



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Tomas SAKALAUSKAS

ŽMOGAUS AKIES TINKLAINĖS SKAITINIŲ MODELIŲ TYRIMAS
ANALYSIS OF COMPUTATIONAL MODELS OF HUMAN RETINA

Magistro baigiamasis darbas

Informatikos inžinerijos studijų kryptis
Informacinių elektroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 621E15003
Atvirojo kodo sistemų specializacija

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
prof. habil. dr. R. Martavičius
2014 m. _____ mėn. ____ d.

Tomas SAKALAUSKAS

ŽMOGAUS AKIES TINKLAINĖS SKAITINIŲ MODELIŲ TYRIMAS
ANALYSIS OF COMPUTATIONAL MODELS OF HUMAN RETINA

Magistro baigiamasis darbas

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Informacinių elektroninių sistemų studijų programa, valstybinis kodas 621E15003

Atvirojo kodo sistemų specializacija

Vadovas	dr. Dalius Matuzevičius	_____	_____
	(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	(parašas)	(data)
Konsultantas	-	_____	_____
	(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	(parašas)	(data)

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas. Magistro baigiamasis darbas informatikos inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2014, 78 p., 34 iliustr., 3 lent., 55 bibl., 5 priedai.

Darbo metu atliktas žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas. Išanalizavus biologinės žmogaus regos sistemos modelius, atrinkti bei ištirti perspektyvūs žmogaus akies tinklainės skaitiniai modeliai ir pateikti tyrimo rezultatai. Tyrimo rezultatai gauti naudojant skaitmeninio signalų apdorojimo, vaizdų analizės bei matematinės statistikos teorijas. Žmogaus akies tinklainės modelių ir metodų tyrimas atliktas *Windows* ir *Linux* operacinių sistemų aplinkose, taikant *OpenCV Retina*, *Python Canny* ir *HVSToolBox* programinę įrangą. Skaitiniai modeliai ir metodai palyginti su *Matlab* programa, kur nustatyta, kad daugiausiai baltų taškų/briaunų aptinkantis modelis – metodas yra *Python Canny*. *Python Canny* aptikimo procentas lyginant su kitais – 64,72 %, *HVSToolBox* – 59,23 % ir *Retina* – 51,16 %. Viso rezultatams gauti modeliuota 12 skirtingų vaizdų kiekvieno modelio – metodo atveju.

Tomas SAKALAUSKAS

Analysis of computational models of human retina. Master degree of informatics engineering. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, 2014, 78 p., 34 pic., 3 tab., 55 lit., 5 annexes.

Biological human models are examined in computational models of human retina analysis. Promising computational models of human retina were selected and researched during this work. Research results derived by using digital signal processing, image analysis and mathematical statistic theory. Investigation of human retina models and methods performed in *Windows* and *Linux* operating systems applying *OpenCV Retina*, *Python Canny* and *HVSToolBox*. Computational models and methods compared with results which are gained modeling the same pictures in *Matlab*. According to obtained results defined that at white pixels/edges mostly detected using *Python Canny* model – method. *Python Canny* detection per cent is compared with others – 64,72 %, *HVSToolBox* – 59,23 % and *Retina* – 51,16 %. Overall, 12 different pictures were modeled during this research.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

TVIRTINU

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis

Katedros vedėjas

Informatikos inžinerijos studijų kryptis

Informacinių elektroninių sistemų studijų programa, valst. kodas 621E15003

prof. habil. dr. R. Martavičius

Atvirojo kodo sistemų specializacija

201_ m. _____ mėn. ____ d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS

Studentui

Tomui SAKALAUSKUI

Baigiamojo darbo tema: Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

Analysis of Computational Models of Human Retina

Patvirtinta 201_ m. _____ mėn. ____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201_ m. _____ mėn. ____ d.

Darbo tikslas – atlikti žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimą.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti žmogaus regos sistemos modelių analitinę apžvalgą.
2. Atrinkti perspektyvius žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius.
3. Ištirti atrinktus žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius ir pateikti tyrimo rezultatus.

Aiškinamojo rašto turinys

1. Įvadas
 - 1.1. Darbo aktualumas ir tikslas
 - 1.2. Darbo uždaviniai
 - 1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai
 - 1.4. Darbo naujumas ir praktinė nauda
 - 1.5. Darbo struktūra
2. Žmogaus regos sistemos ir jos modelių analitinė apžvalga
3. Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių analizė
4. Žmogaus akies tinklainės modeliavimas
5. Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimo rezultatai
6. Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

A priedas. Skaitinių modelių tyrimo rezultatai

B priedas. Pranešimo 17-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas:

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas

(parašas)

dr. Dalius Matuzevičius

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(parašas)

201_ m. _____ mėn. ____ d.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas Sakalauskas, 20083472

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Informacinės elektroninės sistemos, AKSfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2014 m. gegužės 30 d.

atvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas“ patvirtintas 2012 m. spalio 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 289el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas dr. Dalius Matuzevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Tomas Sakalauskas

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Žymenys, santrumpos ir paaiškinimai	9
1. Įvadas	10
1.1. Darbo aktualumas ir tikslas	10
1.2. Darbo uždaviniai	10
1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai	10
1.4. Darbo struktūra.....	10
2. Žmogaus regos sistemos ir jos modelių analitinė apžvalga	12
2.1. Žmogaus regos sistemos.....	12
2.2. Žmogaus regos sistemos modeliai.....	17
2.2.1. Vieno kanalo žmogaus regos sistemos modeliai.....	17
2.2.2. Daugelio kanalų žmogaus regos sistemos modeliai.....	18
2.2.3. Žmogaus regos sistemos modelių palyginimas.....	21
2.2.4. Skyriaus išvados.....	21
3. Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių analizė	23
3.1. Žmogaus akies tinklainės veikimo analizė	23
3.2. Tinklainės modelių skaitinė analizė	29
3.2.1. Integruojantis veikimo modelis.....	30
3.2.2. Ištekantis integruojantis veikimo modelis.....	34
3.2.3. Determinuoti funkciniai modeliai	38
3.2.4. Stochastiniai funkciniai modeliai.....	40
3.2.5. Baltojo triukšmo funkciniai modeliai	42
3.2.6. Skyriaus išvados.....	44
4. Žmogaus akies tinklainės modeliavimas	46
4.1. <i>OpenCV Retina</i> modelis	46
4.2. <i>Python Canny</i> metodas.....	49
4.3. <i>HVSToolBox</i> modelis	52
4.4. Skyriaus išvados	56
5. Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimo rezultatai	57
5.1. Rezultatų gavimo metodika ir jų apibendrinimas.....	57
5.2. Skyriaus išvados.....	62
6. Apibendrinimas. Išvados	64
Literatūra	65
PRIEDAI	69
A priedas. <i>OpenCV Retina</i> modelio atveju gauti vaizdai	69
B priedas. <i>Python Canny</i> metodo atveju gauti vaizdai.....	71
C priedas. <i>HVSToolBox</i> modelio atveju gauti vaizdai.....	73
D priedas. <i>Matlab Canny</i> modelio atveju gauti vaizdai	74
E priedas. Pranešimo 17-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga.....	76

Paveikslų sąrašas

2.1 pav. Vaizdo kelias žmogaus regos sistemose	12
2.2 pav. Žmogaus akies tinklainės centrinės dalies vaizdas ir neuronas	13
2.3 pav. Šviesa stimuliuojamų ląstelių intensyvumas ir jų veikimo dažnis.....	14
2.4 pav. Schematiškai pateiktas vaizdo kelias žmogaus regos sistemoje	15
2.5 pav. Smegenų žievėje regimo vaizdo formavimas	16
3.1 pav. Akies pjūvis ir šviesos patekimas į tinklainę	21
3.2 pav. Žmogaus tinklainės skerspjūvis	24
3.3 pav. Fotoreceptorių absorbuojamų bangų (spalvų) ilgiai	25
3.4 pav. Bipoliarinės ląstelės	26
3.5 pav. Ganglinių ląstelių reakcija jas veikiant šviesa	26
3.6 pav. Įtampos potencialų apdorojimas neuronuose	28
3.7 pav. Integruojantis veikimo modelis.....	32
3.8 pav. Integruojantis veikimo modelis su nustatyta jėgimo srove.....	33
3.9 pav. Ištekantis integruojantis veikimo modelis su nustatyta jėgimo srove.....	36
3.10 pav. Blokinė tinklainės integruojančio veikimo modelio diagrama	37
3.11 pav. Determinuoto modelio blokinė diagrama	38
3.12 pav. DoG pritaikymas erdvės signalui.....	40
3.13 pav. Stochastinio modelio blokinė diagrama.....	41
3.14 pav. Baltojo triukšmo modelio blokinė diagrama.....	43
3.15 pav. Baltojo triukšmo charakteristikos	43
4.1 pav. Žmogaus akies tinklainės <i>Retina</i> modelio parametrizavimas	48
4.2 pav. <i>Retina</i> modeliu apdorotas automobilių numerių vaizdas	49
4.3 pav. Originalus automobilių numerių vaizdas	49
4.4 pav. Briaunų aptikimas <i>Python Canny</i> modelyje	50
4.5 pav. Briaunų slenksčio ribų veikimas <i>Python Canny</i> metode	51
4.6 pav. Briaunų aptikimas su <i>Python Canny</i>	51
4.7 pav. Originalus vaizdas naudotas su <i>Python Canny</i>	52
4.8 pav. <i>HVSToolBox</i> modelio veikimo schema	54
4.9 pav. <i>HVSToolBox</i> modeliuota šaškių lenta	55
4.10 pav. Originalus šaškių lentos vaizdas	55
5.1 pav. Neaptikti balti taškai lyginant su <i>Matlab Canny</i> metodu.....	59
5.2 pav. Aptikti balti taškai lyginant su <i>Matlab Canny</i> metodu	60
5.3 pav. Naudotų modelių – metodų briaunų neaptikimo/aptikimo aritmetiniai vidurkiai	61
5.4 pav. Išskirtys neaptiktų baltų taškų atveju	61

Lentelių sąrašas

5.1 lentelė. Tyrimo rezultatai <i>Retina</i> ir <i>Matlab</i> atveju	58
5.2 lentelė. Tyrimo rezultatai <i>Python Canny</i> ir <i>Matlab</i> atveju.....	58
5.3 lentelė. Tyrimo rezultatai <i>HVSToolBox</i> ir <i>Matlab</i> atveju.....	59

Žymenys, santrumpos ir paaiškinimai

Geltonoji dėmė – centrinė tinklainės dalis, atsakinga už centrinį matymą.

Erdvinis dažnis – pasikartojimų ar objektų skaičius erdvės, ploto ar ilgio vienetu.

Laikinis dažnis – pasikartojimų skaičius laiko intervale.

Matomumas – galimybė atskirti supančios aplinkos ypatybes, santykinai juos apšvietus ir esant skaidriai aplinkai.

Neurofiziologija – fizikos sritis, tirianti nervų sistemos veikimą.

Periferinis regėjimas – tinklainės periferinės dalies funkcija, kai daikto vaizdas atsiranda bet kurioje tinklainės vietoje, esančioje į kurią nors pusę nuo centrinės duobutės.

Šviesos jautrumas – akies gebėjimas skirti nevienodą apšvietimą.

Žvilgsnio plotas – apima visus erdvėje matomus taškus judant akiai, bet nejudant galvai.

Kontrasto jautrumo funkcija – netiesinė funkcija naudojama kontrasto koeficientui skaičiuoti.

Gauso piramidė – kintantis poveikslų dydis, sudarant to paties vaizdo rinkinį.

Gaboro filtrai – Gauso ir sinuso bei kosinuso funkcijų sandaugos.

1. ĮVADAS

1.1. Darbo aktualumas ir tikslas

Rega yra vienas svarbiausių žmogaus jutimų, kurio dėka žmogus gali gauti informaciją iš aplinkos. Kasdieniniame gyvenime rega yra nepakeičiamas informacijos šaltinis atliekant įvairias užduotis, tad žmonės, kurie netenka regėjimo galimybės yra priklausomi nuo kitų ir negali būti visapusiškai savarankiški.

Regos sutrikimai – dažniausiai netaisyklingai išsivysčiusios regėjimo sistemos pasekmė, tačiau vis didesnę regėjimo sutrikimų dalį sudaro įvairios regos ligos bei žmogaus paveldimumas, genai. Aklumas yra sunkus žmogaus sveikatos sutrikimas, akliesiems yra sunku pažinti kitus žmones, matyti gamtos vaizdus bei objektus, tad pastarieji turi apribotą judėjimo laisvę. Regos sutrikimai taip pat yra didelė psichologinė našta.

Atsižvelgiant į tai, kad žmogaus aklumą bei regos praradimo atvejus dažnai lemia tinklainės sutrikimai, nuspręsta ištirti, kokiais skaitmeniniais modeliais ir metodais galima geriausiai atkartoti žmogaus akies tinklainės veikimą taikant aptiktų briaunų kriterijų.

Darbo tikslas yra atlikti žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimą.

1.2. Darbo uždaviniai

1. Atlikti žmogaus regos sistemos modelių analitinę apžvalgą.
2. Atrinkti perspektyviausius žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius.
3. Ištirti atrinktus žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius ir pateikti tyrimo rezultatus.

1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbe taikomos skaitmeninio signalų apdorojimo, vaizdų analizės, matematinės statistikos teorijos.

Žmogaus akies tinklainės modelių ir metodų tyrimas atliekamas *Windows* ir *Linux* operacinių sistemų aplinkose, taikant *OpenCV Retina*, *Python Canny* ir *HVSToolBox*. Kaip etalonas modelių ir metodų rezultatų palyginimui naudojami *Matlab* programa apdoroti vaizdai. Aptiktų baltų taškų kriterijus, atitinka aptiktų briaunų kiekį [54].

1.4. Darbo struktūra

Darbą sudaro: įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas. Kiekvieno skyriaus pabaigoje sudaromos trumpos skyriaus išvados.

Pirmojo skyriaus pradžioje pristatomos esminės žinios apie žmogaus regos sistemą, jos biologinę sandarą. Glaustai išnagrinėjami žmogaus regos sistemos organai, sudarantys žmogaus

regos sistemą. Antroji pirmojo skyriaus dalis skirta žmogaus regos modelių analizei. Analizės metu apžvelgiami du pagrindiniai žmogaus regos sistemų modeliai – vieno ir kelių kanalų. Pastarieji išnagrinėjami atskirai, atliekamas jų palyginimas.

Antrojo skyriaus pradžioje pateikiamos esminės žinios apie žmogaus tinklainės struktūrą bei veikimą. Išnagrinėjama tinklainės sudėtis, ląstelių tipai bei jų veikimo principai apdorojant vaizdus žmogaus regos sistemoje. Antroji šio skyriaus dalis skirta tinklainės skaitinių modelių analizei. Šioje dalyje pateikiami pagrindiniai tinklainės skaitiniai modeliai – struktūriniai bei funkciniai, atliekama jų analizė.

Trečiame skyriuje aprašomas tyrimo procesas taikant dvylika skirtingų vaizdų, juos apdorojant pasirinktais *Retina*, *Python Canny* ir *HVSToolBox* modeliais bei metodais. Rezultatams palyginti vizualiai pateikiami apdoroti bei originalūs vaizdai.

Ketvirtasis darbo skyrius skirtas žmogaus akies tinklainės modelių – metodų tyrimo rezultatams analizuoti. Darbo metu atliktų modeliavimų duomenys pateikiami lentelėse taikant statistinius aritmetinio vidurkio, standartinio imties nuokrypio bei išskirčių skaičiavimus tyrimo metu gautiems rezultatams apdoroti. Tinklainės modelių – metodų modeliavimo proceso rezultatai vaizduojami grafiškai, pateikiant kiekvieno apdoroto vaizdo rezultatus vertinant jo baltų taškų aptikimo kriterijų.

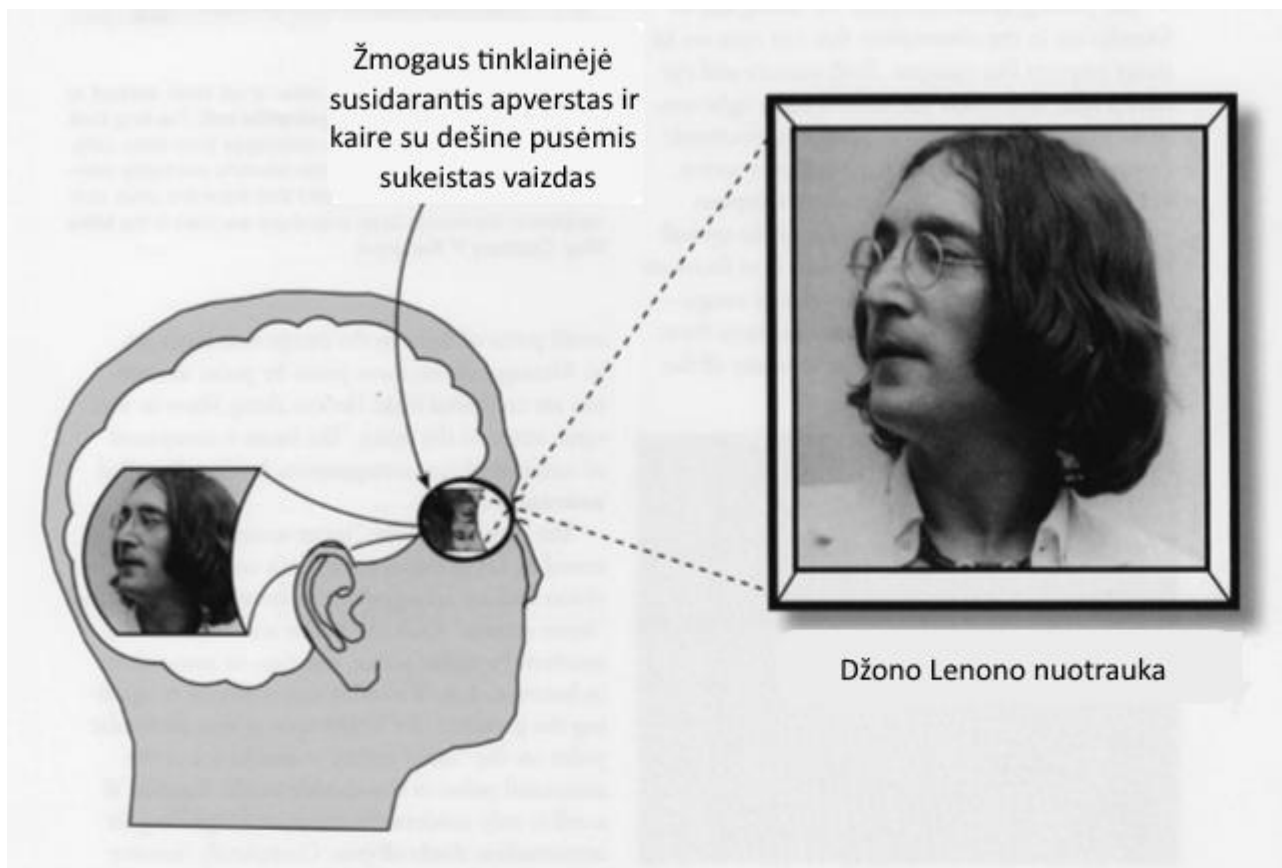
Magistrinio darbo pabaigoje apibendrinami darbo rezultatai ir pateikiamos bendrosios išvados.

2. ŽMOGAUS REGOS SISTEMOS IR JOS MODELIŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Daugelis regą suvokia kaip savaime suprantamą dalyką. Žmogaus vizualusis suvokimas atrodo savaime suprantamas dalykas ir žmogus apie tai dažnai net nesusimąsto. Negalvojama apie tai, kaip fiziologiniai procesai paveikia tai, kas matoma ir kaip matoma. Regėjimas – vienas svarbiausių jutimų, kuris teikia daugiausia informacijos apie aplinką. Regėjimas žmogui padeda orientuotis erdvėje, įvertinti nuotolį, kryptį, daiktų erdvinius ryšius, sekti procesų ir reiškinių dinامينius pokyčius, kontroliuoti ir reguliuoti savo judesius, suvokti meno kūrinis, stebėti gamtos pasikeitimus. Nors regą įtakoja ne tik fiziologiniai bet ir psichologiniai veiksniai, šiame darbe gilinamasi tik į fiziologinius regos aspektus, kadangi jie labiau susiję su nagrinėjama tema.

2.1. Žmogaus regos sistemos

Nagrinėjant žmogaus akies tinklainę, svarbu suvokti kaip veikia žmogaus regos sistema. Supaprastintas vaizdo kelias žmogaus regos sistemoje iliustruojamas paveiksle 2.1. Paveiksle pateiktas Džono Lenono (John Lennon) atvaizdo kelias žmogaus regos sistemoje.

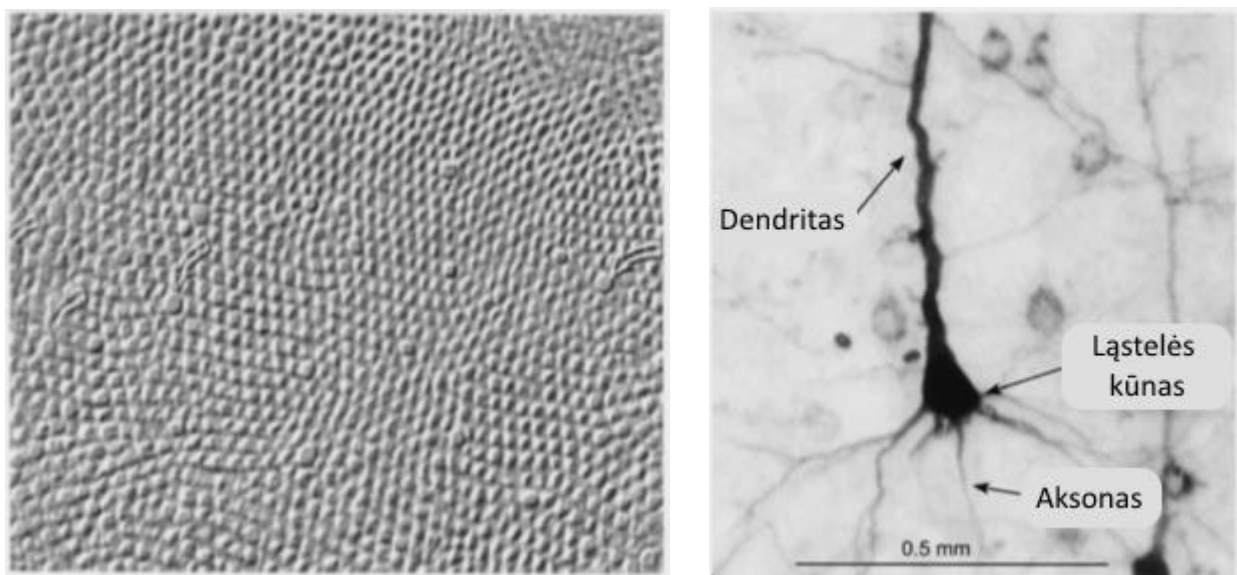


2.1 pav. Vaizdo kelias žmogaus regos sistemoje [2]

Čia, regimas vaizdas patenka per žmogaus akis į tinklainę, kur yra apverčiamas ir sukeičiamas pusėmis, o iš tinklainės perduodamas į žmogaus smegenis, kurios suvokia ir atitinkamai apdoroja bei reaguoja į matomą vaizdą.

Žmogaus regoje pirmiausia vaizdas patenka per akies obuolyje esantį lęšį, kurio paskirtis yra sufokusuoti išorinį poveiklį tinklainėje ant šviesai jautrių foto receptorių. 2.2 a) paveiksle vaizduojamas šviesai jautrus receptorių tinklo išsidėstymas akies obuolio galinėje dalyje, kurią sudaro dviejų tipų foto receptoriai kūgiai (angl. *Cones*) ir stiebeliai (angl. *Rods*), padidinti 1200 kartų.

Tinklainėje krintanti šviesa veikia (stimuliuoja) fotoreceptorius ir kiekvienas jų koduoja po vieną mažą poveiklio taško intensyvumą ant kurio yra fokusuojamas išorės vaizdas. Šių taškų intensyvumo signalas perduodamas nervų pluoštu (angl. *Neural Fiber*) per regos nervą (angl. *Optic Nerve*) į žmogaus smegenis, kur pastarosios sudarytos iš milijonų mažų komponentų, smegenų ląstelių, vadinamų neuronais – 2.2 b) paveikslas.

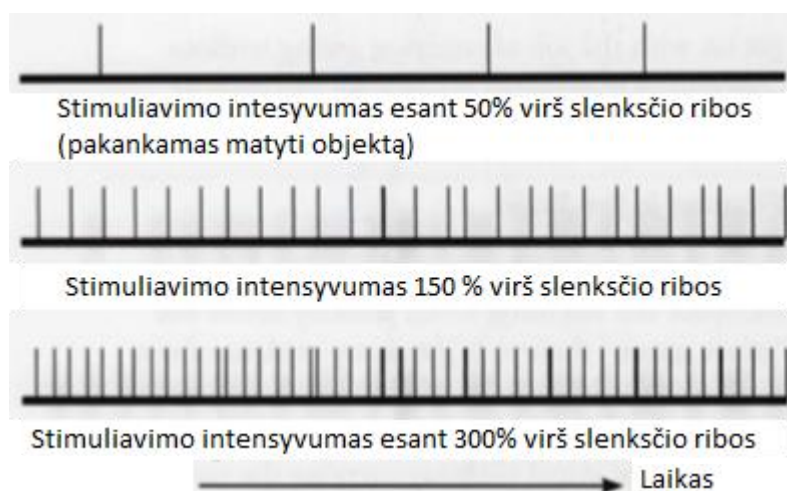


2.2 pav. a) žmogaus akies tinklainės centrinės dalies vaizdas (kairėje); **b)** neuronas (dešinėje) [2]

Pateikto neurono struktūrą sudaro ilgas ir plonas pluoštas, vadinamas dendritu (angl. *Dendrite*), kuris priima pranešimus iš kitų ląstelių bei aksonai (angl. *Axons*), kurie priešingai nei dendritai perduoda informaciją kitoms ląstelėms. Tarp dendrito ir aksonų matome ląstelės kūną, kuris užtikrina tinkamą ląstelės funkcionavimą.

Tinklainėje esanti ląstelė bet kuriuo laiko momentu gali būti aktyvi, neaktyvi ar balansuoti tarp šių dviejų būsenų (žr. 2.3 pav.). Jeigu ląstelė yra itin aktyvi, ji signalizuoja apie ryškios vietos (šviesos) buvimą tam tikrame taške, kuris tiesiogiai susijęs su išoriniu poveikliu. Analogiškai, jeigu ląstelė yra vidutiniškai aktyvi, ji signalizuoja apie šviesiai pilko atspalvio buvimą tame taške, o visiškai neaktyvios ląstelės perduoda signalą apie juodus (neapšviestus) taškus. Neuronai aksonais

persiunčia pranešimus į kitus neuronus, o pranešimai yra koduojami veikimo potencialais, kurių kiekvienas yra trumpas įtampos pokytis per neurono membraną (sienelę). 2.3 paveikslo apačioje matyti laiko juosta, kurioje parodyta, kiek veiksmų įvyksta šviesai stimuliuojant neuronus.



2.3 pav. Šviesa stimuliuojamų ląstelių intensyvumas ir jų veikimo dažnis [2]

Vaizdo kelias nuo akies iki žmogaus smegenų ląstelių pateiktas 2.4 paveiksle. Šviesa (vaizdas) patenka per akis, pasiekia tinklainę, impulsai perduodami į regos nervą, pluoštų sankirtą, alkūninius branduolius ir galiausiai pasiekia galinę smegenų žievę. Regimo paveikslo vietos sunumeruotos siekiant aiškiau pateikti ir suprasti kas vyksta žmogaus regos sistemoje.

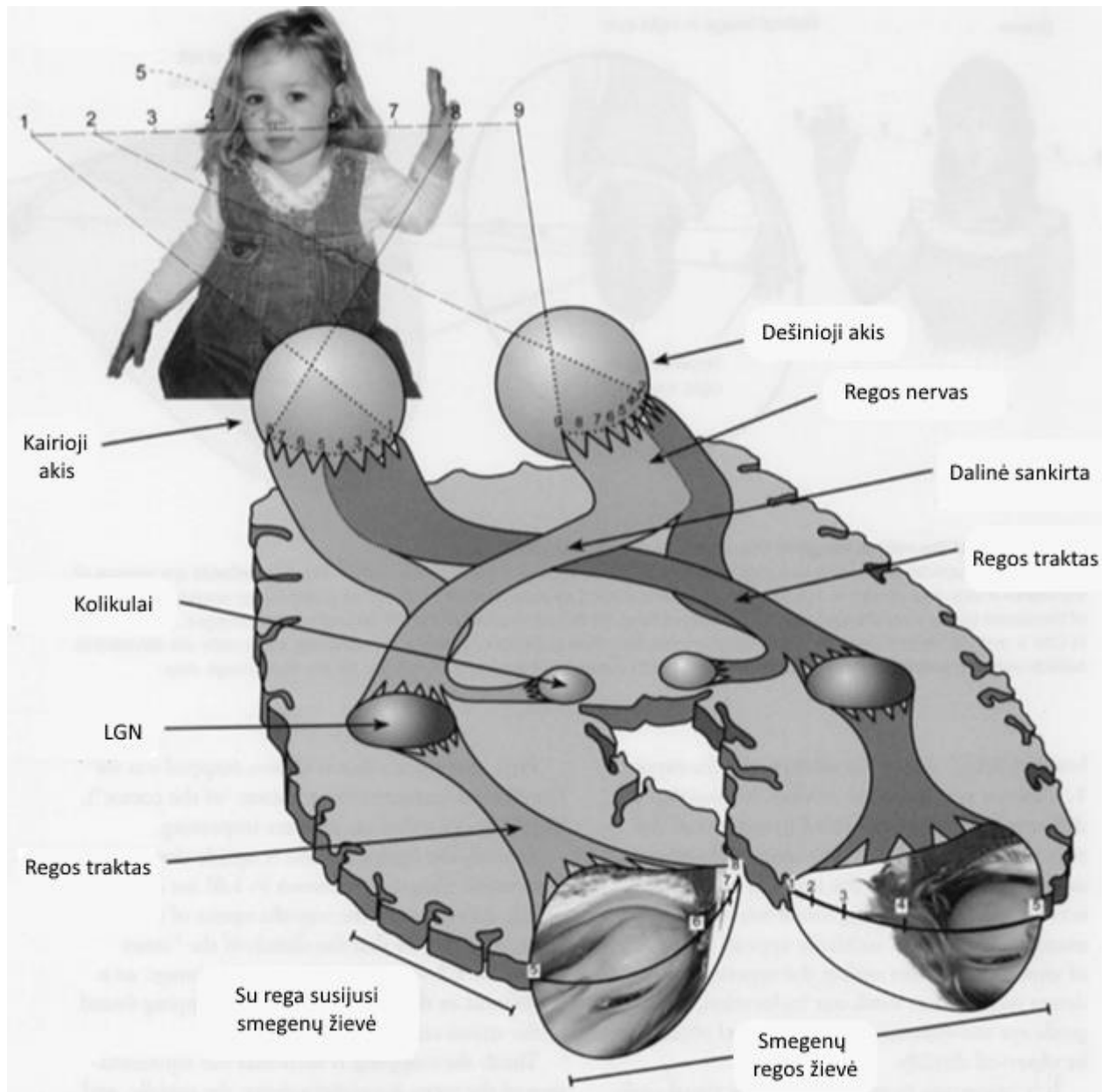
Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad žmogaus regos sistemoje akys nepriima identiškų vaizdų. Kairioji akis mato didesnę plotą į kairę nuo centrinės linijos (1 ir 2 sritys), bei atvirkščiai – dešinioji akis (8 ir 9 sritys). Tai tik vienas iš pagrindinių skirtumų regos sistemoje, kodėl akys yra dvi (šią darbą šis klausimas plačiau nagrinėjamas nebus).

Galima pastebėti, kad iš akių išeinanti linija yra regos nervas, o jo pluoštą sudaro tam tikros tinklainės rūšies ląstelių aksonai, kurie perduoda pranešimus iš tinklainės į smegenis. Kairysis ir dešinysis regos nervas susikerta sudarydami dviejų pluoštų sankirtą (angl. *Optic Chiasm*), o regos pluoštas iš kiekvienos akies pasidalija į dvi dalis. Kiekvienos akies viena pluošto dalis pereina į kitą smegenų pusę, o šis pasidalijimas dar vadinamas daliniu padalijimu. Kairiosios ir dešniosios akių vaizdai yra analizuojami toje pačioje fizinėje vietoje, smegenų žievės dalyje (angl. *Primary visual* arba *Striate Cortex*), kuri yra pagrindinė vaizdų priėmimo vieta žmogaus smegenyse.

Regos nervo pluoštai iš susikirtimo taško tiek kairėje tiek dešinėje veda į šone esančius alkūninius branduolius (angl. *Lateral Geniculate Nucleus* – LGN). Pastarieji yra tarsi „pirmosios stotys“ regos nervų pluoštų kelyje link smegenų žievės. Aksonai, išeinantys iš tinklainės LGN susijungia su naujų neuronų dendritais, o naujieji neuronai pasiekia smegenų žievę. Tačiau, LGN

priima signalus ne vien tik iš akių, bet ir iš kitų jutimo organų. Manoma, kad LGN gali būti susiję su pranešimų filtravimu iš tinklainės atsižvelgiant į tai, kas vyksta kituose žmogaus organuose.

Žmogaus regos nervas vaizdinę informaciją perduoda dar dviem struktūromis, pateiktoms 2.4 paveiksle. Kairėje ir dešinėje pusėje esantys kolikulai (angl. *Superior Colliculus*) yra smegenų struktūra, esanti po smegenų žieve. Jos funkcija yra skirtinga nei smegenų žievės dalies ir pagal šiuo metu žinomus tyrimus galima teigti, kad kolikulai yra susiję su dėmesio sutelkimu regimam vaizdui. Pavyzdžiui, vykdomas objekto stebėjimas ar sekimas, gali būti vykdomas kolikulais.

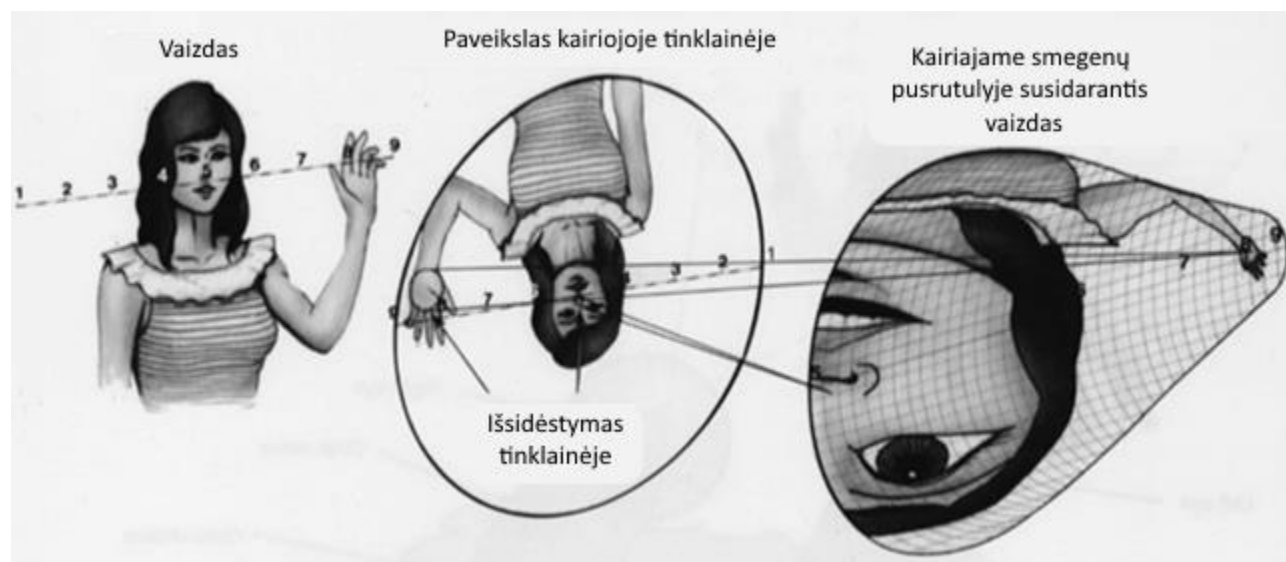


2.4 pav. Schematiškai pateiktas vaizdo kelias žmogaus regos sistemoje [2]

2.4 pav. matyti, kad mergaitės veidas rodomas sukeistomis pusėmis bei apverstas. Matomas vaizdas susidaro paveikslą padalijus tiksliai per vidurį ir kiekviena dalis pateikiama smegenų žievėje (techniškai, kiekviename smegenų pusrutulyje (angl. *Cerebral Hemisphere*)).

Atvaizdavimas yra iškreipiamas erdvėje, kad didesnis smegenų žievės plotas būtų skirtas centriniam matymui, o ne periferijai: tai gana padidėjęs/patinęs veidas, sumažėjusi ranka ar plaštaka (2.5 pav.). Tai rodo, kad daug didesnis mūsų smegenų plotas yra skirtas geltonosios dėmės regėjimui (angl. *Foveal Vision*), t. y. analizuojama, ką žmogus regi, į kur yra nukreiptas ir sutelktas žvilgsnis. Dėl šios priežasties, žmogus smulkesnius daiktus geriau mato tiesioginio vaizdo srityje, į kurį tuo metu žiūri, lyginant su detalėmis, kurios yra ne tiesioginiame regėjimo lauke.

Smegenų žievėje vaizdo išsidėstymas techniškai vadinamas topografija (angl. *Topographic*), o tinklainės atveju, tai yra tinklainės topografija (angl. *Retinotopic*), kai paveikslai išsaugo gretimų ryšius, analogiškai, kaip pastarieji egzistuoja tinklainės ląstelėse (išskyrus vidurio liniją).



2.5 pav. Smegenų žievėje regimo vaizdo formavimas [2]

Įdomu tai, kad žmogaus akis vibruoja bei juda atsitiktinai specifiniu dažniu. Šios vibracijos yra žinomos kaip *termoro*, neperiodinis, panašus į bangos akies judėjimas, amplitudės atitinka maždaug kūgio esančio geltonojoje dėmėje skersmenį, o dažnis yra apie 90 Hz. *Dreifavimas* – lėtas akies judėjimas, kai judama užfiksuojant objektą keliolika fotoreceptorių, vidutinis greitis lankas per sekundę 6 minutes ir *mikrosakados* arba staigūs šuoliai, akies judėjimas per keliasdešimt foto receptorių užfiksuojant objektą, bei trunka apie 25 ms. Šie judėjimai skiriasi nuo mirksėjimo ir yra susiję su suvokimu bei yra žvilgsnio kontrolės ir krypties rezultatas. Vibravimas, dreifavimas bei mikrokaskadiniai judesiai nėra visiškai išaiškinti, manoma, kad šie procesai didina vaizdo rezoliuciją, matymo lauką daugiau nei leidžia receptoriai. Nustatyta, kad smegenys yra įtrauktos į regą vienu ar kitu būdu apie 60 %.

2.2. Žmogaus regos sistemos modeliai

Modeliuoti žmogaus regą galima įvairiais būdais bei modeliais. Pastarųjų tikslas atitikti neurofiziologinį veikimą, pavyzdžiui, atkartoti neuronų veikimą pirminėje regos žievėje, kaip pateikta 2.4 paveiksle.

Žmogaus regos sistemos modeliai gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes: *vieno kanalo* bei *daugelio kanalų* modelius. Pastarieji regimąjį vaizdą išskaido į keletą erdvinių dažnių bei kontrasto kitimo juostas (žemi dažniai), nustatant ribas atskirai kiekvienam kanalui prieš juos sumuojant. Šie modeliai sukurti atsižvelgiant į smegenų žievės neuronų veikimą, kurie geba nustatyti (reaguoti į) dažnį bei regimo vaizdo kontrastą. Vieno kanalo modeliai neatlieka tokio kintamos skiriamosios gebos skaidymo bei veikia globaliai taikant vienos apimties paveikslo apdorojimą.

2.2.1. Vieno kanalo žmogaus regos sistemos modeliai

Vienas pirmųjų erdvės pagrindu sukurtas modelis – Manos ir Sakrisono (J. L. Mannos ir D. J. Sakrison) [4]. Šio modelio veikimui naudojama kontrasto jautrumo funkcija (angl. *Contrast Sensitivity Function* – CSF), kurios parametrai parenkami pagal subjekto vaizdą bei šviesos netiesinę funkciją, įgyvendintą kaip kubinės šaknies funkcija (angl. *Cube-Root Function*). Modelio testavimui naudojant JPEG formato vaizdus gautas mažas koreliacijos koeficientas lyginant su realiu subjekto vaizdu [5].

Kitas modelis, susidedantis iš netiesinės apšvietimo funkcijos bei CSF fazių, pateiktas Halo ir Halo (C. F. Hall ir E. L. Hall) [6]. Jų modelyje CSF yra taikomos kaip atskiri žemų bei aukštų dažnių filtrai. Šviesos netiesinė funkcija yra taikoma po žemų dažnių filtro, tačiau prieš aukštų dažnių filtrą. Tai leidžia modeliuoti fiziologinius procesus: žemų dažnių prigimtis žmogaus regos sistemoje vyrauja optikoje, kur receptoriuose pasireiškia vaizdo ryškumas bei netiesiškumas, o aukšto dažnio charakteristikos sąlygoja *On-center/Off-center* ganglinių ląstelių atsaką. Tačiau, Halo ir Halo modelio efektyvumas yra abejotinas, nes dažniausiai sutinkamuose žmogaus regos sistemos modeliuose dviejų etapų CSF modelis nėra taikomas.

Limbo (J. O. Limb) paveikslo iškraipymo kriterijus, susidedantis iš šviesos netiesinės funkcijos, CSF, erdvės maskavimo ir sudėties etapų, taip pat atlieka žmogaus regos sistemos modeliavimą [7]. Geriausias šio modelio įgyvendinimas atliktas lyginant modelių prognozę su subjektyvia nuomonės verte (angl. *Mean Opinion Score* – MOS). Didžiausias koreliacijos koeficientas, gautas naudojant: žemo dažnio CSF vaizdams, lokalaus aktyvumo maskavimą ir sumavimą, kuris koncentruojamas į dvi ar tris vietas su didžiausiu iškraipymu, vietoje skaičiuojamo vidutinio iškraipymo visame paveiksle. Rezultatai parodė ženklų koreliacijos pagerėjimą MOS

atveju lyginant su vidutine kvadratine klaida (angl. *Mean Squared Error* – MSE). Tačiau modelių parametrų skaičiavimas priklauso nuo naudojamų vaizdų duomenų. Taigi, tai yra tik optimalus pasirinkimas keletu atvejų lyginant su panašiais paveikslų tipais bei jų kokybe ar sąlygomis.

Lukas ir Budrikis (F. X. J. Lukas ir Z. L. Budrikis) naudojo panašią metodologiją kaip Limbas, tačiau pastarųjų modelis išplėstas iki video medžiagos apdorojimo [8]. Erdvės ir laiko CSF įgyvendinta kaip atskiros sužadavimo ir slopinimo šakos. Erdvės maskavimas įgyvendintas taikant lokalaus aktyvumo matavimą, o sumavimas atliekamas taikant Minkovskio (H. Minkowski) matavimą su eksponente lygia 2. Gaunama koreliacija lygi $r = 0,88$ su subjektyvia MOS ir gali būti lyginama su $r = 0,69$ taikant MSE. Matomas ženklus koreliacijos padidėjimas taikant pastarąjį modelį.

Karunasekera ir Kingsburis (S. A. Karunasekera ir N. G. Kingsbury) pateikė paveikslo iškraipymo modelį, kurio tikslas aptikti daiktus kaip blokus [9]. Šis žmogaus regos modelis įdomus tuo, kad vaizdų atpažinimui reikalingi parametrai renkami iš skirtingų eksperimentų, matuojant reakcijos laiką į įvairius dirgiklius. Tai yra priešingai nei prieš tai minėtuose modeliuose, kurie parametrus gauna pradinių eksperimentų metu ir daro prielaidą, jog esama duomenų skalės tiesiškumo skirtinguose vaizdų regionuose. Šis modelis taip pat taiko šviesos netiesinę funkciją ir erdvės aktyvumo maskavimą, rezultate gaunant vidurkio klaidą blokų briaunose nustatant didžiąsias blokų dalis. Naudojantis šiuo metodu gaunamas didelis koreliacijos koeficientas lyginant su prieš tai buvusiais modeliais.

Apžvelgtų modelių problema yra ta, kad jie priklausomi nuo paveiksluose esančių vaizdų, t. y. šviesumas, spalvos, kontūrų kiekis ir kt., todėl nerekomenduojama jų taikyti visiems paveikslų tipams bendrai, o esant poreikiui modelius galima modifikuoti ar pasirinkti tinkamiausią, didžiausią koreliacijos koeficientą įgyjantį modelį.

2.2.2. Daugelio kanalų žmogaus regos sistemos modeliai

Žmogaus regos sistemos daugelio kanalų modeliai sukurti taikant neuronų atsakymą pirminėje smegenų žievės dalyje, kuri yra žinoma kaip selektyvi erdviniam dažniui (vidutinis pralaidumas 1,0 – 1,4 oktavos) ir orientacijai (vidutiniškas pralaidumas 35 – 40 laipsnių). Daugelio kanalų modeliai išskaido paveikslą į kanalus, kurie yra jautrūs tiek erdviniam dažniui tiek orientacijai. Sekančiame žingsnyje nustatomos aptikimo ribos kiekvienam kanalui atskirai prieš juos sumuojant, bei sukuriamas paveikslas, pateikiantis matomų klaidų vietas. Įvairiais tyrimais nustatyta, kad daugelio kanalų modeliai yra pajėgūs vaizdo pateikimo (prognozavimo) modeliai, kur vieno kanalo modeliai to atlikti negali [10, 11].

Pirmasis daugelio kanalų paveikslo kokybės matavimas buvo pasiūlytas Sakrisono (D. J. Sakrison) [12]. Pasiūlyta technika, klaidos signalui pirmiausia pritaiko netiesinės šviesumo

funkcijos logaritmavimą ir gautą signalą išskaido į erdvino dažnio bei orientacijos pasirinkimo kanalus. CSF ir erdvės maskavimo duomenys yra paimami iš psichofizinių testų taikant paprastą simuliaciją, kurie naudojami nustatyti kirtimo ribą kiekvienam kanalui. Atliekant žymėjimą, visų kanalų klaidos yra sumuojamos sudarant galutinį iškraipymų paveikslą (žemėlapi), kuris gali būti apibendrinamas erdvėje gaunant vieną klaidos įvertį.

Vatsono (A. B. Watson) žievės transformacija, regos modeliavimo įrankis, naudojamas kaip pagrindas daugelio kanalų vaizdų kokybės vertinimo modeliuose [13]. Vienas tokių buvo pasiūlytas Zetzscho ir Hausko (C. Zetzche ir G. Hauske) [14]. Pastarieji naudojo santykinę Gauso piramidę (angl. *Ratio of Gaussian Pyramid* – ROG) kartu su orientacijos atrinkimo Gaboro filtrais, išskaidant abu – tiek originalų, tiek apdorotą paveikslą į erdvinių dažnių bei orientacijos kanalų rinkinius. Penki skiriamosios gebos ir šeši orientacijos lygiai naudojami gauti 30 skirtingų kanalų. Slenksčio lygmuo nustato paveikslo briaunas, parenkamas atsižvelgiant į maskavimo eksperimentų rinkinius, kurie atliekami pasirinktam kraštinių bei linijų kiekiui. Ši slenkstinė vertė lyginama su skirtumu, gautu iš originalaus ir apdoroto signalo kiekviename kanale, siekiant nustatyti, ar klaida yra matoma kanale. Simuliacija atliekama visuose kanaluose, o iš erdvinių kanalų gautas bendras skaičius (vidurkis) skirtas vaizdo kokybės koreliacijai. Koreliacija su MOS lyginama su Watsono modeliu dideliuose stimuliacijos rinkiniuose (8 paveikslai, 13 iškraipymų, 5 subjektai) duoda mažą koreliacijos koeficientą $r = 0,61$, nors tai yra geresnis rezultatas nei naudojant signalo didžiausios vertės konvertavimą į santykinį triukšmą (angl. *Peak Signal to Noise Ratio* – PSNR), kurio koreliacijos koeficientas siekia vos $r = 0,46$.

Regėjimo skirtumų prognozavimo (angl. *Visible Differences Predictor* – VDP) algoritmas pasiūlytas Skoto Dali (S. Daly) yra vienas iš geriausių modelių skirtų vaizdų tikslumo vertinimui [15]. Svarbiausia šio modelio ypatybė yra ta, kad jis pirmiausia sukalibruojamas specifiniais regos parametrais (kaip pikselių išsidėstymas, matymo nuotolis ar monitoriaus charakteristikos). Originalaus bei iškreipto paveikslo šviesumo vertės yra gaunamos naudojant šviesumo netiesinę funkciją (atsižvelgiant į Veberio (Weber) efektą) bei CSF. Modifikuota Watsono (Watson) žievės transformacija yra naudojama paveikslų išskaidymui į dažnių bei orientacijos jautrumo kanalus [16]. Maskavimo procesas įgyvendintas taikant slenkščio ribą, kuri prisitaiko prie kiekvieno kanalo matomumo ribos (atitinkamai pagal CSF) bei priklauso nuo kanalo kontrasto. Tiek originalūs, tiek išskaidyti paveikslai yra naudojami maskavimo procesui, kuris vadinamas *abipusiu maskavimu* (angl. *Mutual Masking*). Tai atliekama, nes klaidos paveikslas gali būti užmaskuotas bet kurio originalaus ar išskaidyto paveikslo, priklausomai nuo naudojamo maskavimo tipo. Pavyzdžiui, neryškumo klaida (angl. *Blurring Error*) turi būti užmaskuojama naudojant išskaidytą paveikslą.

Kai skirtumas tarp originalaus ir apdoroto paveikslo yra palyginamas su slenkščio riba, klaidos yra apjungiamos taikant tikimybių sumavimą ir tokiu būdu sudaromas skirtumų žemėlapis. Tai

suteikia galimybę aptikti klaidą kiekvienoje paveikslų vietoje. Tokia struktūra yra naudinga, nes ji pateikia klaidų vietą ir formą algoritmo programuotojui bei gali būti modifikuojama. Naudojant skirtumų žemėlapių sunku aptikti klaidas natūraliuose (sudėtinguose) paveiksluose. Norint patikrinti ribos aptikimą, Dali pasiūlė naudoti didžiausią VDP reikšmę žemėlapiuose kaip indikatorius ribiniam matomumui. Naudojant šį metodą Dali nustatė, kad jo modelis vaizdų duomenis apdoroja puikiai naudojant realius (sudėtingus) vaizdus [17].

Kitas ankstyvosios regos modelis yra Lubino (J. Lubin) [18]. Šis modelis naudoja regėjimo parametrus, kuriame židinio šviesos signalas yra paverčiamas į lokalų kontrastą naudojant panašią techniką kaip Peli (E. Peli) LBC algoritmas [19]. Pastarasis algoritmas efektyviai atlieka šviesos keitimą į kontrastą bei erdvinio dažnio išskirstymą. Orientacijos parinkimas įgyvendintas naudojant Hilberto (Hilbert) poras keturioms orientacijoms. Sigmoidinė netiesinė funkcija yra naudojama modeliuoti maskavimo efektui (vidiniam kanalui), kai maskavimo ir stimuliavimo procesai yra panašūs, gaunamas „gilesnis“ efektas su tikslesniu paveikslų apdorojimu. Atsižvelgiant į slenksčio ribą, simuliuojant visus kanalus (naudojant Makovskio (Makowski) sistemą su eksponente 2,4), sudaromas skirtumų žemėlapis.

Lubinas įrodė, kad iš žemėlapio išėmus didžiausią vertę jo modelis gali aptikti didesnę skaičių detalių vaizduose [18]. Įvertinant suspausto vaizdo kokybę, Lubinas susumavo skirtumų žemėlapių, kur vaizdo kokybė gali būti palyginta su MOS duomenimis. Gautas rezultatas, koreliacija tarp MOS ir Lubino siūlymo yra $r = 0,94$, lyginant su MSE $r = 0,81$, nors naudotas vaizdo rinkinys gana ribotas (4 paveikslai, 1 programuotojas, 8 subjektai).

Teo ir Higeris (P. C. Teo ir D. J. Heeger) pasiūlė modelį, paremtą katės smegenų neuronų atsakymais ir Folio ir Bointono (J. M. Foley ir G. M. Boynton) kontrasto maskavimo duomenimis [20, 21, 22]. Šis metodas susideda iš trijų žingsnių:

- tiesinė transformacija išskaidanti tiek originalų, tiek skaitmenizuotą paveikslą į erdvinius dažnius bei jautrios orientacijos kanalus;
- Duotajam skrituliui nubraižomas lygiaplotis kvadratas bei atliekamas normalizavimas, kuris naudojamas modeliuoti kontrasto maskavimui. Parametrai yra pasirenkami pritaikant modelį Folio bei Bointono duomenims [22];
- taikomas aptikimas, kuris apima atsako skirtumą tarp originalaus ir skaitmeninio kanalų bei atsakymo simuliacijos per mažų lopinėlių visumą tyrimo paveiksle.

Vestenas (S. J. P. Westen) pasiūlė modelį, kuris yra panašus į kitus daugelio kanalų modelius [23]. Dalijimas į kanalus vyksta naudojant Peli (Peli) LBV algoritmą, kuriuo atliekamas filtravimas į šešias skirtingas orientacijas [19]. CSF duomenys yra paimami iš Barteno (P. G. J. Barten) modelio, o kontrasto maskavimas yra modeliuojamas naudojant ribos konstanta su 0,65 nuolydžiu

logaritmėje skalėje [24]. Atliekama Minkovskio sudėtis visiems kanalams ir tada gaunamas erdvinis skaičius apibūdinantis poveiklo kokybę. Palyginimas su subjektyviais MOS duomenimis parodo tik nežymų koreliacijos pagerėjimą taikant PSNR $r = 0,84$ lyginant be PSNR $r = 0,78$. Duomenys gauti naudojant 6 poveiklus, 4 skirtingus apdorojimo ir 7 subjektus. Vesteno modelis tap pat gali apdoroti ir video failus.

Vatsonas (A. B. Watson) pateikė nemažai skirtingų regos įrankių bei modelių objekto aptikimui, poveiklo suspaudimui ir kokybės įvertinimui [13]. Jo modelio struktūra yra panaši į kitus, kurie buvo minėti šiame skyriuje. Watsono atlikti bandymai parodė, kad esama galimybė prognozuoti objektų aptikimą gamtos fone.

Nemažas skaičius skirtingų modelių buvo testuojama: tiek vieno, tiek keletos kanalų, įvairūs maskavimo modeliai (be maskavimo, juostinis maskavimas, dalinis maskavimas) ir kt. Didžiausias atradimas yra tai, kad maskuojantis modelis naudojamas kaip svarbus veiksnys ir dalinis maskavimas dažniausiai davė geriausias rezultatus natūraliems poveikslams. Tuo pačiu, vieno kanalo modelių efektyvumas atitiko keleto kanalų daugelyje bandymų.

2.2.3. Žmogaus regos sistemos modelių palyginimas

Pateiktas keletas vieno ir daugelio kanalų regos modelių, didžiausias dėmesys skirtas modelių savybėms pabrėžti, pateikiant nuorodas į išsamius šių modelių literatūros šaltinius.

Galima teigti, kad vieno kanalo modeliai daugeliu atveju negali paaiškinti psichofizinių bandymų duomenų, kuriuos geba atlikti daugelio kanalų modeliai. Tai būtų: tinkamas erdvinio dažnio parinkimas bei maskavimo efektas.

Tačiau, daugeliu bandymų atvejų, kai naudojami standartiniai vaizdai, gauti duomenys rodo, kad taikant vieno ar kelių kanalų modelius rezultatai yra panašūs.

Palyginus vieno ir daugelio kanalų modelius, aptinkant objektus natūraliuose poveikluose nesant maskavimui, daugelio kanalų modeliai objektą aptiko geriau nei vieno kanalo modeliai. Kai buvo naudotas kontrasto maskavimas, objekto aptikimas tiek vienu tiek kitu modeliu tipu buvo gautas labai panašus. Galima daryti prielaidą, kad maskavimas yra vienintelis daugiausiai įtakos turintis komponentas žmogaus pradinės regos sistemoje apdorojant natūralius vaizdus.

2.2.4. Skyriaus išvados

Skyriuje pateikiamas žmogaus regos sistemos biologinis veikimas:

- išnagrinėjama žmogaus regos sistema bei glaustai analizuojamas vaizdo kelias nuo šviesos patekimo per akies obuolio lęšį iki smegenyse esančios regos žievės;
- siekiant suprasti kaip veikia atskiri žmogaus regos organai išsiaiškintos jų atliekamos pagrindinės funkcijos, pateikiant jų savybes ir tarpusavio priklausomumą.

Antrojoje skyriaus dalyje išnagrinėti žmogaus regos sistemos skaitiniai modeliai bei išsiaiškintas jų veikimas. Pastarieji skirstomi į dvi pagrindines grupes: vieno kanalo bei daugelio kanalų modelius.

Daugelio kanalo modeliai regimąjį vaizdą išskaido į keletą erdvinių dažnių bei kontrasto kitimo juostas (žemi dažniai), nustatant ribas atskirai kiekvienam kanalui prieš juos sumuojant. Šie modeliai sukurti atsižvelgiant į smegenų žievės neuronų veikimą, kurie geba nustatyti (reaguoti į) dažnį bei regimo vaizdo kontrastą.

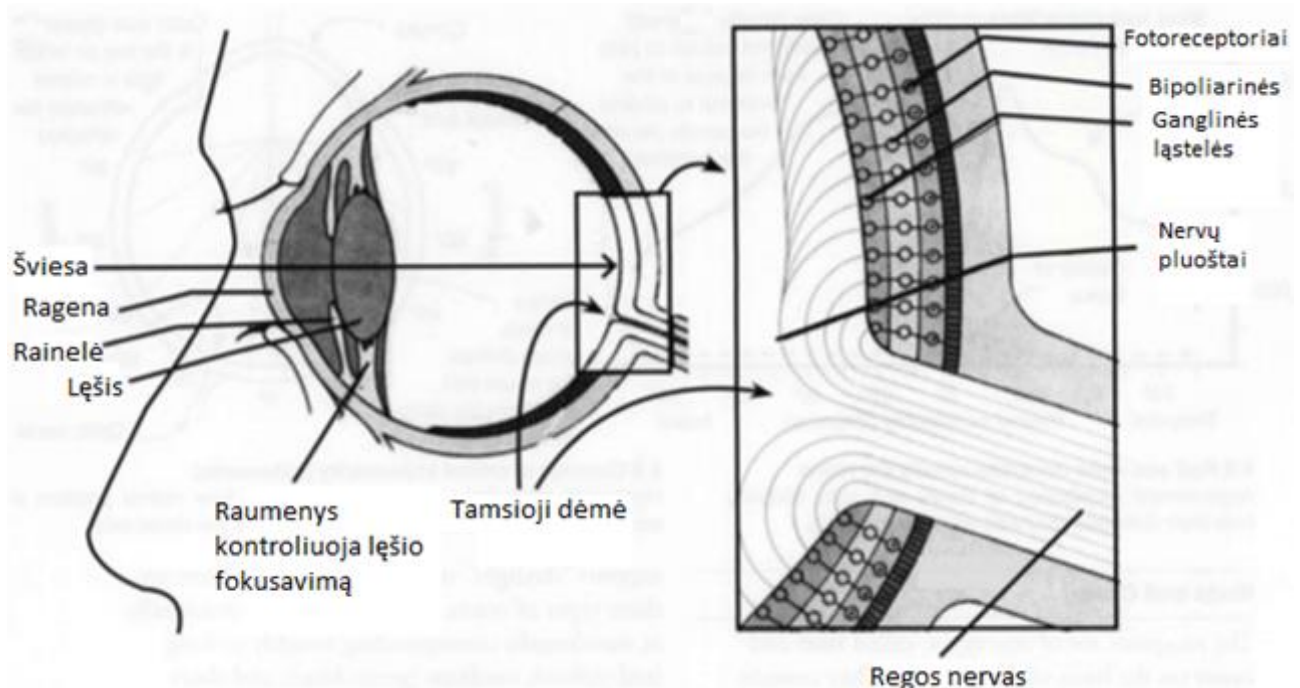
Vieno kanalo modeliai neatlieka tokio kintamos skiriamosios gebos skaidymo bei veikia globaliai taikant vienos apimties paveikslo apdorojimą neišskiriant erdvės ir laiko, tad jų naudojimas yra paprastesnis.

3. ŽMOGAUS AKIES TINKLAINĖS SKAITINIŲ MODELIŲ ANALIZĖ

3.1. Žmogaus akies tinklainės veikimo analizė

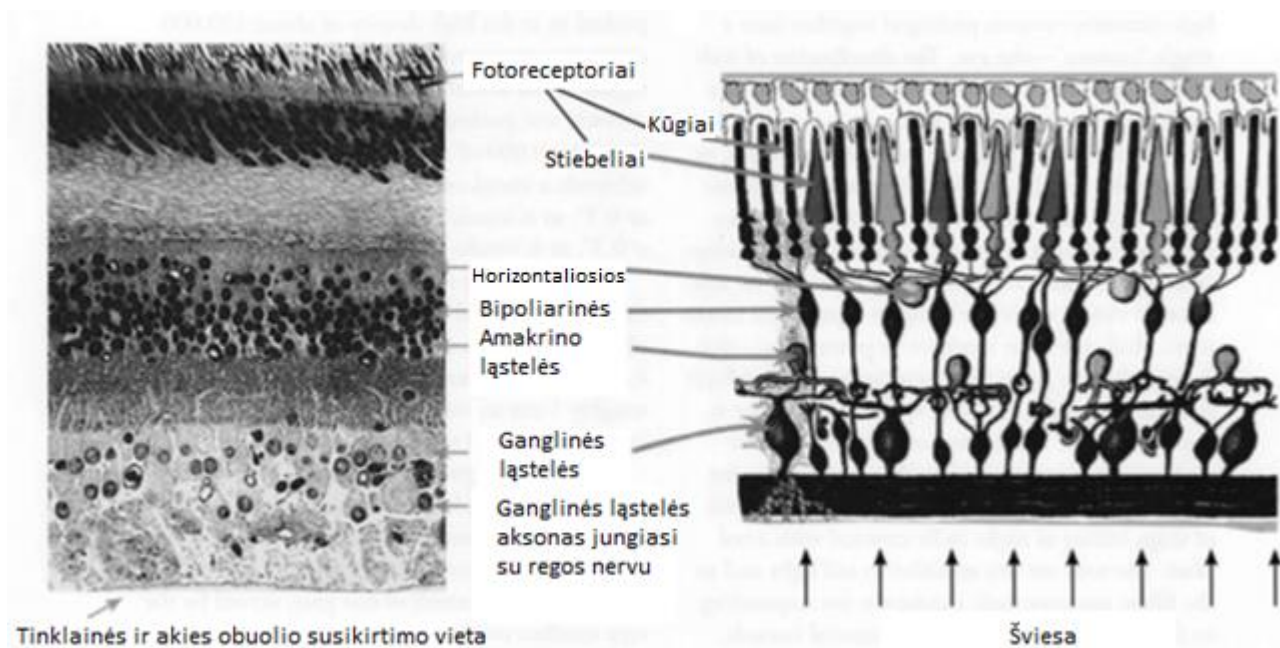
Žmogaus akies tinklainės storis siekia vos 0,5 mm, ji sudaro kitapus akies obuolio vidinės dalies išsidėsčiusios ląstelės. Šis sluoksnis sudarytas iš šviesai jautrių fotoreceptorių, kurie inicijuoja visą vaizdo apdorojimo procesą mūsų regos sistemoje. Bendras receptorių skaičius siekia daugiau nei 126 milijonų. Receptoriai signalus perduoda tinklainėje esančioms nervų ląstelėms, kurie per regos nervą (1,2 milijonų pluoštų) perduodami į žmogaus smegenis.

Svarbiausios tinklainės dalys pateiktos 3.1 paveiksle, ląstelės yra sujungtos tarpusavio ryšiais. Sklindanti šviesa per akies obuolio lęšiuką patenka į tinklainę ant fotoreceptorių, bipoliarinių ir ganglinių ląstelių. Šis kelias kartais vadinamas vertikalia tinklainės struktūra, atskiriant jį nuo horizontalios struktūros, kurią sudaro ląstelių šoninės jungtys. Pastarosios ląstelės sudarytos iš dviejų tipų: horizontaliosios ląstelės, kurios atlieka pranešimų priėmimą iš šoninių fotoreceptorių ir perduoda į bipoliarinius mazgus, bei antroji rūšis – amakrino ląstelės, kurios pranešimus iš šonuose esančių bipoliarinių ląstelių perduoda į ganglines ląsteles, 3.2 paveikslas.



3.1 pav. Akies pjūvis ir šviesos patekimas į tinklainę, kairėje; dešinėje – padidintas tinklainės pjūvio vaizdas su pagrindiniais ląstelių sluoksniais: fotoreceptoriai, bipoliarinės ląstelės, ganglinės ląstelės, nervų pluoštai [2]

Įdomus faktas apie tinklainės anatomiją yra tai, kad fotoreceptoriai yra tolimiausioje tinklainės vietoje. Jie nėra tinklainės paviršiuje, kurį pasiekia šviesa, patekusi per lęšiuką. Tai yra keista, nes šviesa pirmiausia turi pereiti per keletą aukščiau išvardintų (nors ir beveik permatomų) ląstelių sluoksnių, taip pat kraujagysles, kol suaktyvina fotoreceptorius.



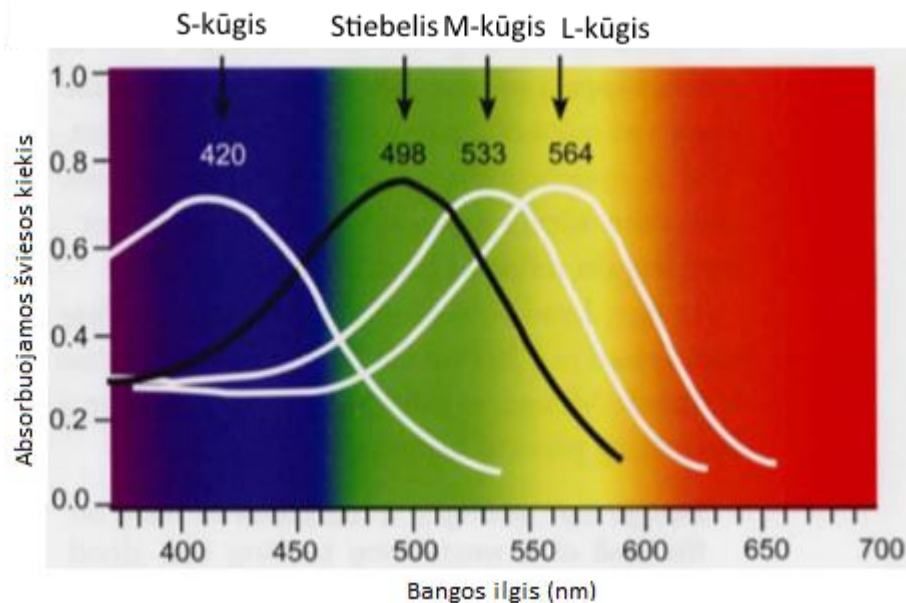
3.2 pav. Žmogaus tinklainės skerspjūvis: a) kairėje apšviestas tinklainės pjūvis; b) dešinėje schematiškai pateikti pagrindinių tinklainės ląstelių tipų ryšiai [2]

Fotoreceptoriai sudaryti iš skirtingo šviesai jautraus pigmento, tad yra skirtingai jautrūs šviesos bangos ilgiams bei pagal tai tinklainėje atlieka skirtingus vaidmenis. Žmogaus akies tinklainė turi 120 milijonų stiebelių ir apie 6 milijonus kūgių, kurie gali būti suvokiami kaip dvi atskiros šviesai jautrios sistemos, sudarančios vieną matymo mechanizmą. Stiebelių ir kūgių pasiskirstymas tinklainėje yra netolygus, kūgiai pasiskirstę centrinėje tinklainės dalyje, o stiebeliai – periferinėje. Pastarieji turi violetinio pigmento (angl. *Visual Purple*) dar vadinamo *rhodopsinu*, kuris yra apie 500 kartų jautresnis šviesai nei pigmentas kūgeliuose. Stiebeliai yra labiau pritaikyti žemo lygio arba „nakties“ matymui (angl. *Scotopic Vision*). Šių stiebelių paskirtis nėra spalvų matymas, o šviesos intensyvumo nustatymas. Stiebeliai yra labiau jautresni žaliai šviesai, tad *rhodopsinas* bei gerai absorbuoja žalią šviesą, taip pat puikiai reaguoja į raudoną bei mėlyną šviesas. Svarbiausias stiebelių aspektas naktiniam matymui yra atpažinti vaizdą naktį ar esant mažam šviesos kiekiui.

Kūgiai susideda iš kitų šviesai jautrių molekulių, kurios leidžia matyti spalvas, tačiau joms reikalingas didesnis šviesos kiekis. Ši dalis vadinama fotopinė rega (angl. *Photopic Vision*). Akies tinklainėje yra trijų skirtingų tipų kūgiai, kurie maksimaliai absorbuoja bangos ilgus nuo ilgiausių (raudona – geltona), vidutinių (žalia – mėlyna) iki trumpų (mėlyna), tad atitinkamai skirstomi į L, M, S kūgelius (angl. *Long, Medium, Short*) – 3.3 paveikslas.

Žmogaus tinklainėje šalia nervų pluošto yra geltonoji dėmė (angl. *Fovea*), kurią sudaro tik kūgiai, jų tankis kvadratiname milimetre yra apie 150000. Geltonosios dėmės centre kūgiai yra mažesni ir glaudesni, jų dydis siekia 1/10000 milimetro pločio. Geltonoji dėmė susideda iš maždaug 2000 minėto dydžio kūgių, tačiau galima aptikti tiek didesnių, tiek mažesnių. Pačiame matymo centre tankiausiai išsidėstę kūgiai lemia mūsų vaizdo matymą, o tam įtakos gali turėti vos keletas

dešimčių kūgių. Žmogaus tinklainė fiksuoja objektus stengdamasi padidinti savo galimybę aptikti smulkias detales, remdamasi gauta informacija tik iš 20 – 30 kūgių, kurių diametras yra apie vieną mikroną (viena milijonoji metro dalis).



3.3 pav. Fotoreceptorių absorbuojamų bangų (spalvų) ilgiai [2]

Paveiksluose regimi objektų kraštai dažniausiai pateikiami paveikslo pavidalu su intensyvumo gradientais, kurie greitai keičiasi, o tinklainėje esantys neuronai matuoja jų kitimą.

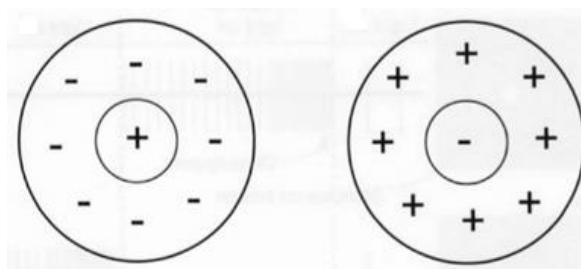
Reikėtų atkreipti dėmesį į 3.4 paveikslą, kuriame matyti, kad receptoriai gali turėti daugiau nei vieną bipoliarinę ląstelę ir tai, kad ganglinės ląstelės gali priimti pranešimus iš daugiau nei vienos bipoliarinės ląstelės.

Žinoma, jog fotoreceptoriai reaguoja į šviesą, tačiau pilkumo (tamsumo) lygis taip pat yra reikalingas. Receptorių reakcija – įtampos pasikeitimas jų ląstelės membranoje (veiksmo potencialas), kuris padidina įvykio šviesos intensyvumą ir tęsiasi visą impulso trukmę. Įtampos pasikeitimo lygis receptoriaus membranoje gali būti suvokiamas funkciškai, ekvivalentas – pikselių skaičius užfiksuojamas skaitmenine kamera.

Žmogaus tinklainėje yra dviejų tipų bipoliarinės ląstelės (3.4 paveikslas). Šviesos apšviestas taškas, esantis centrinėje ląstelės dalyje lemia ląstelės aktyvavimą/veikimą. 3.4 paveikslo kairėje schematiškai pateikta ląstelė su pliuso ženklu centrinėje dalyje, bei, priešingai, kai apšviestos ląstelės veikimas yra slopinamas – su minuso ženklu, 3.4 dešinėje. Dėl šios priežasties šie du ląstelių tipai vadinami centro veikimo/neveikimo (angl. *On-center/Off-surround*; *Off-center/On-surround*).

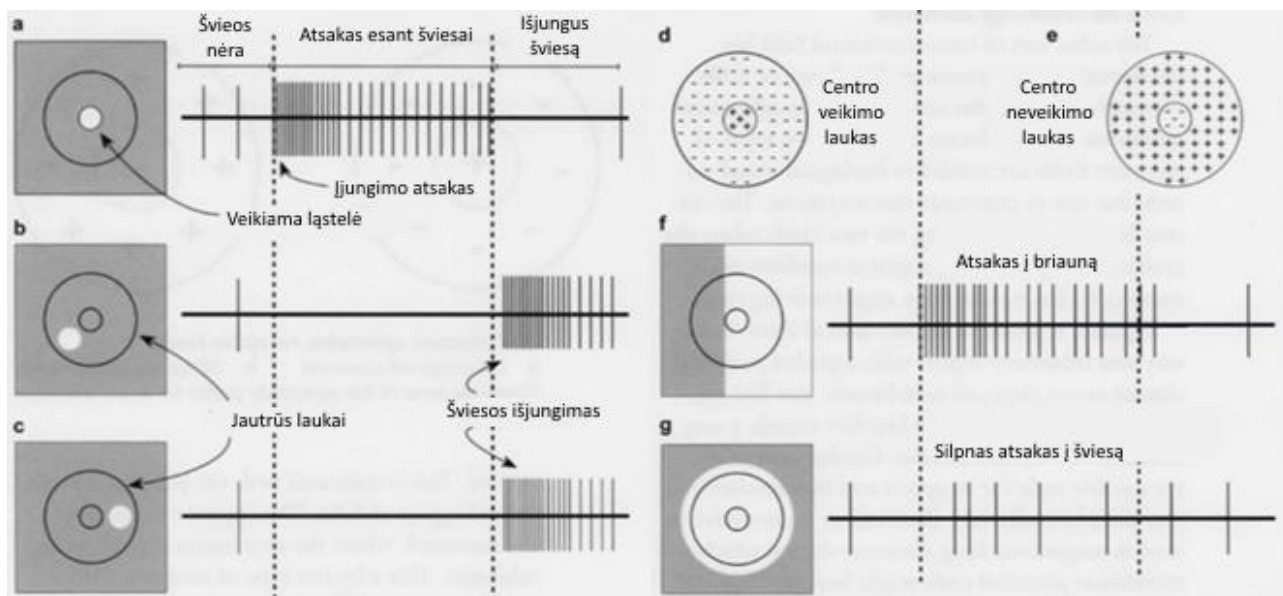
Bipoliarai pranešimus gauna iš centrinės receptorių susijungimo vietos, vadinamos *synapse* (angl. *Synapse*). Kiti receptoriai, supantys šį centrinių receptorių jungimosi „tašką“, taip pat perduoda

pranešimus bipoliarinėms ląstelėms, bet netiesiogiai, per horizontaliąsias ląsteles, kurių įėjimo signalai gaunami iš fotoreceptorių supančių centrinių receptorių (turintį tiesioginį susijungimą su bipoliarine ląstele). Šis ląstelių išsidėstymo būdas suteikia slopinamąjį arba sužadinaujį pranešimus iš supančiųjų receptorių. Tai sprendžia problemą, kaip galima įvertinti potencialų pasikeitimą receptoriuje naudojant vieną žadinamąją bipoliarinę ląstelę ir slopinamąją tuo pačiu metu, nes horizontaliosios ląstelės gali keisti receptoriaus perduodamą sužadinimo signalą į slopinamąją arba atvirkščiai. Bipoliarinių ląstelių jautrūs laukai yra skirtingų dydžių. Skirtingas dydis reiškia tarpinę vaizdo analizę įvairių dydžių erdvinėje skalėje.



3.4 pav. Bipoliarinės ląstelės: kairėje – centro veikimo; dešinėje – centro neveikimo ląstelės [2]

Receptoriai signalus gali perduoti dviem ir daugiau bipoliarinių ląstelių vienu metu, o vieni bipoliarai gali būti *On-center*, kiti *Off-center* tipų. Žmogaus tinklainėje abiejų tipų bipoliarinės ląstelės sudaro beveik vienodą skaičių, tad skirtingų tipų bipoliarinės ląstelės veikia skirtingai tuo pačiu papildydamos vieną kitą, kintant paveiklo matavimo gradientui.



3.5 pav. Ganglinių ląstelių reakcija jas veikiant šviesa; a-d, f) Centro veikimo; e) Centro neveikimo; g) apšvietus visą ląstelę [2]

Bipoliarinės ląstelės signalus perduoda į ganglines ląsteles. Dauguma ganglinių ląstelių turi priešingų tipų centro veikimo/neveikimo jautrius laukus, kaip pateikta 3.5 paveiksle. Vienas

pagrindinių skirtumų yra tai, kad sužadintos ganglinės ląstelės generuoja veiksmo signalus (potencialą) aksonais, kurie sudaro regos nervą ir vaizdinę informaciją perduoda į žmogaus smegenis.

Centro veikimo/neveikimo jautrių laukų pasiskirstymas daugelyje ganglinių ląstelių yra žinomas seniai, o standartiniai išėjimo signalai, pateikti 3.5 paveiksle. Pirmuoju ganglinių ląstelių atveju šviesos taškas yra jautraus lauko centre ir išspinduliuoja energingą impulsų išsiveržimą – 3.5 a) pav. Kita vertus, taškas šviečia ir kitose ląstelės vietose (ne centre, jautriausioje vietoje) – 3.5 b, c) paveikslai, sukeldamas slopinimą, matomą iškrovos lauke. Matyti, jog esama *On-center* ir *Off-center* ląstelių, kaip ir bipolariniu atveju.

Kai 3.5 paveiksle šviesos taškas yra perkeltas iš ląstelės centro į krašto zoną, ląstelė išspinduliuoja impulsų „sprogimą“. Tai šviesos taško slopinimas (ląstelės išjungimas) tam tikru būdu, o jei šviesos taškas grįžta atgal į centrą, šis slopinimas baigiasi. Reikėtų pažymėti, kad centras ir kraštiniai regionai ganglinėse ląstelėse yra koncentriniai (du apskritimai, kurių geometriniai centrai sutampa).

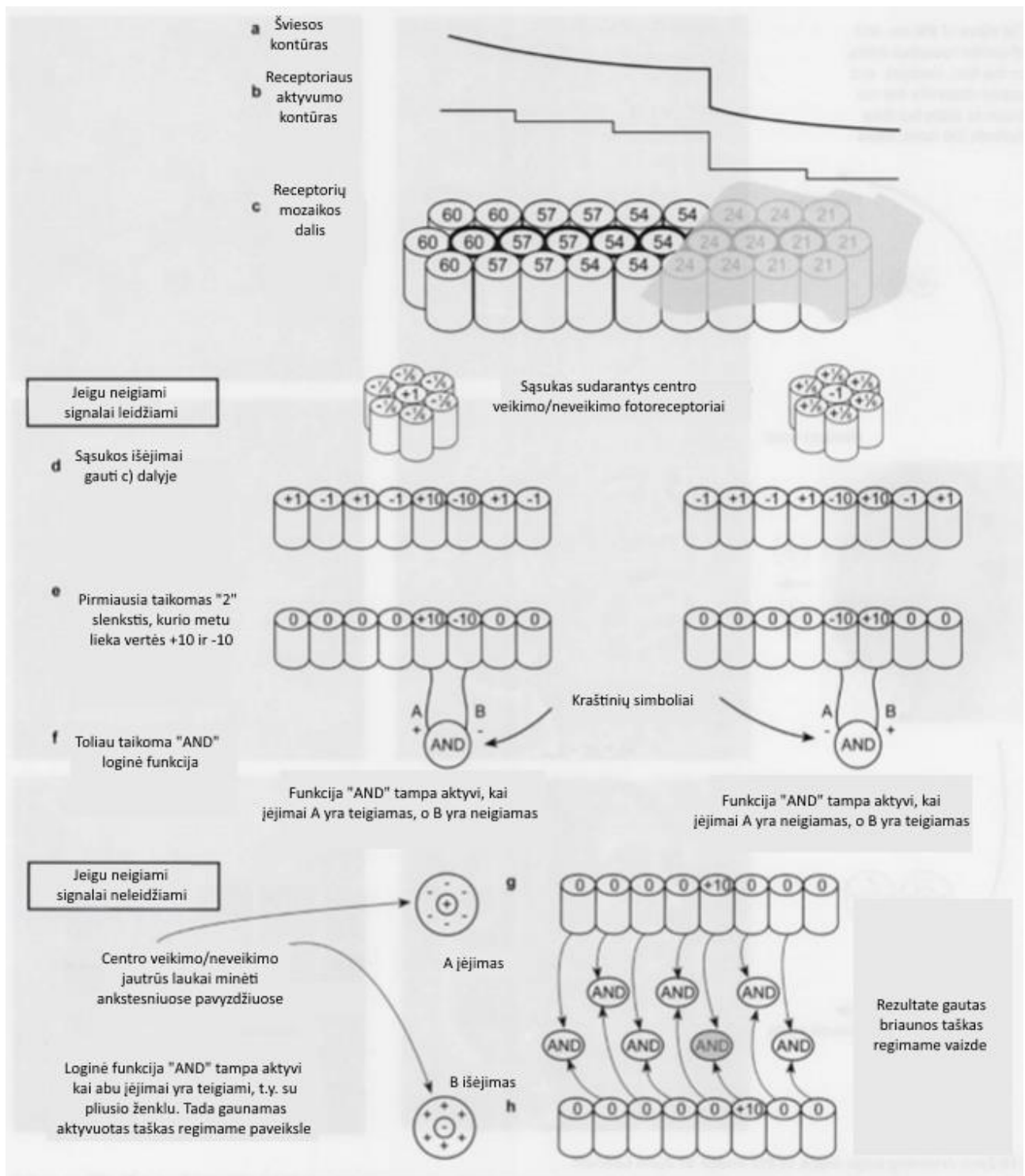
Tinklainės ganglinės ląstelės puikiai nustato esančių kraštų padėtį. 3.5 f) pav. matyti, kad šviesa ir pilka spalva krinta ant ganglinės ląstelės jautrių laukų, kai centras yra apšviečiamas didelio intensyvumo šviesa bei ląstelės krašto dalis yra šiek tiek slopinama (neapšviečiama, tamsi). Toks stimuliavimas sukuria ne stiprų ląstelės signalą, kuris gaunamas šviesa apšviečiant ląstelės centrą, bet ir dalinai jos aplinkinę dalį. Ląstelės kraštinės dalies simuliavimas slopina centro generuojamą signalą, tačiau tik dalinai, nes jis nėra visiškai apšviečiamas. Jeigu apšviestume visą ląstelę, dauguma ganglinių ląstelių beveik nereaguotų į tokią aplinką, (žr. 3.5 g) pav.) ar reakcija pasireikštų minimaliai.

Su ganglinėmis ląstelėmis jungiasi amakrino ląstelės, 3.2 paveikslas. Jos turi platų (didelio ploto) kontaktą su ganglinėmis ląstelėmis.

Apšviestas kontūras su paviršiaus gradientu, kurio kitimas pateiktas 3.6 a) paveiksle. Pilkos spalvos lygio apibrėžimas rodo jos aktyvumo lygį mažais laipteliais receptorių mozaikoje 3.6 b) ir c). Paveiksle matyti paviršiaus intensyvumo gradiento kitimo žingsnis, kuris sukuria didelį kontūro pokytį – 54/24.

Struktūroje sudaromas ląstelių masyvas, sąsuka, kurioje ląstelės įgyja +1 arba -1 vertes su atitinkamais svoriais *Off-center* tipo ląstelėse, kurių potencialo lygis yra -1/6 arba +1/6.

Gaunami *On-center* ir *Off-center* sąsukų išėjimai, 3.6 d) paveikslas. Toliau, e) paveiksle pritaikomas +2 slenkstis. Tai reiškia, kad tik d) vertės didesnės ar lygios +2 yra išsaugomos, visos kitos pakeičiamos į nulius kaip e) paveiksle.



3.6 pav. Įtampų potencialų apdorojimas neuronuose [2]

Šiuo atveju atsikratoma nereikšmingo gradiento taikant slenkstį bei daroma prielaida, kad šis slenksčio gradientas gali būti saugiai ignoruojamas dėl nereikšmingų priežasčių, pavyzdžiui vyraujant skirtingoms apšvietimo sąlygoms. Žinoma, norint gauti aiškų vaizdą svarbu parinkti tinkamą slenkstį, kurį naudojant būtų gautos tinkamos objekto kraštinės ar tekstūra.

Taikant +2 slenksčių kiekvienam masyvui 3.6 d), gaunamas rezultatas sukuria didelius gradiento pakitimus nuo +10 iki -10 kaip parodyta 3.6 e) paveiksle. Turint omenyje, kad 3.6 d, e) išėjimas pateikiamas „ne biologiniais“ vienetais, o neigiamais krūviais, kas gradiento atveju yra leidžiama.

Kitas žingsnis yra surasti perėjimus (nulinio kirtimus) tarp +10 ir -10 naudojant *AND* sąlygą kaip pateikta 3.6 f) paveiksle.

Būdas, kuriuo naudojantis galima aptikti briaunas biologinėje sistemoje žinant, kad neigiamos reikšmės ląstelėse nėra galimos, pateiktas 3.6 g, h) paveiksluose, kur ląstelių neigiami išėjimai yra keičiami į nulius. Slenkstis su verte 2 taikomas ir anksčiau, o ląstelių išsidėstymas su *On-center* ir *Off-center* vienetais yra pateiktos atskirai, vaizduoja galimus išsidėstymo variantus.

Galima pastebėti, kad +10 yra kiekvienoje juostoje, tačiau jos skirtingos. Taigi, -10 *On-center* vertė 3.6 e) atrodo kaip +10 *Off-center* išėjimo vertė 3.6 h). Dvi „biologinės“ ląstelių juostos išdėstytos viena virš kitos su tokiu pat slenksčio barjeru, 3.6 g, h) paveiksle – išėjimo ląstelių išsidėstymas (vieta) nėra svarbi, svarbiausi tarpusavio susijungimai.

Toliau siekiama nustatyti aiškią briaunos vietą, atmetus neigiamas vertes naudojant tiek *On-center* ir *Off-center* bipoliarines ląsteles, o tai reiškia, kad nulio kirtimo riba išnyksta. Tokiu atveju reikia rasti teigiamą signalą kiekvienoje bipoliarinėje ląstelėje, kuri komunikuoja su kiekviena paveikslo briaunos puse.

Poskyryje pateiktas biologiškai įgyvendintas briaunų aptikimo mechanizmas. 3.6 paveiksle pateikta schema yra supaprastinta, jos tikslas pateikti dviejų jautrių laukų *On-center* bei *Off-center* idėją, kurią galima naudoti porose, sprendžiant arba apeinant neigiamų reikšmių problemą taikant briaunų aptikimą įvairiuose vaizduose.

3.2. Tinklainės modelių skaitinė analizė

Neuro mokslo tikslas yra atkartoti ar modeliuoti nervų veikimą bei juose vykstantį informacijos apdorojimą. Žinant šių procesų veikimą, būtų galima aiškiai suprasti kaip veikia žmogaus smegenys ir centrinė nervų sistema. Supratimas leistų kurti elektronikos įrenginius, kurie padėtų biologinių sutrikimų turintiems žmonėms, tokių kaip biologinė regos sistema akliesiems ar išoriniai nerviniai jutikliai praradus galūnes.

Toliau patiekiami žmogaus akies tinklainės skaitiniai modeliai. Pagrindinis skirtumas, pagal kurį galima skirti nervinių ląstelių modelius, yra didėjančio stimuliavimo (laipsniškai) (angl. *Rate-Code*) bei laike atsitiktinai kintančio stimuliavimo (angl. *Time-Code*) [25] modeliai. Tinklainėje didėjančio stimuliavimo išėjimo atveju gaunama ganglinių ląstelių atsako vertė į šviesos stiprumą, o laike kintantis stimuliavimo modelis pateikia signalo santykį atsižvelgiant į šviesą, esančią visame paveiksle.

Atsižvelgiant į apibūdintą modelių struktūrą, juos galima skirstyti į struktūrinius ir funkcinius. Struktūriniuose modeliuose ląstelių funkcinė struktūra yra modeliuojama paprastai naudojant skirtingas formules. Literatūroje dažnai randami modeliai, kuomet modeliuojamas kiekvienas tinklainės ląstelių sluoksnis atskirai, sudarant pakopinę tinklainės struktūrą. Funkciniai žmogaus tinklainės modeliai traktuojami kaip “juoda dėžė”, kuriais tiesiog bandoma atkartoti tinklainės funkcionalumą.

Funkcinio modelio atveju, galima išskirti keletą funkcinių šakų, kaip determinuoti ir stochastiniai modeliai. Determinuotieji modeliai yra statinio veikimo ir visada pateikiantys tą patį išėjimo signalą į tą patį dirgiklį. Stochastiniai modeliai bando atkartoti tinklainei būdingą atsako kintamumą pridėdant triukšmo signalą. Šiam tikslui yra sukurti baltojo triukšmo modeliai (angl. *White Noise*), kuriuose taikant baltojo triukšmo analizės metodus gaunamas tinklainės atsakas.

Struktūriniai modeliai pasikliauja prielaidomis, kad neuronai generuoja įtampos kitimą (angl. *Spikes*) atskirai vienas nuo kito. Kita prielaida, jog neuronų išskiriamas signalas kinta laike ir yra funkcija atsižvelgiant į įėjimo signalą. Šios prielaidos nėra visiškai teisingos, nes neuronai veikia kaip sudėtingas tinklas perduodami duomenis tiek į regos nervą, tiek gaudami iš jo. Taip pat neuronai negali savarankiškai išspinduliuoti dviejų signalų vieno sužadavimo metu, nes jų vidiniai ir išoriniai jonų lygiai turi keistis atitinkamai atsižvelgiant į potencialą.

Kiekvienas tinklainės modelis bando imituoti šviesos tinklelio struktūrą fotoreceptorių sluoksnyje pateikiant ganglinių ląstelių sluoksnio suformuotą išėjimo signalą. Tokio pobūdžio šviesos modelis koncentruojasi į tinklainę kaip akies optinę sistemą apibūdinama trijų kintamųjų funkcijos: a) dviejų erdvės dimensijų vektoriaus $r = [xy]^T$; b) laiko funkcijos t , kuri keičiasi atsižvelgiant į aplinkos komponentų pasikeitimą ar akies judėjimą; c) kaip šviesos ilgio funkcija λ . Trečioji erdvės dimensija, gylis, yra suvokiama smegenyse kaip kampinis skirtumas tarp dviejų dimensijų vaizdų, kuriuos užfiksuoja kiekviena akis. Taigi, regos stimuliavimo signalas gali būti apibūdinamas matematiškai kaip $s(r, t, \lambda)$ funkcija.

Dažniausiai tinklainės modeliai į signalus reaguoja kaip erdvės ir laiko funkcija, kuri priklauso nuo bangos ilgių. Šviesos intensyvumo modelis taip pat gali kisti ar būti diskretus erdvėje bei laike.

3.2.1. Integruojantis veikimo modelis

Struktūriniai modeliai taikomi modeliuojant skirtinguose nerviniuose centruose esančias ląsteles, įskaitant ir tinklainės. Šis modelis vadinamas integruotu veikimo (angl. *Integrated-Fire – I&F*) modeliu [26]. Modelis paremtas neuronų sienelių charakteristikomis, kurių savybės gali būti modeliuojamos kaip elektronikos komponentai bei yra supaprastintas Hodgkino ir Huzlėjaus netiesinis modelis [27].

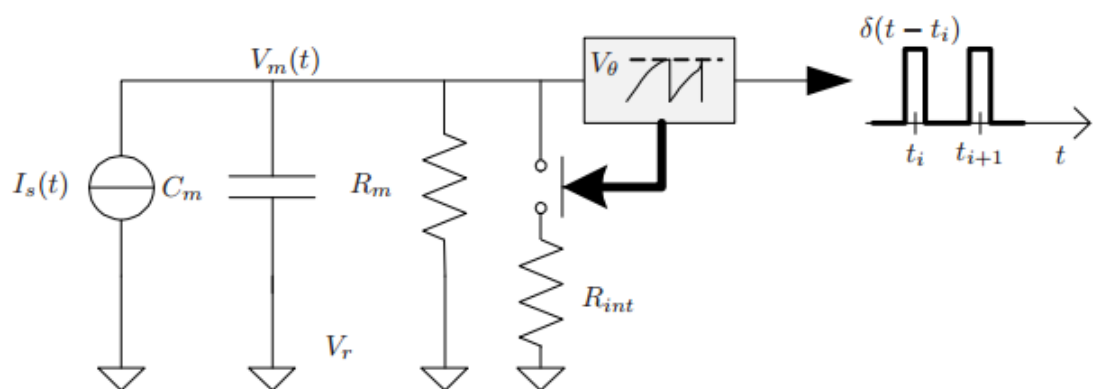
Paprastiausios struktūros nervinis modelis integruoja (sumuoja) sužadavimo ir veikimo signalus, kai membranos įtampa $V_m(t)$ tampa didesnė už slenksčio įtampą V_θ . Šis integruojantis veikimo modelis schematiškai pateiktas 3.7 paveiksle.

Integruojantis veikimo modelis skaičiuoja ar neurono membrana veiks kaip kondensatorius, kuris yra pripildomas įėjimo signalo srove, kol pasiekia ribinę įtampą V_θ ir išsikrauna atstatydamas V_R įtampą į pradinę būseną. Šis elgesys yra analogiškas 3.7 paveiksle su begaline membranos varža ($R_m \rightarrow \infty$), kur yra ekvivalentas atvirai grandinei. Daroma prielaida, kad jungiklio vidinė varža yra labai maža ($R_{int} \rightarrow 0$), atitinkanti mažą grandinės atkarpą. Santykis tarp įtampos $V_m(t)$ per neurono membranos talpos C_m , bei įėjimo dirginimo srovės $I_s(t)$ yra:

$$C_m \frac{dV_m(t)}{dt} = I_s(t). \quad (3.1)$$

Formulėje matyti, kad įėjimo srovė $I_s(t)$ yra sumuojama ir duoda membranos įtampą $V_m(t)$. $V_m(t)$ kirtus slenksčio įtampą V_θ , signalas išspinduliuojamas, o jungiklis uždaromas, membranos potencialas nustatomas į atsinaujinimo (pradinę) įtampą V_R .

Šis integruojantis veikimo modelis pasižymi begaline atmintimi, nes mažas srovės kiekis gaunamas gana ilgą laiko tarpą ir sugeneruojamas atsako signalas, kuris susidaro priimant didesnę nei nulio vertės srovę.



3.7 pav. Integruojantis veikimo modelis [26]

Membranos potencialas $V_m(t)$ gali būti gautas integruojant diferencialinę lygtį (3.1) laike nuo t_i iki t gauname:

$$V_m(t) = V_m(t_i) + \frac{1}{C_m} \int_{t_i}^t I_s(t) dt, \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}. \quad (3.2)$$

Jeigu, neuronas pradiniu laiku t_i atidavė išėjimo signalą, jo membrana įgyja pradinį potencialą $V_m(t_i) = V_r$. Iš formulės (3.2) išplaukia, kad

$$V_m(t) = V_r + \frac{1}{C_m} \int_{t_i}^t I_s(t) dt, \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}. \quad (3.3)$$

Formulė (3.3) apibūdina membranos potencialo kitimą laike $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, kur t_{i+1} yra kito išėjimo signalo pradinis laikas po t_i .

Pateiktas pavyzdys rodo nuolatinį įėjimo srovės poveikį modeliui. Esant nenutrūkstamam srovės tekėjimui $I_s(t) = I_s$, formulėje (3.3), membranos potencialas gaunamas iš:

$$V_m(t) = V_r + \frac{1}{C_m} I_s (t - t_i), \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}. \quad (3.4)$$

Iš (3.4) formulės matyti, kad kai neuronas pradiniu laiku išspinduliuoja signalą $t = t_i$ iki sekančio signalo $t = t_{i+1}$, membranos potencialas yra atstatomas į pradinę padėtį kaip pateikta (3.4) formulėje. Neuronui išspinduliuojus signalą, kada $V_m(t)$ tampa didesnė už V_θ , laikas T_{isi} tarp dviejų signalų gali būti gautas formulėje (3.4) žinant, kad $V_m(t_{i+1}) = V_\theta$, kuri duoda:

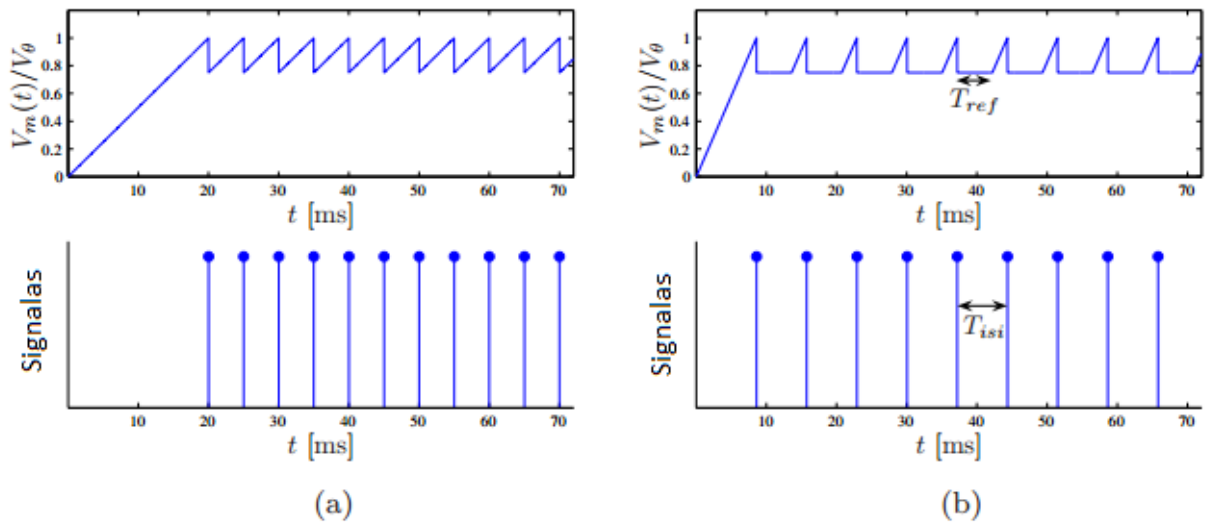
$$T_{isi} = t_{i+1} - t = C_m \frac{V_\theta - V_r}{I_s}. \quad (3.5)$$

Iš laiko tarp neurono išspinduliuojamų signalų dažnumo $r = 1/T_{isi}$, išplaukia:

$$r = \frac{1}{C_m} \frac{I_s}{V_\theta - V_r}, \quad (3.6)$$

kur r yra konstanta, nes laikas tarp dviejų neurono išspinduliuotų signalų taip pat yra konstanta.

3.8 a) paveiksle matyti membranos įtampos kitimas esant srovės konstantai bei tinklainės modelio išėjimo signalas. Koreguojant ribinį potencialą į $V_\theta - V_r$, pradinis potencialas paveiksle 3.7 galėtų būti nustatytas į nulį $V_r = 0$.



3.8 pav. Integruojantis veikimo modelis su nustatyta įėjimo srove; a) viršuje – normalizuotas membranos potencialas, apačioje, generuojamas išėjimo signalas; a) normalus laidumas; b) prastas laidumas

$$(I_s = 1,5 \text{ mA}, \quad C_m = 1 \text{ nF}, \quad T_{ref} = 5 \text{ ms}; \quad (V_r = 45 \text{ mV}, \quad V_\theta = 60 \text{ mV})) \quad [26]$$

Formulė (3.6) nurodo, kad neuronas gali išspinduliuoti išėjimo signalą nustatytu dažniu esant didelei įėjimo srovei I_s . Tačiau realiuose neuronuose stimuliacija negali būti valdoma dinamiškai jonų per ląstelės membraną, kuri sumažina laidumą po kiekvieno išėjimo signalo. Neuronas išspinduliuavęs išėjimo signalą, laike T_{ref} negali išspinduliuoti dar vieno signalo, nepriklausomai nuo dirgiklio stiprumo. Po šio „mirties“ laiko, jo veikimas iš karto grįžta į normalų veikimą. Integruojantis veikimo modelis gali būti išplėstas atsižvelgiant į neveikimo laiko periodą, nustatomą po signalo išėjimo, kurio metu neuronas būtų neaktyvus laiką T_{ref} ir tik praėjus šiam laikui neuronas gali vėl išspinduliuoti sekantį signalą. Remiantis 3.7 paveikslu, neveikimo periodas gali būti modeliuojamas nustatant, kad jungiklis išjungiamas laikui T_{ref} ir po šio periodo jis vėl yra įjungiamas, kondensatorius yra užkraunamas naujam signalui.

Tuo atveju, kai įėjimo srovė lygi konstantai, atsižvelgiama, kad neveikimo periodas yra T_{ref} , laikas tarp iš eilės esančių išėjimo signalų gaunamas:

$$T_{isi} = T_{ref} + \frac{C_m V_\theta}{I_s}, \quad (3.7)$$

kuris atitinka išspinduliuojamo signalo dažnumą:

$$r = \frac{I_s}{C_m V_\theta + T_{ref} I_s}. \quad (3.8)$$

Iš (3.8) matyti, kad esant didelei sužadavimo įtampai (tai reiškia, kad neuronas bus stipriai veikiamas), maksimalus išėjimo signalo dažnumas yra:

$$r_{\max} = \lim_{I_s \rightarrow \infty} \frac{I_s}{C_m V_\theta + T_{\text{ref}} I_s} = \frac{1}{T_{\text{ref}}}, \quad (3.9)$$

o maksimalus dažnumas yra priklausomas nuo T_{ref} . 3.8 b) paveiksle vaizduojamas membranos įtampos kitimas laike integruojančio veikimo modelyje atsižvelgiant į neveikimo periodą po kiekvieno signalo išspinduliavimo. Pradžioje, kai laikas yra lygus nuliui, neuronas turi pradinę įtampą, kuri taip pat lygi nuliui. Laikui bėgant gauta srovė yra sumuojama ir pasiekia slenkstinę įtampą V_θ , kur neuronas išspinduliuoja signalą, o jo sienelės įtampa grįžta į pradinę vertę V_R .

Paveiksle 3.10 pateikta spinduliavimo funkcijos kitimas išėjimo signalui pagal įėjimo įtampą integruojančio veikimo modelio atveju su ir be neveikimo periodu.

3.2.2. Ištekantis integruojantis veikimo modelis

Ištekantis integruojantis veikimo (angl. *Leaky Integrate-Fire* – LI&F) modelis kaip parametą prideda ne sandarumą. Taigi, tai reiškia, kad bėgant laikui įtampa ląstelėje mažėja arba tiesiog „dingsta“.

Ištekančiuose modeliuose srovė teka iš ląstelės membranos, kaip pateikta formulėje (3.10):

$$C_m = \frac{dV_m(t)}{dt} = I_s(t) - \frac{V_m(t)}{R_m}. \quad (3.10)$$

Nuotėkio srovė $I_{\text{leak}}(t)$ yra proporcinga membranos įtampos koeficientui pagal jos varžą R_m taikant Omo dėsnį. Šis ištekantis integruojantis veikimo modelis yra pateiktas 3.7 paveiksle kaip elektrinė schema, kur varža R_m pateikta lygiagrečiai kondensatoriui C_m , kuris primena membranos talpą.

Įvedant laiko konstantą $\tau_m = R_m C_m$, diferencialinė lygtis šiam modeliui:

$$\tau_m \frac{dV_m(t)}{dt} + V_m(t) = R_m I_s(t), \quad (3.11)$$

kur laiko konstanta τ_m charakterizuoja membranos pokyčius. Jei įeinanti įtampa negali kompensuoti ištekančios įtampos, tokiu atveju membranos potencialas atitinka pradinės įtampos vertę, kuri šiuo atveju yra lygi nuliui ($V_{\text{rest}} = 0 \text{ V}$) ir tokiu atveju neuronas niekada neišspinduliuoja išėjimo signalo.

Jeigu įėjimo srovė yra konstanta, I_s turi būti didesnė nei V_θ / R_m , kas gali kompensuoti ištekančią srovę, $I_\theta = V_\theta / R_m$ tam, kad neuronas taptų aktyvus. Taigi, jeigu įėjimo srovė yra konstanta $I_s(t) = I_s$, kaip pateikta (3.11) formulėje:

$$C_m \frac{dV_m(t)}{dt} + \frac{V_m(t)}{R_m} = I_s. \quad (3.12)$$

Sprendimas šiai diferencialinei lygčiai susidaro iš homogeninio ar laisvo sprendinio:

$$V_{m_h}(t) = K e^{-\frac{t}{\tau_m}}, \quad (3.13)$$

kuriai tam tikros nekintančios srovės pritaikymas:

$$V_{m_p}(t) = R_m I_s. \quad (3.14)$$

Gaunamas bendras sprendinys $V_m(t) = V_{m_h}(t) + V_{m_p}(t)$. Integracijos konstanta K , formulėje (3.13) turi tam tikrą būseną pradiniam laike t_i , kai neuronas reaguoja, o membranos potencialas yra grąžinamas į pradinę vertę $V_m(t_i) = V_r$. Bendras sprendimas formulei (3.12) yra:

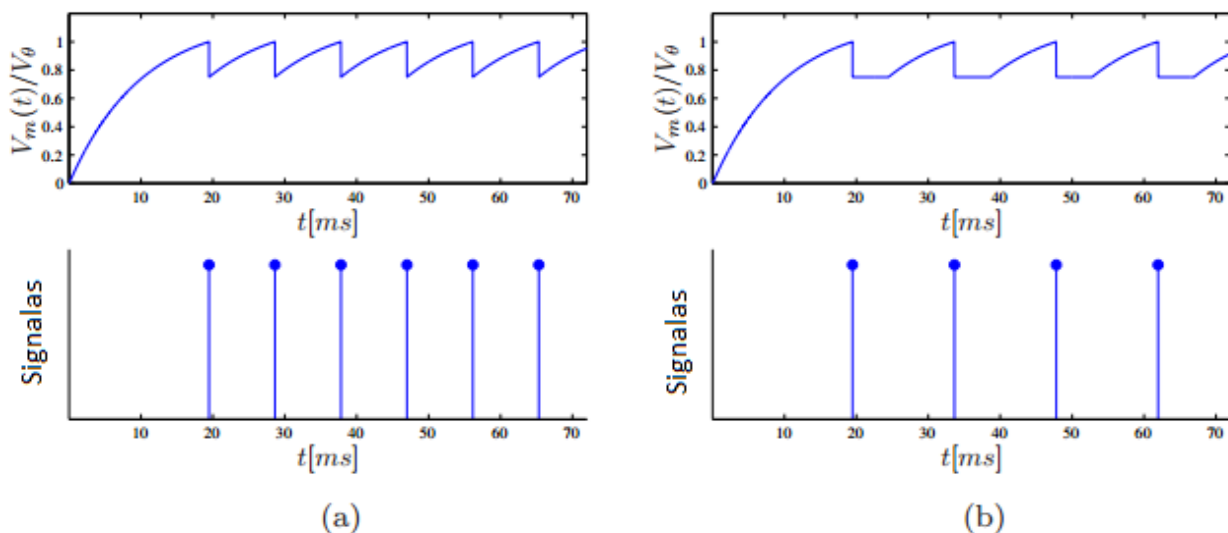
$$V_m(t) = V_r e^{-\frac{t-t_i}{\tau_m}} + R_m I_s \left(1 - e^{-\frac{t-t_i}{\tau_m}} \right). \quad (3.15)$$

Žinant, kad neuronas reaguoja kai $V_m(t) = V_\theta$, galima suskaičiuoti laiką iš (3.15) formulės, kada neurone įvyks sekanti aktyvacija. Atsižvelgiant, kad $V_m(t_{i+1}) = V_\theta$, galima nustatyti neveikimo intervalus neuronuose:

$$t_{i+1} - t_i = \tau_m \ln \left(\frac{V_r - R_m I_s}{V_\theta - R_m I_s} \right). \quad (3.16)$$

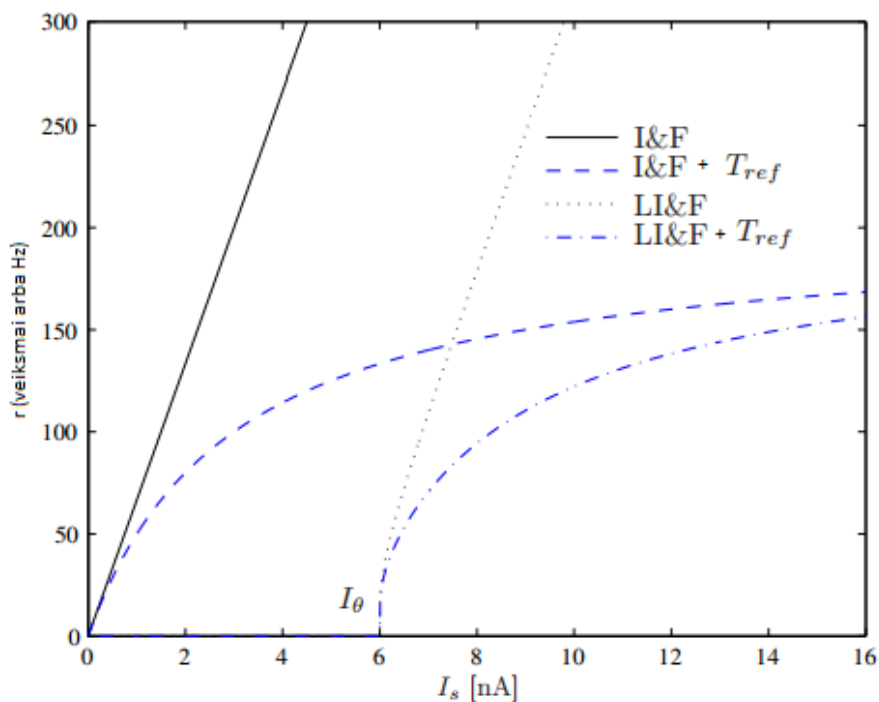
Atsižvelgiant į neveikimo periodą T_{ref} , bendras ISI yra $T_{isi} = T_{ref} + (t_{i+1} - t)$, ir išspinduliavimo dažnumas ištekančio integruojančio atsako modelio su įėjimo srovės konstanta yra:

$$r = \begin{bmatrix} 0 & I_s \leq I_\theta \\ \left(T_{ref} + \tau_m \ln \left(\frac{V_r - R_m I_s}{V_\theta - R_m I_s} \right) \right)^{-1} & I_s > I_\theta \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$



3.9 pav. Ištekantis integruojantis veikimo modelis su nustatyta įėjimo srove; a) viršuje – normalizuotas membranos potencialas, apačioje, generuojamas išėjimo signalas; a) normalus laidumas; b) prastas laidumas

$$(I_s = 1,5 \text{ mA}, \quad C_m = 1 \text{ nF}, \quad T_{ref} = 5 \text{ ms}; \quad (V_r = 45 \text{ mV}, \quad V_\theta = 60 \text{ mV})) \quad [26]$$



3.10 pav. Signalo išspinduliavimo dažnis kintant įėjimo srovei integruojančiuose atsako modeliuose,

$$(I_s = 7 \text{ nA}, \quad C_m = 1 \text{ nF}, \quad R_m = 10 \text{ m}\Omega, \quad T_{ref} = 5 \text{ ms}) \quad [26]$$

Norint rasti bendrą sprendimo formą formulei (3.10), bet kokio tipo įėjimo simuliacijai pritaikius integravimą, gauname galutinę išraišką, kad:

$$V_m(t) = V_r + \left[\frac{1}{C_m} I_s(t) u(t - t_i) - \frac{V_r}{\tau_m} u(t - t_i) \right] * \left[u(t) e^{\frac{-t}{\tau_m}} \right], \quad t \geq t_i. \quad (3.18)$$

Po to, kai neuronas aktyvuojamas, membranos potencialas yra apskaičiuojamas srovės įėjimo sąsukos su žemų dažnių filtru bei eksponentiškai mažėjančiu laiku, kuris daugeliu atveju bei modeliavimo tikslais turi nulinį poveikį žinant, kad $V_r = 0$. Pažymint, kad (3.18) formulė yra nuo neurono pradinio veikimo laiko t_i iki sekančios aktyvacijos t_{i+1} , gali būti naudojama pakartotinai norint gauti sekantį pradinį veikimą, susidedantį iš prieš tai buvusio pradinio laiko t_{i+1} kaip laiką t_i .

Diskretizuojant pradiniu laiko momentu $t = nT_s$ išraišką, esančią (3.11) norint rasti ląstelės membranos įtampą $V_m(t)$, gauname:

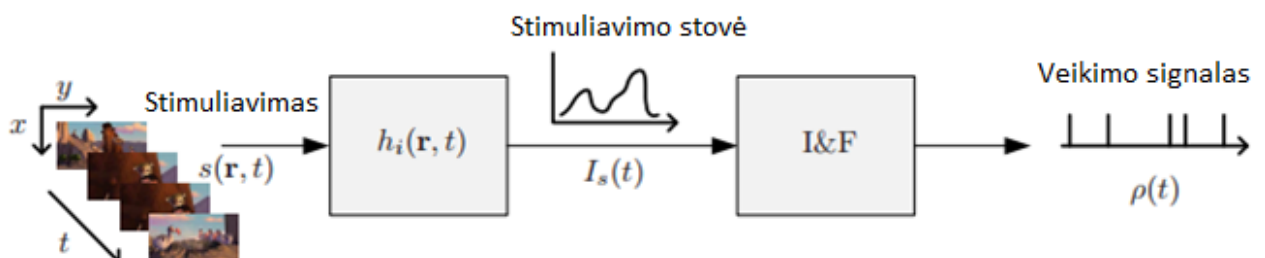
$$\tau_m \frac{V_m(n+1) - V_m[n]}{T_s} + V_m[n] = R_m I_s[n], \quad (3.19)$$

diskrečiu laiku. Pertvarkius formulę gaunama įtampa:

$$V_m[n+1] = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_m} \right) V_m[n] + \frac{T_s}{C_m} I_s[n], \quad (3.20)$$

Pastaroji formulė gali būti naudojama skaičiavimams. Membranos potencialas pradinėje būsenoje nustatomas $V_m[0] = 0$ V, kai jis padidėja iki slenkstinės įtampos $V_m[n] \geq V_\theta$, sugeneruojamas išėjimo signalas, o membranos potencialas grįžta į pradinę būseną $V_m[n+1] = V_r$.

Neuronus veikianti srovė kyla iš neuronų *synapsės* susijungimo su kaimyniniais neuronais. Pirmajame tinklainės sluoksnyje srovė atsiranda iš fotoreceptorių priimamos šviesos ir gali atsirasti iš sąsukos stimuliuojant skirtingas tinklainės vietas naudojant filtrus.



3.11 pav. Blokinė tinklainės integruojančio veikimo modelio diagrama [26]

Filtrams formuoti naudojamas bazinių funkcijų rinkinys, kaip Laguerre funkcijos ar modifikuota sinusinė funkcija (3.9 pav.) modeliuojant įėjimo filtrą. Į neuroną gali būti žiūrima kaip

į jautrų lauką, kuris išrenka aktualią informaciją iš simuliuojančio signalo, kad galėtų būti aktyvuotas. Paveikslas 3.11 iliustruoja integruojančio atsako neurono modelio blokinę diagramą su įėjimo srovę generuojančiais vaizdais.

Bendra neurono simuliacija su erdvės ir laiko kitimu, kai per neurono membraną teka srovė:

$$I_s(t) = \sum_{i=0}^N h_i(x, y, t) * s(x, y, t), \quad (3.21)$$

ženklas $*$ reiškia sąsuką, kuri yra atliekama tiek erdvėje, tiek laike. Sumos indeksas N yra bazinių funkcijų skaičius, susidedantis iš impulsų atsako į įėjimo filtrą.

3.2.3. Determinuoti funkciniai modeliai

Determinuotų modelių pavadinimas kilo iš jų pagrindinio funkcionalumo, pastarųjų atsakas į stimuliavimą yra nekintantis. Naudojant tą patį stimuliavimo signalą šių modelių veikimo signalas (išėjimo) visada gaunamas toks pat.

Šie modeliai sukurti modeliuoti erdvės ir laiko atsakymą *On-center* ir *Off-center* tipo ganglines ląsteles. Modelio blokinė diagrama pateikta 3.12 paveiksle. Signalas $s(r, t)$ reiškia šviesos modelį, kuris tinklainę pateikia kaip laiko t ir erdvės r funkciją, kur vektorius r nurodo erdvės poveikį $r = [xy]^T$. Pirmasis bloko modelis yra panašaus į tinklainės ganglinių ląstelių jautrų lauką. Erdvės ir laiko stimuliacinis modelis sudedamas su branduoliu $K(r, t)$ ir gaunamas ganglinių ląstelių aktyvacijos signalas $c(r, t)$. Ši operacija gali būti apibūdinama sąsuka:

$$c(r, t) = K(r, t) * s(r, t). \quad (3.22)$$

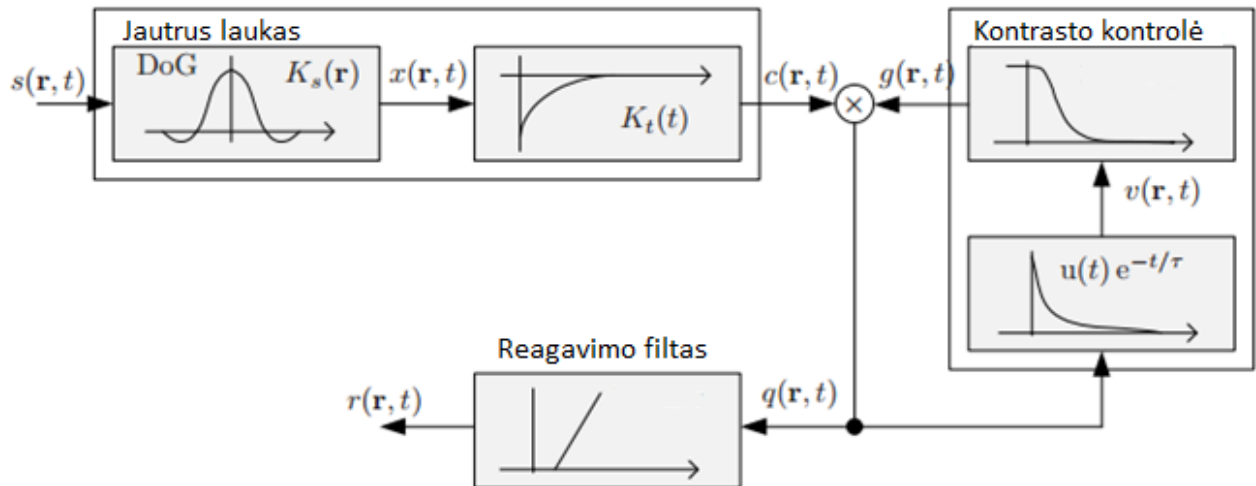
Realioje tinklainėje erdvės ir laiko filtras $K(r, t)$ dažniausiai turi vėlavimo laiką. Bendru atveju jautrus tinklainės ganglinių ląstelių laukas gali būti aproksimuojamas laike ir erdvėje branduolio:

$$K(r, t) = K_s(r) K_t(t). \quad (3.23)$$

Modeliuoti erdvės suvokimą tinklainės ganglinėse ląstelėse dažniausiai naudojamos Gauso diferencialinės lygtys (angl. *Difference of Gaussians* – DoG). Matematinė išraiška:

$$K_s = \frac{A_c}{2\pi\sigma_c^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_c^2}\right) - \frac{A_s}{2\pi\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (3.24)$$

kur parametrai A_c ir A_s turi įtaką jautriam tinklainės centrui lyginant su periferine dalimi, o parametrai σ_c^2 ir σ_s^2 , ($\sigma_c^2 < \sigma_s^2$) nustato centro lauko diametrą ir, atitinkamai, Gauso funkciją periferijai. Erdvės poveikis *On-center* ir *Off-center* ganglinių ląstelių jautriems laukams gali būti modeliuojamas pasirenkant šias vertes, o DoG veikia kaip juostinis erdvės filtras.



3.12 pav. Determinuoto modelio blokinė diagrama [26]

Neurono aktyvacijos signalas $q(r, t)$ gaunamas atsižvelgiant į ryšį:

$$q(r, t) = g(r, t)[K(r, t) * s(r, t)], \quad (3.25)$$

kur netiesinė funkcija, modeliuojanti jautrių laukų išėjimą yra:

$$g(r, t) = \frac{1}{1 + [(v(r, t))_+]^4}, \quad (3.26)$$

čia $[x]_+ = x u(x)$ yra išskiriama į nevienodas dalis, o $v(r, t)$ žemų dažnių laikinis filtras.

Modelio išėjimo signalas yra nekoreguojamas ir momentinis išspinduliavimo santykis ganglinėse ląstelėse $R(r, t)$, o funkcija įgyja formą:

$$R(r, t) = \alpha[q(r, t) + \Theta]_+, \quad (3.27)$$

kur q yra aktyvacijos signalas, α nurodo matavimo skalę ir Θ pradinį išėjimo signalo dažnumą. Kai stimuliacija $s(r, t)$ erdvėje yra tolygi, o laikas nurodomas konstanta, aktyvacijos signalas $q(r, t)$ yra lygus nuliui. Taigi, neurono atsakas yra pagrindas jo aktyvumui, kuris lygus išėjimo signalo spinduliavimo dažnumui $R(r, t) = \alpha\Theta$.

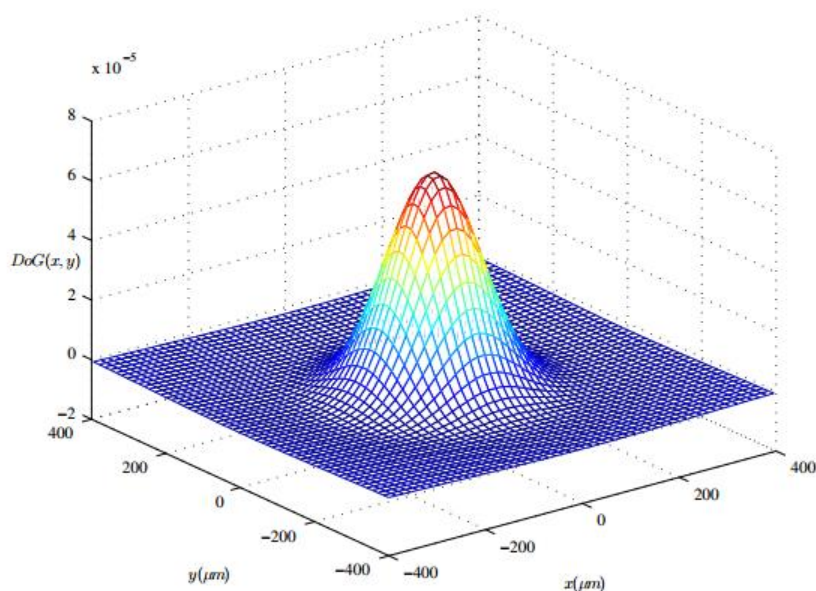
Erdvinis apdorojimas atliekamas jautriame lauke, atitinkamai pirmajame bloke pavaizduotame 3.6 paveiksle. Jautraus bloko išorinėje dalyje diferencijuojama dvimatė Gauso funkcija (3.24).

Taikant skirtingo dydžio svorius ganglinių ląstelių branduoliams formulėje (3.24) kvadrato dydis randamas pagal pozicijos vektorių $r = [xy]^T$, gauname $r^2 = r^T r = x^2 + y^2$.

Antrasis jautraus lauko blokas paveiksle 3.12 atitinka laiko branduolį, kurio vertės kinta laike, o pritaikius Laplaso transformaciją, diskrečiąją Z transformaciją gaunamas aukštų dažnių erdvinis filtras.

Paveiksle 3.12 antrąjį kontrasto kontrolės bloką sudaro du mažesni blokai: žemų dažnių filtras ir netiesinė funkcija. Žemų dažnių filtras gali būti konvertuojamas į skaitmeninį filtrą kaip ir aukštų dažnių erdvinio filtro atveju, ir gaunamas išėjimo $v[n]$ signalas su įėjimo $q[n]$ signalu kontrasto kontrolės žemų dažnių filtre.

Formulėje 3.26 pateiktas modelio netiesiškumas gali būti tiesiogiai įgyvendintas skaitmeniniuose signaluose. Paskutinis blokas pateiktas 3.12 paveiksle yra „srovės lygintuvas“ tinklainės struktūroje, kurio įgyvendinimas tiesiogiai atitinka (3.37) formulę.



3.13 pav. DoG pritaikymas erdvės signalui [26]

Determinuotas modelis pateikia išėjimo signalą modeliuodamas tinklainės ganglinių ląstelių atsako dažnumą. Taigi, norint gauti neuronų atsakymą, signalo generatorius generuoja signalus pagal įėjimo signalo stiprumą.

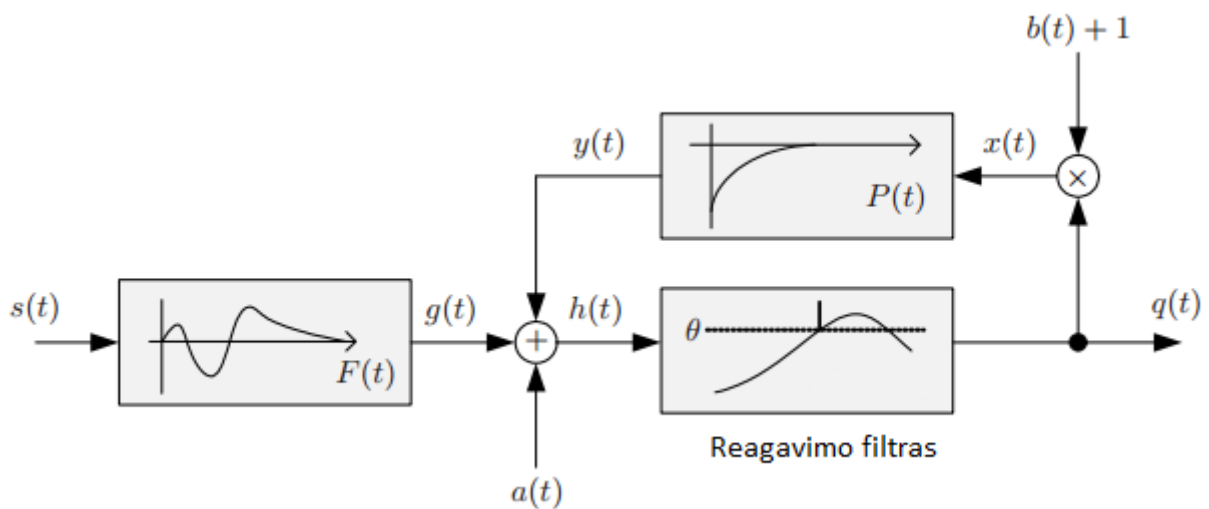
3.2.4. Stochastiniai funkciniai modeliai

Tinklainės stochastinis modelis generuoja išėjimo signalų seką pats, be jokio papildomo išorinio poveikio išėjimo signalui. Gauti išėjimo signalų rinkiniai keičiasi bandymų eigoje esant tam pačiam įėjimo signalui, kuris apibūdina stochastinio modelio elgesį. Taip siekiama tiesiogiai modeliuoti kintančius tinklainės ganglinių ląstelių signalus.

Mėginimas į modelio kūrimą įtraukti kintamą išėjimo signalą ir nepalikti to atskiram signalo generatoriui yra pateisinamas, atsižvelgiant į tai, kad kintanti signalo seka turi apribotą intervalą. Kintamumas pateikiamas modeliuojant du Gauso triukšmo šaltinius su stochastiniu modeliu.

Šis modelis yra susijęs tik su laikine priklausomybe tinklainės atsakui į įėjimo signalą. Tačiau, gali būti išplėstas siekiant įtraukti erdvinį apdorojimą. Jeigu daroma prielaida, kad laiko ir erdvės apdorojimas gali būti atskiriamas, kaip buvo minėta determinuotame modelyje, erdvinis apdorojimas gali būti atliekamas funkcija, panašia į DoG.

Šis modelis pirmiausia buvo pritaikytas numatyti tinklainės atsakui į Gauso atsitiktinę simuliaciją keletui skirtingų tinklainės ganglinių ląstelių su skirtingomis vertėmis. Modelis taip pat taikomas modeliuoti LGN neuronų ląstelėms.



3.14 pav. Stochastinio modelio blokinė diagrama [26]

Iš struktūros (žr. 3.14 pav.) matyti, kad laikinis stimuliavimas $s(t)$ filtruojamas tiesiniu filtru su impulso atsako funkcija $F(t)$, gaunant generatoriaus potencialą $g(t)$. Pastarasis pateiktas kaip sąsukos, veikiant neuroną laike $s(t)$ bei tiesinio filtro $F(t)$ rezultatas:

$$g(t) = \int_{-\infty}^t s(\tau) F(t - \tau) d\tau. \quad (2.38)$$

Signalas $g(t)$ yra sumuojamas su triukšmo komponentu $a(t)$ bei grįžtamojo signalu iš grįžtamojo bloko. Gaunamas signalas $h(t)$, kuris yra palyginamas su slenksčio verte. Slenksčio blokas yra sudarytas iš trijų pagrindinių dalių: a) signalas $h(t)$ yra lyginamas su slenksčio verte θ , taigi jis įgauna laikinę formą $\delta(h(t) - \theta)$ užtikrinant, kad neuronai aktyvuojami ir signalas yra išspinduliuojamas tik tada, kai jis didėdamas kerta ribinę vertę; b) signalas įgyja laikinę formą

$u(h(t))$, kur $u(t)$ yra nuolatinė Hevisaido žingsninė funkcija (angl. *Heaviside Step Function*) [28];
c) galiausiai, šios dvi sąvokos laiko atžvilgiu yra dauginamos darinio $h(t)$, nurodant $h(t)$.

Pirmieji du 3.14 paveikslo blokai, filtras $F(t)$ ir ribinis blokas yra skirti prognozuoti neurono veiklai, atitinkamai pažymint, kad $a(t) = b(t) = P(t) = 0$ modelio struktūroje, pateiktoje 3.14 paveiksle (P – po potencine (angl. *After-Potential*) funkcija). Norint prognozuoti neurono aktyvumą, grįžtamojo ryšio blokas modelyje užtikrina neveikimo periodą po to, kai neurono ląstelė buvo aktyvi. Atitinkamai gaunamas modelio išėjimas:

$$\hat{\rho}(t) = \delta(h(t) - \theta) u(\dot{h}(t)) \quad (2.39)$$

Stochastinis modelis modeliuoja neurono kintančius atsakymus laikui bėgant. Šis kintamumas apima neurono išėjimo signalus bei kintamumą laike, neurono reakciją. Modeliuojama įskaitant du Gauso triukšmo šaltinius $a(t)$ ir $b(t)$. Triukšmo signalų amplitudės keičiasi laike, tad neurono išėjimo signalas $a(t)$ keičiasi atsižvelgiant į amplitudės kitimą.

Atsitiktinis signalas $a(t)$ yra pridėtas prie generatoriaus potencialio $g(t)$ prieš slenksčio bloką, įvedant tam tikrą kintamumą, kai nustatytu laiku yra kertama slenksčio riba. Šio tinklainės modelio išėjimo signalo kitimas yra mažesnis nei tikrų neuronų, todėl triukšmo šaltinis $b(t)$ taip pat yra įtraukiamas.

Stochastinis tinklainės modelis laikomas nuolatinių signalų sistema ir gali būti įgyvendinamas skaitmeniniuose įrenginiuose.

3.2.5. Baltojo triukšmo funkciniai modeliai

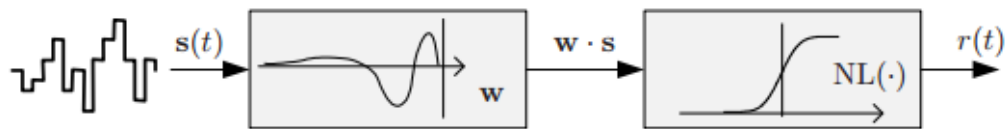
Šis modelis pasiūlytas 2001 metais, kai pradėtas modeliuoti tinklainės ganglinių ląstelių atsakas į triukšmą. Baltasis triukšmas gali generuoti laiko ir erdvės atsakus neuronų regos sistemoje.

Baltojo triukšmo modelis pateiktas blokinėje diagramoje paveiksle 3.15. Pirmasis blokas yra tiesinė funkcija su impulso atsaku, lygiu laike kintančiam vektoriui W , kuris yra proporcingas išėjimo signalų vidurkiui jeigu veikianti erdvė turi tam tikrų savybių.

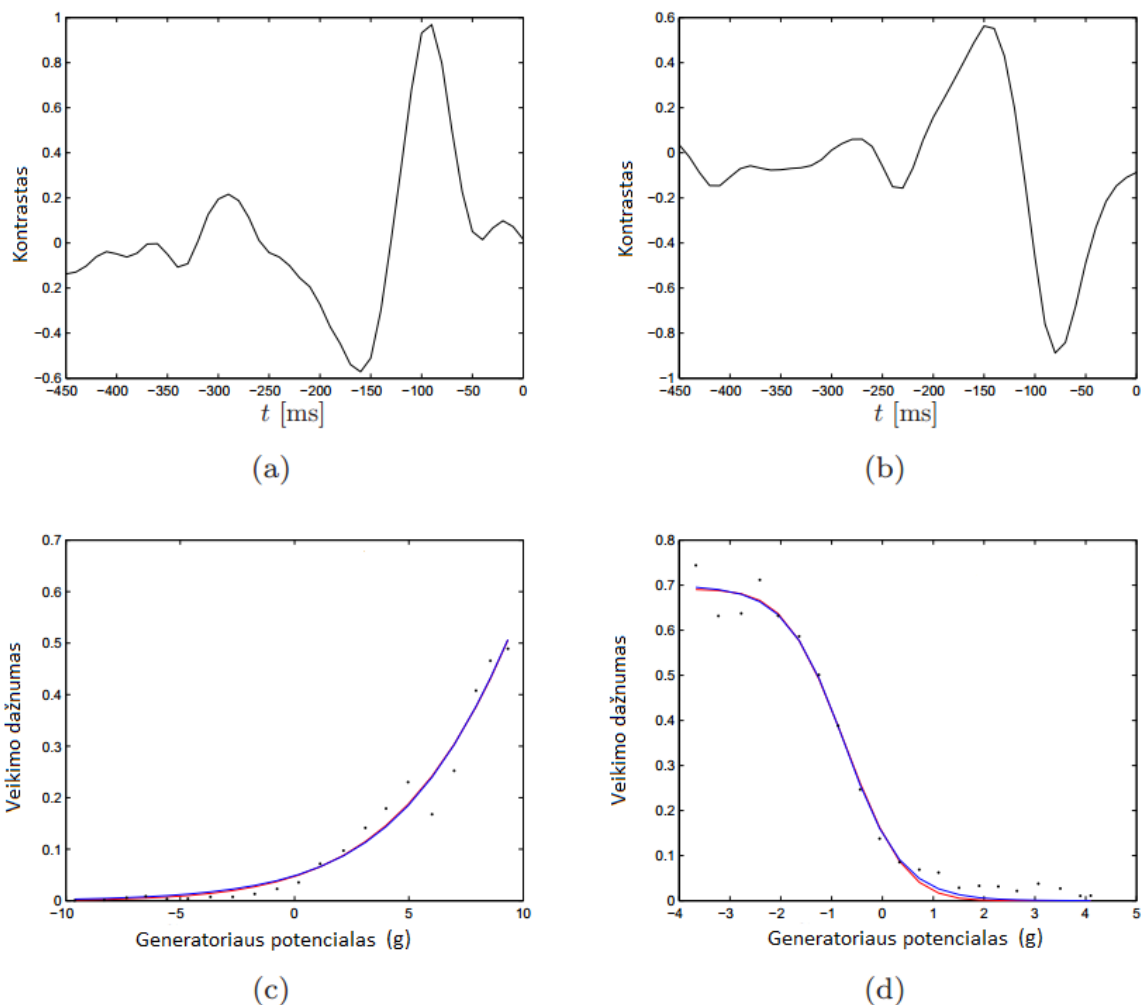
Antrasis modelio blokas iš kairės yra netiesinė funkcija, kuri vaizduoja generatoriaus signalą gautą iš vidinio vektoriaus į tinklainės išėjimo signalo dažnumą $w \cdot s = w^T s$. Filtro atsakas gaunamas analizuojant ganglinių ląstelių atsaką į baltąjį triukšmą, o netiesinė funkcija pavaizduota dešiniajame paveikslo bloke, generatoriaus potencialo kitimą vaizduojant kreive pagal išėjimo signalo kitimą. Tinklainės išėjime gaunamas signalas, kuris atitinkamu laiko momentu išeina iš neurono, tačiau daroma prielaida, kad tai priklauso tik nuo generatoriaus signalo. Generatoriaus signalas yra tiesinis vaizdo darinys, kuris pasiekia tinklainę tam tikroje vietoje ir tam tikru laiku.

Tokiu atveju, gaunama išėjimų signalų seka, o signalų generatorius juos turi paversti į neurono funkciją. 3.15 paveiksle NL yra vieno kintamojo realios vertės netiesinė funkcija.

Šis baltojo triukšmo modelis gali būti laikomas kaip kreivės pritaikymas išėjimo signalui. Stimuliuojanti funkcijos charakteristika, vadinama signalo vidurkiu, yra taikoma kaip procedūra neuronų modeliavimui neuro mokslo teorijoje. Įgyvendinimas skaitmeniniuose įrenginiuose yra gana paprastas, kai visos išraiškos yra pateikiamos diskrečia forma.



3.15 pav. Baltojo triukšmo modelio blokinė diagrama [26]



3.16 pav. Baltojo triukšmo charakteristikos; **a)** salamandros *On-center* tipo ganglinės ląstelės veikimas atsakas į kontrastą; **b)** triušio *Off-center* tipo ganglinės ląstelės veikimas atsakas į kontrastą; generatoriaus signalas pasirinktame laiko tarpe gyvūnų atveju, $\Delta t = 10 \text{ ms}$ [26]

Pirmiausiai, modelio parametrai turi būti tinkamai nustatyti naudojant eksperimentinius duomenis. Pavyzdys pateiktas 3.16 paveiksle, kur naudojamas *On-center* ir *Off-center* tipo ląstelės. Vektorius W gaunamas iš stimuliavimo vidurkio, pateikto paveiksle abiejų ląstelių atveju. Išėjimo signalas gaunamas pradiniu laiku 0, o neigiamos laiko vertės yra pradinis signalas.

Pritaikant netiesinę funkciją galime sukurti grafiką su taškais, atitinkančiais generatoriaus potencialą $g_n = W \cdot S_n$ ir išspinduliuotų signalo skaičių tam tikrais laiko momentais. Tarkime, kad šis laikas $\Delta t = 10 \text{ ms}$ yra didelis palyginti su periodu $T_s = 1 \text{ ms}$. Išėjimo signalų skaičius laike Δt svyruoja kartu su generatoriaus potencialu, o generatoriaus potencialų diapazonas suskaidytas į 20 intervalų. Generatoriaus potencialo signalo vertės per laiką paimtos vidutiniškai per intervalą.

Grafikai, pateikti 3.16 c) ir d) rodo generatoriaus potencialą per išspinduliuotų signalų skaičių pasirinktame intervale, analizuojant tinklainės ganglines ląsteles. Iš netiesinės funkcijos matyti skirtingą elgesį c) paveiksle, esant *On-center* tipo ganglinei ląstelei (salamandra) bei d) paveiksle esant *Off-center* tipo ląstelei (triušis). Šie grafikai rodo, kad naudojant sigmoidinę funkciją (mėlyna spalva) gaunama kreivė yra panaši į gaunamą taikant pasiskirstymo funkciją (mėlyna spalva).

3.2.6. Skyriaus išvados

Skyriaus pirmojoje dalyje išnagrinėta biologinė žmogaus akies tinklainės sistema. Išsiaiškinta, kad tinklainę sudaro dviejų tipų fotoreceptoriai – kūgiai ir stiebeliai. Pastarieji yra atsakingi už smulkių detalių matymą regos lauke, o kūgiai yra atsakingi už periferinį matymą.

Žmogaus tinklainę sudaro dviejų tipų bipoliarinės ir ganglinės ląstelės, kurios vienu atveju signalus, esančius tinklainėje stiprina, kitu – slopina. Fiziniam ryšiams tarp fotoreceptorių ir bipoliarinių ląstelių yra naudojamos horizontaliosios, o tarp bipoliarinių ir ganglinių – amakrino ląstelės. Ganglinės ląstelės regimo vaizdo signalą perduoda į regos nervą tolimesniam apdorojimui.

Antrojoje skyriaus dalyje išnagrinėti skaitiniai žmogaus tinklainių modeliai, kur pastarieji suskirstyti į struktūrinių ir funkcinių grupes.

Struktūriniuose modeliuose ląstelių funkcinė struktūra yra imituojama taikant skirtingas formules, kur modeliuojamas kiekvienas tinklainės sluoksnis, atskirai sudarant pakopinę tinklainės struktūrą. Išnagrinėti modeliai:

- integruojantis atsako – kaupiamas potencialas ir pasiekus ribinę vertę generuojamas išėjimo signalas;
- ištekančio integruojantis atsako – kaupiamas potencialas tuo pačiu metu yra mažinamas, atsižvelgiant į tai, kad realios ląstelės membranos potencialas yra kintantis.

Funkciniai žmogaus akies tinklainės modeliai skirstomi į keletą šakų – determinuoti, stochastiniai bei baltojo triukšmo. Determinuotieji modeliai yra statinio veikimo ir visada

pateikiantys tą patį išėjimo signalą į tą patį „dirgiklį“. Stochastiniai modeliai atkartoja tinklainei būdingą išėjimo signalo kintamumą pridedant triukšmo signalą. Šiam tikslui naudojami baltojo triukšmo modeliai, kuriuose taikant baltojo triukšmo analizės metodus gaunamas tinklainės išėjimo signalas.

4. ŽMOGAUS AKIES TINKLAINĖS MODELIAVIMAS

Žmogaus akies tinklainės modeliavimui atrinkti trys skirtingi modeliai – metodai. Modeliai pasirinkti atsižvelgiant į jų populiarumą įvairiuose darbuose:

- *OpenCV Retina* [30];
- *Python Canny* [33, 54];
- *HVStoolbox* [37].

Taikant pasirinktus modelius – metodus apdorojami klasifikuoti vaizdai. Pastarieji, papildomam gautų duomenų palyginimui, apdorojami *Matlab* programiniu paketu, taikant aptiktų pikselių statistinį palyginimą, o rezultatai pateikti sekančiame rašto darbo skyriuje.

Šiame skyriuje išnagrinėti pasirinkti trys žmogaus tinklainės modeliai – metodai, aprašant kiekvieną bei pateikiant modeliavimo pavyzdžių bei atlikimo techniką.

4.1. *OpenCV Retina* modelis

OpenCV yra atviro kodo kompiuterinių vaizdų apdorojimo bei mašininio mokymosi biblioteka. Biblioteka yra parašyta C ir C++ kalbomis bei veikia šiose operacinėse sistemose: *Linux*, *Windows*, *Mac OS X*.

OpenCV suprojektuota atlikti efektyvius skaičiavimus, o didžiausias dėmesys sutelktas ties minėtų sričių realaus laiko aplikacijomis. Taikant *OpenCV* galima naudotis kelių branduolių procesorių teikiamomis galimybėmis.

Ši biblioteka turi supaprastintą kompiuterinių vaizdų apdorojimo infrastruktūrą. Bibliotekoje yra daugiau nei 2500 optimizuotų algoritmų, kurie apima daugelį vaizdo sričių ir taip pat suteikia tokias galimybes kaip vaizdų atpažinimas, objektų aptikimas, žmogaus veiksmų klasifikacija video medžiagoje, vaizdo kameros filmuojamo vaizdo sekimas, 3D vaizdų apdorojimas ar žmogaus akies tinklainės modeliavimas.

OpenCV bibliotekoje randamas žmogaus tinklainės modelis pavadinimu *Retina*. Šis modelis sukurtas *Gipsa* ir *Listic* laboratorijose (Prancūzija). Erdvės – laiko filtrų modeliavimui yra du pagrindiniai tinklainės informacijos kanalai:

- geltonosios dėmės regėjimas detaliam spalvų matymui (angl. *ParvoCellular Pathway*);
- periferinis matymas jautriems pereinantiems signalams aptikti, kurie skirti judesio ar judesių aptikimui (angl. *MagnoCellular Pathway*).

Tinklainės modelio struktūra sudaryta iš dviejų išėjimo kanalų, kurie skirstomi į *ParvoCellular* ir *MagnoCellular*.

ParvoCellular – daugiausiai aktyvus tinklainės geltonosios dėmės dalyje (didelės raiškos centrinė rega su spalvoms jautriais fotoreceptoriais), kurio tikslas yra tinkamai pateikti tinklainėje esamo vaizdo spalvą (statinio) ar besikeičiančio vaizdo spalvas (dinaminio).

Antrasis kanalas yra žinomas kaip *MangoCellular*. Pastarojo aktyvumas yra periferinėje tinklainės dalyje (periferiniame matyme). Jis perduoda signalus, susijusius su vaizdo pasikeitimu – judėjimas, vaizdo objektų pasikeitimas ir kt. Šie išeinantys signalai regos sistemai padeda susitelkti į judančias paveikslų vietas, jas analizuoti ar atlikti matomų objektų klasifikaciją.

Retina tinklainės modelis atlieka erdvės – laiko apdorojimą vaizdui, keletui vaizdų ar video medžiagai (taip pat gali būti apdorojimas realiu laiku gaunamas kameros vaizdas). Tyrimai atliekami tinklainės modelyje su šiomis savybėmis:

- spektrinis šviesinimas (detalių išskyrimas vaizduose, vidutinių dažnių juosta). Aukšto dažnio signalai sukelia triukšmą paveiksluose, vidutiniai sustiprina detalių matymą, o žemi dažniai sumažina šviesos energijos kiekį;
- aukšto dažnio erdvės – laiko triukšmo sumažinimas (laiko bei aukštų dažnių erdvinis triukšmas yra minimizuotas);
- šviesumo sumažinimas žemuose dažniuose (šviesumo diapazono suspaudimas) – didesnio šviesumo taškai vaizduose neuždengia tamsesniuose regionuose esančių tamsesnių detalių;
- logaritminis šviesos suspaudimas (leidžia geriau atpažinti vaizdo detales esant prastesnėms apšvietimo sąlygoms).

Visi šie nustatymai vaizdo signalus išvalo nuo nepageidaujamų iškraipymų įėjimo duomenyse bei pritaiko reikiamą apšvietimo lygį.

Tinklainėje atliekamas pradinis žmogaus matomo vaizdo apdorojimas (angl. *Pre-processing*) perkeltas į *Retina* modelį. Pasirinktas *Retina* modelis gali būti parametrizuojamas, naudojant standartinį (angl. *default*) parametrų *.xml formato failą arba naudojantis pateikta dokumentacija gali būti sukuriamas specifinis parametrų rinkinys ir pritaikomas konkrečiam vaizdui modeliuoti (žr. 4.1 pav.).

Pagrindiniai *Retina* modelio parametrai:

- *colorMode* – nurodoma, koks paveikslas bus modeliuojamas. Spalvotas (reikšmė lygi 1) ar nespalvotas (reikšmė lygi 0);
- *normaliseOutput* – kiekvienas kanalas turi šį parametą, jeigu jo reikšmė lygi 1, tada išėjimo skalė yra pateikiama 0 ir 255 vertės intervale. Triukšmas, likęs išėjimo kanaluose, taip pat yra pateikiamas minėtuose intervaluose.
- *photoreceptorsLocalAdaptationSensitivity* – galimos vertės tarp 0 ir 1. Vertės, artimesnės 1, didina ryškios šviesos kompresijos efektą fotoreptorių lygyje. Vertės, artimos 0,

suteikia daugiau tiesinio jautrumo, o jį didinant prarandamas smulkus vaizdas išėjimo paveiksle;

- *photoreceptorsTemporalConstant* – nustatoma konstanta žemų dažnių filtrų poveikiui tinklainės įėjime. Didelė vertė veda prie stipraus laiko išlaikymo efekto: judantys objektai yra neryškūs ir gali išnykti kol statinis objektas bus užfiksuotas/išrinktas. Tačiau, kol pradedamas apdorojimas tinklainėje, stabili būsena yra besikeičianti;
- *photoreceptorsSpatialConstant* – nurodo erdvinę konstantą susijusią su fotoreceptorių žemų dažnių filtro efektu (poveikiu). Šis parametras apibrėžia mažiausią galimą erdvinio signalo periodą ir šis filtras sumažina aukšto dažnio triukšmą. Jeigu konstantos vertė lygi 0, triukšmas nėra išmetamas kol didesnės vertės nepradeda mažinti erdvinio signalo dažnio. Norint matyti daugiau detalių įvesties vaizduose, konstanta turėtų būti vidutinio dydžio.

Detalus paveikslo 4.1 parametrų aprašymas pateiktas šaltinio nuorodoje [30].



```

1 <?xml version="1.0"?>
2 <opencv_storage>
3 <OPLandIPLparvo>
4   <colorMode>1</colorMode>
5   <normaliseOutput>1</normaliseOutput>
6   <photoreceptorsLocalAdaptationSensitivity>7.0e-01</photoreceptorsLocalAdaptationSensitivity>
7   <photoreceptorsTemporalConstant>5.0e-01</photoreceptorsTemporalConstant>
8   <photoreceptorsSpatialConstant>5.3e-01</photoreceptorsSpatialConstant>
9   <horizontalCellsGain>0.</horizontalCellsGain>
10  <hcellsTemporalConstant>1.</hcellsTemporalConstant>
11  <hcellsSpatialConstant>7.</hcellsSpatialConstant>
12  <ganglionCellsSensitivity>6.7e-01</ganglionCellsSensitivity></OPLandIPLparvo>
13 <IPLmagno>
14   <normaliseOutput>1</normaliseOutput>
15   <parasolCells_beta>0.</parasolCells_beta>
16   <parasolCells_tau>0.</parasolCells_tau>
17   <parasolCells_k>7.</parasolCells_k>
18   <amacrinCellsTemporalCutFrequency>1.2e+00</amacrinCellsTemporalCutFrequency>
19   <V0CompressionParameter>9.5e-01</V0CompressionParameter>
20   <localAdaptIntegration_tau>0.</localAdaptIntegration_tau>
21   <localAdaptIntegration_k>7.</localAdaptIntegration_k></IPLmagno>
22 </opencv_storage>

```

4.1 pav. Žmogaus akies tinklainės *Retina* modelio parametrizavimas

Žmogaus tinklainės modeliams bei metodams tirti pasirinkta 12 skirtingų vaizdų, kuriuos sudaro sinusoidiniai, įvairaus kontrasto, spalvų ar apšvietimo paveikslai. Kiekvieno modelio bei metodo atveju darbe pateikta po vieną modeliuotą paveikslą bei šalia pateiktas originalus vaizdas, kaip galimybė vizualiai įvertinti modelio kokybę.

Darbo rezultatų skyriuje pateikti visų paveikslų modeliavimo rezultatai kiekvieno modelio bei metodo atveju.

Retina modelio tyrimo metu pasirinktas vaizdas su automobilių numeriais [32]. 4.2 paveiksle pateiktas *OpenCV Retina* modeliu apdorotas paveikslas (originalus – 4.3 pav.).



4.2 pav. Retina modeliu apdorotas automobilių numerių vaizdas



4.3 pav. Originalus automobilių numerių vaizdas [38]

OpenCV modeliu atliktas paveikslo apdorojimas rodo, kad objektų kontūrai vaizduose yra aptinkami, tad likusieji paveikslai taip pat apdoroti šiuo modeliu, kurių rezultatai pateikiami rezultatų darbo skyriuje.

4.2. Python Canny metodas

Python Canny metodas, pasiūlytas Džono Keni (J. Canny) 1986 metais skirtas briaunų aptikimui vaizduose. Metodas vadinamas šio mokslininko pavarde, tiesiog *Canny* briaunų detektoriumi (angl. *Canny edge detector*).

Nuo tada, kai pradėtas naudoti briaunų aptikimas, pirmasis šio modelio žingsnis yra pašalinti triukšmą iš apdorojamo vaizdo, taikant Gauso filtrą.

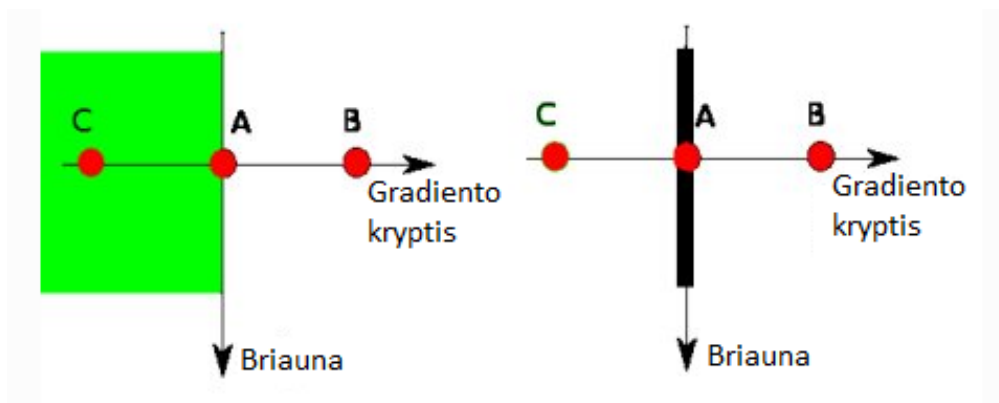
Toliau vaizdui pritaikomas Sobelio operatorius, tiek horizontaliai tiek vertikaliai gaunant x ir y kryptimis išvestines – G_x bei G_y [32]. Turint atskirtus vaizdus, galima surasti briaunos gradientą (4.1) bei kryptį (4.2) kiekvienam pikseliui, kuriame jis keičiasi:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (4.1)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (4.2)$$

Gradiento kryptis visada statmena briaunoms. Gradientas yra sukamas į vieną iš keturių krypčių horizontaliai ir vertikaliai bei dvi įstrižos kryptys (45° kampas).

Kai yra žinomas gradiento dydis ir kryptis, vaizdo nuskaitymas yra baigiamas, o netinkami pikseliai, kuriems netinka gradiento kitimo sąlygos, yra ištrinami. Čia kiekvieno pikselio atveju pažymima, jeigu jis yra lokalus maksimumas su savo gretimų tašku ir gradiento kryptimi (žr. 4.4 pav.).



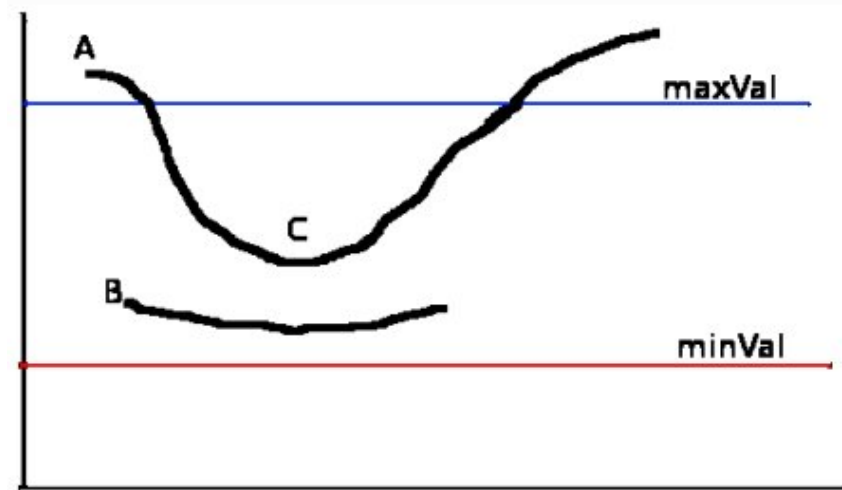
4.4 pav. Briaunų aptikimas *Python Canny* modelyje [33]

Taškas A nurodo briaunos vietą vertikaliajoje padėtyje. Įprasta, kad gradiento kryptis sutampa su briauna. Taškai B ir C taip pat yra gradiento kryptyje, tačiau taškas A yra pažymėtas tarp B ir C kaip lokalus maksimumas. Jeigu šis taškas lieka lokaliu maksimumu ir kito gretimio taško atžvilgiu jis yra paliekamas, kitu atveju – slopinamas (vertė nustatoma į nulį). Tokiu atveju gaunamas dvejetainis paveikslas su nustatytomis briaunomis.

Histerėzes slenksčio naudojimas [34].

Šiame etape yra nustatoma, kuri briauna yra „tikroji“, o kuri ne. Nustatymui naudojamos dvi slenksčio vertės $minVal$ ir $maxVal$. Bet kokios briaunos su intensyvumo gradientu, didesniu už $maxVal$ yra briaunos, o tos, kurios žemiau $minVal$ nėra briaunos, tad joms taikomas atmetimas. Briaunos, esančios tarp šių dviejų linijų, yra klasifikuojamos į briaunas ir ne briaunas priklausomai

nuo jų ryšių su atmetomis arba patvirtintomis briaunomis. Jeigu jos susijungusios su „tikrosiomis“ briaunomis, jos priskiriamos prie briaunų, kitu atveju yra atmetamos. Paveikslas vaizduoja briaunų atmetimui naudojamas ribas – 4.5.



4.5 pav. Briaunų slenksčio ribų veikimas *Python Canny* metode [33]



4.6 pav. Briaunų aptikimas su *Python Canny*

Briauna A yra aukščiau *maxVal* ribos, taigi šis taškas yra „tikroji“ briauna. Nors taškas C yra žemiau *maxVal* vertės, jis turi susijungimą su briauna A. Šiuo atveju taškas C yra priskiriamas prie briaunos. Taškas B yra virš *minVal* vertės bei taip pat kaip C, tačiau jis nėra susijungęs nei su viena „tikrąja“ briauna, taigi yra atmetamas. Labai svarbu tinkamai pasirinkti *minVal* ir *maxVal* vertes,

norint gauti geriausią rezultatą. Šio proceso metu taip pat yra pašalinami maži triukšmo taškai, darant prielaidą, kad briaunos yra ilgos linijos.

Python naudojama *OpenCV* biblioteka, visus prieš tai išvardintus veiksmus sujungia į vieną funkciją – *cv2.Canny()*.

Naudojant *Python* programavimo įrankį pasirinktas žmogaus tinklainės ganglinių ląstelių analogas briaunų aptikimui atlikti. Gautas rezultatas pateiktas 4.5 paveiksle, originalas – 4.6.

Lyginant originalų ir apdorotą paveikslus, matyti, kad briaunų aptikimas naudojant *Python Canny* yra pakankamas atskirti objektus plika akimi iš apdoroto paveikslo.



4.7 pav. Originalus vaizdas naudotas su *Python Canny* [35]

4.3. *HVSToolBox* modelis

Šis tinklainės modelis sukurtas C++ programavimo kalba kaip daugelį gijų palaikanti programinė įranga. Naudojant Qt 4.5 struktūrą programinis paketas gali būti valdomas grafiškai, įkeliant paveikslus, paveikslų sekas, video failus ar sujungiant tiesiogiai su video kamera [36]. *HVSToolBox* yra parametrizuojamas įrankis, kuriame valdomas vaizdų apdorojimas.

Įrankio parametrų valdymas suskirstytas į du sluoksnius – vidinį ir išorinį. Vidiniame sluoksnyje galima valdyti tokius parametrus:

- *photoreceptors local adaptation (Cph)* – fotoreceptorių lokali adaptacija pagal bendrą vaizdą, procentais;
- *photoreceptors low pass filter spatial constant (Fph)* – fotoreceptorių žemų dažnių filtras konstanta, pikseliui;

- *photoreceptors low pass filter temporal constant (Fph)* – fotoreceptorių žemų dažnių filtro konstanta per kadrą (angl. *frame*);
- *horizontal cells input gain (Fh)* – horizontaliosioms ląstelėms taikomas įėjimo pralaidumas, dB;
- *horizontal cells low pass filter spatial constant (Fh)* – horizontaliųjų ląstelių žemų dažnių filtro konstanta, pikseliui;
- *horizontal cells low pass filter temporal constant (Fh)* – horizontaliųjų ląstelių žemų dažnių filtro laiko konstanta per kadrą.

Signalas išoriniame sluoksnyje pereina per fotoreceptorius, horizontaliąsias ląsteles ir pasiekia bipoliarines *On-center* bei *Off-center* ląstelės (žr. 4.7 pav.), kaip minėta antrajame darbo skyriuje.

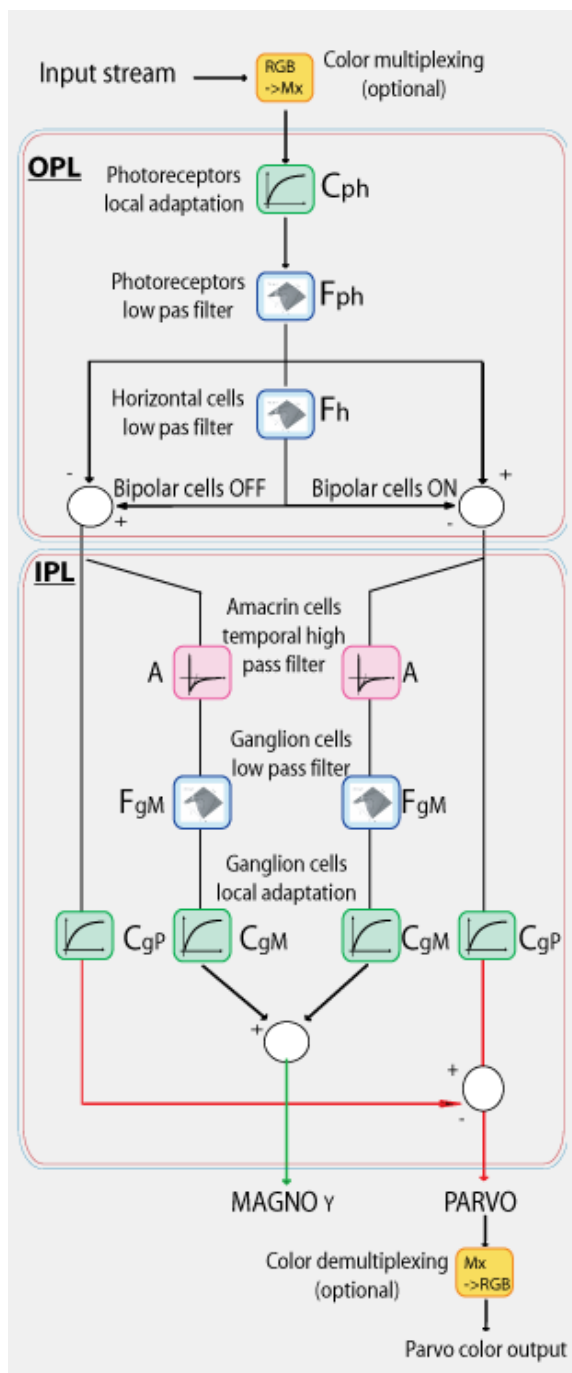
Vidinio sluoksnio parametrai – detalių matymas, geltonosios dėmės rega:

- *Cgp local adaptation strength* – pikselių lokali adaptacija taškui atsižvelgiant į bendrą įėjimo signalą, procentais;
- *Fgp spatial integration* – erdvės integracija, pikseliais;
- *Fgp temporal integration* – laiko integracija, per kadrą.

Judėjimas, periferinis matymas:

- *amacrine cells temporal high pass filter, temporal constant* – amakrino ląstelių laikinis aukštų dažnių filtras su laikine konstanta kadrui;
- *Fgm low pass filter spatial constant* – žemų dažnių filtro erdvės konstanta pikseliui;
- *Cgm local adaptation strength* – lokali adaptacija taškui pagal bendrą įėjimo signalą, pikseliais;
- *Cgm spatial integration* – erdvinė integracija pikseliui;
- *Cmg temporal integration* – laiko integracija kadrui.

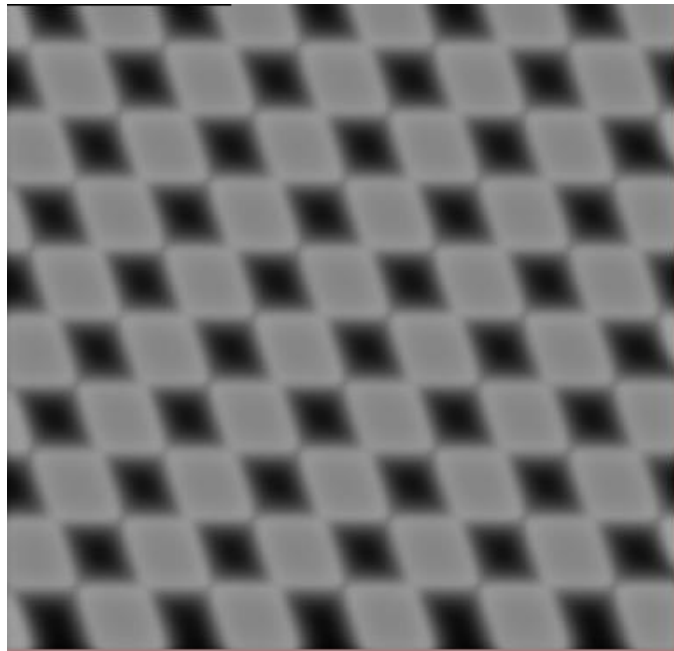
Darbe nagrinėjamas *Retina* modelis taip pat turi du išėjimo kanalus – *MagnoCellular* ir *ParvoCellular*. *HVSToolBox* atveju šie išėjimo kanalai yra taikomi analogiškai. *MagnoCellular* yra skirtas judesių aptikimui, periferiniam matymui, o *ParvoCellular* – detalių aptikimui, mažų objektų regėjimui.



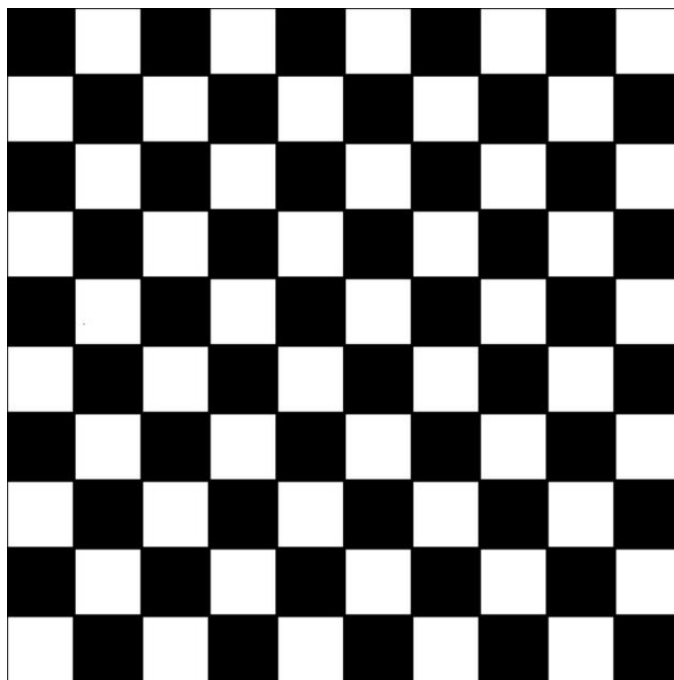
4.8 pav. HVSToolBox modelio veikimo schema

HVSToolBoox veikimo schema pateikta 4.7 paveiksle. Schemoje pateikiami žymėjimai ir tekstai anglų kalba, siekiant vertiniais neiškraipyti schemos.

Naudojant *HVSToolbox* įrankį atliktas žmogaus tinklainės vaizdo modeliavimas taikant standartinę aptartų parametrų konfigūraciją, kurią pateikia šio projekto autoriai [37]. Modeliavimui pasirinkta šaškių lenta, gautas rezultatas pateiktas 4.8, o originalas 4.9 paveiksluose.



4.9 pav. *HVSToolBox* modeliuota šaškių lenta



4.10 pav. Originalus šaškių lentos vaizdas [39]

Žmogaus akies tinklainės modeliams tirti pasirinkta 12 skirtingų vaizdų:

1. Sinusoidinės grotelės – [40].
2. Šaškių lenta – [39].
3. Spalvotų kvadratų mozaika – [41].
4. Spalvų juostos – [42].
5. Juodai balti laiptai – [43].
6. Rusvos spalvos plytų siena – [31].

7. Sufokusuotos gėlės gamtos vaizde – [44].
8. Saulės apšviestas miškas – [35].
9. Didysis kanjonas, apšviestas saulės – [45].
10. Automobilių numeriai – [38].
11. Saulės pusiau apšviesta Šv. Onos bažnyčia – [46].
12. Dykumoje vykstančios šaudymo į taikinius pratybos – [47].

Pastarieji paveikslai modeliuoti išvardintais įrankiais ir viso gauta 36 skirtingi vaizdai, kurie papildomai apdorojami suvienodinant modeliuoto vaizdo – originalaus vaizdo išmatavimus – siekiant gauti tikslesnį tyrimo rezultatą.

Kitame skyriuje pateikiami gauti duomenys apdorojant originalius paveikslus *Matlab* programiniu paketu, kurie lyginami su modeliavimo rezultatais, sudarant grafikus bei matematinius rodiklius.

Visi gauti vaizdai ir programų išeities kodai pateikiami elektroninėje laikmenoje.

4.4. Skyriaus išvados

Šiame skyriuje išnagrinėti trys žmogaus akies tinklainės modeliavimui pasirinkti modeliai – metodai:

- *OpenCV Retina* modelis;
- *Python Canny* metodas;
- *HVSToolBox* modelis.

Taikant pasirinktus modelius – metodus iš viso atlikti 36 modeliavimo procesai gaunant apdorotus vaizdus. Kiekvienu atveju po vieną modeliavimo vaizdą pateikiama šiame skyriuje, o likusieji apdoroti vaizdai A, B ir C prieduose.

Pastebėta, kad *Retina* ir *HVSToolBox* modeliai taiko panašią metodiką, išėjimo signalams naudojami du kanalai: *MagnoCellular* ir *ParvoCellular*. *MagnoCellular* yra skirtas judesių aptikimui, periferiniam matymui, o *ParvoCellular* detalių aptikimui, mažų objektų regėjimui.

Python Canny metode naudojamas briaunų aptikimas taikant slenksčio ribas gradientui, kuris yra skaičiuojamas judant paveikslo x, y ašimis bei 45° laipsnių kampais šių ašių atžvilgiu. Gradientu gautos vertės skirstomos atrenkant briaunas nuo ne briaunų bei tokiu būdu sudaromas vaizdo kontūras.

5. ŽMOGAUS AKIES TINKLAINES SKAITINIŲ MODELIŲ TYRIMO REZULTATAI

5.1. Rezultatų gavimo metodika ir jų apibendrinimas

Atliekant žmogaus akies tinklainės tyrimus praėjusiam skyriuje aptartais modeliais gauti vaizdai lyginami su dar vienu pasirinktu metodu gautais vaizdais.

Šiam tikslui naudota *Matlab* funkcija *edge*. Su *edge* funkcija briaunų radimui galima taikyti metodus: *Sobel*, *Prewitt*, *Roberts* ir *Canny*. Tyrimų rezultatams pasirinkta taikyti paskutinį metodą, kaip vieną iš dažniausiai naudojamų įvairiuose tyrimuose.

Matlab programiniame pakete *Canny* briaunų aptikimo modelis aptinka briaunas įėjimo paveiksluose imant apytikslį jo gradiento dydį. Gradientas skaičiuojamas naudojant Gauso filtro išvestinę. *Canny* metodas naudoja dvi slenkstines ribas aptinkant „stiprias“ ir „silpnas“ briaunas. Kaip ir *Python Canny* atveju, „silpnos“ briaunos yra fiksuojamos ir pateikiamos tik tada, jeigu jos yra tiesiogiai susijusios su „stipriomis“ briaunomis, o kitu atveju atmetamos. Metodas daugiau atsižvelgia į triukšmą nei kiti modeliai, siekiant aptikti „silpnąsias“ briaunas.

Pritaikius *Canny* metodą *Matlab* programoje atliktas modeliavimas su visais 12 tiriamų paveikslų (originalių, neapdorotų), programos kodas pateiktas priede D.

Toliau gauti vaizdai redaguoti, automatiškai keičiant jų dydį, pagal *OpenCV*, *Python Canny* ir *HVSToolBox* modeliavimo metu gautų vaizdų dydžius, siekiant tikslesnių tyrimų duomenų.

Modelių palyginimui pasirinktas metodas, kur *Matlab Canny* funkcijos taikymo metu gauti paveikslo balti taškai (pikseliai) yra lyginami su kitų modeliavimo metu gautų vaizdų baltų taškų skaičiumi, nustatant modelio kokybę aptinkant briaunas.

Lentelėje 5.1 pateikti *Retina* bei *Matlab Canny* modelių tyrimų duomenys. Lentelę sudaro visų dvylikos paveikslų modeliavimo rezultatai – baltų pikselių skaičius, jų skirtumas, naudojamas matuoti kiek taškų neaptikta ir aptikta.

Siekiant išsiaiškinti, koks modelis yra tinkamesnis, suskaičiuotas aritmetinis aptiktų ir neaptiktų taškų vidurkis, standartinis nuokrypis bei išskirtys.

Aritmetinis vidurkis skaičiuojamas matematiškai sudedant visas vertes ir padalijant jas iš komponentų skaičiaus, naudojama *Excel* funkcija *average*.

Gautiems aptiktiems ir neaptiktiems taškams apskaičiuojamas standartinis imties nuokrypis (dar vadinama dispersijos kvadratine šaknimi), kuris rodo, kiek daug reikšmės skiriasi nuo aritmetinio vidurkio (vidutinės reikšmės) [48].

Išskirtis – gražina normalizuotą reikšmę, kuri nurodo, kiek toji reikšmė yra nutolusi nuo bendro reikšmių vidurkio [49].

5.1 lentelė. Tyrimo rezultatai *Retina* ir *Matlab* atveju

Vaizdo Nr.	Retina, px	Matlab Canny, px	Skirtumas, px	Viso taškų, px	Neaptikta, %	Aptikta, %	Išskirtys
1	2687	17955	15268	50196	30,42	69,58	0,83
2	18209	80825	62616	408778	15,32	84,68	1,51
3	3563	27991	24428	50400	48,47	51,53	0,02
4	4205	17134	12929	164160	7,88	92,12	1,85
5	9422	144293	134871	175446	76,87	23,13	1,26
6	11797	135964	124167	174420	71,19	28,81	1,01
7	4685	52727	48042	158922	30,23	69,77	0,84
8	21141	233090	211949	351141	60,36	39,64	0,52
9	57180	737631	680451	923601	73,67	26,33	1,12
10	34830	323315	288485	424530	67,95	32,05	0,86
11	8332	107052	98720	188250	52,44	47,56	0,16
12	15212	166274	151062	294400	51,31	48,69	0,11
	Aritmetinis vidurkis				48,84	51,16	
	Standartinis nuokrypis				22,19	22,19	

5.2 lentelė. Tyrimo rezultatai *Python Canny* ir *Matlab* atveju

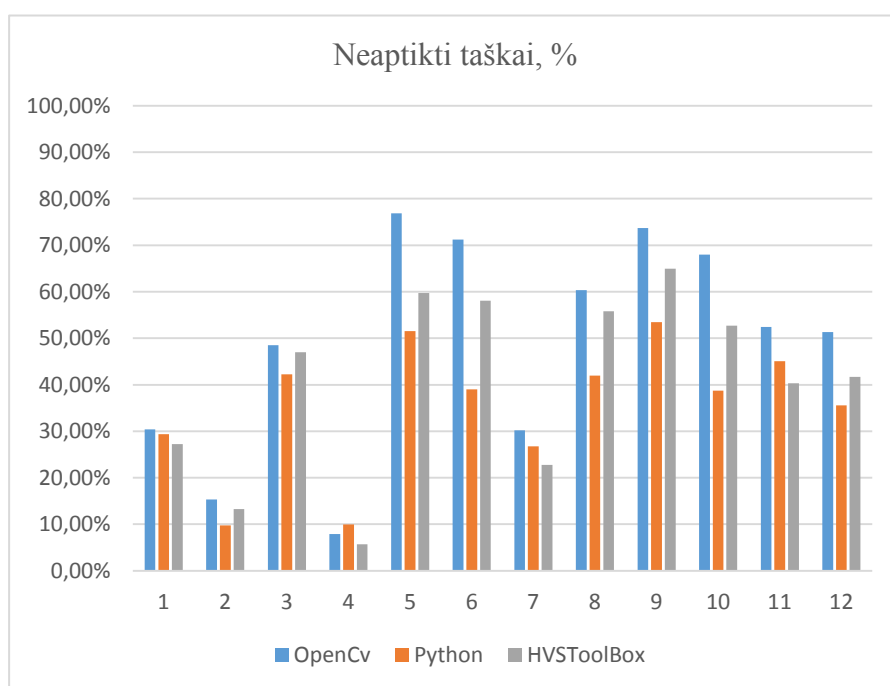
Vaizdo Nr.	Python Canny, px	Matlab Canny, px	Skirtumas, px	Viso taškų, px	Neaptikta, %	Aptikta, %	Išskirtys
1	11498	65491	53993	183749	29,38	70,62	0,43
2	17896	43296	25400	259590	9,78	90,22	1,88
3	17660	79679	62019	146880	42,22	57,78	0,51
4	2077	18281	16204	162880	9,95	90,05	1,87
5	21424	110744	89320	173400	51,51	48,49	1,20
6	32280	99222	66942	171533	39,03	60,97	0,28
7	14024	88401	74377	277776	26,78	73,22	0,63
8	35574	108146	72572	173060	41,93	58,07	0,49
9	21431	99901	78470	146880	53,42	46,58	1,34
10	37976	104523	66547	171870	38,72	61,28	0,25
11	32630	172625	139995	310569	45,08	54,92	0,72
12	18017	84103	66086	185785	35,57	64,43	0,02
	Aritmetinis vidurkis				35,28	64,72	
	Standartinis nuokrypis				13,56	13,56	

Lentelės 5.2 ir 5.3 analogiškos lentelei 5.1, kur pateikiami tyrimų duomenys. Lentelėje 5.2 pateikiami modeliavimo rezultatai taikant *Python Canny* briaunų aptikimo modelį bei jie palyginami su *Matlab* programiniu paketu gautais duomenimis modeliuojant analogiškus vaizdus. Lentelėje 5.3 matyti *HVSToolBox* ir *Matlab* modeliavimo rezultatai tokia pačia tvarka kaip ir prieš tai išvardintose lentelėse.

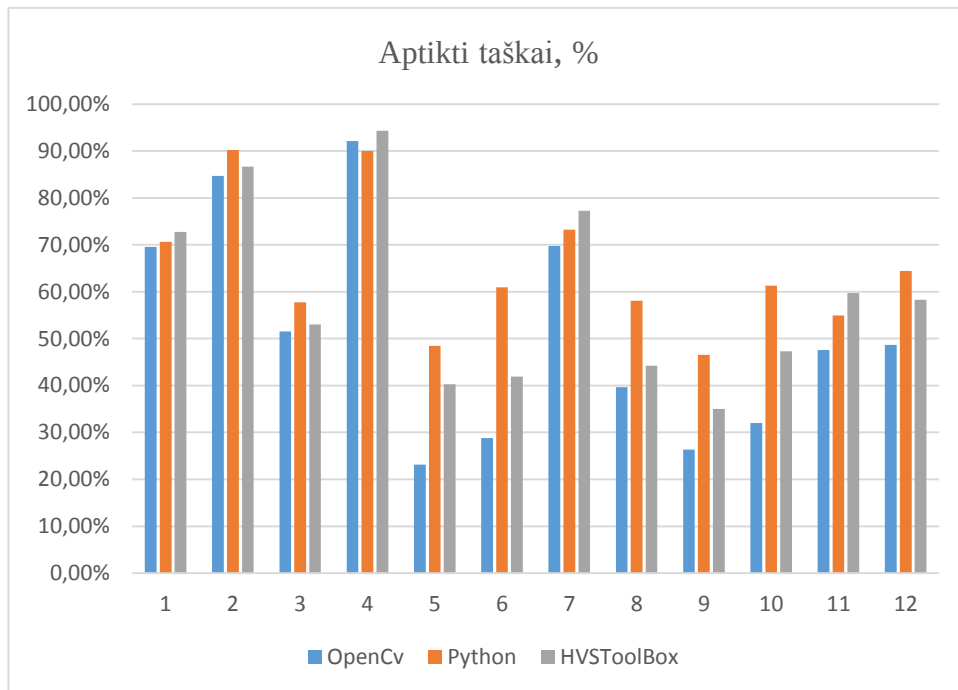
5.3 lentelė. Tyrimo rezultatai *HVSToolBox* ir *Matlab* atveju

Vaizdo Nr.	HVSToolBox, px	Matlab Canny, px	Skirtumas, px	Viso taškų, px	Neaptikta, %	Aptikta, %	Išskirtys
1	6799	27484	20685	75936	27,24	72,76	0,73
2	6419	25211	18792	141327	13,30	86,70	1,48
3	5163	33045	27882	59325	47,00	53,00	0,34
4	2508	6312	3804	66640	5,71	94,29	1,89
5	4613	47039	42426	71060	59,70	40,30	1,02
6	5369	46853	41484	71400	58,10	41,90	0,93
7	3685	25321	21636	95053	22,76	77,24	0,97
8	7114	47065	39951	71610	55,79	44,21	0,81
9	4737	43395	38658	59500	64,97	35,03	1,30
10	8278	45706	37428	71060	52,67	47,33	0,64
11	5125	47553	42428	105248	40,31	59,69	0,02
12	3995	36094	32099	76953	41,71	58,29	0,05
	Aritmetinis vidurkis				40,77	59,23	
	Standartinis nuokrypis				18,58	18,58	

Duomenys vaizduojami grafiškai, siekiant juos pateikti lengviau suprantamu būdu. Paveiksle 5.1 matyti, kaip konkretaus modeliuoto vaizdo atveju, taikant skirtingą žmogaus akies tinklainės modelį, gaunamas neaptiktų baltų taškų procentas lyginant su *Matlab Canny* aptinkamais baltais taškais/briaunomis.

5.1 pav. Neaptikti balti taškai lyginant su *Matlab Canny* metodu

Analogiškai pateikiamas grafikas (žr. 5.2 pav.), kur konkretaus modelio atveju kiekviename paveiksle yra aptinkamas procentas baltų taškų, kurie rodo vaizduose esančių briaunų žymes.



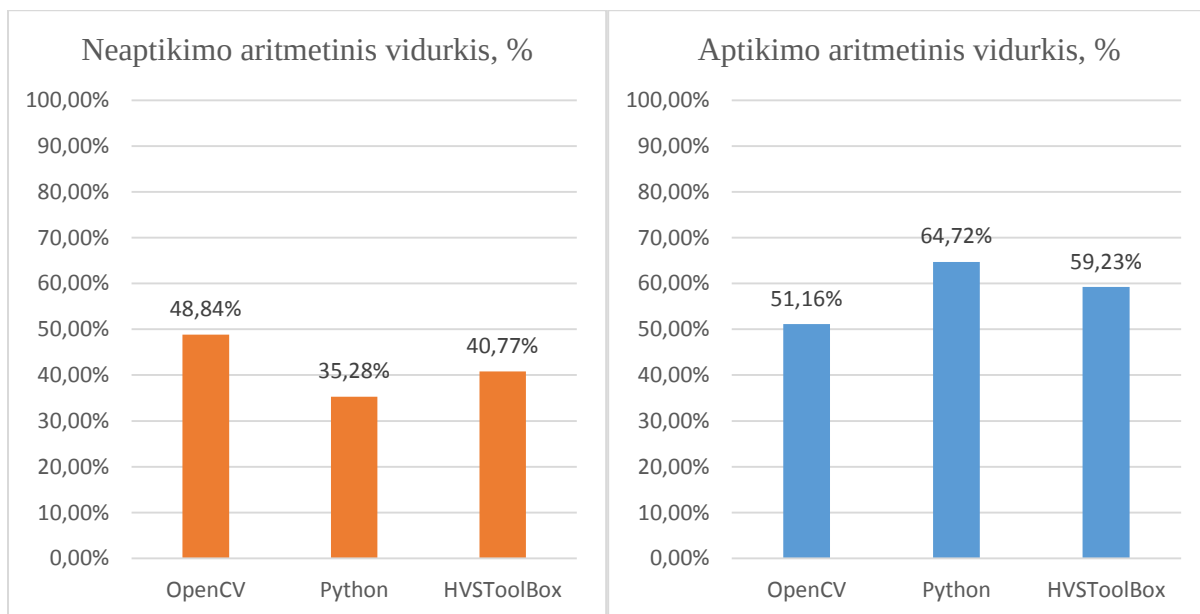
5.2 pav. Aptikti balti taškai lyginant su *Matlab Canny* metodu

Baltų taškų aptikimo ir neaptikimo pateiktuose grafikuose (5.1 ir 5.2 pav.) matyti, kad geriausiai ir daugiausiai baltų taškų/briaunų aptikta *Python Canny* tinklainės modeliu (5.1 ir 5.2 paveiksluose žymima oranžine juosta). Aštuonių iš dvylikos paveikslų atveju šis metodas davė geriausią rezultatą lyginant su kitais. Iš pateiktų grafikų matyti, kad antroje vietoje yra *HVSToolBox* modelis daugiausiai taškų/briaunų aptikta likusiais keturiais modeliavimo atvejais.

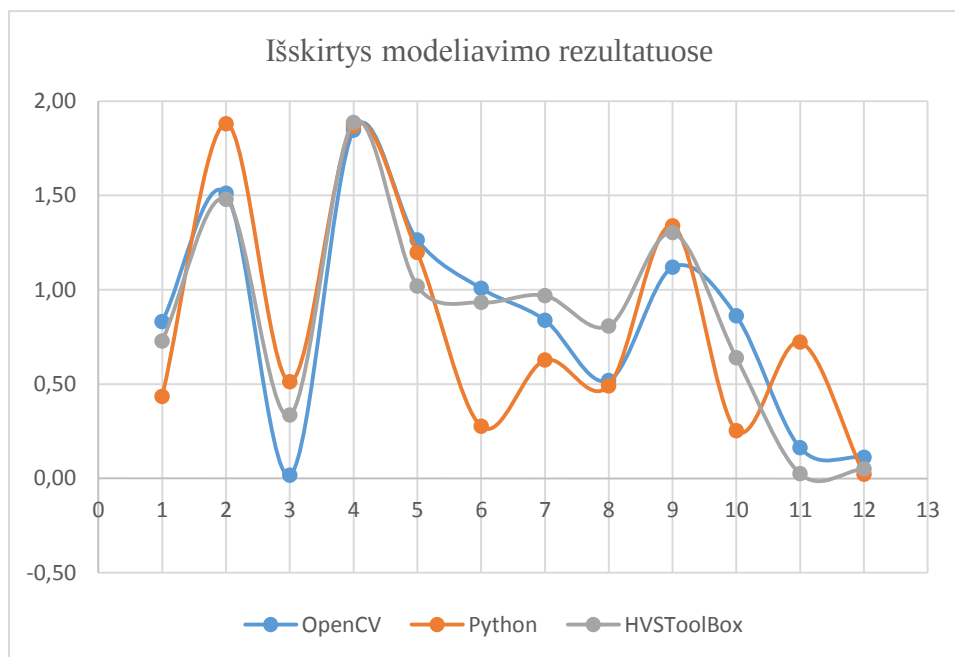
Taigi, sudėjus 5.2 paveiksle pateikto grafiko rezultatus, *Retina* tinklainės modelis nė vienu modeliavimo atveju nebuvo aptikęs daugiau taškų/briaunų, nei pastarieji *Python Canny* bei *HVSToolBox*.

Paveiksle 5.3 pateikiami naudotų modelių – metodų *Retina*, *Python Canny* ir *HVSToolBox* aptiktų bei neaptiktų taškų visuose paveiksluose aritmetiniai vidurkiai. Iš paveiksle esančių grafikų matyti, kad suskaičiavus aritmetinį vidurkį, geriausias modelis yra *Retina*, tačiau jeigu pažiūrėjus į duomenų lenteles, galima pastebėti, kad duomenų skirtumas tam tikrais vaizdų modeliavimo atvejais yra didelis.

Atsižvelgiant į duomenų lenteles apskaičiuojamos neaptiktų taškų išskirtys kiekvieno tiriamo vaizdo atveju visuose trijuose skirtinguose modeliuose - metoduose. Paveiksle 5.4 pateiktas išskirčių grafinis vaizdas.



5.3 pav. Naudotų modelių – metodų briaunų neaptikimo/aptikimo aritmetiniai vidurkiai



5.4 pav. Išskirtys neaptiktų baltų taškų atveju

5.4 paveiksle matyti, kiek ir kurio modelio – metodo atveju neaptiktų baltų taškų vidurkis yra nutolęs nuo bendro vidurkio. Grafike bendro vidurkio taško vertė 0, tad visi duomenys, kurie turi didesnę vertę už nulį, yra nutolę nuo bendro vidurkio. Grafike pateiktos skaičių vertės yra naudojamos nustatyti išskirtims, t. y. koeficientui. Didžiausia išskirtis gauta *Python Canny* atveju, modeliuojant antrąjį paveikslą (šaškių lenta – 2) – 1,87, o mažiausia – 0,2 visų trijų modelių atveju, tačiau skirtingais paveikslais (3, 11 ir 12).

Iš išskirčių grafiko matyti, kad paskutinis paveikslas, dykumoje vykstančios šaudymo pratybos (12), yra geriausiai modeliuojamas visų trijų modelių, kurie buvo lyginti su *Matlab Canny*

funkcija. Vizualiai vertinant minėtąjį poveikslą, galima teigti, kad visi trys modeliai geriausiai briaunas aptinka vaizduose, turinčiuose daugiausiai šviesos/ryškumo. Kad šį teiginį patikrinti, reikėtų atkreipti dėmesį į trečiąjį vaizdą, kurio išskirties koeficientai yra vieni mažiausių visų modelių atveju. Vertinant šį poveikslą vizualiai, matyti, kad ryškių spalvų kvadratai yra aptinkami gerai, lyginat išskirties vertę su kitomis pateiktomis išskirtimis.

Tačiau grafike matyti, kad tam tikrais modeliavimo atvejais išskirties koeficientas visų trijų žmogaus akies tinklainės modelių tyrimuose duoda didelį išskirties koeficientą. Didžiausi išskirties koeficientai gauti apdorojant vaivorykštės (3) bei didžiojo kanjono (9) paveikslus. Šiuos vaizdus įvertinus vizualiai, galima pastebėti, kad pastarieji yra ne ryškūs, ir per daug neišsiskiria perėjimais iš vienos spalvos į kitą.

Turint šiuos keturis pavyzdžius, galima daryti išvadą, kad visi trys žmogaus tinklainės modeliai – metodai geriausiai modeliuoja ryškesnius, geriau apšviestus vaizdus ar paveikslus, bet prastesnis rezultatas gaunamas su blankesniais, neryškiais vaizdais (mažas gradientas).

Kitas svarbus momentas žiūrint į 5.4 paveiksle pateiktą grafiką yra tai, kad 4, 5 ir 9 atvejais matomas vieno ar kito modelio – metodo pranašumas, lyginant išskirties koeficiento vertes.

Galima teigti, kad geriausiai briaunas aptikęs ir mažiausiai išskirties koeficiento aritmetinį vidurkį turintis yra *Python Canny* tinklainės metodas – 0,80. Tačiau, jeigu žiūrėti į išskirčių grafiką, šis modelis geriausiai aptinka briaunas spalvotuose, daugiau skirtingų vaizdų turinčiuose paveiksluose (4 – 12) (esant didesniai gradientui). Jeigu šį metodą naudosime modeliuoti juodos ir baltos spalvos vaizdams (1, 2 ir 3), išskirties koeficientas yra daug didesnis nei kitų tiriamų modelių, tad *Python Canny* šiuo atveju modeliavimo rezultatų kokybe nusileistų *OpenCV* bei *HVSToolBox* modeliams.

Atsižvelgus į visus pateiktus duomenis bei grafikus, galima teigti, kad iš trijų žmogaus akies tinklainei modeliuoti pasirinktų metodų – modelių tinkamiausias yra *Python Canny* metodas, antroje vietoje *HVSToolBox* bei trečioje *Retina* modeliai.

Modeliavimų metu gauti grafiniai vaizdai pateikti A, B ir C prieduose.

5.2. Skyriaus išvados

Modeliavimo metu gauti tyrimo rezultatai lyginti su *Matlab* programinio paketo funkcijos *edge* apdorotais duomenimis taikant baltų taškų radimo kriterijų.

Sudarytose duomenų lentelėse bei grafikuose pateikiami aptikti bei neaptikti balti taškai, reiškiantys briaunų aptikimo kokybę, atsižvelgiant į tai taikomi statistiniai skaičiavimai modelių – metodų kokybei įvertinti:

- aritmetinis aptiktų – neaptiktų taškų vidurkis, procentais;
- standartinis nuokrypis, parodantis kiek reikšmės yra nutolusios nuo aritmetinio vidurkio;

- išskirtys – grąžina normalizuotą reikšmę, kuri nurodo, kiek toji reikšmė yra nutolusi nuo bendro reikšmių vidurkio kiekvieno modeliuoto paveikslo atveju.

Išanalizavus gautus duomenis, nustatyta, kad geriausiai briaunas aptiko *Python Canny* metodas, 8 iš 12 atveju, lyginant aptiktų taškų skaičių.

Antrojoje vietoje pagal minėtų skaičių aptikimą, 4 iš 12 modeliavimo atvejų geriausius rezultatus davė *HVSToolBox* modelis. Paskutinytis – *Retina* žmogaus akies tinklainės modelis nė vienu iš 12 atveju neaplenkė minėtų modelių – metodų pagal naudojamą kokybės įvertinimo kriterijų.

6. APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Atlikus žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimą ir išanalizavus biologinės žmogaus regos sistemos modelius, atrinkti bei ištirti perspektyvūs žmogaus akies tinklainės skaitiniai modeliai ir pateikti tyrimo rezultatai. Tyrimo rezultatai gauti naudojant skaitmeninio signalų apdorojimo, vaizdų analizės bei matematinės statistikos teorijas. Žmogaus akies tinklainės modelių ir metodų tyrimas atliktas *Windows* ir *Linux* operacinių sistemų aplinkose, taikant *OpenCV Retina*, *Python Canny* ir *HVSToolBox* programinę įrangą. Modelių rezultatų palyginimas atliktas naudojant *Matlab* programą.

Gautos šios svarbios žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimo išvados:

1. Atlikus biologinės žmogaus regos sistemos modelių analizę ir palyginus kelis modelius, nustatyta, kad perspektyviausi tinklainės skaitiniai modeliai – metodai yra:
 - a) *Retina*;
 - b) *Python Canny*;
 - c) *HVSToolBox*.

Ištyrus atrinktus žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius – metodus ir juos palyginus naudojant *Matlab* programą, išsiaiškinta, kad:

1. tirti modeliai – metodai lyginat jų bendrą vidurkį ir įvertinus išskirčių koeficientus, vienas kitą lenkia labai nežymiai;
2. lyginant atpažįstamų baltų taškų (briaunų) bendrą vidurkį, tinkamiausias žmogaus akies tinklainės skaitmeninis apdorojimo modelis – metodas yra *Python Canny*. Pastarojo aptikimo procentas lyginant su kitais – 64,72 %, *HVSToolBox* – 59,23 % ir *Retina* – 51,16 %.

Literatūra

1. VITKAUSKIENĖ, R. *Žmogaus akies dažninės skiriamosios gebos tyrimas* [interaktyvus]. Šiauliai [žiūrėta 2013 m. liepos 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2011~D_20111103_091502-40831/DS.005.0.01.ETD>
2. FRISBY, J. P.; STONE J. V. 2010. *Seeing. The Computational Approach to Biological Vision*: mokomoji knyga. USA, Cambridge: MIT. 564 p.
3. *Geltonoji dėmė* [interaktyvus]. 2008. Akių lazerinės chirurgijos centras [žiūrėta 2013 m. liepos 7 d.]. Prieiga per internetą: <<http://blog.lasik.lt/tagai/geltonoji-deme>>
4. MANNOS, J. L.; SAKRISON, D. J. 1974. *The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images. IEEE Transactions of Information Theory*. JAV: IEEE. 536 p.
5. FUHRMANN, D. R.; BARO, J. A.; COX J. R. 1995. Experimental evaluation of psychophysical distortion metrics for JPEG – encoded images, *Journal of Electronic Imaging* 4(4)397-406.
6. HALL, C. F.; HALL, E. L. 1977. A nonlinear model for the spatial characteristics of the human visual system, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 7(3)161-170.
7. LIMB, J. O. 1979. Distortion criteria of the human view, *Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 9(12):778-7793.
8. LUKAS, F. X. J.; BUDRIKIS, Z. L. 1982. Picture quality prediction based on a visual model, *IEEE Transactions on Communications* 30(7):1679-1692
9. KARUNASEKERA, S. A.; KINGSBURY, N. G. 1995. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity, *IEEE Transactions on Image Processing* 4(6):713-724
10. BUF, du J. M. H. 1992. Modeling spatial vision at the threshold level, *Spatial Vision* 6(1):25-60.
11. *Vieno ir dviejų kanalų modelių tyrimai ir palyginimai* [interaktyvus]. 1997. Stanfordo universitetas [žiūrėta 2013 m. rugpjūčio 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://scien.stanford.edu/jfsite/Papers/ImageQuality/Farrell_Comcon_1997.pdf>
12. SAKRISON, D. J. 1977. On the role of the observer and a distortion measure in image transmission, *IEEE Transactions on Communications* COM-25(11):1251-1267
13. WATSON, A. B. 1987. The cortex transform: Rapid computation of simulated neural images, *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 39:311-327
14. ZETZSHE, C.; HAUSKE G. 1989. Multiple channel model for the prediction of subjective image quality, *Human Vision, Visual Processing and Digital Display* 1077:209-216
15. DALY, S. 1993. *The visible difference predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity*: mokomoji knyga. USA: Cambridge, 206 p.
16. DALY, S. 1994. *A visual model for optimizing the design of image processing algorithms*: mokomoji knyga. USA: Ostin, 427 p.
17. DALY, S. 1995. *Method and apparatus for determining visually perceptible differences between images* [interaktyvus]. USA [žiūrėta 2013 rugsėjo 4 d.] Prieiga per internetą:

<<http://www.patentbuddy.com/pdfdownload;jsessionid=5C05CBE0B478E5ABBE7177D3A746A475?type=pdf&patentNo=5394483>>

18. LUBIN, J. 1993. *The use of psychophysical data and models in the analysis of display system performance*: mokomi knyga. USA: Cambridge. 265 p.
19. PELI, E. 1990. Contrast in complex images, *Journal of the Optical Society of America* 7(10):2031-2040
20. TEO, P. C.; HEEGER, D. J. 1994. Perceptual image distortion, *Human Vision, Visual Processing and Digital Display V* Vol. 2179, 127-141
21. FOLEY, J. M. 1994. Human luminance patter – vision mechanisms: masking experiments require a new model, *Journal of the Optical Society of America* 11(6):1710-1719
22. FOLEY, J. M.; BOYNTON, G. M. 1994. A new model of human luminance pattern vision mechanisms: analysis of the effects of pattern orientation, spatial phase and temporal frequency, *Computational Vision Based on Neurobiology* Vol. 2054, 32-42
23. WESTEN, S. J. P.; LAGENDIJK, R. L.; BIEMOND, J. 1995. *Perceptual image quality based on a multiple channel HVS model*: mokomoji knyga. USA, Detroit 2354 p.
24. BARTEN, P. G. J. 1992. Physical model for the contrast sensitivity of the human eye, *Human Vision, Visual Processing and Digital Display* Vol. 1666, 57-72
25. *Neuronų programavimas* [interaktyvus]. 2013. Wikipedia [žiūrėta 2013 lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Neural_coding>
26. MARTINS, J. C.; SOUSA, L. A. 2009. *Bioelectronic Vision. Retina Models, Evaluation Metrics and System Design*: mokomoji knyga. Singapūras: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 249 p.
27. *Hodgkin – Huxley netiesinis modelis* [interaktyvus]. 2012. Rayan Siciliano [žiūrėta 2013 lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.math.mcgill.ca/gantumur/docs/refs/RyanSicilianoHH>>
28. *Hevisaido žingsninė funkcija* [interaktyvus]. 2013. Wikipedia [žiūrėta 2013 lapkričio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Heaviside_step_function>
29. *OpenCV tinklainės modelis* [interaktyvus]. 2012. GitHub [žiūrėta 2013 lapkričio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<https://github.com/kikoht/freak>>
30. *OpenCV tinklainės modelio aprašymas* [interaktyvus]. 2013. OpenCV [žiūrėta 2013 lapkričio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<http://docs.opencv.org/modules/contrib/doc/retina/index.html>>
31. *Plytų sienos paveikslas* [interaktyvus]. 2013. Wikipedia [žiūrėta 2013 lapkričio 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Background_brick_wall.jpg>
32. *Solbelio briaunų aptikimas* [interaktyvus]. 2013. Wikipedia [žiūrėta 2013 gruodžio 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/sobel.htm>>
33. *Python Canny (OpenCV) modelis* [interaktyvus]. 2013. Alexander Mordvintsev [žiūrėta 2013 gruodžio 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://opencv-python-tutroals.readthedocs.org/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_canny/py_canny.html>
34. *Histerėzės slenkstis* [interaktyvus]. 2013. Wikipedia [žiūrėta 2013 gruodžio 13 d.]. Prieiga per internetą: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis>>

35. *Miško paveikslas* [interaktyvus]. 2013. Blogspot [žiūrėta 2013 gruodžio 14 d.] Prieiga per internetą: <http://3.bp.blogspot.com/-OCgarCQoHQI/UlxfpV8ILJI/AAAAAAAAADFf/KD5MnlRAqsE/s1600/IMG_9440edit.jpg>
36. *Qt daugelio platformų grafinė struktūra* [interaktyvus]. 2013. Qt [žiūrėta 2013 gruodžio 26 d.] Prieiga per internetą: <<http://qt-project.org/doc/qt-5/qtmodules.html>>
37. *HVSToolBox įrankio aprašymas ir naudojimas* [interaktyvus]. 2013. Alexandre Benoit [žiūrėta 2014 Sausio 20 d.] Prieiga per internetą: <<https://sites.google.com/site/benoitalexandrevision/demonstrations>>
38. *Automobilių numerių paveikslas* [interaktyvus]. 2014. Dubai Media Incorporated [žiūrėta 2014 Sausio 24 d.] Prieiga per internetą: <http://cdn-wac.emirates247.com/polopoly_fs/1.482654.1352648403!/image/1758048660.jpg>
39. *Šaškių lenta* [interaktyvus]. 2014. ImageEvent [žiūrėta 2014 Sausio 20 d.] Prieiga per internetą: <<http://photos.imageevent.com/imagesbykim/pda/galleriesbycategory/gamepieces/0811031%20checkerboard.JPG>>
40. *Sinusinės grotelės* [interaktyvus]. 2014. The Free Dictionary [žiūrėta 2014 Sausio 20 d.] Prieiga per internetą: <<http://img.tfd.com/ElMill/thumb/F0G-06-S2958.jpg>>
41. *Spalvoti kvadratai* [interaktyvus]. 2014. Gstatic [žiūrėta 2014 Sausio 20 d.] Prieiga per internetą: <<https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSwfeqAgZVBmvjQWm6CRGMOdZh0KEb-DVKRaKm-1sgUml2sZ4PX>>
42. *Spalvų juostos* [interaktyvus]. 2014. MinimalWall [žiūrėta 2014 Sausio 21 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.minimalwall.com/wp-content/uploads/minimal-desktop-wallpaper-rainbow-colors.png>>
43. *Laiptai* [interaktyvus]. 2014. Public Domain Pictures [žiūrėta 2014 Sausio 21 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.publicdomainpictures.net/pictures/10000/nahled/step-background-11287678262708h.jpg>>
44. *Sufokusuotos gėlės gamtoje* [interaktyvus]. 2014. Naturography [žiūrėta 2014 Sausio 22 d.] Prieiga per internetą: <<http://naturography.com/wp-content/uploads/2011/01/Garlic-Mushrooms-Natural-Light.jpg>>
45. *Didysis kanjonas* [interaktyvus]. 2014. Travel Freak [žiūrėta 2014 Sausio 22 d.] Prieiga per internetą: <<http://www.travelfreak.com/wp-content/uploads/2013/11/grand-canyon-sunset.jpg>>
46. *Šv. Onos bažnyčia* [interaktyvus]. 2014. Flickr [žiūrėta 2014 Vasario 7 d.] Prieiga per internetą: <https://c1.staticflickr.com/5/4075/4808992878_217a35dc99.jpg>
47. *Šaudymo pratybos į taikinius* [interaktyvus]. 2014. Acclaim Images [žiūrėta 2014 Vasario 7 d.] Prieiga per internetą: <http://www.acclaimimages.com/gallery/free_images/0420-0906-1412-2953_weapons_training_m.jpg>
48. *Standartinis nuokrypis* [interaktyvus]. 2014. Microsoft [žiūrėta 2014 Kovo 11 d.] Prieiga per internetą: <<http://office.microsoft.com/lt-lt/excel-help/HP010335660.aspx>>
49. *Išskirtis* [interaktyvus]. 2014. Microsoft [žiūrėta 2014 Kovo 13 d.] Prieiga per internetą: <<http://office.microsoft.com/lt-lt/excel-help/HA102752862.aspx>>

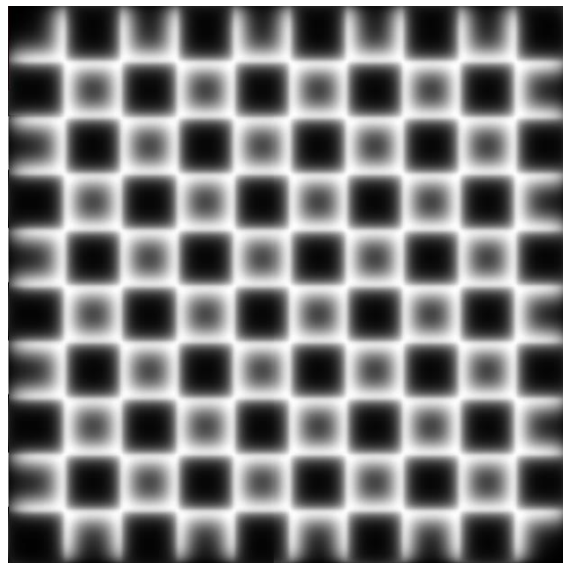
50. HUMAYUN, M. S.; WEILAND, J. D.; CHADER, G.; GREENBAUM, E. 2007. *Artificial Sight. Basic Research, Biomedical Engineering and Clinical Advances*: mokomoji knyga. USA: Springer Science and Business Media, 398 p.
51. MARR, D. 2010. *Vision. A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*: mokomoji knyga. USA: MTIP Press, 401 p.
52. BHARATH, A.; PETROU, M. 2008. *Next Generation Artificial Vision Systems. Reverse Engineering the Human Visual System*: mokomoji knyga. England: Imperial College London, : Imperial College London, p.
53. MALLOT, H., A. 2000. *Computational Vision: Information Processing in perception and Visual Behavior*: mokomoji knyga. USA: MTIP Press, 296 p.
54. AZZOPARDI, G.; PETKOV, N. 2012. A CORF computational model of a simple cell that relies on LGN input outperform the Gabor function model, *Biological Cybernetics* 106:177-189.
55. HARVEY, R. J. 2008. The Extraction of features and disparities from images by a model based on the neurological organization of the visual system. *Vision Research* 48:1297-1306.

PRIEDAI

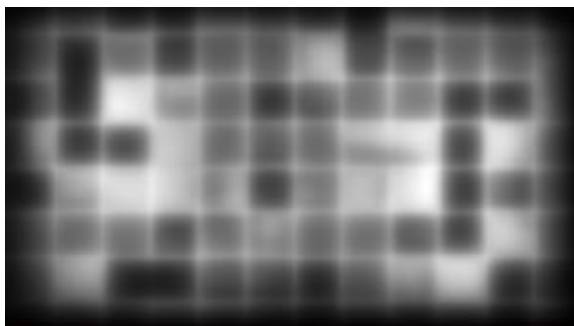
A priedas. *OpenCV Retina* modelio atveju gauti vaizdai



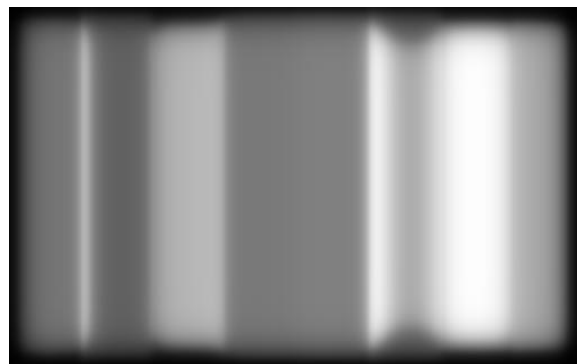
A.1 pav. 1.



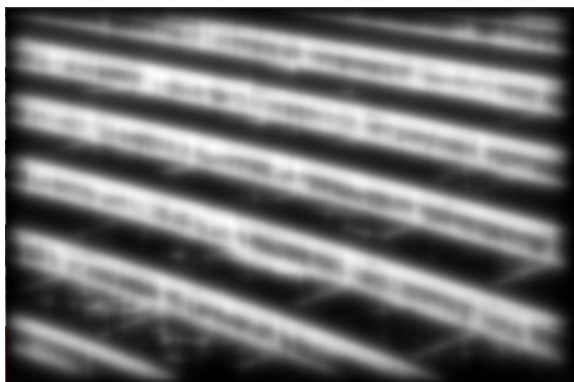
A.2 pav. 2



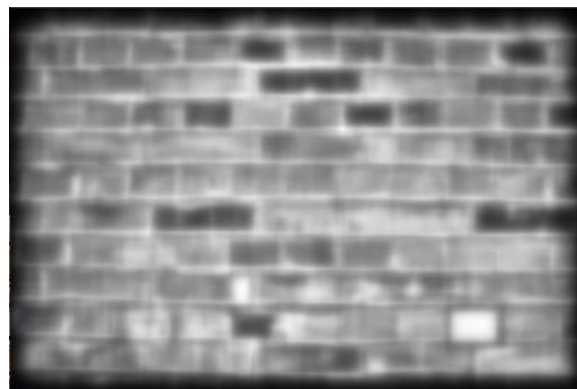
A.3 pav. 3



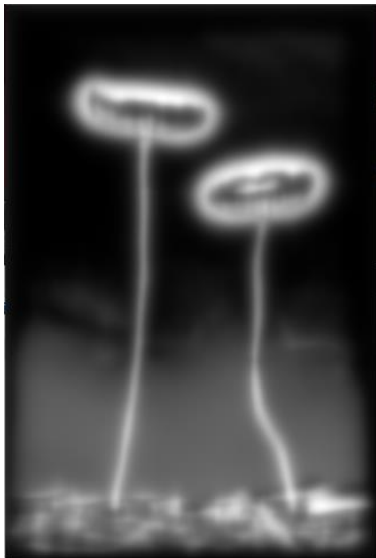
A.4 pav. 4



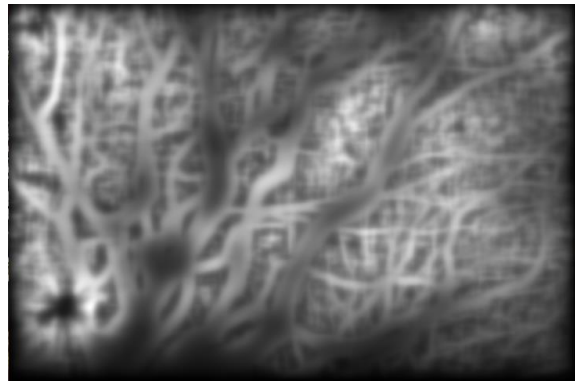
A.5 pav. 5



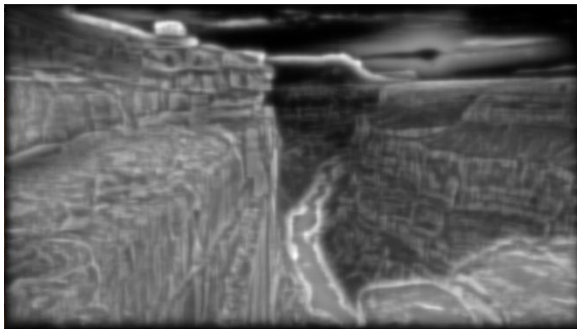
A.6 pav. 6



A.7 pav. 7



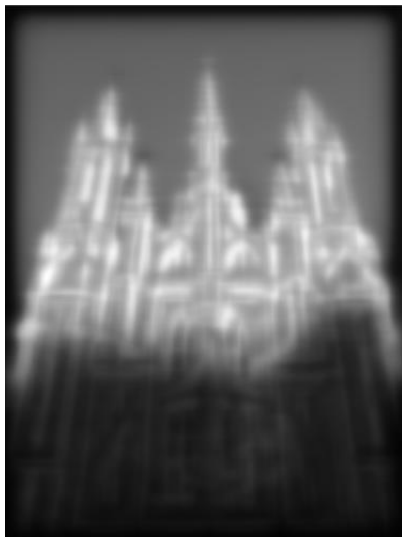
A.8 pav. 8



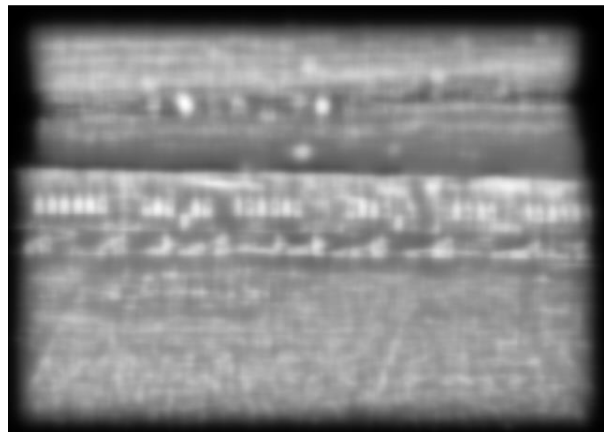
A.9 pav. 9



A.10 pav. 10

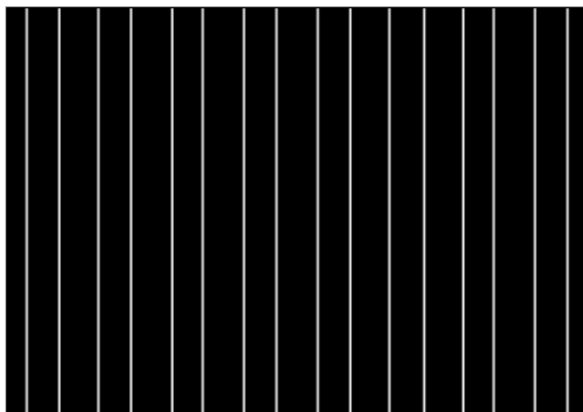


A.11 pav. 11

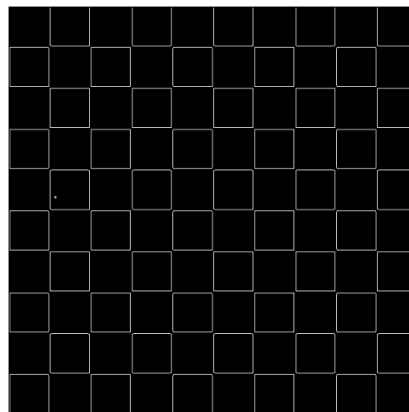


A.12 pav. 12

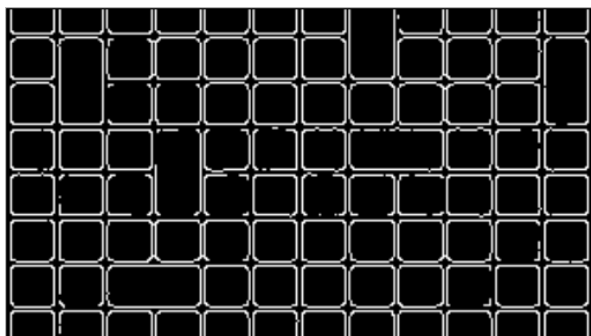
B priedas. *Python Canny* metodo atveju gauti vaizdai



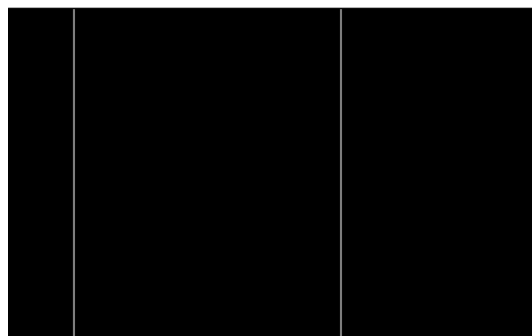
B.1 pav. 1



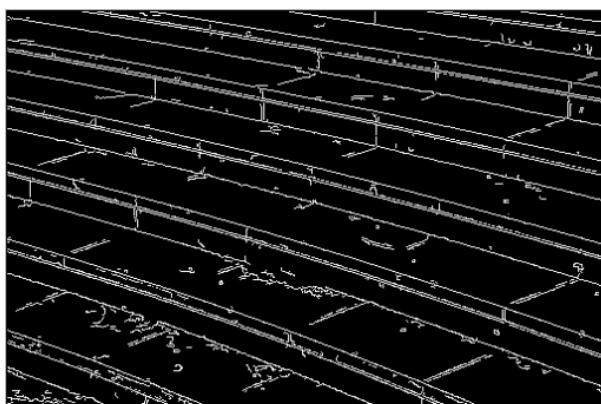
B.2 pav. 2



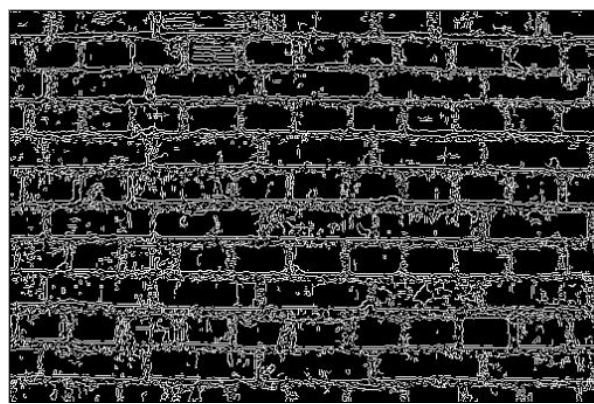
B.3 pav. 3



B.4 pav. 4



B.5 pav. 5



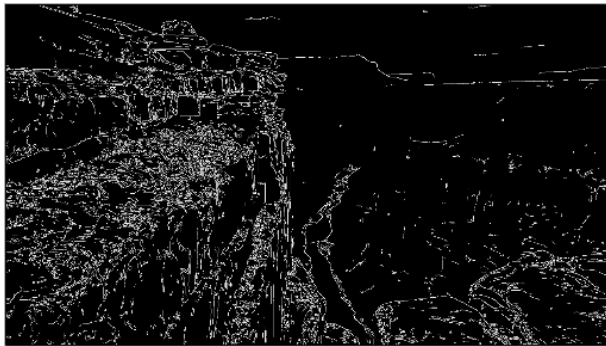
B.6 pav. 6



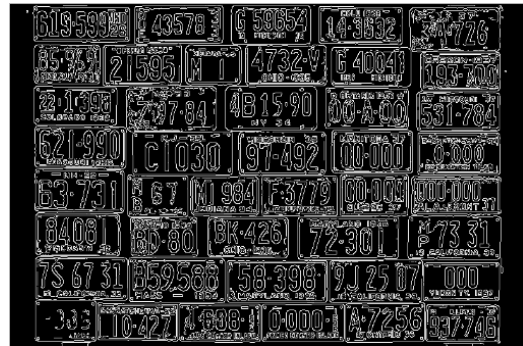
B.7 pav. 7



B.8 pav. 8



B.9 pav. 9



B.10 pav. 10

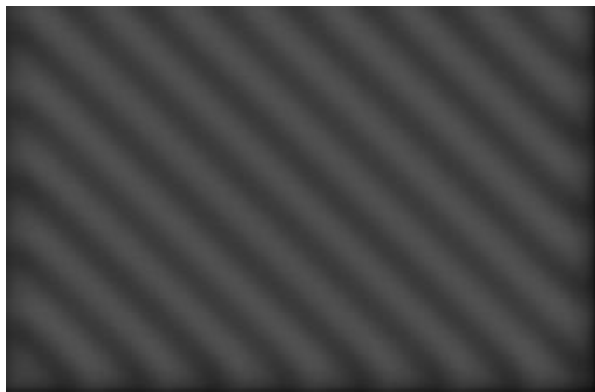


B.11 pav. 11

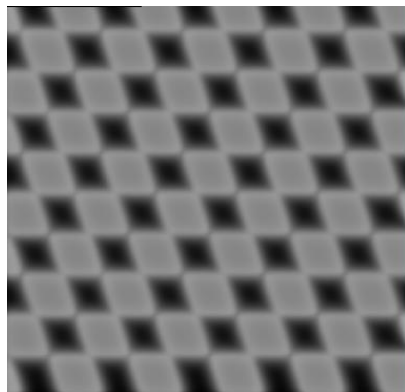


B.12 pav. 12

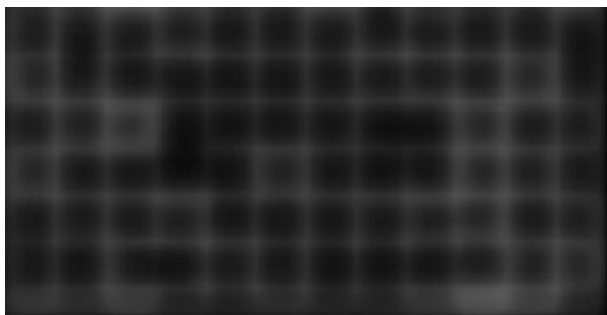
C priedas. *HVSToolBox* modelio atveju gauti vaizdai



C.1 pav. 1



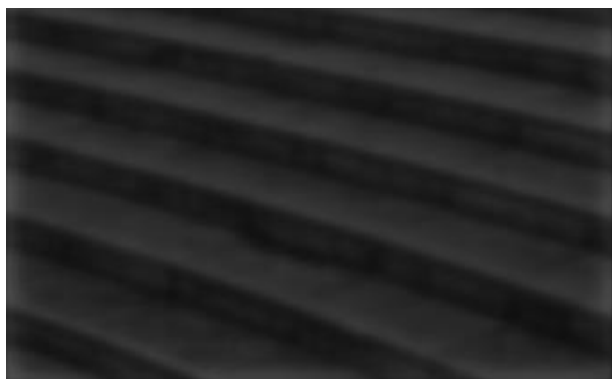
C.2 pav. 2



C.3 pav. 3



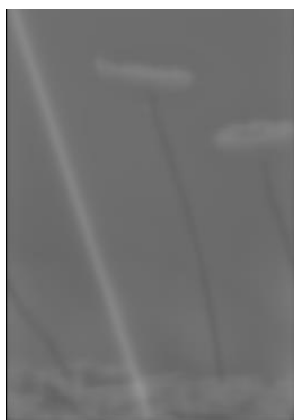
C.4 pav. 4



C.5 pav. 5



C.6 pav. 6



C.7 pav. 7



C.8 pav. 8



C.9 pav. 9



C.10 pav. 10

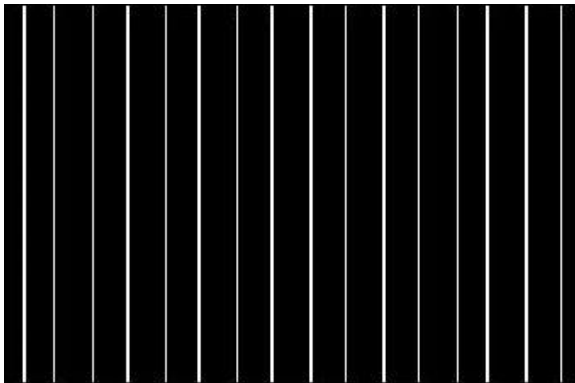


B.11 pav. 11

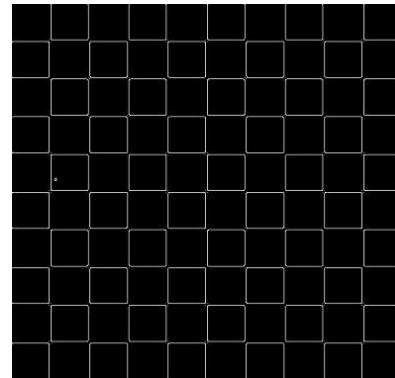


B.12 pav. 12

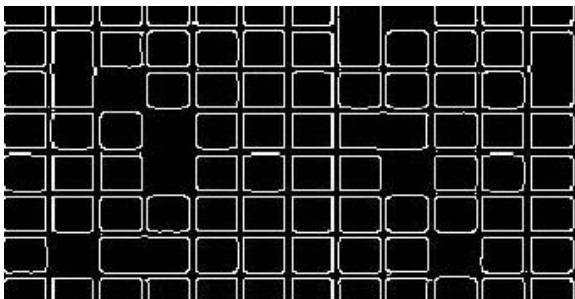
D priedas. *Matlab Canny* modelio atveju gauti vaizdai



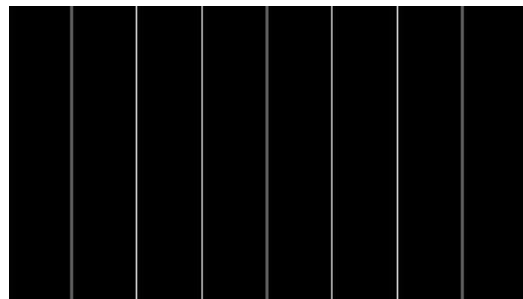
D.1 pav. 1



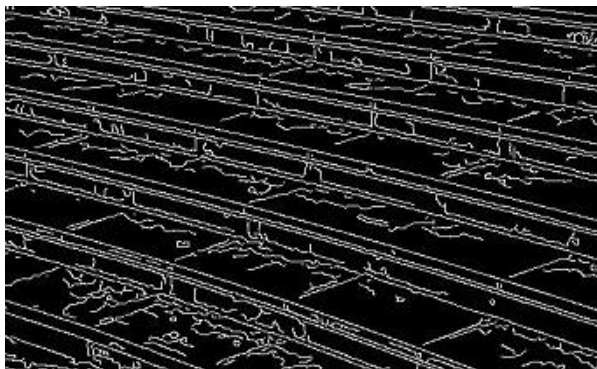
D.2 pav. 2



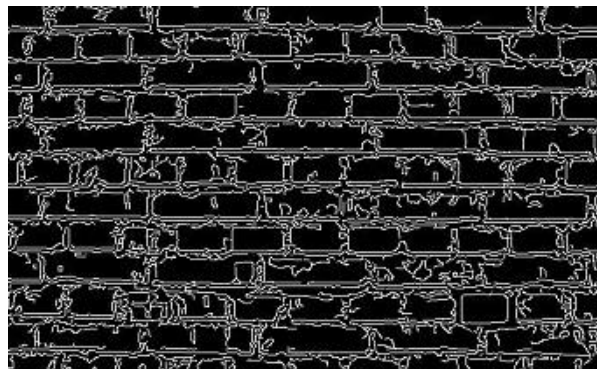
D.3 pav. 3



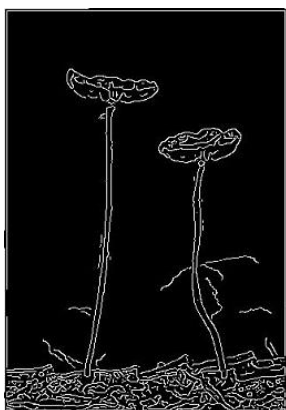
D.4 pav. 4



D.5 pav. 5



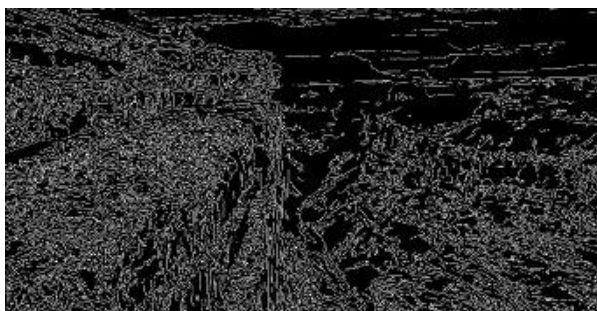
D.6 pav. 6



D.7 pav. 7



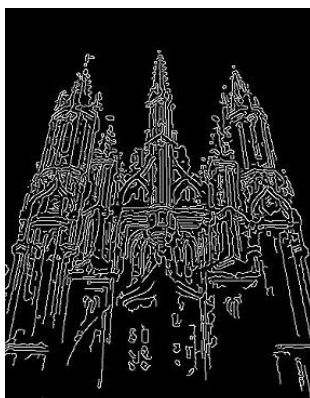
D.8 pav. 8



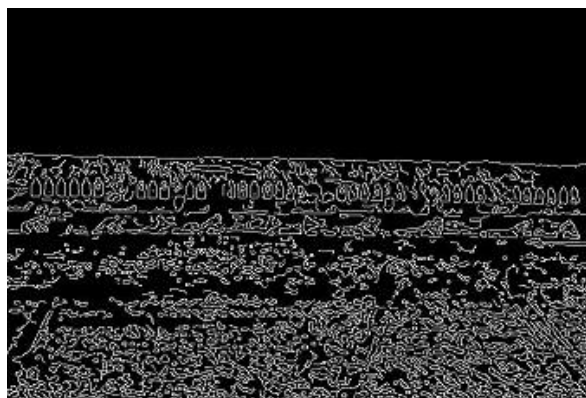
D.9 pav. 9



D.10 pav. 10



B.11 pav. 11



B.12 pav. 12

E priedas. Pranešimo 17-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

AKSfm-12 gr. stud.
Tomas Sakalauskas

2014-03-21
Vilnius

Darbo tikslas ir paskirtis

- Darbo tikslas – išnagrinėti bendrą žmogaus regos sistemą, ištirti pasirinktus žmogaus akies tinklainės skaitinius modelius pagal jų klasifikaciją ir atlikti jų palyginimą.
- Darbo objekto paskirtis – pagal atliktus tyrimo duomenis atitinkamai sudaryti galimybę įvairių sistemų kūrėjams pasirinkti tinkamiausius akies tinklainės modelius juos taikant praktiškai.

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas 2/9

Darbo reikalavimai/turinys

- Žmogaus regos sistemos analizė
- Tinklainės modeliavimas
- Tinklainės neuronų kodas
- Tinklainės modelių klasifikacija
- Pasirinktų modelių tyrimas

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas 3/9

Žmogaus regos sistemos analizė

- Žmogaus regos sistema yra viena pagrindinių ir sudėtingiausių informacijos gavimo sistemų, kurią sudaro keletas kompleksškai veikiančių komponentų:
 - Neuronas
 - Akis
 - Tinklainė**
 - Regos žievė (smegenyse)

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas 4/9

Žmogaus akies tinklainė

Diagram illustrating the structure of the human retina. Light enters from the left, passing through the receptive field, pigment epithelium, and photoreceptors (rods and cones). The diagram shows the neural circuitry including bipolar cells, ganglion cells, and the optic nerve. Labels include: Amacrine cell, Horizontal cell, To optic nerve, Bipolar cell, Rod, Pigment epithelium, Receptive field, Ganglion cell, Neurons where signals from rods and cones are integrated, Cone (color vision), and Rod (monochromatic vision).

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas 5/9

Žmogaus regos sistemos analizė

- Žmogaus regos sistema yra viena pagrindinių ir sudėtingiausių informacijos gavimo sistemų, kurią sudaro keletas kompleksškai veikiančių komponentų:
 - Neuronas
 - Akis
 - Tinklainė**
 - Regos žievė (smegenyse)

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas 4/9

Žmogaus tinklainės modeliavimas ir neuronų kodas

- Pagrindiniai klausimai:
 - „Koks kodas yra naudojamas perduodant vaizdinę informaciją?“
 - „Kaip šis kodas yra sukuriamas?“
 - „Kaip sužadinti neuronai šifruoja informaciją?“
 - „Kaip vertinti elektrinių impulsų šuolius ir kaip žinoti dirgiklio atsiradimą bei atitinkamai reguluoti?“

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas

6/9

Tinklainės modelių klasifikacija

- Tinklainę sudaro sluoksniai, kurioje yra: fotoreceptoriai, bipolarinės, horizontaliosios, amakrino bei ganglijos ląstelės
- Pagrindiniai modeliai:
 - Funkcinis – žmogaus tinklainės modelis bando imituoti funkcijas kaip „juodoji dėžė“ sudarant ryšį su įvestimi ir išvestimi
 - Struktūrinis – modeliuoja kiekvieną tinklainės ląstelę atskirai, pakopomis kai kiekvienai tinklainės ląstelei naudojamas atskiras modelis jas sumuojant.

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas

7/9

Pasirinktų modelių tyrimas

- **OpenCV Retina** (Open Source Computer Vision Library) – specializuota C/C++ programavimo biblioteka daugumoje skirta vaizdų analizei realiaje laike (video bei paveikslų).
- **Python Canny** – metodas skirtas briaunų aptikimui įvairiuose vaizduose (video ir paveikslų).
- **HVSToolBox** – akies tinklainės simuliacijai skirtas įrankis, turintis galimybę keisti nustatymus (video ir paveikslų).

Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas

8/9

Ačiū už dėmesį!



Žmogaus akies tinklainės skaitinių modelių tyrimas

AKSfm-12 gr. stud. Tomas Sakalauskas

9/9