



**Vilniaus universitetas
Matematikos ir informatikos
institutas
L I E T U V A**



INFORMATIKA (09 P)

**ERDVINĖS INFORMACIJOS
PANAUDOJIMAS VAIZDŲ ANALIZĖJE**

Giedrius Stabingis

2016 m. spalio

Mokslinė ataskaita MII-DS-09P-17-5

VU Matematikos ir informatikos institutas, Akademijos g. 4, Vilnius LT-08663

www.mii.lt

Santrauka

Daugybė ligų gali būti anksti diagnozuotos pagal akies dugno vaizdus remiantis keletu skirtingų požymių. Vienas iš šių požymių yra arterijos ir venos santykis. Kraujagyslių pločio matavimai atliekami pagrindinėms kraujagyslėms. Sukurtas kraujagyslių matavimų automatizavimo algoritmas, kuriuo remiantis siekiama sukurti pilnai automatinį akies dugno vaizdų analizės metodą. Sistema susideda iš kraujagyslių medžio išskyrimo ir optinio disko nustatymo, kuris reikalingas tam kad kraujagyslių matavimus atlikti standartinėse vietose. Kraujagyslių medžio išskyrimas tam tikrose situacijose yra komplikuoatas, todėl sukurtas kraujagyslių matavimų algoritmas yra sukurtas taip, kad matavimai būtų atliekami ir nepriklausomai nuo išskirto kraujagyslių medžio. Kraujagyslių medis naudojamas tik krypties patikslinimui ir tik tada, kai jis yra atliekamų matavimų aplinkoje. Kraujagyslių matavimai yra lyginami su rankiniu būdu gautais ekspertų matavimais. Su 95% pasiklovimo lygmeniu automatizuoti matavimai nesiskiria nuo ekspertų atliktų matavimų. Tyrimams buvo naudojama Optomed OY skaitmeninė mobili akies dugno kamera Smartscope M5 PRO, tačiau algoritmas gali būti naudojamas ir su kitomis kameromis gautais vaizdais. Pateiktas metodas yra publikuotas straipsnyje (Stabingis G. et. al. 2017).

Reikšminiai žodžiai: Kraujagyslių arterijos venos santykis; akies dugno vaizdai; kraujagyslių matavimai

Turinys

1	Įvadas	4
2	Kraujagyslių išskyrimas ir optinio nervų disko nustatymas.	5
3	Kraujagyslių pločio matavimų algoritmas.	8
4	Rezultatai ir išvados	10
4.1	Tolesni darbai	11
5	Literatūra	12
	Priedai	13

1 Įvadas

Akies dugno anatominų struktūrų tyrimas gali būti labai svarbus diagnozuojant tokias ligas kaip arterinė hipertenzija, diabetinė retinopatija, amžinė makulos degeneracija ir glaukoma (Kanski J.J. 2007). Akie dugnas susideda iš įvairių anatominų struktūrų, kurios gali būti naudingos diagnozuojant besivystančias ligas. Pokyčiai makuloje rodo amžiaus įtakojamą makulos degeneraciją (Kanagasingam, Y. et. al. 2014). Optinis diskas ir ekskavacija yra tiriami glaukomos nustatymui (Bock R. et. al. 2010, Buteikienė D. et. al. 2012, Treigys P. et. al. 2008). Kraujagyslių struktūrų tyrimas yra svarbus indikatorius ligų susijusių su kraujo spaudimu prognozei: choroidinė neovaskuliarizacija, hipertenzija, arteriosklerozė, insultas (Odstrcilk J. et. al. 2013, 7. Fraz P.R. et. al. 2012). Kraujagyslių forma ir vingiuotumas, eksudacijos, kraujosruvos, mikroaneurizmai ir dugno tekstūra yra savybės leidžiančios diagnozuoti diabetinę retinopatiją.

Svarbiausi yra tokie akies dugno pokyčių pastebėjimai, kurie įgalina apsaugoti nuo ne akies ligų progresavimo. Sprendimai apie besivystančias ligas gali būti priimami remiantis venos ir arterijos santykio matavimais prieš ir po fizinio krūvio (žiūrėti Morgan A.J. et. al. 2007). Dar daugiau, venos arterijos santykis gali būti įtakojamas ne vien fizinės, bet ir psichinės tiriamojo būsenos. Automatizuoti santykio matavimus gana sudėtinga, nes arterijas ir venas yra labai sunku atskirti (Mirsharifa Q. et. al. 2013, Kondermann C. et. al. 2007, Li X. ir Wee W.G. 2017). Santykio matavimus atlikti taip pat sudėtinga ir dėl to, jog santykio pokyčiai atsiranda mikro lygmenyje. Yra nemažai pasiūlytų arterijos/venos segmentavimo metodų, tačiau labai reikšmingų rezultatų nėra dėl pažangiausių metodų ribotumo ir naudojamos techninė įrangos. Rezultatai yra įtakojami prasto segmentavimo, kai kraujagyslėse matomas vidinis šviesos atspindys. Taip pat dėl prasto segmentavimo išsišakojimuose, susikirtimuose bei persidengimuose. Kraujagyslės kurios yra arti viena kitos gali būti apjungtos į vieną, o plonos kraujagyslės gali būti praleistos. Kai kuriose vietose kraujagyslės gali būti klaidingai suklasifikuotos. Tai ypač būdinga regione šalia optinio disko (OD) kraštų arba patologiniuose akies dugno regionuose (Nguyen U.T. et. al. 2013).

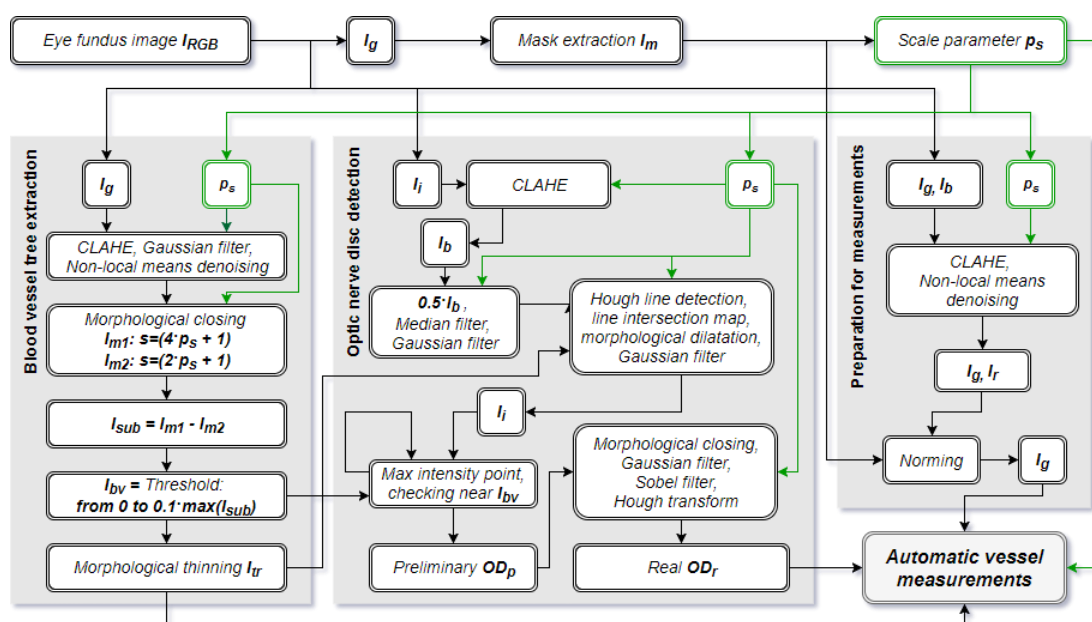
Remiantis literatūros analize, akies dugno kraujagyslių segmentavimo metodai gali būti suskirstyti į šešias kategorijas (Fraz P.R. et. al. 2012):

- *Priderinto filtravimo metodų taikymas*
- *Daugiasluoksnės analizės metodų taikymas*
- *Atpažinimo teorijos metodų taikymas*
- *Kraujagyslių sekimo metodai*
- *Modeliu paremtų technikų taikymas*
- *Matematinės morfologijos metodai*

Kaip aprašoma literatūroje, daugelis vaizdų analizės algoritmų taikoma aukštos kokybės vaizdams gautiems stacionariomis akies dugno kameromis, tačiau jos yra labai brangios ir sunkiai gali būti naudojamos sudėtingomis sąlygomis, kai reikalingas objektyvus tiriamojo fizinės ir psichinės būsenos nustatymas. Pirmo lygio sveikatos įstaigose ankstyvai diagnozei yra naudojamos mobilios kameros, kurios kokybės prasme yra vienodai geros, lyginant su auksiniu standartu. Šiame darbe pateikiamas metodas paremtas kraujagyslių sekimu ir matematinės morfologijos metodais. Metodas skirtas išmatuoti kraujagyslių diametrų pokyčius nurodytose vietose akių dugno vaizduose prieš ir po fizinio krūvio. Matavimai atliekami kairės ir dešinės akių dugno vaizduose. Toliau aptariami palyginimų tarp eksperto matavimų ir sistemos matavimų rezultatai. Tyrimui naudojami vaizdai gauti su Optomed OY skaitmenine mobilia akies dugno kamera Smartscope M5 PRO. Algoritmas yra paremtas metodais pateiktais

straipsniuose (Ravishankar S. et. al. 2009, 14. Pachiyappan A. et. al. 2012). Siūlomo metodo naujumas yra toks, jog jis gali veikti su skirtingų dydžių vaizdais panaudojant skalės parametą p_s . Geresnis požymių išgavimas yra pasiekiamas panaudojant skirtingus pirminio apdorojimo metodus skirtingiems algoritmo etapams. Taip pat pateikiamas naujas kraujagyslių pločio matavimo algoritmas, kuris veikia nepriklausomai nuo išgauto kraujagyslių medžio. Šis algoritmas susideda iš sekančių žingsnių (pav. 1):

- *Kaukės išskyrimas, naudojamas atskirti akies dugno dalį nuo viso paveiksluko;*
- *Skalės parametro įvertinimas;*
- *Skirtingų pirminio apdorojimo metodų panaudojimas skirtingiems etapams;*
- *Kraujagyslių medžio išskyrimas;*
- *Optinio nervų disko (OD) nustatymas;*
- *Automatizuotas kraujagyslių pločio matavimas.*



Pav. 1. Pilna pateikiamo algoritmo schema. Algoritmas susideda iš trijų pagrindinių dalių: skalės parametro p_s įvertinimo, kraujagyslių medžio I_{tr} išskyrimo, optinio nervų disko OD_r nustatymo ir kraujagyslių pločio matavimų.

Šio darbo struktūra. Pirmoje dalyje pateikiami kraujagyslių išskyrimo ir OD nustatymo algoritmai. Antroje dalyje aptariamas siūlomo automatinio kraujagyslių pločio matavimo algoritmas. Paskutinėje dalyje aptariamas metodo veikimas ir pateikiami rezultatai.

2 Kraujagyslių išskyrimas ir optinio nervų disko nustatymas.

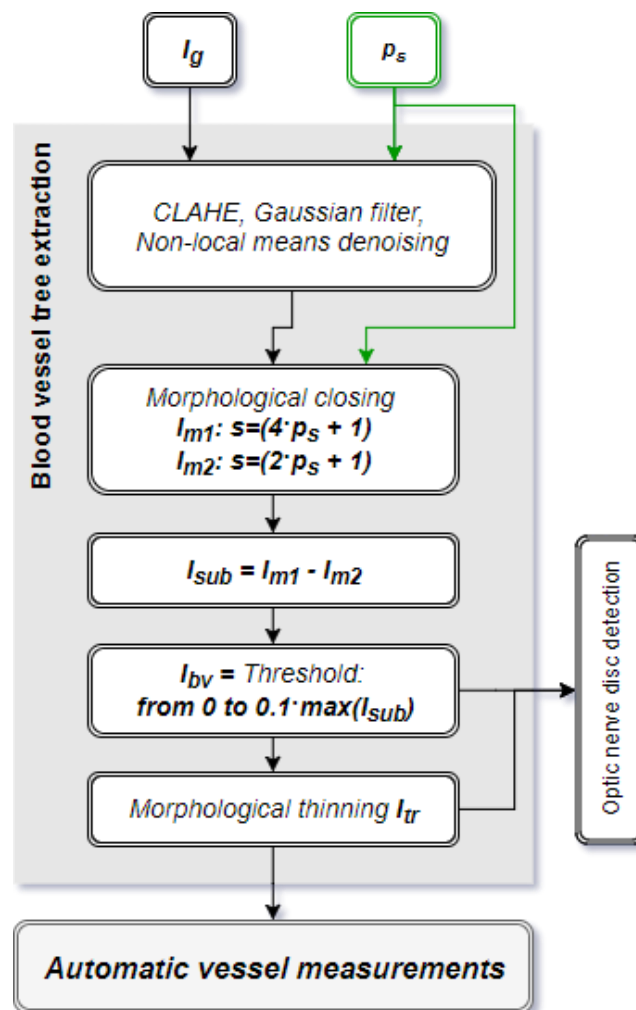
Kad nurodytose akies dugno vaizdo vietose atlikti matavimus, reikia nustatyti optinį nervų diską. Algoritmas pasiūlytas (Ravishankar S. et. al. 2009, 14. Pachiyappan A. et. al. 2012) straipsniuose naudoja išskirtą kraujagyslių tinklą tam, kad padidinti OD nustatymo tikslumą. Praplėstas kraujagyslių išskyrimo ir OD nustatymo algoritmas buvo plačiau aprašytas straipsnyje (Stabingis G. et. al. 2016). Čia pateikiamas

algoritmas naudoja skalės parametą, skirtingus pirminio apdorojimo metodus ir kitas adaptavimo priemones, kad panaudoti originalaus dydžio vaizdus. Skalės parametras apskaičiuojamas pagal formulę:

$$p_s = \frac{wd_{mask}}{500}$$

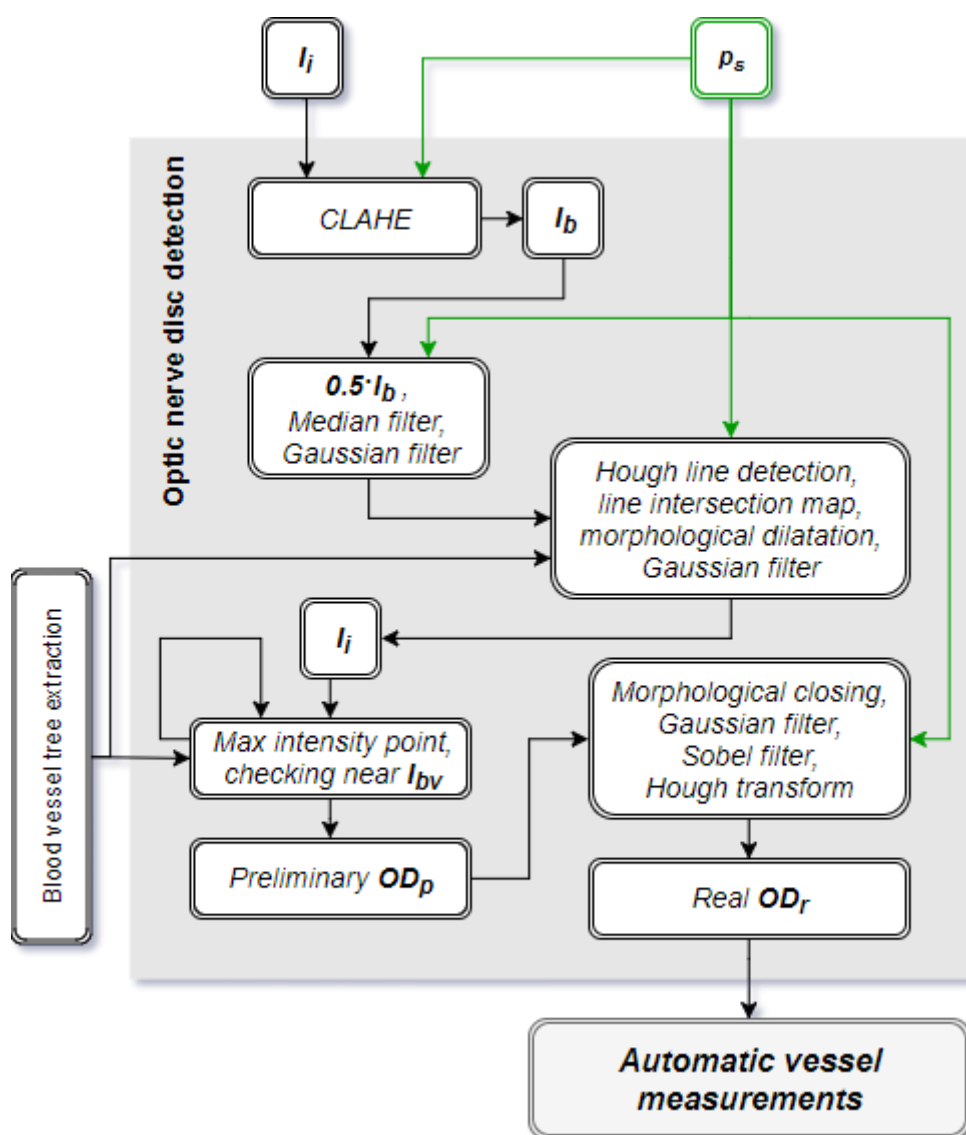
čia wd_{mask} yra akies dugno dalies vaizde kaukės plotis.

Kraujagyslių išskyrimo algoritmas (pav. 2.) yra paremtas matematinės morfologijos uždarymo operacija. Morfolginės uždarymo operacijos, kurių dydžiai $4 \cdot p_s + 1$ ir $2 \cdot p_s + 1$ yra pritaikomi vaizdo žaliame kanalui I_g , kuris yra apdorotas remiantis schema pateikta pav. 1 ir pav. 2. Kuo didesnis uždarymo operacijos šablono dydis, tuo didesnės kraujagyslės gali būti išskiriamos. Po uždarymo operacijų pritaikymo atliekama gautų paveikslukų atimties operacija. Gautam paveikslukų skirtumui pritaikoma slenksčio operacija ir tokių būdu gaunamas galutinis binarinis vaizdas, kuriame yra tik kraujagyslių tinklas. Toliau, gautas kraujagyslių binarinis vaizdas yra suploninamas panaudojant morfolginę ploninimo operaciją taip suformuojant kraujagyslių medį I_{tr} . Trumpi kraujagyslių medžio segmentai yra pašalinami siekiant sumažinti triukšmą. Toks kraujagyslių tinklo medis yra naudojamas tolesniuose algoritmo etapuose.



Pav. 2. Kraujagyslių tinklo išskyrimo schema.

Optinio nervų disko (OD) nustatymo algoritmas susideda iš dviejų etapų (pav. 3.). Pirmajame etape surandamas preliminarus OD_p . Pirmiausia, remiantis Hofo linijų transformacija pagal I_r , sudaromas linijų susikirtimo žemėlapis. Gautam žemėlapiui pritaikoma morfologinė auginimo operacija ir gautas rezultatas sudedamas su apdrotu intensyvumo kanalu. Pritaikomas didelio šablono Gauso filtras ir labiausiai intensyvus taškas parenkamas, kaip OD_p regionas. Tačiau, tam tikrais atvejais, OD_p yra nustatomas neteisingoje vietoje, dažniausiai dėl tam tikrų vaizdo gavimo metu atsirandančių klaidų. Kad išspręsti šią galimą problemą, OD_p nustatymo algoritmas yra papildytas papildoma sąlyga, jog nustatyto OD_p aplinkoje turi būti išskirtų kraujagyslių. Jei ši sąlyga netenkinama, nustatytas OD_p yra atmetamas ir ieškomas kitas labiausiai intensyvus taškas. Nustačius tinkamą OD_p regioną, atitinkamai sričiai pritaikomas Sobel gradiento nustatymo filtras ir pritaikoma Hofo apskritimų transformacija. Arčiausiai OD_p centro esantis apskritimas parenkamas, kaip realus optinis nervų diskas OD_r . Remiantis nustatyto OD_r visi matavimai atliekami spinduliu nuo $2 \cdot OD_r$ iki $3 \cdot OD_r$ nuo OD_r centro.

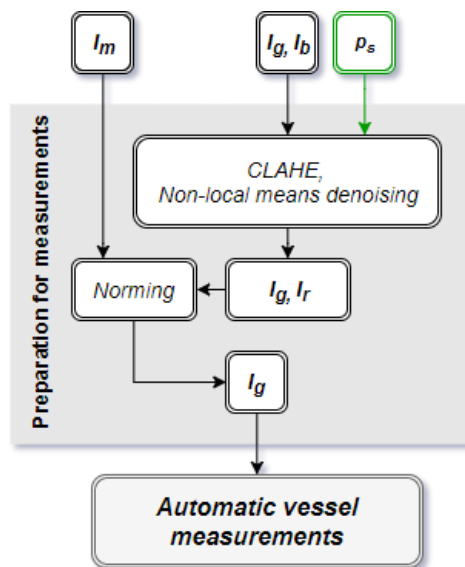


Pav. 3. Optinio disko nustatymo etapo schema.

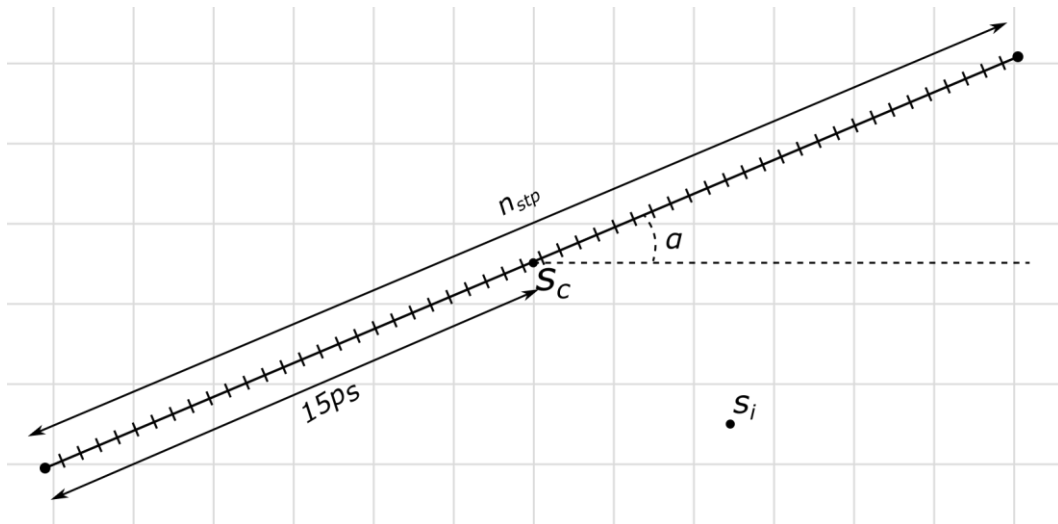
3 Kraujagyslių pločio matavimų algoritmas.

Pagrindinis algoritmo tikslas yra padaryti kraujagyslių matavimus kiek įmanoma nepriklausomus nuo išskirto kraujagyslių tinklo I_{tr} . Matavimai yra atliekami pagal pradinį vaizdą, o kraujagyslių topologijos vaizdas, gautas po ploninimo operacijos I_{tr} naudojamas tik kaip nuoroda. Tai leidžia atlikti matavimus ir vietose kuriose kraujagyslės dar nebuvo išskirtos, taip pat išvengti klaidų susijusių su kraujagyslių išskyrimu, taip sumažinant jų įtaką galutiniam tikslumui. Matavimų schema yra sekanti:

- Pradinis vaizdo apdorojimas skirtas matavimams atliekamas pagal pav. 1 ir pav. 4;
- Pasirenkamas I_g kanalas;
- Matavimai atliekami taške $s_c = (x_c, y_c)$;
- Profilio informacija yra paimama remiantis pav. 5;
- Apskaičiuojamas kraujagyslės plotis (pagal pav. 6);
- Matavimai atliekami profilių imant skirtingais kampais 1° intervalais.
- Kampas α , ties kuriuo apskaičiuotas plotis yra mažiausias, parenkamas kaip geriausias.
- Remiantis nustatytu kampu, tolimesni matavimai atliekami, kad įvertinti didesnę kraujagyslės dalį. Kiekvienam vertinimui naudojama 20 profilių.
- Pirmasis vertinimas atliekamas kampo nuo 0° iki 180° ribose, o sekantys matavimai nuo $\alpha-45^\circ$ iki $\alpha+45^\circ$ ribose, pagal ankstesniame žingsnyje nustatytą kampą α .
- Jei šalia vertinamos vietos yra išskirtas kraujagyslių medis I_{tr} , tai jis naudojamas kampo α nustatymui ir matavimai vykdomi nuo $\alpha-12^\circ$ iki $\alpha+12^\circ$ ribose.
- Atrinkami profiliai, kurių plotis patenka į intervalą $\overline{wd} \pm \sigma_p$. Čia σ_p yra standartinis nuokrypis matavimų atliktų išilgai kraujagyslės ties pozicijomis $S_j, j=1..n_{stp}$.
- Vidutinis plotis pagal atrinkus profilius naudojamas kaip kraujagyslės plotis.



Pav. 4. Vaizdų paruošimas automatiniams kraujagyslių pločio matavimams.



Pav. 5. Kraujagyslės profilio paėmimo schema.

Pav. 5 iliustruoja profilio informacijos paėmimo algoritmą. Čia S_c yra taškas kuriame atliekami matavimai. Profilio informacija paaimama tam tikru kampu α . Profilio ilgis yra $30 \cdot p_s$. Profilis suskaidomas į n_{stp} žingsnių.

$$n_{stp} = \begin{cases} 100, & \text{kai } p_s > 2 \\ 50, & \text{kai } p_s \leq 2 \end{cases}$$

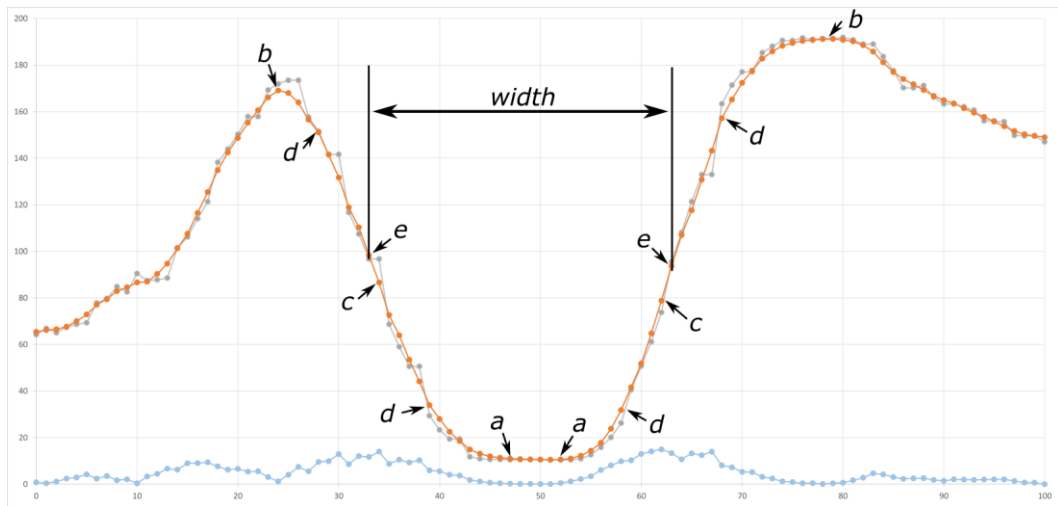
Kiekviename žingsnyje s_j apskaičiuojama intensyvumo reikšmė v_j remiantis arčiausiai esančiais taškais s_i .

$$v_j = \frac{\sum_{s_j \in J} Z_i \cdot h_{ij}}{\sum_{s_j \in J} h_{ij}}$$

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{d(s_i, s_j)}{3}, & \text{kai } d < 3 \\ 0, & \text{kai } d \geq 3 \end{cases}$$

čia $d(s_i, s_j)$ yra Euklido atstumas tarp taškų s_i ir s_j . J yra s_j taškui artimiausi taškai, o Z_i yra s_i taško intensyvumo reikšmė.

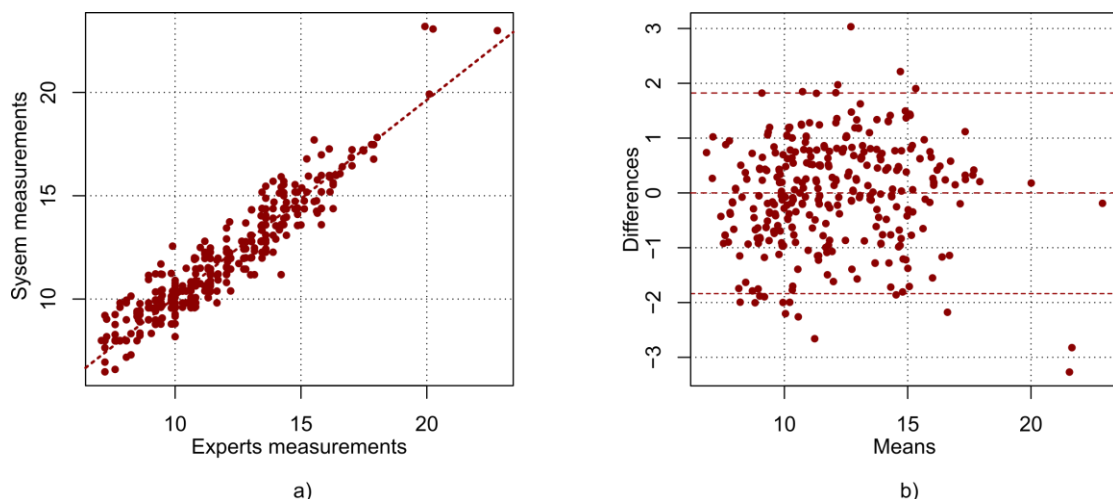
Paėmus profilio informaciją, ji naudojama tolesnei analizei tam, kad įvertinti kraujagyslės plotį. Šis procesas pavaizduotas pav. 6. Profilio centre, 30% profilio pločio ribose, surandamas minimumo taškas. Nustatomi kairysis ir dešinysis minimumo taškai (pav. 6.a.). Nuo šių taškų, profilis analizuojamas dvejomis skirtingomis kryptimis surandant lokalaus maksimumo tašką (pav. 6.b.). Surandamas greičiausio nusileidimo taškas (pav. 6.c) tarp a ir b taškų. Surandami du ribiniai taškai (pav. 6.d), kuriuose nusileidimo reikšmė yra intervale $[max - \sigma_w; max]$. Čia σ_w yra nusileidimų reikšmių tarp taškų a ir b standartinis nuokrypis. Centrinis taškas (pav. 6.e) tarp d taškų yra paaimamas kaip geriausias taškas kraujagyslės pločio matavimams.



Pav. 6. Profilio analizė: kraujagyslės pločio įvertinimas. Pilka spalva – paimto profilio informacija. Raudona – profilio informacija pritaikius Gauso filtrą. Mėlina – nusileidimo reikšmės (skirtumai tarp gretimų taškų). a) minimumų taškai; b) lokalūs maksimumų taškai; c) didžiausio nusileidimo taškai; d) didelio nusileidimo kraštiniai taškai panašūs į c; e) vidurio taškai tarp e taškų pagal kuriuos apskaičiuojamas kraujagyslės plotis.

4 Rezultatai ir išvados

Pasiūlyto metodo įvertinimui buvo panaudoti 86 vaizdai ir kiekviename iš jų buvo matuota po keturias kraujagysles: po dvi viršutines ir po dvi apatines (atskaitos tašku imant OD_r centro tašką). Viso buvo atlikti 344 matavimai. Visi vaizdai buvo gauti Optomed OY skaitmenine mobilią akies dugno kamera Smartscope M5 PRO. Eksperto ir pateikto algoritmo matavimai buvo atliekami tuose pačiuose taškuose. Pav. 7. pateikti eksperto ir pateikto algoritmo atlikti matavimai. Patikrinus statistinę hipotezę, su 95% pasiklovimo lygmeniu, galima teigti, jog abiem būdais atlikti matavimai yra vienodi. Pagrindinės charakteristikos pateiktos lentelėje 1.

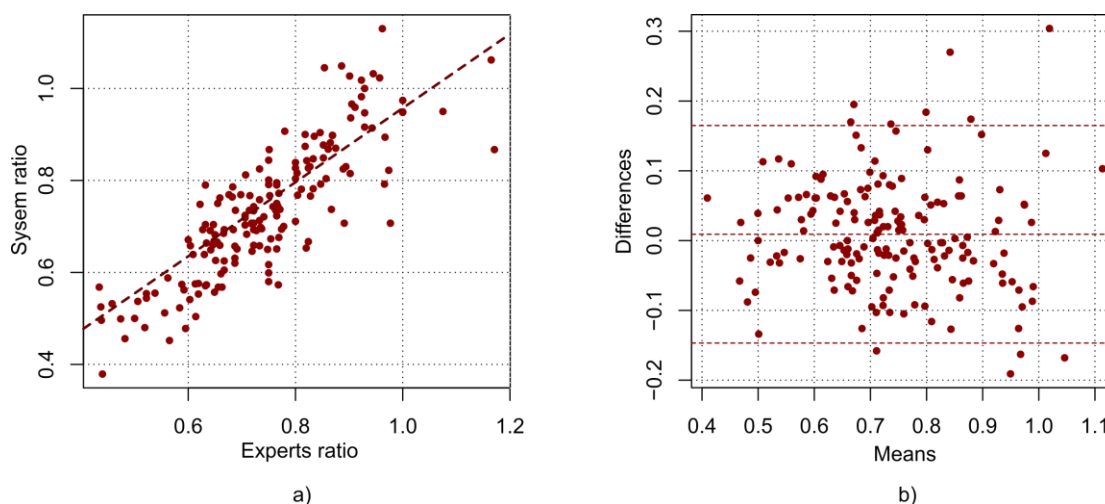


Pav. 7. Kraujagyslių pločių matavimų rezultatai. Matavimai atlikti eksperto ir pateikto algoritmo. a) sklaidos diagrama, b) Bland - Altman diagrama.

Lentelė 1. 344 kraujagyslių matavimo rezultatai. Pagrindinės charakteristikos.

Matavimai atlikti	Eksperto	Pateikto algoritmo
Vidurkis	11.858	11.865
Dispersija	7.482	7.241

Toliau buvo tiriamas arterijos-venos santykis. Santykis turi rodyti besiformuojančios ligos pradžia. Santykis buvo apskaičiuotas pagal eksperto matavimus ir pagal pateikto algoritmo matavimus. Rezultatai pateikti pav. 8. ir lentelėje 2. Pagal statistinę hipotezę, su 95% pasiklovimo lygmeniu, galima teigti, jog abiem būdais atlikti matavimai yra vienodi. Pagal pav. 8 galima matyti, jog matavimų paklaida didėja, kai didėja apskaičiuoto santykio reikšmės. Normalus santykis turėtų būti apie 0.7, o didesni santykiai paprastai nustatomi probleminėse vietose arba prastesnės kokybės vaizdams.



Pav. 8. Arterijos-venos santykio rezultatai. Matavimai atlikti eksperto ir pateikto metodo. a) sklaidos diagrama, b) Bland - Altman diagrama.

Lentelė 2. Arterijos-venos santykis apskaičiuotas 172 kraujagyslių poroms.

Matavimai atlikti	Eksperto	Pateikto algoritmo
Vidurkis	0.743	0.734
Dispersija	0.019	0.021

4.1 Tolesni darbai

- *OD nustatymas yra įtakojamas kraujagyslių esančių OD viduje. OD nustatymo algoritmas atsižvelgia į taisyklę, jog jo viduje privalo būti išskirtų kraujagyslių. Ši taisyklė laidžia atmesti didelius šviesos dėmes atsirandančias dėl vaizdo paėmimo klaidų, o šios dėmės gali vesti prie klaidingo OD nustatymo. Tačiau,*

jei OD kraujagyslės yra susikcentravusios vienoje OD pusėje, nustatinėjant OD_p, šios kraujagyslės gali būti laikomos, kaip esančios už OD ribų, ir tai gali vesti prie pradinio OD nustatymo be jame esančių kraujagyslių, taip galutinį OD nustatant klaidingoje vietoje.

- *Matavimų kryptis yra įtakojama išskirto kraujagyslių medžio, o tam tikrose vietose jis yra išskiriamas nekorektiškai. Tai dažna situacija vietose, kur dvi kraujagyslės susikerta arba eina labai arti viena kitos. Tam kad išvengti klaidų, tokie regionai turi būti analizuojami su papildomomis sąlygomis.*
- *Pateiktas kraujagyslių matavimų algoritmas gali būti taikomas, kad pagerinti išskirtą kraujagyslių tinklą užpildant atsiradusius tarpus.*
- *Kadangi analizės procesas yra automatinis, reikalingas labai tikslus kraujagyslių klasifikavimas, tam reikalingas bendros vaizdo kokybės nustatymo algoritmas.*
- *Arterijų venų santykis yra svarbus diagnozuojant tam tikras ligas, tačiau, verta paminėti, jog taip pat svarbi ir šio santykio dinamika. Tam kad tirti šio santykio dinamiką, reikia matavimus atlikti kaip įmanoma tose pačiose vietose. Tam galima panaudoti taškų deskriptorių metodus, kad matavimus atlikti tose pačiose vietose.*
- *Teoriškai pateiktas algoritmas gali būti testuojamas su bet kuria akies dugno vaizdų baze. Tačiau vienas iš šio algoritmo reikalavimų yra jo veikimas su vaizdais, kurie turi kokybės problemų, o šiuo metu trūksta duomenų bazių, kuriuose būtų pateikti matavimai nurodytose vietose.*

5 Literatūra

1. Stabingis, G., Bernatavičienė, J., Dzemyda, G., Paunksnis, A., Treigys, P., Vaičaitienė, R., Stabingienė, L., *Automation of Eye Fundus Vessel Width Measurement. Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics, Proceedings of VipIMAGE 2017. Springer, (2017). ISBN 978-3-319-68194-8.*
2. Kanski, J.J.: *Clinical Ophthalmology, 6th ed. Elsevier Health Sciences, London (2007).*
3. Kanagasingam, Y., Bhuiyan, A., Abramoff, M.D., Smith, R.T., Goldschmidt, L., Wong, T.Y.: *Progress on retinal image analysis for age related macular degeneration. Prog. Retin. Eye Res., 38, pp. 2042, (2014),*
4. Bock, R., Meier, J., Nyl, L. G., Michelson, G.: *Glaucoma risk index: automated glaucoma detection from color fundus images. Medical Image Analysis, 14(3), pp. 471-481, (2010).*
5. Buteikienė, D., Paunksnis, A., Barzdžiukas, V., Bernatavičienė, J., Marcinkevičius, V., Treigys, P.: *Assessment of the optic nerve disc and excavation parameters of interactive and automated parameterization methods. Informatica , 23(3), p. 335-355, (2012).*
6. Treigys, P., Šaltenis, V., Dzemyda, G., Barzdžiukas, V., Paunksnis, A.: *Automated optic nerve disc parameterization. Informatica, 19(3), p. 403-420, (2008).*
7. Odstroik, J., Kolar, R., Budai, A., Hornegger, J., Jan, J., Gazarek, J., Kubena, T., Cernosek, P., Svoboda, O., Angelopoulou, E.: *Retinal vessel segmentation by improved matched filtering: evaluation on a new high resolution fundus image database, IET Image Processing, 7(4), pp. 373-383, (2013).*

8. Fraz, P.R.M.M., Hoppe, A., Uyyanonvara, B., Rudnicka, A.R., Owen, C.G., Barman, S.A.: Blood vessel segmentation methodologies in retinal images a survey. *Comput. Methods Programs Biomed.* 108, 407-433, (2012).
9. Morgan, A.J., Hosking, S.L.: Non-invasive vascular impedance measures demonstrate ocular vasoconstriction during isometric exercise. *Br J Ophthalmol*, 91 (3), pp. 385-390, (2007).
10. Mirsharifa, Q., Tajeripoura, F., Pourreza, H.: Automated characterization of blood vessels as arteries and veins in retinal images. *Comput. Med. Imaging Graphics*, 37, p. 607-617, (2013).
11. Kondermann, C., Kondermann, D., Yan, Y.: Blood vessel classification into arteries and veins in retinal images. *Proc. SPIE*, 6512, (2007).
12. Li, X., Wee, W.G.: Retinal vessel detection and measurement for computer-aided medical diagnosis, *J. Digit. Imaging*, 27(1) (2014) 120132.
13. Nguyen, U.T., Bhuiyan, A., Park, L.A., Ramamohanarao, K.: An effective retinal blood vessel segmentation method using multi-scale line detection. *Pattern Recognit.*, 46, pp. 703-715, (2013).
14. Ravishankar, S., Jain, A., Mittal, A.: Automated feature extraction for early detection of diabetic retinopathy in fundus images. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009. IEEE Conference)*, (2009).
15. Pachiyappan, A., Das, U., Murthy, T., Tatavarti, R.: Automated diagnosis of diabetic retinopathy and glaucoma using fundus and OCT images. *Lipids in Health and Disease*, p. 11-73, (2012).
16. Stabingis, G., Bernatavičienė, J., Dzemyda, G., Imbrasienė, D., Paunksnis, A.: Automated Classification of Arteries and Veins in the Retinal Blood Vasculature. *Computer data analysis and modeling. Theoretical & Applied Stochastics. Proceedings of the 11th International Conference. Minsk, Belarus.* (2016).

Priedai