45	14,75	5
	15,00	23
50	14,75	3
	15,00	29
55	14,75	2
	15,00	31
60	14,75	3
	15,00	30

Iš lentelės matyti, kad gauti rezultatai tenkina tyrimo pradžioje iškeltas sąlygas, kaip ir atveju kai kaukės ilgis lygus 33 taškams.

Iš gautų rezultatų matyti, kad pasirinktas kvantavimo žingsnio dydis neužtikrins tikslaus rezultato gavimo esant laipsnio dalies sukties posūkiui, jei kraštinės ilgis bus ne adekvatus sukties posūkiui. Pasirinkus kvantavimo žingsnį lygų $0,05^\circ$ laipsnio, išauga laiko sąnaudos reikalingos skaičiavimams atlikti. Esant tokiam kvantavimo žingsniui rainelės juostos ilgis nuo 1440 taškų išauga 5 kartus iki 7200 taškų. Tuomet vieno segmento ilgis nuo 40 taškų išaugtų iki 200 taškų. Atsižvelgiant į tai, kad kraštinės ilgis taip pat padidėtų 5 kartus, paieškos zonos ilgis taptų lygus 700 taškų. Tokiam paieškos zonos ilgiui tektų naudoti 1024 taškų dydžio dvimatį masyvą. Nagrinėto metodo atveju tarpusavio koreliacija atliekama su 256 taškų dydžio dvimačiu masyvu. Kadangi FFT sąsūkos trukmė proporcinga $N^2 \text{Log}(N)$, skaičiavimų trukmė pailgėtų 20 kartų, žr. 5.35 lentelę.

Atliekant tyrimą buvo naudojama tokia kompiuterinė įranga: procesorius - AMD Athlon 1100 Mhz; operatyvinė atmintis - 750 MB SDRAM; kietasis diskas 40 GB, 7200 rpm. Naudojant pateiktą įrangą viena tarpusavio koreliacija Visual C++ programavimo kalba parašytoje programoje apskaičiuojama per 1 sekundę. Pilnas vieno kadro apdorojimas trunka apie 30 sekundžių. Tuo metu, pasirinktas modeliavimo MATLAB 6.1 paketas skaičiavimus atlieka net keliasdešimt kartų lėčiau.

5.35 lentelė

2-D FFT laiko ir skaičiavimo sąnaudos.[18]

Masyvo dydis	DFT daugybos	DFT trukmė	FFT daugybos	FFT trukmė
256 * 256	4.3e9	71 min.	1,048,576	1.0 s
512 * 512	6.8e10	19 h.	4,718,592	4.8 s
1024 * 1024	1.1e12	12 dienos	20,971,520	21.0 s
2048 * 2048	1.8e13	203 dienos	92,274,688	92.2 s

5.5. Išvados

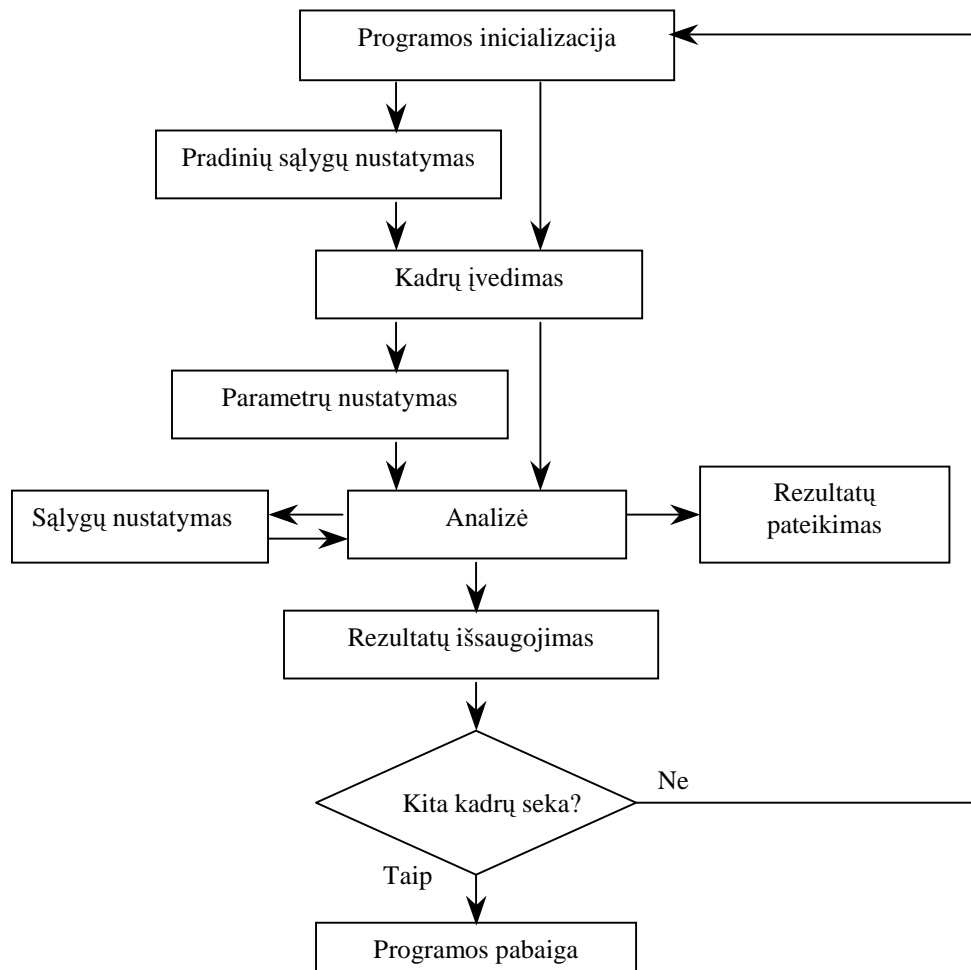
Išanalizavus modeliavimo rezultatus, galiausiai juostos tarpiniam apdorojimui buvo pasirinktas *Prewitt* horizontalus ir vertikalus filtravimas. Nustatyta, kad kaukės ir paieškos zonos dydžiai turi didelę įtaką rezultatų kokybei. Kaukės dydis turi būti kuo didesnis, bet neturi viršyti segmento dydžio. Mūsų atveju ne mažesnis už 25×25 ir ne didesnis už 37×37 taškų. Paieškos zonos dydis didėjant kampui taip pat turi didėti. Nustatėme, kad tarkime esant sukties kampui iki 15° , zonos ilgis turėtų būti ne mažesnis kaip 130 taškų. Iki 25° - 240 taškų. Pasirinktas kvantavimo žingsnio dydis neužtikrins tikslaus rezultato gavimo esant laipsnio dalies sukties posūkiui, jei kraštinės ilgis bus neadekvatus sukties posūkio reikšmei.

Vėlesni atlikti matavimai su atsitiktiniu modeliujamu sukties kampu patvirtino tarpusavio koreliacijos parametrų pasirinkimo teisingumą. Matuojant tikrą akies judesių seką teks įvertinti geometrinius iškreipimus dėl akies obuolio formos ir jų įtaką rezultatams.

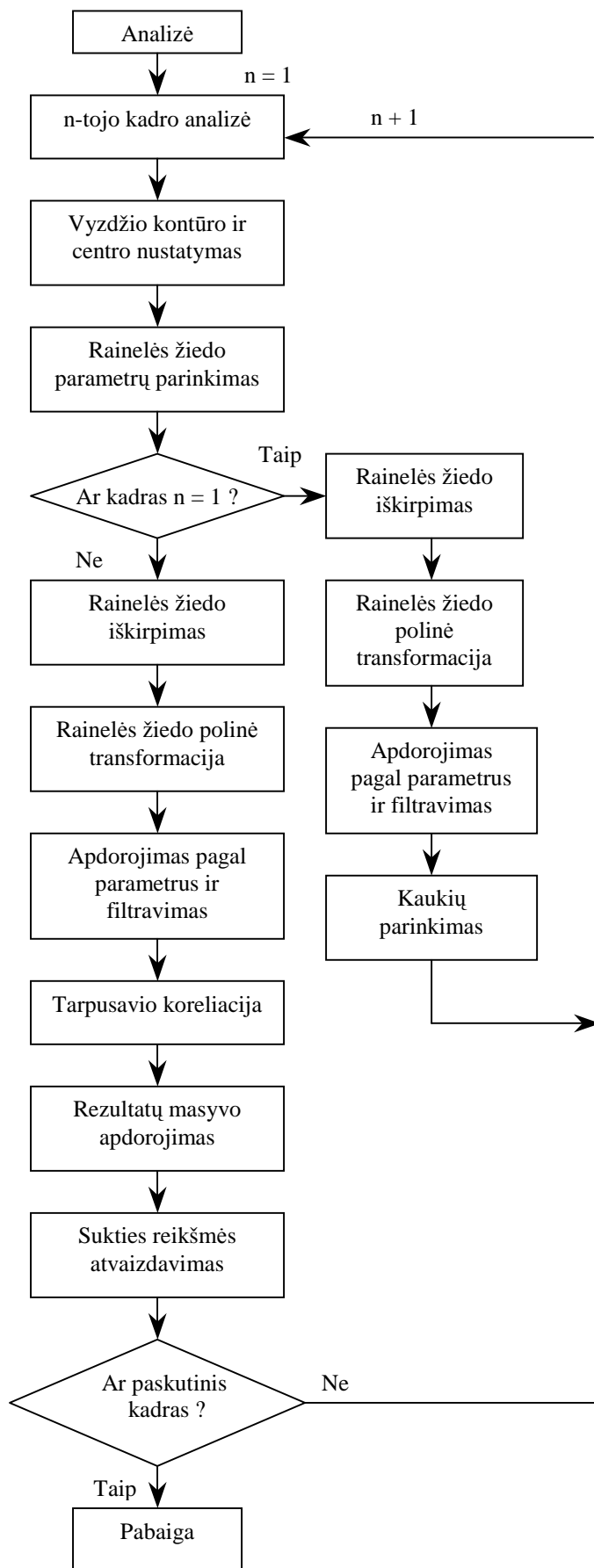
6. METODO PROGRAMINĖS ĮRANGOS ALGORITMŲ STRUKTŪRA

Darbe pateiktas sukties matavimo metodas įgyvendintas programinėje įrangoje, parašytoje C++ kalba, naudojant *Microsoft Visual Studio* paketą

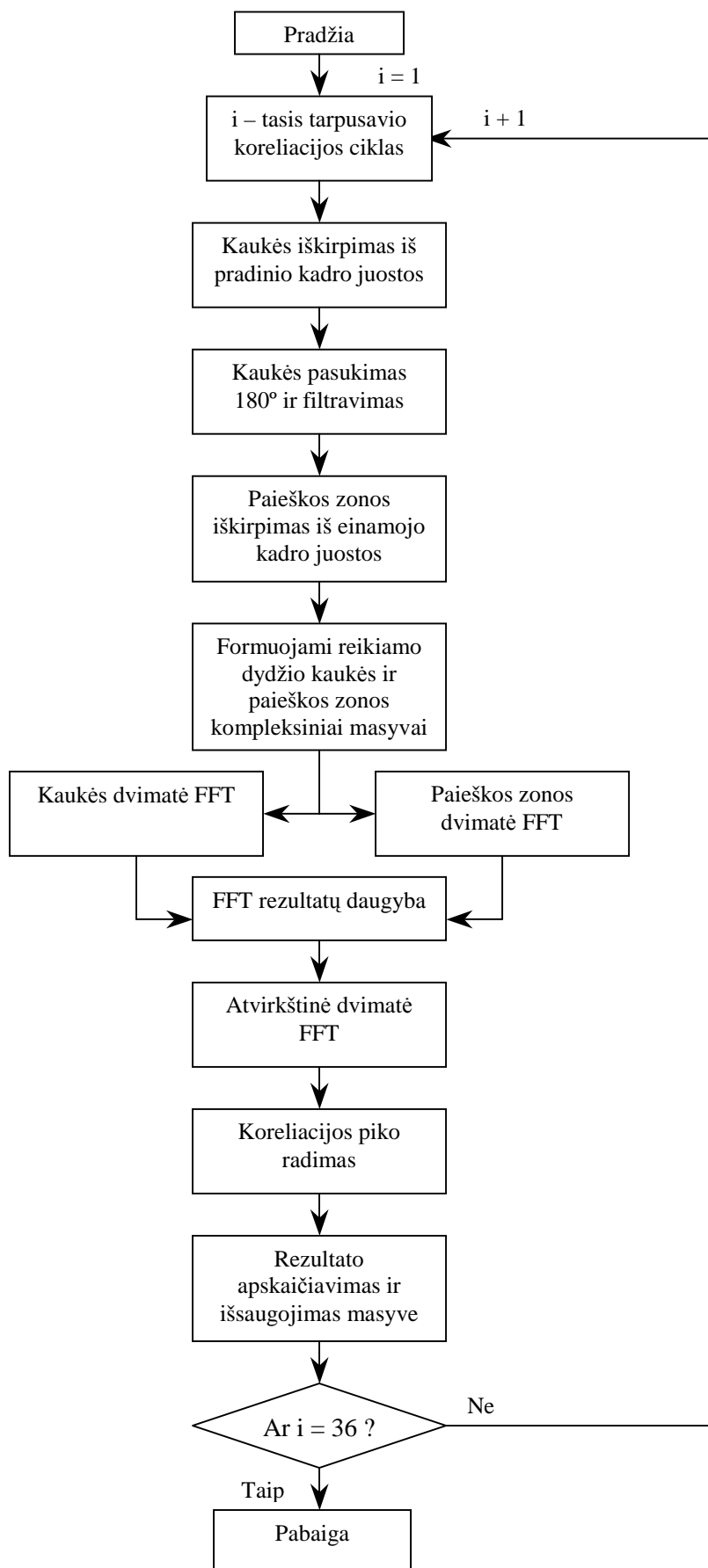
Apibendrintas programos algoritmas pateiktas 6.1 paveiksle. Po programos inicializavimo, keičiamos pradinės sąlygos (jei reikalinga), įvedamas video failas (kadru seką). Pradinių sąlygų nustatymų metu parenkamas vyzdžio nustatymo metodas (koordinacių vidurkinimo, aproksimacija apskritimu, Hough transformacija). Vyzdžio nustatymui naudojamas aproksimacijos apskritimu metodas išnagrinėtas N. Ramanausko darbe [15]. Nustačius pradines sąlygas, užkraunama .ajm tipo kadru seką, kur kadro formatas – 656×485 taškai. Nustatomi parametrai reikalingi tolimesniam apdorojimui: parenkamas rainelės žiedo vidinis ir išorinis žiedas, filtravimas, kontrastas ir šviesumas. Toliau vykdoma įvestų kadru analizė. Kiekvieno kadro analizės metu ekrane atvaizduojami gaunami rezultatai. Duomenys gali būti išsaugomi *.txt tipo bylose, iš kurių juos vėliau galima apdoroti.



6.1 pav. Apibendrinta programos veikimo algoritmo schema



6.2 pav. Išsami analizės etapo algoritmo schema



6.3 pav. Išsami tarpusavio koreliacijos algoritmo schema

6.2 paveiksle pavaizduota analizės etapo išsami algoritmo struktūra. Analizės pradžioje kadre randamas vyzdžio kontūras ir centras. Šios užduoties atlikimui panaudota N. Ramanausko [15] programinės įrangos dalis. Turint vyzdžio centrą ir kontūrą, apibrėžiamas rainelės žiedas, kurio vidinį ir išorinį spindulį galima koreguoti rankiniu būdu. Jei analizės metu tai yra pirmasis kadras, tuomet iškerpamas rainelės žiedas pagal vidinį ir išorinį spindulį. Po polinės transformacijos, kuri išnagrinėta 3.2 skyrelyje, gauname rainelės juostą, kurios ilgis 1440 taškų. Juosta apdorojimą pagal parinktus, jei tai reikalinga, šviesumo ir kontrasto parametrus. Galiausiai juosta filtruojama filtravimo tripletu (žr. 3.3 ir 5.3 skyrelius). Filtruota juosta dalinama į 36 segmentus iš kurių kiekviename parenkamos koreliacijai reikalingų kaukių centro koordinatės. Perskaitomas kitas kadras, kuriame vėl randamas vyzdžio kontūras ir centras, iškerpamas rainelės žiedas transformuojamas į juostą, apdorojama ir filtruojama. Apdorota juosta skaidoma į 36 segmentus – paieškos zonas, kurios koreliuojamos su atitinkamomis parinktomis kaukėmis iš pradinio kadro. 6.3 paveiksle pateiktą išsami tarpusavio koreliacijos algoritmo schema. Po koreliacijos etapo turimas 36 reikšmių rezultatų masyvas, kuris apdorojamas ir vartotojui pateikiamas sukties rezultatas. Jei apdorotas kadras nėra paskutinis kadro sekoje, tuomet pereinama prie kito kadro analizės. Priešingu atveju analizė baigiama.

6.3 paveiksle pateikta tarpusavio koreliacijos algoritmo struktūrinė schema. Pagal pasirinktą analizės metodą kiekvienam kadrai atliekamos 36 tarpusavio koreliacijos. Veiksmų sekos kiekvienai tarpusavio koreliacijai – identiškos. Iškerpama kaukė iš pradinio kadro apdorotos rainelės juostos, kuri dar papildomai filtruojama ir pasukama 180° . Pasukimo reikalauja koreliacijos metodas. Taip pat iš einamojo kadro apdorotos rainelės juostos iškerpama reikiamo ilgio paieškos zona. Prieš atliekant Furjė transformaciją (žr. 3.5 skyrelį), tiek kaukei tiek paieškos zonai suformuojami atskiri kompleksiniai masyvai, kur patalpinamos jų intensyvumo reikšmės. Pereinama prie paieškos zonos ir kaukės diskretinės dvimatės Furjė transformacijos. Dvimatė Furjė transformacija įgyvendinama atliekant vienmates transformacijas masyvo eilutėms po to stulpeliams. Rezultate gaunami du kompleksiniai reikšmių masyvai su realiosiomis ir menamosiomis dalimis. Tarpusavyje sudauginus masyvus gaunamas vienas kompleksinis masyvas, su juo atliekama atvirkštinė Furjė transformacija, kurios rezultatas koreliacijos rezultatų masyvas. Tokį masyvą galime vadinti koreliacijos koeficientų plokštuma, kadangi kiekvienas taškas indikuoja kaukės sutapimo dydžio vietą paieškos zonoje. Pikas (didžiausia reikšmė) koeficientų erdvėje indikuoja tapatumą toje vietoje. Pagal tai apskaičiuojamas kaukės poslinkis pradinio kadro atžvilgiu. Gautas rezultatas talpinamas į rezultatų masyvą. Jei tai nebuvo 36-oji koreliacija kadre, procedūra kartojama su kita identiška pora. Priešingu atveju tarpusavio koreliacijos etapas baigiamas.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

- ✓ Ištirtas polinės tarpusavio koreliacijos metodo tinkamumas.
- ✓ Išsiaiškinta, kad būtinas pildomas rainelės intensyvumų apdorojimas. Tam reikalui ištirta per 20 filtravimo variantų, kurių dalis patekti darbe. Galiausiai rainelės juostos tarpiniam apdorojimui buvo pasirinktas *Prewitt* horizontalus ir vertikalus filtravimas.
- ✓ Nustatyta, kad kaukės ir paieškos zonos dydžiai turi didelę įtaką rezultatų kokybei. Kaukės dydis turi būti kuo didesnis, bet neturi viršyti segmento dydžio. Mūsų atveju ne mažesnis už 25x25 ir ne didesnis už 37x37 taškų. Nustatėme, kad tarkime esant sukties kampui iki 15°, zonos ilgis turėtų būti ne mažesnis kaip 130 taškų. Iki 25° – 240 taškų
- ✓ Dėl pasirinkto kvantavimo žingsnio yra svarbu, kad kraštinės ilgis būtų adekvatus arba maksimalus sukties posūkiui, dėl rezultatų neapibrėžtumo esant laipsnio dalies kampo posūkiui
- ✓ Sukties posūkio matavimas nėra galimas realiuoju laiku dėl koreliacijos metodo reikalaujančių skaičiavimo technikos išteklių.
- ✓ Koreliacijos rezultato piko radimas C++ programavimo kalboje sudaro sunkumų, ko nėra dirbant su MATLAB 6.1 modeliavimo paketu.
- ✓ Norint išsamiau įvertinti šio metodo tinkamumą, reikėtų pasitelkti dirbtinę akies judesių seką su žinomomis sukties reikšmėmis.
- ✓ Dėl rainelės rašto sudėtingumo, reikėtų atlikti bandymus sekant tam tikros spalvos segmentų judėjimą, nors naudojant šią savybę ne visi respondentai bus tinkami tyrimams.
- ✓ Matuojant tikrą akies judesių seką teks įvertinti geometrinius iškraipymus dėl akies obuolio formos. Teks įvertinti ir tų iškraipymų įtaką rezultatams.

LITERATŪRA

1. Structure of the human eye. [žiūrėta 2004-02-27]. Prieiga per internetą: <<http://library.thinkquest.org/12409/structure.html>>.
2. Lietuvos aklujų ir silpnaregių svetainė. Rainelė. [žiūrėta 2005-04-14]. Prieiga per internetą: <<http://akis.lass.lt/schema/dalis6.htm>>.
3. Carpenter R.H.S. Movements of the eyes. London: Pion, 1977. 420 p.
4. Porrill J. The variation of torsion with vergence and elevation/J. Porrill, J. Irvins, J. Frisby// Vision Research. 1999, vol. 39, p .3934-3950.
5. Michael Brodsky C. Do you really need your Oblique muscles? Adaptations and exaptations// Archives of Ophthalmology. 2002. p. 820-828.
6. Collewijn H., Van der Steen J., Ferman L., Jansen T. C. Human ocular counterroll: Assesment of static and dynamic properties from electromagnetic scleral coil recordings// Experimental Brain Research. 1985, vol. 59, p. 185-196.
7. Moore S.T., Haslwanter T., Curtnoys I.A. A Geometric Basis for Measurement of Three-dimensional Eye Position Using Image Processing/S.T. Moore, T. Haslwanter, I.A. Curtnoys// Vision Research. 1996, vol.36, No.3, p. 445-459.
8. Robinson D.A. A method of measuring eye movements using scleral search coils in magnetic field// BME. p. 137-145.
9. Paliulis E. Estimation of three – dimensional eye rotations coordinates by electromagnetic method/E. Paliulis, G. Daunys, Z. Kapoula// Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2002. Nr. 3(38), p. 7-11.
10. Skalar Medical bv homepage. [žiūrėta 2004-03-15]. Prieiga per internetą: // <<http://www.skalar.nl>>.
11. Haslwanter T. Mathematics of three-dimensional eye rotations// Vision Res. 1995. Vol. 35, No. 12, p. 1727-1739.
12. Haslwanter T, Steven T. Moore. A theoretical analysis of three-dimensional eye position measurement using polar cross-correlation/T. Haslwanter, Steven T. Moore// IEEE transactions on biomedical engineering, vol. 42, No.11, November 1995. p.1053-1061.
13. Groen Eric L. Orientation to gravity - oculomotor and perceptual responses in man. Utrecht University, 1997. ISBN 90-367-0982-2. [žiūrėta 2004-04-08]. Prieiga per internetą: <<http://www.desc.med.vu.nl/Publications/Thesis/Groen/Groen.htm>>.
14. Ramanauskas N. The Investigation of Eye Tracking Accuracy using Synthetic Images/ N. Ramanauskas, G. Daunys// Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2003. Nr.4(46), p. 17-20.

15. Ramanauskas N. Noise of Eye Movement Detection by Videoculography/ N. Ramanauskas, G. Daunys// Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2004. Nr.6(55), p. 26-28.
16. Daugman, J. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence//Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 15(11) 1993. p 1148-1161.
17. Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. 1999. ISBN 0-9660176-6-8. Prieiga per internetą: <www.dspguide.com>.
18. Image Processing Fundamentals. [žiūrėta 2003-02-21]. Prieiga per internetą: <<http://www.ph.tn.tudelft.nl>>.
19. Luong Chi Mai. Introduction to Computer Vision and Image Processing// Department of Pattern Recognition and Knowledge Engineering Institute of Information Technology, Hanoi, Vietnam. Chapter: 9.3 Fast Fourier Transform. [žiūrėta 2004-03-22]. Prieiga per internetą: <<http://www.netnam.vn/unescocourse/computervision/93.htm>>.
20. MathWorks MATLAB 6.1 Help. Image Processing Toolbox: fspecial. 2001.
21. Fisher R. HIPR2/R. Fisher, S. Perkins, A. Walker// Gaussian Smoothing. 2000. [žiūrėta 2003-05-06]. Prieiga per internetą: <<http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/gsmooth.htm>>.
22. About PCI Help Gateway// Prewitt Edge Filter (3x3). [žiūrėta 2004-03-08]. Prieiga per internetą: <<http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pcihlp/FPRE/>>.