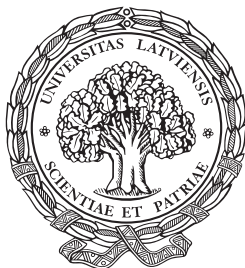


LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE



Varis Karitāns

**OPTISKO UN NEIRĀLO FAKTORU
IETEKME UZ UZTVERTĀ ATTĒLA
KVALITĀTI**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora zinātniskā grāda iegūšanai fizikā
Apakšnozare: medicīniskā fizika

Darba vadītājs: prof. *Dr. hab. phys.* Māris Ozoliņš

Rīga 2012

Darbs ir izstrādāts no 2007. līdz 2011. gadam Latvijas Universitātes Fizikas un Matemātikas fakultātes Optometrijas un Redzes zinātnes nodaļā.

Darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā Fonda atbalstu.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Eiropas Sociālā fonda projekts „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē”

Nr.2009/0138/ 1DP/1.1.2.1.2./ 09/IPIA/ VIAA/004.

Zinātniskais vadītājs: prof. *Dr. habil. phys.* **Māris Ozoliņš**

Recenzenti:

Prof. *Dr. habil. phys.* **Ivars Lācis**, Latvijas Universitāte

Prof. *Dr. habil. biol.* **Juris Imants Aivars**, Latvijas Universitāte

Dr. Frank Stein, Ifa systems AG Frechen/Cologne

Fizikas un Astronomijas, un Mehānikas Specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs: prof. *Dr. habil. phys.* **Jānis Spīgulis**

Darbs tiks aizstāvēts 2012. gada 23. aprīlī plkst. 17.00 atklātā Promocijas padomes sēdē Rīgā, LU Fizikas un matemātikas fakultātē, Zeļļu ielā 8.

Ar promocijas darbu var iepazīties LU Bibliotēkā (Kalpaka bulv. 4), Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā (Rūpniecības iela 10) un LU Fizikas un Matemātikas fakultātē F210 telpā.

© Latvijas Universitāte, 2012

© Varis Karitāns, 2012

ISBN 978-9984-45-490-0

Satura rādītājs

Satura rādītājs	3
Anotācija	4
Abstract	4
1. Ievads	5
1.1. Darba aktualitāte	5
1.2. Darba mērķis	5
1.3. Darba novitāte	6
1.4. Aizstāvamās tēzes	6
2. Teorētiskā daļa	8
2.1. Jēdziens ‘viļņu fronte’	8
2.2. Jēdziens ‘aberācija’	8
2.3. Aberāciju matemātiskais apraksts	9
2.4. Attēla veidošanās optiskā sistēmā	10
2.5. Optiskās kvalitātes mēri	10
2.6. Aberāciju nozīme redzes zinātnē	11
2.7. Adaptīvās optikas korekcijas principi	12
3. Eksperimentālā daļa	15
3.1. Vernjē (Vernier) asuma pētījumi	15
3.2. Acs aberāciju ietekme uz binokulārās redzes uztveri	20
3.3. Krāsu piesātinājuma adaptācijas pētījumi	24
3.4. Asinsvadu redzamā diametra atkarība no acs aberācijām	31
3.5. Viļņu frontes korektoru izveide	40
3.6. Kalibrācijas parametru ietekme uz aberāciju mērījumiem	49
Praktiskā nozīmība	56
Izmantotā literatūra	57
Publikāciju saraksts	61
Konferenču tēzes	62
Pateicības	63

Anotācija

Acs ir optiska sistēma, kam piemīt nepilnības jeb aberācijas. Acs aberācijas ietekmē gan redzes uztveri, gan arī tīklenes struktūru saskatāmību. Attīstoties adaptīvās optikas tehnoloģijām, ir kļuvis iespējams kontrolēt acs optisko kvalitāti ļoti augstā līmenī.

Redzes funkciju atkarība no acs optiskās kvalitātes ir plaši pētīta, tomēr pētnieku vidū nav vienprātības par aberāciju nozīmi redzes uztverē. Promocijas darbā veikti pētījumi, cik lielā mērā redzes sistēma adaptējusies acs optiskajiem defektiem un kāda ir redzes sistēmas jutība pret dažāda veida aberācijām. Krāsu redzes eksperimenti pierāda adaptācijas procesu ietekmi uz redzes uztveri.

Promocijas darbā pierādīta acs optiskās kvalitātes nozīme tīklenes asinsvadu diametra novērtēšanā un oftalmoskopijas rezultātu interpretācijā. Darbā izstrādāti viļņu frontes korektori un analizētas to izmantošanas iespējas. Izstrādātie viļņu frontes korektori ir izmantojami aberometru kalibrēšanai.

Abstract

An eye is an optical system suffering from optical aberrations. Ocular aberrations influence both visual perception and visibility of retinal features. As technologies of adaptive optics advanced it became possible to control optical quality of an eye at very high level.

Dependence of visual functions on optical quality of an eye is widely studied. There is no scientific agreement regarding the role of ocular aberrations in visual perception. In the work, adaptation to the optical defects of an eye and sensitivity of the visual system to different aberrations has been studied. Color vision experiments confirm the role of adaptation processes in visual perception.

The role of optical quality of an eye in assessing the diameter of retinal blood vessels and in interpretation of the results of ophthalmoscopy has been proved. Wavefront correctors have been designed and their applicability has been studied. The wavefront correctors designed are suited for calibration of aberrometers.

1. IEVADS

1.1. Darba aktualitāte

Sākotnēji adaptīvā optika tika izmantota atmosfēras turbulences efektu korekcijai astronomijā. Vēlāk adaptīvo optiku sāka izmantot arī redzes zinātnē acs optiskās kvalitātes kontrolei. Pētījumu pirmsākumos tika uzskatīts, ka starp redzes kvalitāti un acs optisko kvalitāti pastāv vienkāršs sakars, t. i., jo labāka ir acs optiskā kvalitāte, jo augstāks ir visu redzes funkciju līmenis. Promocijas darbā pievērsta uzmanību aktuālam jautājumam, vai acs optiskos defektus redzes sistēma izmanto savā labā, t. i., vai tā ir adaptējusies dzīves laikā šiem defektiem. Mūsdienās ļoti populārs acs refraktīvo defektu korekcijas līdzeklis ir progresīvās brilles, kam piemīt dažādi optiskie defekti. Progresīvo brillu valkāšanas sākumposmā redzes uztvere ir traucēta attēla kropļojumu dēļ, un redzes sistēmas adaptācija acs optiskajiem defektiem nosaka, cik ilgā laikā cilvēks pie šo brillu valkāšanas pierod.

Sarežģītu acs optisko defektu korekcija sarežģītās oftalmoskopijas metodēs sniedz iespēju saskatīt dažus mikronus lielus objektus (fotoreceptorus, kapilārus u. c.). Promocijas darbā pievērsta uzmanību aberāciju nozīmei parastajā oftalmoskopijā. Optometristi un acu ārsti apzinās acs aberāciju nozīmi, koriģējot acs refraktīvās kļūdas, turpretim, apskatot acs dibenu, nereti aizmirst, ka, acs dibenu aplūkojot caur optiski nepilnīgu vidi, šie optiskie defekti var būtiski ietekmēt tiklīnes struktūru redzamo formu.

Sarežģītu acs optisko defektu korekcija iespējama tikai laboratorijas apstākļos. Lai nodrošinātu augstu acs optisko kvalitāti ikdienā, nepieciešami pārnēsājami acs optisko traucējumu korekcijas līdzekļi. Promocijas darbā analizēts, cik viegli šādi korektori izgatavojami, izmantojot vienkārši realizējamas optiskās litogrāfijas metodes.

Redzes zinātnē ir plaši pētīta dažāda veida acs optisko defektu izplatība un apjoms lielā cilvēku grupā. Bieži vērojama neatbilstība starp dažādu autoru iegūtajiem mērījumu rezultātiem. Literatūrā bieži trūkst analīzes, kas ir iespējamie mērījumu rezultātu atšķirību iemesli. Promocijas darbā pievērsta uzmanību tam, vai atšķirības viņu frontes sensorā var radīt tādas acs aberāciju mērījumu rezultātu atšķirības, kādas novērojamas, salīdzinot dažādu autoru iegūtos rezultātus.

1.2. Darba mērķis

Promocijas darba galvenais mērķis ir izpētīt optisko un neirālo faktoru nozīmi redzes uztverē, oftalmoloģijā un aberometrijā.

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, bija jāveic šādi uzdevumi:

- 1) jāizpēta acs optiskās kvalitātes ietekme uz telpisko redzes uztveri;
- 2) jāizmēra lielākā acs aberāciju apjoma intraokulārā atšķirība, kas pieļaujama progresīvo brillu izgatavošanā;
- 3) jāizpēta redzes sistēmas adaptācija stimula hromatiskajam saturam;

- 4) jāizpēta acs aberāciju ietekme uz tīklenes asinsvadu diametru;
- 5) jānovērtē fotorezista slānī izgatavotu viļņu frontes korektoru virsmas struktūra un optiskās īpašības, izmantojot dažādas metodes;
- 6) jāizpēta saistība starp izmērīto acs aberāciju apjomu un adaptīvās optikas sistēmas kalibrācijas parametriem.

1.3. Darba novitāte

1. Promocijas darbā pirmo reizi analizēts, kā dažādu aberāciju apjoma atšķirība starp abām acīm ietekmē redzes sistēmas spēju sapludināt abās acīs veidotos attēlus. Redzes zinātnē veikti nedaudzi pētījumi, kā aberāciju veida un apjoma atšķirība ietekmē stereoredzi, turpretim redzes sistēmas spēja sapludināt abās acīs veidotos attēlus atkarībā no acu optiskajiem defektiem iepriekš nav pētīta. Promocijas darbā iegūtie rezultāti liecina par binokulārās redzes sistēmas adaptācijas spējām, kas iepriekš nav pētītas.
2. Promocijas darbā pirmo reizi pierādīts, ka dažādu aberāciju gadījumā novērojamas būtiskas tīklenes asinsvadu diametra izmaiņas un ka artēriju/vēnu diametru attiecības izmaiņas aberāciju dēļ salīdzināmas ar tām izmaiņām, ko rada dažādas tīklenes un vispārējas organisma slimības.
3. Promocijas darbā pirmo reizi, izmantojot dažādas metodes (aberometriju, skenējošo elektronu mikroskopiju un profilometriju), pētīta binārās spožuma skalas fāzu maskas lietojamība acs viļņu frontes korektoru izveidē. Binārās spožuma skalas fāzu maskas lietojums litogrāfijā ir plaši pētīts, tomēr tā nav izmantota viļņu frontes korektoru izveidei.

1.4. Aizstāvamās tēzes

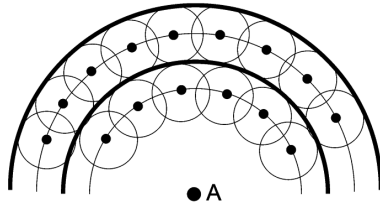
1. Acs aberāciju radīto apmieglojumu redzes sistēma ir iemācījusies izmantot specifiskas redzes funkcijas – Vernjē (*Vernier*) asuma nodrošināšanai. Redzes sistēma interpolē daudzu fotoreceptoru signālus, lai noteiktu līnijas atrašanās vietu ar precizitāti, kas augstāka nekā to tā, ko pieļauj fotoreceptoru izvietojuma blīvums. Zema aberāciju korekcijas līmeņa rajonā Vernjē asums ir augsts tāpēc, ka smadzenes izmanto lielāku fotoreceptoru skaitu, lai aprēķinātu līnijas atrašanās vietu, un ka acs optiskajai sistēmai piemīt defekti, kuriem tā adaptējusies. Redzes sistēmā pastāv neirāls mehānisms, kura dēļ izkropļotas līnijas tiek uztvertas kā taisnas. Augsta aberāciju korekcijas līmeņa rajonā Vernjē asums ir augsts tāpēc, ka attēls uz tīklenes ir ass un tam ir augsts kontrasts.
2. Promocijas darba gaitā ir gūti pierādījumi redzes sistēmas adaptācijas spējām. Cilvēks savas dzīves laikā adaptējas tām aberācijām, kam ir pastāvīgs apjoms un kam atbilstošās punkta izplūdes funkcijas struktūra ir vienkārša. Visvieglāk ir pamanīt trīslapiņu aberācijas radītās attēla izmaiņas, visgrūtāk – sfēriskās aberācijas radītās izmaiņas. Iegūtie rezultāti ir izmantojami progresīvo lēcu izstrādē.

3. Pieskaņojot perifērā stimula krāsu piesātinājumu centrālā stimula krāsu piesātinājumam no ahromātiskās un maksimāli piesātinātās puses, līdzsvara punktā tiek iegūtas dažādas perifērā stimula piesātinājuma vērtības, t.i., tiek novērota krāsu piesātinājuma histerēze. Līdzsvara punktā iegūtā perifērālā stimula piesātinājuma atkarība no adaptācijas laika ir eksponenciāla. Tas, iespējams, norāda uz nelineāru fotoreceptoru procesu iesaisti piesātinājuma adaptācijā.
4. Aberāciju kopas, kas savā starpā atšķiras ar savu struktūru un apjomu, dažādi ietekmē tiklens attēlus. Acs aberācijas spēj ievērojami izmainīt A/V vērtību, salīdzinot to ar vērtību, kāda tā ir, ja acs optisko sistēmu ierobežo vienīgi difrakcija. A/V vērtības izmaiņas, ko rada acs aberācijas, ir salīdzināmas ar tām izmaiņām, ko rada acs patoloģijas. Aberāciju dēļ patoloģiskas asinsvadu diametra izmaiņas var palikt nepamanītas. Oftalmologam ir jāņem vērā pacienta un savas acs optiskais stāvoklis, novērtējot pacienta acs dibenu.
5. Viļņu frontes formu, kas nepieciešama augstāko kārtu aberāciju kompensēšanai, iespējams iegūt, apgaismojot fotorezistīvu slāni caur bināro spožuma skalas masku. Šāda maska rada straujas fotorezista slāņa dziļuma izmaiņas un spēcīgu gaismas izkliedi. Ja viļņu frontes korektori, kas izgatavoti, izmantojot bināro spožuma skalas masku, tiek lietoti aberometru kalibrēšanai, tad gaismas izkliede nav būtiska. Samazinot gaismas izkliedi, viļņu frontes korektori izmantojami aberāciju efektu mazināšanai oftalmoskopijas metodēs.
6. Šaka-Hartmana (*Shack-Hartmann*) viļņu frontes sensori jākalibrē, vai nu izmantojot asfērisku lēcu vai arī vienas modas šķiedras galu, kas novietots tālu no Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora ieejas zīlītes. Iespējamais cēlonis atšķirībai starp aberāciju apjomu, kas izmērīts, izmantojot dažādus Šaka-Hartmana viļņu frontes sensorus, ir dažāds kalibrācijai izmantotās viļņu frontes liekums.

2. TEORĒTISKĀ DAĻA

2.1. Jēdziens ‘viļņu fronte’

Gaismai izplatoties optiskā vidē, gaismas avotu apliec viļņu fronte. Ja tiek aplūkots punktveida gaismas avots, kas atrodas optiski homogēnā vidē, t. i., tādā vidē, kurā gaismas laušanas koeficients visā tilpumā ir vienāds, tad gaismas avotu apliec sfēriska viļņu fronte, kas bezgalīgi lielā attālumā kļūst plakana. Saskaņā ar Heigensa-Freneļa (*Huygens-Fresnel*) principu katrs punkts uz viļņu frontes ir sekundārais viļņu avots, no kā tālāk telpā izplatās sfēriski viļņi (skat. 2.1.1. attēlu). Sekundāro viļņu frontu apliecēja veido jauno viļņu fronti.

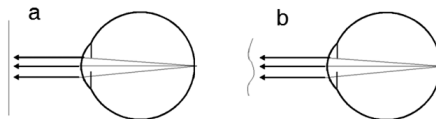


2.1.1. attēls. Heigensa-Freneļa princips viļņu frontes konstruēšanai. Optiski homogēnā vidē punktveida gaismas avotu (A) apliec sfēriska viļņu fronte. Katrs punkts uz sfēriskās viļņu frontes ir sekundāro viļņu avots. Sekundāro viļņu frontes apliecošā virsma ir jaunā viļņu fronte (trekninātais loks).

Plakana viļņu fronte ir atskaites viļņu fronte, attiecībā pret kuru tiek mērīta pretvaļīgi izvēlēta viļņu fronte.

2.2. Jēdziens ‘aberācija’

Ja optiskā vide nav viendabīga, tad viļņu fronte tiek deformēta. Jebkuru viļņu frontes novirzi no plakanas viļņu frontes sauc par aberāciju. Viļņu fronte var tikt deformēta, gan atstarojoties no nelīdzenas virsmas, gan arī, ejot cauri videi, kuras laušanas koeficients un biezums dažādās vietās atšķiras (skat. 2.2.1. attēlu). Aberāciju gadījumā viļņu frontes fāze ir mainīga, kā arī absorbcijas dēļ var mainīties tās amplitūda. Acī ir vairākas optiskās vides – radzene, lēca, priekšējās kameras šķidrums un stiklveida ķermeņi. Aberācijas var veidoties katrā no šīm vidēm.



2.2.1. attēls. Plakana viļņu fronte (a) un viļņu fronte ar aberācijām (b). Katrā acs optiskajā elementā dažādu apstākļu dēļ viļņu fronte izkropļojas.

Acs aberācijas tiek iedalītas zemāko kārtu un augstāko kārtu aberācijās. Zemāko kārtu aberācijas ir aizture, noliece, defokuss un astigmātisms. Aizture ir viļņu frontes aizkavēšanās, tai ejot cauri viendabīgam plakanparalēlam materiālam. Aiztures gadījumā viļņu frontes forma un stara izplatīšanās virziens nemainās. Viļņu frontes forma nemainās arī nolieces gadījumā, bet šajā gadījumā mainās stara izplatīšanās virziens. Jebkura veida aberācija (izņemot aizturi un nolieci) pazemina uz tiklenes veidotā attēla kvalitāti, kā arī izkropļo no acs iznākošo viļņu fronti. Defokuss un astigmātisms ir koriģējami ar tradicionālajiem korekcijas līdzekļiem, t. i., brillēm un kontaktlēcām. Augstāko kārtu aberāciju viļņu frontes struktūra ir sarežģīta. Augstāko kārtu aberācijas koriģējamas, izmantojot adaptīvās optikas, lāzerķirurģijas u. c. metodes.

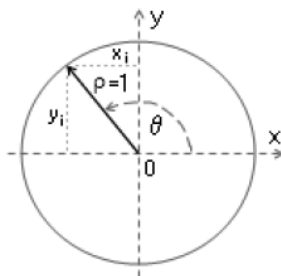
2.3. Aberāciju matemātiskais apraksts

Visbiežāk aberācijas matemātiski tiek aprakstītas, izmantojot Zernikes (*Zernike*) vai Zeideļa (*Seidel*) aberāciju teoriju [1]. Vēsturiski Zernikes aberāciju teorija ir kļuvusi populārāka nekā Zeideļa teorija. Zernikes aberāciju teorijā jebkuras formas viļņu fronte tiek sadalīta pamataberācijās. Katru pamataberāciju apraksta Zernikes polinoms, kam ir divi argumenti – radiālais arguments jeb rādiusvektors ρ un polārais leņķis θ (skat. 2.3.1. attēlu).

Katram Zernikes polinomam atbilst savs Zernikes koeficients. Zernikes koeficienti ir Zernikes polinomu reizinātāji, kas raksturo katra Zernikes polinoma aprakstītās aberācijas ieguldījumu kopējā aberāciju ainā. Izmantojot Zernikes polinomus un koeficientus, viļņu fronti W iespējams uzrakstīt formā:

$$W(\rho, \theta) = \sum_n^k \sum_{m=-n}^n c_n^m Z_n^m(\rho, \theta) \quad (2.3.1.)$$

kur c_n^m ir Zernikes koeficients, bet Z_n^m ir Zernikes polinoms.



2.3.1. attēls. Zernikes polinomu argumenti – rādiusvektors ρ un polārais leņķis θ . Rādiusvektors ir bezdimensionāls lielums robežās no 0 līdz 1. Polārais leņķis tiek mērīts pretēji pulksteņrādītāja virzienam robežās no 0° līdz 360° .

Ir vairāki Zernikes polinomu standarti. Populārākais Zernikes polinomu standarts ir OSA standarts.

2.4. Attēla veidošanās optiskā sistēmā

Pieņemsim, ka atveri, aiz kuras atrodas fokusējoša sistēma, aizpilda apertūras funkcija, kuru apraksta vienādojums [2]:

$$A(y, z) = A_o(y, z) \cdot e^{i\phi(y,z)} \quad (2.4.1.)$$

kur $A_o(y, z)$ – amplitūda, bet $\phi(y, z)$ – fāze atveres punktā, kura koordinātas ir (y, z) .

Fokālajā plaknē veidojas attēls, ko sauc par punkta izplūdes funkciju. Koherenta starojuma gadījumā elektriskajam laukam punkta izplūdes funkcija aprēķināma kā divdimensionālu apertūras funkcijas Furjē (*Fourier*) transformācija [2]:

$$E(y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A(y, z) e^{ik(Yy+Zz)/R} dydz \quad (2.4.2.)$$

Ja uz riņķveida atveri krīt plakana viļņu fronte, tad lēcas fokālajā plaknē izveidojas Fraunhofera (*Fraunhofer*) difrakcijas aina – Airī (*Airy*) disks, ko aptver periodiski gaiši un tumši gredzeni. Fraunhofera difrakcijas aina ir punkta izplūdes funkcijas speciālgadījums. Fraunhofera difrakcijas ainas pirmā minimuma rādiuss r aprēķināms, izmantojot vienādojumu:

$$r = \frac{1.22 \cdot \lambda}{d} \text{ (rad)} \quad (2.4.3.)$$

Attēla veidošanās optiskajā sistēmā aprakstāma kā objekta intensitātes sadalījuma un punkta izplūdes funkcijas konvolūcija. Katrs punkts tiek aizstāts ar punkta izplūdes funkciju, un attēls veidojas kā visu punkta izplūdes funkciju summa.

$$I_i(Y, Z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_o(y, z) \cdot S(Y - y, Z - z) dydz = I_o(y, z) \otimes S(y, z) \quad (2.4.4.)$$

kur $I_i(Y, Z)$ – attēla intensitātes sadalījums, $I_o(y, z)$ – objekta intensitātes sadalījums, $S(y, z)$ – punkta izplūdes funkcija, \otimes – konvolūcijas operators.

2.5. Optiskās kvalitātes mēri

Visbiežāk izmantotie optiskās sistēmas kvalitātes mēri ir PV (no angļu valodas: Peak-to-Valley (PV) – maksimālā deformācija), RMS (no angļu valodas: root-mean-square (RMS) – vidējā kvadrātiskā kļūda) un Strēla (*Strehl*) attiecība.

PV vērtība ir maksimālā viļņu frontes deformācija. PV vērtība, neraugoties uz to, ka tā ir viegli aprēķināma, nav piemērots parametrs optiskās sistēmas kvalitātes raksturošanai. Optiskai sistēmai, kurai PV vērtība ir mazāka nekā citai optiskai sistēmai, kvalitāte var būt zemāka.

RMS vērtība ir viļņu frontes standartkļūda, un tā tiek aprēķināta noteiktam zīlītes izmēram, tādējādi daudz labāk raksturojot optiskās sistēmas kvalitāti.

RMS vērtība aprēķināma arī kā kvadrātsakne no Zernikes koeficientu kvadrātu summas [3].

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum_{n,m} (c_n^m)^2} \quad (2.5.1.)$$

Strēla attiecība ir punkta izplūdes funkcijas maksimālās intensitātes attiecība pret maksimālo intensitāti, kāda tā ir, ja optisko sistēmu ierobežo vienīgi difrakcija. Maksimālā Strēla attiecība ir 1. Šajā gadījumā optisko sistēmu ierobežo vienīgi difrakcija. Ja Strēla attiecība ir 0, tad centrālajā piķī koncentrējas nulles enerģija. Strēla attiecība S tiek aprēķināta, izmantojot vienādojumu:

Punkta izplūdes funkcijas Furjē transformācija ir optiskās pārnese funkcija (OTF). OTF izšķirama reālā daļa – modulācijas pārnese funkcija (MTF) un fāzes pārnese funkcija (PTF).

2.6. Aberāciju nozīme redzes zinātnē

2.6.1. Aberāciju ietekme uz redzes uztveri

Aberāciju efekti acī parasti tiek aplūkoti kopā ar difrakcijas efektiem. Ja acs zīlīte ir maza, tad acī dominē difrakcija, turpretim liela zīlītes izmēra gadījumā dominē aberācijas. Gan difrakcija, gan aberācijas rada attēla izplūdumu uz tīklenes. Difrakcija un aberācijas ietekmē uz tīklenes veidotā attēla telpisko frekvenču spektru. Telpisko frekvenču caurlaidību apraksta modulācijas pārnese funkcija, kas parāda, cik lielā mērā acs optiskā sistēma laiž cauri dažādas telpiskās frekvences un kāda ir attēla kontrasta attiecība pret objekta kontrastu dažādām telpiskām frekvencēm. Acī modulācijas pārnese funkcija vienmēr sasniedz vērtību 0 pie telpiskās frekvences aptuveni 60 cikli/grāds, jo šauras zīlītes gadījumā aberāciju nav, bet platas zīlītes gadījumā robežfrekvenci pazemina aberācijas.

Acs aberāciju nozīmei redzes uztverē veltīts daudz pētījumu. Acs aberācijas ietekmē redzes asumu [4], kontrastjutību [5, 6], stereoredzi [7], akomodāciju [8] u. c. redzes funkcijas. Pētījumā [4] analizēta redzes asuma atkarība no acs augstāko kārtu aberācijām dažādu stimula spožuma līmeņu un kontrasta polaritāšu gadījumā. Būtisks redzes asuma uzlabojums tika novērots visu spožuma līmeņu gadījumā, aplūkojot baltus stimulus uz melna fona. Citā pētījumā [9] pievērsta uzmanību redzes asuma atkarībai no dažāda veida aberācijām. Gan otrās kārtas, gan trešās kārtas aberāciju korekcija radīja būtisku redzes asuma uzlabojumu. Pētījumā [5] tika iegūts seškārtīgs kontrastjutības uzlabojums pēc acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas. Aberāciju apjoma atšķirība starp abām acīm ietekmē arī stereoredzi [7]. Pieaugot aberāciju apjoma atšķirībai starp abām acīm, stereoredzes sliekšnis paaugstinājās.

Redzes uztvere atkarīga ne tikai no optiskajiem, bet arī no neirālajiem faktoriem. Redzes garoza, kas analizē no tīklenes saņemto informāciju, dzīves laikā adaptējas acs aberāciju radītajam apmieglojumam. Redzes sistēmas adaptācija acs aberāciju radītajam apmieglojumam pēta vairākkārt [10, 11]. Pētījumā [11] analizēts, kāds ir optimālais acs augstāko kārtu aberāciju līmenis, kas nepieciešams, lai uztvertā attēla kvalitāte būtu visaugstākā. Ar adaptīvās optikas palīdzību tika

mainīta attēla optiskā kvalitāte. Eksperimenta dalībniekam bija jāizvēlas vislabākā uztvertā attēla kvalitāte. Visaugstākā attēla kvalitāte bija gadījumā, kad nekorrigēto acs augstāko kārtu aberāciju apjoms bija aptuveni 12 % no sākotnējā apjoma. Pētījuma [11] autori šos rezultātus skaidro ar redzes sistēmas adaptāciju acs augstāko kārtu aberāciju radītajam apmieglojumam un secina, ka šie rezultāti jāņem vērā, koriģējot acs aberācijas ar lāzerķirurģijas metodēm.

2.6.2. Acs aberāciju nozīme oftalmoloģijā

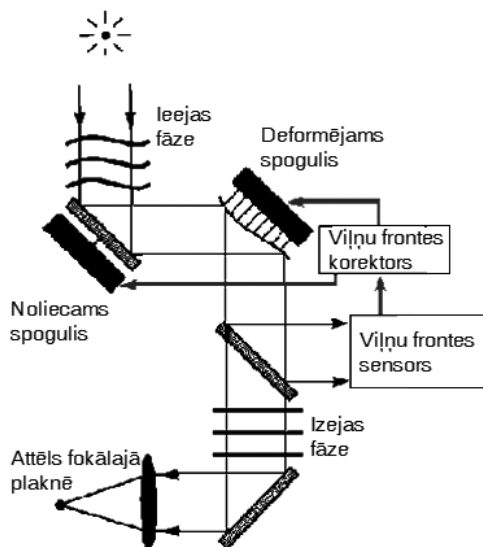
Īpaši liela nozīme oftalmoloģijā tiek pievērsta acs augstāko kārtu aberācijām, kuru apjoms acī var būt ievērojams, salīdzinot ar zemāko kārtu aberāciju apjomu. Ja koriģēts tikai defokuss un astigmātisms, nav iespējams atšķirt atsevišķus fotoreceptorus [5, 12]. Acs augstāko aberāciju korekcija oftalmoloģijā ir nozīmīga, lai diagnosticētu dažādas tiklenes patoloģijas, saskatītu dažādus perēkļus, asins izplūdumus, konstatēt fotoreceptoru atrofiju u. c.

Acs augstāko kārtu aberāciju korekcija sniedz iespēju ne tikai saskatīt atsevišķus tiklenes fotoreceptorus, bet arī tiklenes pigmentepitēlija šūnas, tiklenes mikroasinsvadu struktūru, trombocītus tiklenes asinsvados [13] u. c. Kombinācijā ar doplerogrāfiju ir iespējams izmērīt leukocītu pārvietošanās ātrumu [14].

Aberācijas var radīt problēmas, veicot retinoskopiju. Retinoskopiju ir sevišķi grūti veikt gadījumā, ja acī ir neregulārs astigmātisms vai keratokonuss. Šajā gadījumā ir grūtības atrast tā saucamo neītalizācijas punktu. Veicot retinoskopiju acīs, kurās ir neregulārs astigmātisms, reizēm ir novērojams tā saucamais šķēru reflekss [15, 16]. Šķēru refleksa cēlonis ir īpatnēja staru gaita acī, ko rada augstāko kārtu aberācijas – vienā acs zīlītes daļā acs ir tuvredzīga, bet citā – tālredzīga. Viens šķēru refleksa stars ir ļoti tumšs, bet otrs ļoti gaišs. Acīs, kurās ir keratokonuss, ir liels komas apjoms, kas rada t.s. tiklenes refleksa savērpšanās efektu.

2.7. Adaptīvās optikas korekcijas principi

Adaptīvās optikas principu – viļņu frontes fāzes maiņu attēla kvalitātes paaugstināšanai pirmo reizi izteica ASV astronoms Babkoks (*Horace Welcome Babcock*) 1959. gadā. Gaismas viļņu fronte izplatoties cauri atmosfēras slāņiem, tā tiek deformēta, jo lokālu temperatūras izmaiņu dēļ mainās gaismas laušanas koeficients. Adaptīvās optikas būtība redzama 2.7.1. attēlā. Viļņu frontes formu uztver viļņu frontes sensors, kas datus tālāk pārsūta datoram. Dators, izmantojot sensora datus, savukārt, aprēķina korekcijas algoritmus, saskaņā ar kuriem spoguļa virsma tiek deformēta tā, lai pēc atstarošanās viļņu fronte kļūtu plakana. Plakana viļņu fronte, krītot uz fokusējošu sistēmu, fokālajā plaknē veido attēlu, ko ierobežo vienīgi difrakcija. Adaptīvās optikas darbība ir salīdzināma ar apgrieztajiem greizajiem spoguļiem – līdzīgi kā deformēts spogulis augstas kvalitātes attēlu izkropļo, tāpat, izmantojot deformējamu spoguļi, iespējams zemas kvalitātes attēlu uzlabot.



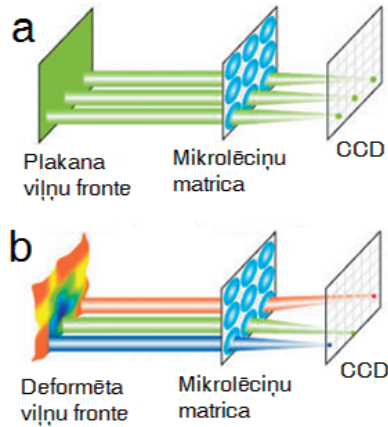
2.7.1. attēls. Adaptīvās optikas darbības princips. Plakanu viļņu fronti deformē neviendabīga optiskā vide. Pēc atstarošanās no noliecama un deformējama spoguļa viļņu fronte ieiet viļņu frontes sensorā, kas datus pārsūta viļņu frontes korektoram, kas, savukārt, tālāk kontrolē deformējamā spoguļa formu. Pēc atstarošanās no deformējamā spoguļa viļņu fronte kļūst plakana un veido asu attēlu fokālajā plaknē [17].

Vairākus gadus pēc adaptīvās optikas ieviešanas astronomijā šo metodi sāka pielietot arī redzes zinātnē, lai koriģētu acs augstāko kārtu aberācijas. Gan astronomijā, gan redzes zinātnē adaptīvās optikas sistēmas veido 3 pamatbloki:

- 1) viļņu frontes sensors;
- 2) viļņu frontes modulators un vadības bloks;
- 3) programmatūra viļņu frontes rekonstruēšanai un korekcijas algoritmu izstrādei.

Viļņu frontes analīzei visbiežāk tiek izmantots Šaka-Hartmana (*Shack-Hartmann*) viļņu frontes sensors. Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora uztverošais elements ir CCD pikseļu matrica. Atšķirībā no digitālās kameras fokusēšanas sistēmas vienas lēcu sistēmas jeb objektīva vietā tiek izmantota mikrolēciņu matrica, kuras katra lēciņa izveido CCD sensora plaknē savu punktiņu (skat. 2.7.2. attēlu). Ja uz mikrolēciņu matricu krīt plakana viļņu fronte, tad punkti uz CCD sensora veido pilnībā režģi, kurā jebkuri divi blakusesoši punkti atrodas tādā attālumā, kādā viens no otra atrodas blakusesošu mikrolēciņu centri. Ja uz mikrolēciņu matricu krīt deformēta viļņu fronte, tad šie punktiņi nobīdās no sava sākotnējā stāvokļa. Izmērot punktu nobīdes, tiek aprēķināts viļņu frontes slīpums virs attiecīgās mikrolēciņas. Zinot viļņu frontes slīpumu virs katras mikrolēciņas, tiek rekonstruēta pilnā viļņu frontes forma, kas tiek sadalīta atsevišķu aberāciju

komponentēs. Pēc viļņu frontes formas rekonstruēšanas viļņu fronte tiek sadalīta Zernikes polinomos, izmantojot mazāko kvadrātu metodi.



2.7.2. attēls. Šaka-Hartmana sensora darbības princips. (a) Ja viļņu fronte ir plakana, tad attālums starp blakusesošiem punktiem sakrīt ar attālumu starp mikrolēciņu centriem. (b) Ja viļņu fronte ir deformēta, tad attālums starp blakusesošiem punktiem ir dažāds atkarībā no viļņu frontes liekuma [18].

Viļņu frontes korektors maina viļņu frontes fāzi tā, lai viļņu fronte kļūtu plakana. Pastāv dažādu veidu viļņu frontes korektori. Divi populārākie viļņu frontes korekcijas līdzekļu veidi ir deformējami spoguļi un telpiski gaismas modulatori. Deformējamie spoguļi sastāv no daudziem atsevišķiem segmentiem, no kuriem katrs var tikt bīdīts uz priekšu un atpakaļ, mainot viļņu frontes formu. Telpisko gaismas modulatoru darbības pamatā ir gaismas laušanas koeficienta maiņa šķidro kristālu matricā.

3. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

3.1. Vernjē (Vernier) asuma pētījumi

3.1.1. Ievads

Redzes sistēmai piemīt spēja sajuxt ļoti sīkus laužumus taisnās līnijās. Šo redzes sistēmas spēju sauc par Vernjē asumu [19, 20]. Vernjē asuma sliekšnis ir daudz mazāks nekā leņķiskais attālums starp blakusesošiem fotoreceptoriem, t.i., 30". Augsto Vernjē asumu nav iespējams izskaidrot ar klasiskajām redzes asuma teorijām – Releja (*Rayleigh*) kritēriju un fotoreceptoru teoriju. Vernjē asuma pamatā ir matemātiskas operācijas, kas tiek veiktas augstākos redzes sistēmas centros [21]. Vernjē asums ir maz atkarīgs no defokusa [22, 23] un gaismas izkliedes, turklāt ir zināms, ka acu kustības uzlabo Vernjē asumu perifērajā redzes laukā [24]. Vernjē asums ir maz atkarīgs no attēla izplūduma tāpēc, ka neatkarīgi no attēla izplūduma pakāpes līnijas atrašanās vieta vienmēr tiek aprēķināta, izmantojot daudzu fotoreceptoru signālus.

Pastāv hipotēze, ka, attēlam uz tiklenes kļūstot īpaši asam, noteikt līniju atrašanās vietu ir problemātiski, un tas var būt iemesls Vernjē asuma samazinājumam [25]. Promocijas darba gaitā šī hipotēze tika pārbaudīta, izmantojot adaptīvās optikas metodi. Pētījuma mērķis bija noskaidrot, vai Vernjē asums ir atkarīgs no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas apjoma.

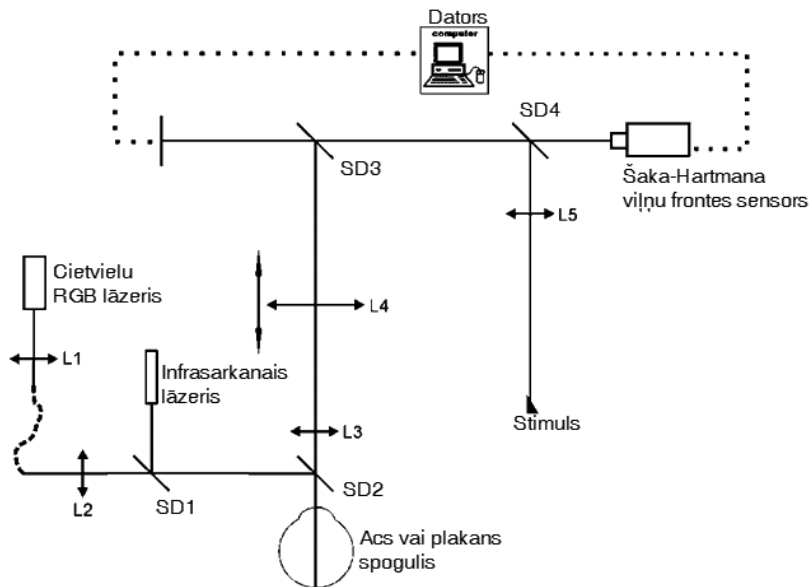
3.1.2. Eksperimentālā daļa

3.1.2.1. Optiskā sistēma

Vernjē asuma atkarība no acs augstāko kārtu aberāciju apjoma tika pētīta, izmantojot adaptīvās optikas sistēmu, kas shematiski redzama 3.1.2.1.1. attēlā. Adaptīvās optikas sistēmas un acs summāro aberāciju mērīšanai kā gaismas avots tika izmantots infrasarkanais lāzeris, kura viļņa garums $\lambda=850$ nm. Pēc atstarošanās no tiklenes staru kūlis tika izplests pa acs zilītes laukumu un virzīts ārā no acs. Optiskās sistēmas aberāciju mērīšanai acs vietā tika novietots plakans spogulis. Optiskās sistēmas nākamajā posmā, izmantojot Badāla (*Badal*) sistēmu, tika koriģēts defokuss. Badāla sistēma arī izpleta staru kūli pa deformējamā spoguļa laukumu. Tālāk staru kūlis atstarojās no deformējamā spoguļa un tika virzīts Šaka-Hartmana viļņu frontes sensorā. Optiskās sistēmas aberāciju mērīšanai tika izmantots kolimēts kūlis, kas tika radīts, fokusējot cietvielu lāzera izstarotu staru ($\lambda = 670$ nm) uz vienas modas polarizāciju uzturošās šķiedras galu, izmantojot lēcu L1, bet otru galu novietojot lēcas L2 fokusā.

Stimuls tika radīts uz minidispleja (*Liteye*). Minidisplejs tika novietots lēcas L5 fokālajā plaknē. No stimula nākošais staru kūlis atstarojās no deformējamā spoguļa un pēc izešanas caur Badāla sistēmu iegāja eksperimenta dalībnieka acī. Vienam minidispleja pikselim atbilda 20" liels leņķis, kas ievērojami pārsniedz

tipisko Vernjē asuma sliekšni, t.i., 5'' – 10''. Lai minidisplejs būtu izmantojams Vernjē asuma mērījumiem, abās pusēs stimulam tika novietoti tā saucamie flanke-ri, kas ievērojami paaugstina Vernjē asuma sliekšni [26].



3.1.2.1.1. attēls. Optiskā shēma Vernjē asuma mērīšanai. Optiskā sistēma sīkāk aprakstīta tekstā. L – lēcas; SD – stara dalītāji.

3.1.2.2. Aberāciju mērīšana un korekcija

Eksperimenta dalībnieki novietoja Badāla sistēmas lēcas vienu no otras tādā attālumā, lai defokusa vērtība būtu vismazākā un attēls būtu ass. Nākamajā posmā tika izmērītas acs un adaptīvās optikas sistēmas summārās augstāko kārtu aberācijas. Nākamajā posmā summārās augstāko kārtu aberācijas tika izkoriģētas, un pēc katras korekcijas reizes tika izmērītas atlikušās summārās augstāko kārtu aberācijas un reģistrētas deformējamā spoguļa elektrodiem pieliktās spriegumu vērtības.

Nākamajā posmā tika izmērītas adaptīvās optiskās sistēmas augstāko kārtu aberācijas. Adaptīvās optikas sistēmas aberācijas tika izmērītas, kolimētam kūlim atstarojoties no plakana spoguļa. Badāla sistēmas stāvoklis tika saglabāts tāds, kādu to bija izvēlējis eksperimenta dalībnieks. Pēc tam tika izkoriģētas adaptīvās optikas sistēmas augstāko kārtu aberācijas, un pēc katras korekcijas reizes tika izmērītas atlikušās sistēmas aberācijas un tika reģistrētas deformējamā spoguļa elektrodiem pieliktās spriegumu vērtības.

Izmantojot izmērītās elektrodiu spriegumu vērtības, eksperimenta laikā acs aberācijas tika koriģētas dažādā līmenī.

3.1.2.3. Psihofizikālā metode

Vernjē asuma mērīšanai tika izmantota konstanto stimulu metode. Stimulus sastāvēja no divām vertikālām taisnstūru malām, kas atradās viena virs otras. Apakšējā mala bija nekustīga, turpretim augšējā mala pārvietojās pa labi un pa kreisi. Stimulus tika aplūkots monokulāri ar labo aci. Eksperimenta dalībniekiem bija jāizlemj, vai kustīgā mala atrodas pa labi vai pa kreisi no nekustīgās malas. Pozitīvas atbildes gadījumā tika nospiests taustiņš „L”, un tika reģistrēta vērtība 1, pretējā gadījumā tika nospiests taustiņš „K”, un tika reģistrēta 0. Kustīgajai malai pavisam bija 21 iespējama pozīcija attiecībā pret nekustīgo malu. Katrā pozīcijā kustīgā mala tika rādīta pavisam 10 reizes. Kustīgās malas pozīcija tika izvēlēta nejauši. Katram acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmenim eksperiments tika atkārtots 10 reizes, un no visiem mērījumiem tika aprēķināta vidējā vērtība un standartklūda. Pavisam bija 11 acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņi robežās no 0 % līdz 100 %.

3.1.2.4. Datu analīze

Vernjē asuma mērījumu dati tika analizēti, aprēķinot katra eksperimenta dalībnieka psihometrisko funkciju. Uz x-ass tika atlikts spraugas platums loka sekundēs, savukārt uz y-ass skaitlis, kas parāda, cik reižu (no 10 reizēm) eksperimenta dalībnieks uzskatīja, ka kustīgā mala atrodas pa labi no nekustīgās malas. Iegūtie dati tika aproksimēti ar Bolcmaņa (*Boltzmann*) sigmoīdu, kas tika uzskatīta par patieso eksperimenta dalībnieka psihometrisko funkciju. Bolcmaņa sigmoīdu apraksta vienādojums:

$$f(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x - x_0}{\sigma}}} \quad (3.1.2.4.1.)$$

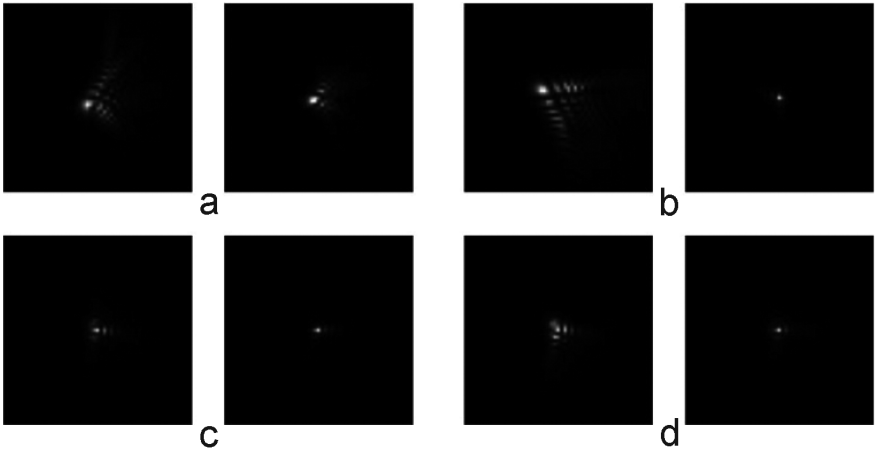
kur A_1 un A_2 – attiecīgi maksimālā un minimālā Bolcmaņa sigmoīdas vērtība, x_0 ir x vērtība, kam atbilst Bolcmaņa sigmoīdas vērtībai 50 % no maksimālās vērtības, σ – sigmoīdas pusplatums. Vernjē asuma pētījumā $A_1 = 10$ un $A_2 = 0$.

Vernjē asuma sliekšnis ir Bolcmaņa sigmoīdas parametrs sigma σ . Katram eksperimenta dalībniekam tika iegūts grafiks, kas parāda Vernjē asuma sliekšņa vidējās vērtības atkarību no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa.

3.1.3. Rezultāti

3.1.3.1. Acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas efektivitāte

3.1.3.1.1. attēlā redzama acs trešās un ceturtās kārtas aberācijām atbilstošās punkta izplūdes funkcijas sašaurināšanās pēc acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas visiem eksperimenta dalībniekiem.



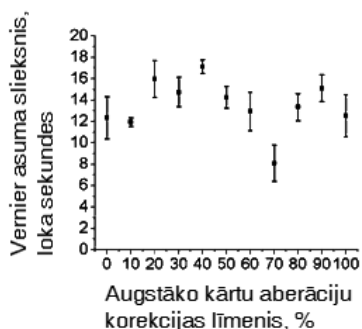
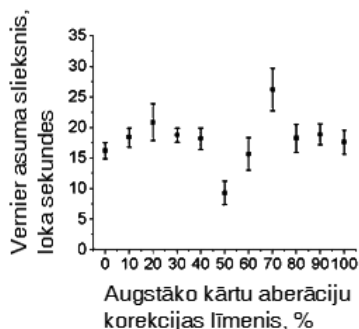
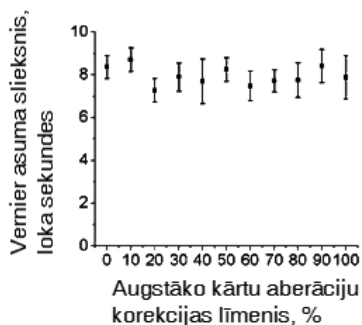
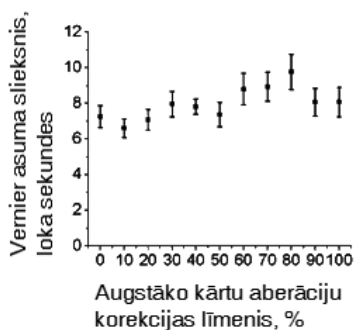
3.1.3.1.1. attēls. Trešās un ceturtais kārtas acs aberācijām atbilstošās punkta izplūdes funkcija visiem eksperimenta dalībniekiem ((a) – VK; (b) – AB; (c) – LE; (d) – IL) pirms augstāko kārtu aberāciju korekcijas un pēc tās. Punkta izplūdes funkcijas simulētas programmā Matlab.

3.1.3.2. Vernjē asuma atkarība no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa

3.1.3.2.1. attēlā redzamas Vernjē asuma sliekšņa izmaiņas atkarībā no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa visiem eksperimenta dalībniekiem. Katrs punkts ir 10 mērījumu vidējā vērtība. Kļūdu stabiņi ir standartkļūda, kas aprēķināta, izmantojot visu mērījumu datus. Trīs eksperimenta dalībnieku (VK, IL, LE) Vernjē asuma sliekšņa atkarībai no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas pakāpes tika novērots ekstrēma funkcijas raksturs, t.i., Vernjē asuma sliekšnis augsta un zema korekcijas līmeņa apgabalā bija zemāks (Vernjē asums augstāks), salīdzinot ar starpstāvokļiem. Katram no šiem trim eksperimenta dalībniekiem acs augstāko kārtu aberāciju RMS vērtības, kam atbilst visaugstākais Vernjē asuma sliekšnis, bija individuāls: VK: RMS = 0.048 μm ; LE: RMS = 0.065 μm ; IL: RMS = 0.039 μm .

3.1.4. Analīze

Punkta izplūdes funkcijas laukuma samazināšanās norāda uz to, ka pēc acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas ievērojami samazinās viena objekta punkta stimulēto fotoreceptoru skaits. Iegūtie rezultāti liecina, ka Vernjē asums ir atkarīgs no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa. Trim no četriem eksperimenta dalībniekiem Vernjē asums bija augstāks zema un augsta korekcijas līmeņa apgabalos, salīdzinot ar Vernjē asumu vidējas korekcijas apgabalā. Salīdzinoši augsts Vernjē asums zemas korekcijas līmeņa rajonā var tikt skaidrots ar daudzu tīklenes fotoreceptoru iesaistīšanu līnijas atrašanās vietas noteikšanā. Jāņem arī vērā, ka



3.1.3.2.1. attēls. Vernjē asuma sliekšņa atkarība no augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa. Uz x ass atlikts augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmenis procentos, uz y ass – Vernjē asuma sliekšnis loka sekundēs.

gadījumā, ja acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmenis ir zems, tad acs optiskai sistēmai piemīt defekti, kam redzes sistēma adaptējusies. Šādā gadījumā redzes sistēma spēj taisnas līnijas uztvert kā taisnas, un šajos apstākļos Vernjē asums var būt augsts. Augsta korekcijas līmeņa rajonā Vernjē asuma uzlabojums skaidrojams ar augstu attēla kontrastu un asumu, kas uzlabo redzes kvalitāti.

Vernjē asuma sliekšņa atkarība no acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeņa līdzinās redzes asuma atkarībai no zīlītes diametra. Ja acs zīlīte ir šaura, tad redzes asumu ierobežo difrakcija, turpretim platas zīlītes gadījumā to ierobežo acs aberācijas. Optimālais zīlītes izmērs ir aptuveni 3 mm, jo šajā gadījumā kopējais attēla kvalitātes pazeminājums difrakcijas un acs aberāciju dēļ ir vismazākais. Līdzīgā veidā Vernjē asums ir atkarīgs no neirālajiem un optiskajiem faktoriem.

Deformējamā spoģuļa maksimālā deformācijas amplitūda ir par mazu, lai pārkorģētu acs augstāko kārtu aberācijas un pētītu pārkorekcijas ietekmi uz Vernjē asumu. Iegūtie rezultāti liecina, ka līdz zināmai pārkorekcijas robežai Vernjē asums varētu uzlaboties, bet pēc tam atkal pazemināties.

3.2. Acs aberāciju ietekme uz binokulārās redzes uztveri

3.2.1. Ievads

Lielākā daļa redzes uztveres pētījumu, kuros analizēta acs optiskās kvalitātes ietekme uz redzes uztveri, veikti monokulāri. Acs aberācijas ietekmē ne tikai monokulāro, bet arī binokulāro redzi. Pētījumā [7] iegūtie rezultāti liecina, ka acs aberācijas būtiski ietekmē stereoredzi. Ir zināms, ka anizeikonija jeb uz tiklenes veidoto attēlu izmēru atšķirība ietekmē binokulārās redzes funkcijas. Lai redzes garozā būtu iespējama sensorā fūzija, abās acīs veidoto attēlu izmēram jābūt aptuveni vienādam. Anizeikonijai pārsniedzot 10 %, redzes sistēma abās acīs veidotos attēlus vairs nespēj sapludināt kopā [27]. Anizeikonija ir anizotropijas (liela refraktīvās kļūdas atšķirība starp abām acīm) korekcijas sekas. Abās acīs veidotie attēli nav sapludināmi arī gadījumā, ja vienas acs attēls ir ievērojami miglaināks nekā otras acs attēls. Šajā gadījumā redzes sistēma zemākās kvalitātes attēlu ignorē. Šo mehānismu sauc par supresiju.

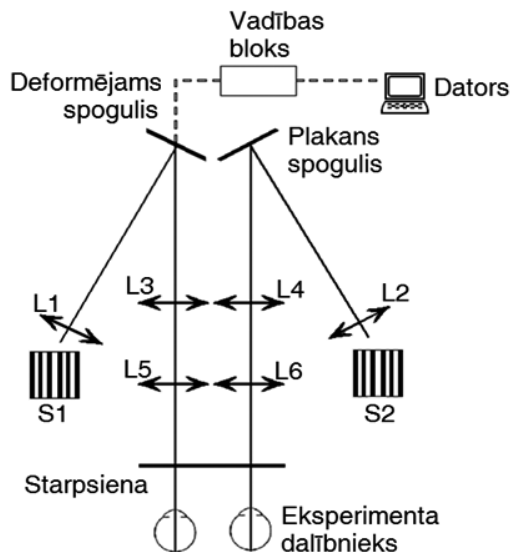
Acs aberāciju iespējams uz binokulāro redzi ir īpaši svarīgs, valkājot progresīvās brilles. Progresīvās brilles nodrošina skaidru redzi jebkādā attālumā. Tās piemērotas cilvēkiem pēc aptuveni 40 gadu vecuma. Skatoties sāniski caur progresīvajām brillēm, abas acis skatās caur zonām, kurām piemīt dažādas aberācijas, kuru apjoms atšķiras. Progresīvo brillu virsma ir sarežģīta, un augsta redzes kvalitāte tiek nodrošināta vienīgi lēcas koridorā, turpretim lēcas malās attēlus izkropļo aberācijas strauji mainīgā virsmas liekuma dēļ. Progresīvo brillu valkāšanas sākumposmā apkārtējie objekti tiek uztverti miglaini un izliekušies. Pēc noteikta adaptācijas perioda miglaini uztvertie objekti kļūst skaidri, un taisnas līnijas tiek uztvertas kā taisnas.

Promocijas darbā veiktā pētījuma mērķis bija dažādu aberāciju gadījumā novērtēt RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšni, kas jāpārsniedz, lai abās acīs veidotos attēlus redzes sistēma nespētu savienot. Šis pētījums ir aktuāls progresīvo brillu izstrādē, jo izstrādes gaitā jāievēro maksimālā pieļaujamā atšķirība starp abu acu attēliem tā, lai netiktu sajūstas abu attēlu atšķirības.

3.2.2. Eksperimentālā daļa

3.2.2.1. Optiskā sistēma

Eksperimentā izmantotā optiskā sistēma shematiski redzama 3.2.2.1.1. attēlā. Optiskās sistēmas pamatā ir divi atsevišķi optiskie ceļi – viens labajai acij, otrs kreisajai acij. Stimuli S1 un S2 bija novietoti asfērisku lēcu L1 un L2 fokusā. Stimuli tika rādīti dihoptiski, t. i., katra acs redzēja savu stimulu. Režģus no aizmugures apgaismoja augstas intensitātes sarkana gaismu emitējoša diode. Melnas svītras uz sarkana fona tika izvēlētas, lai mazinātu hromatiskās aberācijas efektus. Pēc lūšanas lēcā kreisās acs optiskajā ceļā stari atstarojās no deformējama, bet labās acs optiskajā ceļā no plakana spoguļa. Badāla sistēmas (lēcas L3, L4, L5 un L6) saspieda deformējamā un plakana spoguļa laukumu līdz acs zilītes izmēram un izkorigēja defokusu. Starpsiena ar atverēm nodrošināja to, ka katra acs redz tikai savu stimulu.

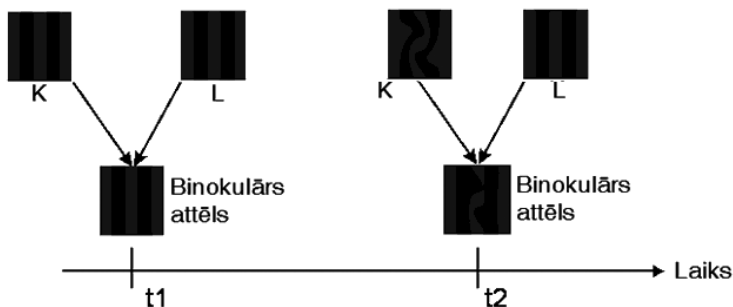


3.2.2.1.1. attēls. Optiskā shēma binokulārās redzes uztveres pētījumiem. Optiskā sistēma sīkāk aprakstīta tekstā. L – lēca, S – stimul.

3.2.2.2. Psihofizikālā metode

Lai izpētītu dažādu aberāciju ietekmi uz binokulārās redzes uztveri, tika izmantota konstanto stimulu metode. Binokulārās redzes pētījumiem tika izraudzītas šādas aberācijas: slīpais astigmātisms c_2^{-2} ; vertikālā koma c_3^{-1} ; horizontālā trīslapiņu aberācija c_3^3 un sfēriskā aberācija c_4^0 . Eksperimenta gaitā redzama 3.2.2.2.1. attēlā. Laika brīdī t_1 katrai acij tika rādīts taisnstūra veida režģis. Šajā brīdī deformējamais spogulis bija plakans. Laika brīdī t_2 kreisās acs attēlu izkropļoja noteikta veida aberācija, kuras apjoms tika brīvi izvēlēts, turpretim labās acs uztvertā attēla kvalitāte netika mainīta. Laika brīdī t_1 abi attēli bija līdzīgi, un smadzenes tos spēja pilnībā apvienot vienā attēlā. Labajā acī veidotā attēla kropļojumu lielumam laika brīdī t_2 pārsniedzot noteiktu sliekšni, tika pamanītas laika brīžos t_1 un t_2 uztverto binokulāro attēlu atšķirības.

Visiem eksperimenta dalībniekiem katras minētās aberācijas gadījumā tika noteikts RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšnis, kas jāpārsniedz, lai laika brīžos t_1 un t_2 starp binokulāri uztvertajiem attēliem tiktu pamanīta atšķirība. Katram aberācijas veidam pavisam bija 11 RMS vērtības līmeņi, un katra aberāciju līmeņa gadījumā attēli bija jāsalīdzina 10 reizes. Eksperimenta dalībnieka uzdevums bija atbildēt uz jautājumu, vai laika brīdī t_2 binokulārais attēls atšķiras no binokulārā attēla laika brīdī t_1 . Eksperiments tika veikts tumsā, lai novērstu citu redzes laukā esošu objektu ietekmi uz eksperimenta gaitu.



3.2.2.2.1. attēls. Stimuli un to rādīšanas secība binokulārās redzes uztveres pētījumam.

Laika brīdī t_1 abās acīs veidotie attēli (K – kreisās acs attēls, L – labās acs attēls) bija vienādi. Smadzenes abus attēlus sapludināja, un tie abi kopā tika uztverti kā binokulārs attēls. Laika brīdī t_2 labā acs redzēja to pašu attēlu, savukārt kreisās acs attēls izkropļots ar aberācijām. Eksperimenta dalībnieka uzdevums bija pateikt, vai starp binokulāri uztvertajiem attēliem laika brīžos t_1 un t_2 bija novērojama atšķirība.

3.2.2.3. Datu analīze

Iegūtie dati tika attēloti grafikā, kurā uz vertikālās ass atlikts skaitlis, kas parāda, cik reīzu eksperimenta dalībnieks apliecināja, ka abu attēlu atšķirību pamanīja. Uz x ass atlikti procenti no maksimālās viļņu frontes RMS vērtības. Iegūtie dati tika aproksimēti ar Bolcmaņa sigmoīdu, kas tika uzskatīta par eksperimenta dalībnieka psihometrisko funkciju. Bolcmaņa sigmoīdu apraksta vienādojums:

$$f(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{-\frac{x - x_0}{\sigma}}} \quad (3.2.2.3.1.)$$

kur A_1 un A_2 – attiecīgi maksimālā un minimālā Bolcmaņa sigmoīdas vērtība, x_0 ir x vērtība, kam atbilst Bolcmaņa sigmoīdas vērtībai 50 % no maksimālās vērtības, σ – sigmoīdas pusplatums. Redzes sistēmas adaptācijas pētījumā $A_1 = 10$ un $A_2 = 0$.

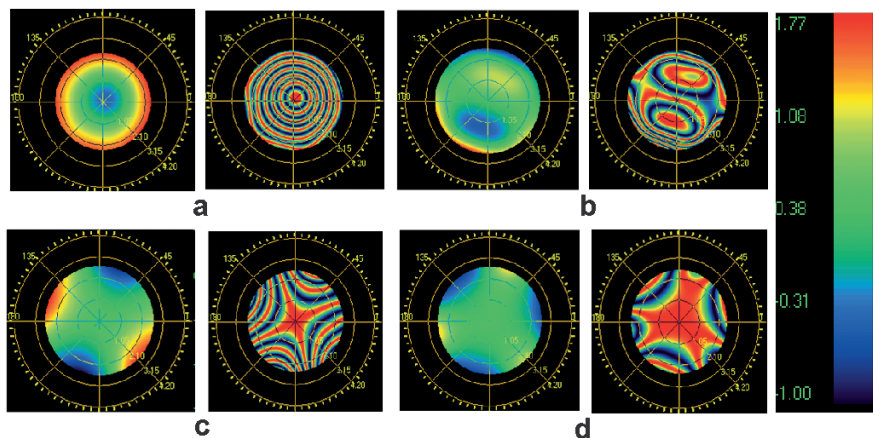
Par RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšņa vērtību tika uzskatīta RMS vērtība, kam atbilstošā psihometriskās funkcijas vērtība bija 50 % no maksimālās vērtības, t.i., vērtība x_0 . Sliekšnis tika izmērīts dažādu veidu aberāciju (slīpais astigmātisms c_2^{-2} ; vertikālā koma c_3^{-1} ; horizontālā trislapiņu aberācija c_3^3 un sfēriskā aberācija c_4^0) gadījumā.

3.2.3. Rezultāti

3.2.3.1. Aberāciju ģenerēšana

Ģenerēto aberāciju viļņu frontes un tām atbilstošās interferogrammas redzamas 3.2.3.1.1. attēlā. Ģenerēto aberāciju Zernikes koeficientu vērtības ir šādas: sfēriskai aberācijai c_4^0 RMS = 0.7 μm , vertikālāi komai c_3^{-1} RMS = 0.43 μm , slīpajam astigmātismam c_2^{-2} RMS = 0.56 μm un horizontālāi trislapiņu aberācijai c_3^3 RMS = 0.23 μm .

Šis aberāciju apjoms ir lielākais, ko iespējams ģenerēt ar deformējamo spoguļi. Viļņu frontes deformācijas lielums katrā viļņu frontes punktā nosakāms, izmantojot krāsu skalu attēla labajā pusē. Aberācijas mērītas zīlītes platumam 5 mm, izmantojot Šaka-Hartmana viļņu frontes sensoru.



3.2.3.1.1. attēls. Ar deformējamo spoguļi ģenerētās viļņu frontes un tām atbilstošās interferogrammas. (a) sfēriskā aberācija; (b) vertikālā koma; (c) slīpais astigmātisms; (d) horizontālā trislapiņu aberācija. Viļņu frontes deformācija mikrometros nosakāma, izmantojot krāsu skalu attēla labajā pusē.

3.2.3.2. RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšnis

3.2.3.2.1. tabulā apkopoti RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšņi katra veida aberācijas gadījumā. Šis sliekšnis jāpārsniedz, lai būtu sajūtamas abu binokulāri uztverto attēlu atšķirības. Sliekšņa vērtības aprēķinātas kā 15 eksperimenta dalībnieku datu vidējā vērtība. Norādīta arī standartkļūda.

3.2.3.2.1. tabula. RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšņi dažāda veida aberācijām.

Aberācijas veids	Dihoptisku attēlu atšķiršanas sliekšnis RMS, μm
Astigmātisms	0.154 ± 0.010
Sfēriskā aberācija	0.204 ± 0.014
Koma	0.126 ± 0.008
Trislapiņu aberācija	0.105 ± 0.007

3.2.4. Analīze

3.2.3.2.1. tabulā redzams, ka dažādu aberāciju gadījumā RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšnis ir atšķirīgs. Visaugstākais RMS vērtības intraokulārās atšķirības sliekšnis ir sfēriskās aberācijas gadījumā, turpretim viszemākais tas ir

trīslapiņu aberācijas gadījumā. Sliekšņu atšķirības dažādu aberāciju gadījumā var tikt skaidrotas, pamatojoties uz binokulārās redzes sistēmas adaptāciju šo aberāciju radītajam apmīglojumam.

Kā minēts iepriekš, redzes uztverē liela nozīme ir ne tikai aberāciju veidam un apjomam, bet arī redzes sistēmas adaptācijas procesiem [10, 11]. Pētījumos [10, 11] redzes sistēmas adaptācija acs optiskajai kvalitātei analizēta monokulāri. Promocijas darbā veiktajā pētījumā iegūtie rezultāti norāda uz adaptācijas procesu nozīmi binokulārās redzes uztverē. Adaptācijas procesu nozīmību binokulārās redzes uztverē apstiprina pētījumā [28] iegūtie rezultāti. Pētījuma [28] autori novēroja, ka, binokulāri adaptējoties izplūdušam vai asam attēlam noteiktu laika periodu, mainās uztvertā attēla asums.

Tas, cik lielā mērā binokulārās redzes sistēma ir adaptējusies noteikta veida aberācijas radītajam apmīglojumam, ir atkarīgs no viņu frontes simetrijas un apjoma. Tā kā cilvēka radzene ir sfēriska, tai raksturīga sfēriskā aberācija. Tā kā sfēriskās aberācijas viņu fronte ir simetriska, tad cilvēks šai aberācijai dzīves laikā ir būtiski adaptējies. Adaptācijas dēļ nepieciešams lielāks sfēriskās aberācijas apjoms, lai eksperimenta dalībnieks justu binokulārā attēla izmaiņu atšķirības. Acī pastāv optimālais sfēriskās aberācijas līmenis, t. i., redzes funkcijas sasniedz augstāko līmeni noteikta sfēriskās aberācijas līmeņa gadījumā [29]. Citām acs aberācijām (piemēram, komai) ir asimetriskas punkta izplūdes funkcijas, un līdz ar to nepieciešama mazāka šo aberāciju RMS vērtības intraokulārā atšķirība, lai attēlu atšķirības kļūtu pamanāmas. Rezultātus interpretējot, jāņem vērā, ka acs aberācijas netika koriģētas, un tās summējās ar deformējamā spoguļa radītajām aberācijām. Tomēr šie efekti bija mazi, jo zīlītes izmērs bija 5 mm, un šāda zīlītes izmēra gadījumā acs augstāko kārtu aberāciju apjoms ir mazs.

Iegūtie rezultāti ir izmantojami, izgatavojot progresīvās brilles. Izgatavošanas procesā jāpievērš uzmanība, lai aberāciju apjoma atšķirība starp abu lēcu zonām, caur kurām vienlaicīgi skatās cilvēks, nepārsniegtu promocijas darbā izmērītos lielumus. Iegūtie rezultāti būtu pielietojami arī jaunu testu izstrādei binokulāro redzes funkciju novērtēšanai.

3.3. Krāsu piesātinājuma adaptācijas pētījumi

3.3.1. Ievads

Sensorā adaptācija ir visu sensoro sistēmu, tajā skaitā, arī redzes sistēmas īpašība. Sensorās adaptācijas gaitā receptoru jutības sliksnis mainās atbilstoši stimula intensitātei [30, 31, 32, 33]. Saistība starp sensorās sistēmas atbildi uz stimulu un stimula intensitāti var būt sarežģīta, un to nosaka katras apakšsistēmas atbilde. Redzes sistēmas adaptācija iedalāma vairākās apakšklasēs – gaismas adaptācija, hromatiskā adaptācija, kontrasta adaptācija u. c. Hromatiskā adaptācija ir īpašs gaismas adaptācijas veids, un tā ietekmē krāsu redzi [34]. Hromatiskās adaptācijas pamats ir katras fotoreceptoru klases jutības regulācija atbilstoši

gaismas intensitātei. Fotoreceptoru jutība tiek regulēta, kontrolējot atbildes pastiprinājumu. Pastiprinājuma kontrole ir nelineāra, un to apraksta Mihaelisa-Mentena (*Michaelis-Menten*) vienādojums un Von Kriesa (*Von-Kries*) modelis [35, 36, 37]. Divu krāsu redzes efektu – Bezolda-Brikes (*Bezold-Brucke*) un Abnija (*Abney*) efekta pamats ir krāsu redzes sistēmas nelinearitāte.

Ir ļoti maz pētījumu, kuros pētīta hromatiskās adaptācijas ietekme uz krāsu tīrības uztveri. Krāsu tīrība ir subjektīvs jēdziens, un tā tiek definēta kā cilvēka uztvertais krāsas piesātinājums, t.i., krāsas tīrības un piesātinājuma būtība ir viena un tā pati, turpretim tīrība ir saistīta ar cilvēka uztveri, bet piesātinājums ir objektīvs jēdziens. Promocijas darbā pievērsta uzmanībai krāsu tīrības atkarībai no hromatiskās adaptācijas. Lai novērstu iespēju, ka eksperimenta dalībnieks jauc krāsas un tās tīrības maiņu, adaptācijas stimula un testa stimula krāsu koordinātas mainījās tā, ka CIE diagrammā tās vienmēr atradās uz nogriežņa, kas savieno baltā punkta koordinātas ar sarkanā pikseļa koordinātām. Tā kā testa un adaptācijas stimuls savā starpā atšķirās tikai ar piesātinājumu, hromatiskā adaptācija tika saukta par piesātinājuma adaptāciju. Kā piesātinājuma mērs tika izvēlēts baltā punkta koordinātas un stimula krāsu koordinātas savienošā nogriežņa garums CIE diagrammā. Piesātinājums tika izteikts procentos no visgarākā nogriežņa, t.i., nogriežņa, kas savieno baltā punkta koordinātas un sarkanā pikseļa krāsu koordinātas.

Promocijas darbā salīdzināta divu stimulu (atskaites stimula un pieskaņojamā stimula) krāsu tīrības atkarība no hromatiskās adaptācijas stāvokļa. Visos adaptācijas stāvokļos tika meklēts subjektīvā līdzsvara punkts, kurā eksperimenta dalībnieks testa un adaptācijas stimula krāsu uztver vienādi tīru, un tika izteikta hipotēze, ka piesātinājuma adaptācijas process ir nelineārs līdzīgi kā Bezolda-Brikes un Abnija efekts. Promocijas darbā tika mērīta piesātinājuma adaptācijas atkarība no laika, kā arī tika analizēts, kurā redzes sistēmas limenī norisinās ar piesātinājuma adaptāciju saistīti procesi.

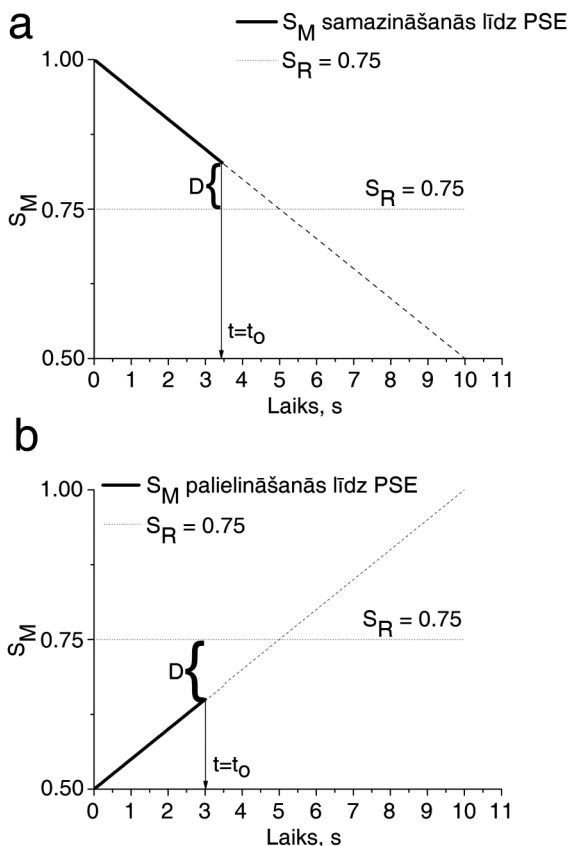
3.3.2. Eksperimentālā daļa

3.3.2.1. Psihofizikālā metode

3.3.2.1.1. Pieskaņošanas metode

Eksperimenta laikā dalībnieki skatījās uz mazu, baltu punktiņu datora ekrānā. Pirmās 10 sekundes ekrāns bija tukšs. Pēc tam ekrānā tika parādīts atskaites stimuls un pieskaņojamais stimuls. Atskaites stimula piesātinājums S_R bija nemainīgs. Pieskaņojamā stimula piesātinājums S_M laikā vai nu samazinājās no 1 līdz 0.5, vai arī palielinājās no 0.5 līdz 1. Piesātinājuma maiņas ātrums bija 0.05/s (skat. 3.3.2.1.1.1. attēlu). Laika brīdī $t = t_0$ eksperimenta dalībnieks bija sasniedzis subjektīvā līdzsvara punktu (SLP). SLP tika definēta starpība

$$D = S_R - S_M \quad (3.3.2.1.1.1.)$$



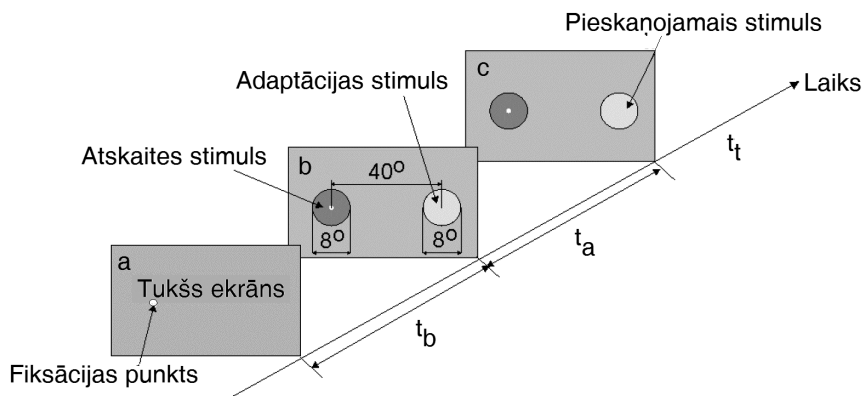
3.3.2.1.1.1. attēls. Pieskaņošanas metode. Laika brīdī $t = 0$ pieskaņojamā stimula piesātinājums SM sāka vai nu samazināties (a) vai arī palielināties (b). Atskaites stimula S_R bija nemainīgs.

Eksperiments, izmantojot pieskaņošanas metodi, tika veikts S_R vērtībām no 0.7 līdz 0.95 (solis 0.05). Katrai S_R vērtībai eksperiments tika atkārtots 10 reizes.

3.3.2.1.2. Konstanto stimulu metode

Lai noteiktu, kā piesātinājuma adaptācija ir atkarīga no laika, tika izmantota konstanto stimulu metode. Eksperimenta dalībnieks visa eksperimenta laikā skatījās uz baltu punktiņu. Eksperimentam bija 3 atsevišķas fāzes (skat. 3.3.2.1.2.1. attēlu): 1) tukšs ekrāns t_b , 2) adaptācijas fāze t_a , 3) eksperimentālā fāze t_e . Tukšs ekrāns tika rādīts $t_b = 10$ sekundes. Adaptācijas fāzes laikā eksperimenta dalībnieks redzēja atskaites stimulu ($S_R = 0.75$) un adaptācijas stimulu ($S_M = 0.5$). Adaptācijas fāzes ilgums mainījās no 0.25 s līdz 1.25 s (solis 0.25 s). Pēc adaptācijas fāzes sākās

eksperimentālā fāzē. Eksperimentālā fāzē sākās ar skaļu skaņas signālu. Eksperimentālās fāzes laikā eksperimenta dalībnieks redzēja atskaites stimulu ($S_R = 0.75$) un pieskaņojamo stimulu. Eksperimentālās fāzes laikā S_M mainījās robežās no 0.5 līdz 1 (solis 1/36). Eksperimentālās fāzes sākumā eksperimenta dalībniekam bija jāatbild, vai pieskaņojamā stimula krāsa izskatās tīrāka nekā atskaites stimula krāsa. Izmantojot iegūtos datus, katram eksperimenta dalībniekam tika izmērīta psihometriskā funkcija, un subjektīvā līdzsvara punktā tika aprēķināta starpība $D = S_R - S_M$.



3.3.2.1.2.1. attēls. Fāžu secība konstanto stimulu metodes eksperimentā. (a) – tukšs ekrāns (ilgums $t_b = 10$ s); (b) – adaptācijas fāze; (c) – eksperimentālā fāze.

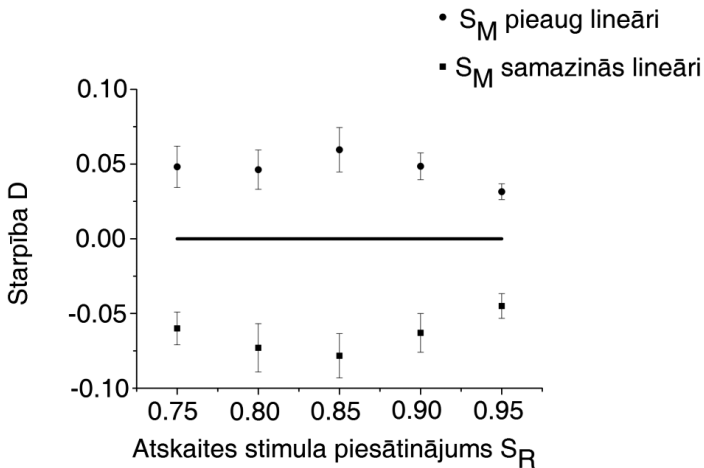
3.3.2.2. Stimuli

Abās psihofizikālajās metodēs tika lietots atskaites stimuls un pieskaņojamais stimuls. Abu stimulu krāsa bija vienmērīga visā stimulu laukumā. Katra stimula leņķiskais diametrs bija 8° , skatoties no 40 cm attāluma. Leņķiskais attālums starp stimulu centriem bija 40° . Stimuli tika aplūkoti uz melna fona, un eksperimenta dalībniekam bija jāskatās uz mazu, baltu punktiņu atskaites stimula centrā. Eksperimenta dalībnieks adaptējās dažādos apstākļos, t.i., atskaites stimuls bija vairāk vai mazāk piesātināts salīdzinājumā ar pieskaņojamo stimulu. Vienā no eksperimentiem atskaites stimulum bija nemainīgs piesātinājums, turpretim pieskaņojamā stimula piesātinājums mainījās lineāri. Otrajā eksperimentā abu stimulu piesātinājums adaptācijas fāzes laikā bija nemainīgs, turpretim adaptācijas fāzes ilgums mainījās. Eksperimentu laikā abu stimulu hromatiskās koordinātas mainījās tā, ka CIE diagrammā stimuli atradās uz nogriežņa, kas savieno sarkano pikseli un balto punktu. Atskaites stimula un pieskaņojamā stimula spožums visā eksperimenta gaitā bija $Y = 40 \text{ cd/m}^2$. Telpas apgaismojums bija 20 lx tā, lai apkārtnie objekti nenovērstu eksperimenta dalībnieka uzmanību.

3.3.3. Rezultāti

3.3.3.1. Pieskaņošanas metode

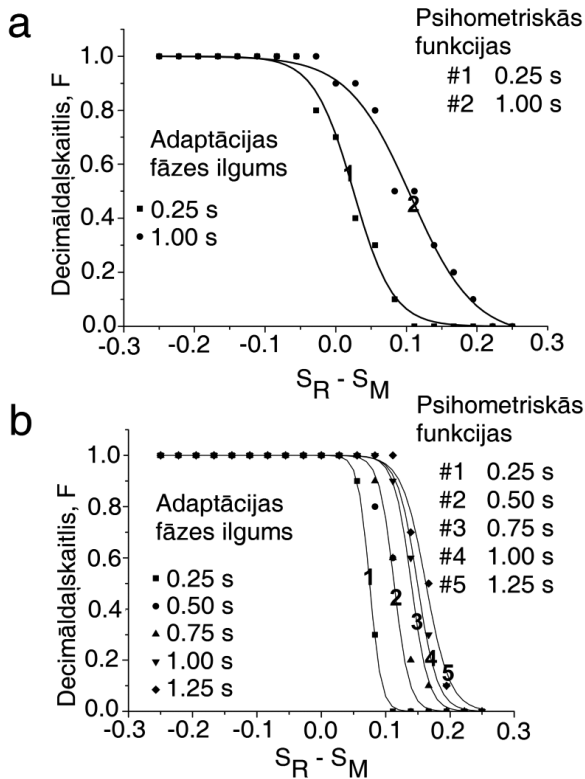
Starpības D atkarība no atskaites stimula piesātinājuma S_R abu pieskaņošanas virzienu gadījumā (S_M pieaug vai samazinās) redzama 3.3.3.1.1. attēlā. Melnie aplīši rāda rezultātus, kas iegūti gadījumā, ja pieskaņojamā stimula piesātinājums S_M pieaug no 0.5 līdz 1, turpetim melnie kvadrātiņi rāda rezultātus gadījumā, ja S_M samazinās no 1 līdz 0.5. Uz x ass atlikts atskaites stimula piesātinājums S_R . Visām S_R vērtībām starp S_M vērtībām bija atšķirība, saskaņojot abu stimulu krāsu tīrību no abām pusēm. Kļūdu stabiņi ir mērījumu standartkļūda.



3.3.3.1.1. attēls. Sakarība starp starpību D un atskaites stimula piesātinājumu S_R subjektīvā līdzsvara punktā. Riņķīši rāda datus, kas iegūti, S_M pieaugot no 0.5 līdz 1. Kvadrātiņi rāda datus, kas iegūti, pieskaņojamā stimula piesātinājumam S_M samazinoties no 1 līdz 0.5.

3.3.3.2. Konstanto stimulu metode

Iegūtie dati tika aproksimēti ar Bolcmaņa sigmoīdu. Analizējot datus, tika uzskatīts, ka Bolcmaņa sigmoīda ir eksperimenta dalībnieka patiesā psihometriskā funkcija. Sigmoīdas ir 3.3.3.2.1. attēlā redzamās nepārtrauktās līknes. Uz y ass atlikts decimālskaitlis F, kas parāda, cik reižu (no 10) pieskaņojamais stimuls izskatījās vairāk piesātināts nekā atskaites stimuls. Uz x ass atlikta starpība $D = S_M - S_R$. Subjektīvā līdzsvara punktā psihometriskās funkcijas vērtība ir 50 % no maksimālās vērtības, un šajā punktā iespējams nolasīt no x ass atbilstošo starpības D vērtību.

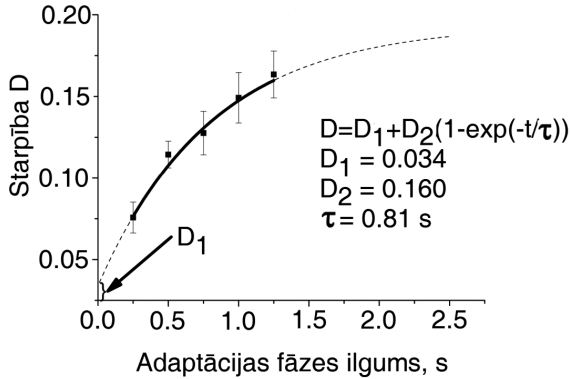


3.3.3.2.1. attēls. Psihometriskās funkcijas, kas izmērītas konstanto stimulu metodes eksperimentā. Adaptācijas fāzes ilgums mainījās – attēla daļā (a) redzamas visu piecu eksperimenta dalībnieku vidējās psihometriskās funkcijas, adaptācijas fāzes ilgumam 0.25 s un 1 s; attēla daļā (b) redzamas eksperimenta dalībniekam (VK) iegūtās psihometriskās funkcijas, adaptācijas fāzes ilgumam mainoties no 0.2 s līdz 1.25 s (solis 0.25 s).

3.3.3.2.1. (a) attēlā redzama vidējā psihometriskā funkciju nobīde visā eksperimenta dalībnieku grupā. 3.3.3.2.1. (b) attēlā redzama psihometriskā funkciju nobīde eksperimenta dalībniekam VK. Visiem eksperimenta dalībniekiem dati tika iegūti tikai adaptācijas fāzes ilgumam 0.25 s un 1 s. Eksperimenta dalībniekam VK eksperiments tika veikts adaptācijas fāzes ilgumam no 0.25 s līdz 1.25 s (solis 0.25 s). 3.3.3.2.2. attēlā redzama atšķirības D vērtība subjektīvā līdzsvara punktā atkarībā no adaptācijas fāzes ilguma. Sakarība starp starpību D un adaptācijas fāzes ilgumu tika aproksimēta ar eksponenciālās augšanas funkciju, ko apraksta vienādojums:

$$D = D_1 + D_2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.3.3.2.1.)$$

kur D_1 un D_2 ir konstantes, τ piesātinājuma adaptācijas laika atkarības pusdzīves laiks. Promocijas darba gaitā veiktajā pētījumā tika iegūts pusdzīves laiks $\tau = 0.81$ s.



3.3.3.2.2. attēls. Starpības $D = SR - SM = 0.75 - SM$ atkarība no adaptācijas fāzes ilguma. Nepārtrauktā līnija ir eksponenciālā funkcija, ar ko aproksimēti dati. Funkcijas vērtības parādītas intervālā no īsākās līdz garākajai adaptācijas fāzei. Pārtrauktā līnija ir eksponenciālās funkcijas turpinājums ārpus pētītā adaptācijas fāzes ilguma.

3.3.4. Analīze

Pieskaņošanas metodes eksperimentā tika novērota starpības D histerēze. Histerēzes cēlonis ir dažādi hromatiskās adaptācijas apstākļi, mainot pieskaņojamā stimula piesātinājumu no vienas vai otras puses. Kā redzams attēlā, histerēzi nav iespējams aproksimēt ar noteiktu funkciju, tomēr tā ir novērojama visām S_R vērtībām.

Piesātinājuma adaptācijas laika atkarība tika mērīta, analizējot starpības D atkarību no adaptācijas fāzes ilguma. Starpības D atkarība no adaptācijas fāzes ilguma bija aproksimējama ar eksponenciālās augšanas funkciju, kas izmantota pētījumā [38], lai aprakstītu enzīmu kinētiku. Tā kā atkarība bija aproksimējama ar eksponenciālu funkciju, iespējams izteikt hipotēzi, ka piesātinājuma adaptācijas procesi ir saistīti ar enzimatiskām reakcijām fotoreceptoros. Fototransdukcijas kaskādes ķēde ir pārāk sarežģīta, lai tajā būtu iespējams identificēt specifiskas reakcijas, kas ir eksponenciālās atkarības iemesls, pie tam eksponenciālās atkarības iemesli var būt arī procesi citos redzes sistēmas posmos. Lai izpētītu eksponenciālās atkarības iemeslus, jāveic papildu eksperimenti. Tā kā kalcijs (Ca) ir ļoti nozīmīgs elements adaptācijas procesos, ir pamats eksponenciālo atkarību saistīt ar diviem enzimatiskajiem pamatprocesiem, kas kontrolē Ca kanālu ($cGMP$ kanāli) atvēršanos un aizvēršanos. Viens no šiem procesiem ir $cGMP$ rašanās GTP hidrolīzes procesā. Šo procesu nodrošina guanilciclāze. Otrs process ir GMP rašanās no $cGMP$. Šo procesu nodrošina fosfodiesterāze [33, 39].

Hromatiskās adaptācijas atkarība no laika mērīta jau iepriekš. Pētījumā [40] analizēts, kā adaptēšanās krāsainam fonam ietekmē krāsu uztveri un izšķirtspēju.

Pētījuma [40] autori grafiski attēloja adaptācijas stāvokļa (izteikts %) atkarību no laika, kas pagājis kopš stimula parādīšanās. Gan krāsu uztveres, gan krāsu izšķirtspējas gadījumā laika atkarībai bija izšķirami trīs komponenti, no kuriem katram bija atšķirīgs pusdzīves laiks. Dažādi pusdzīves laiki norāda uz to, ka hromatiskās adaptācijas procesi norisinās dažādos redzes sistēmas līmeņos un ka redzes sistēma nevar tikt uzskatīta par vienu sistēmu. Redzes sistēma iedalāma vairākos apakšposmos, no kuriem katram ir savs pusdzīves laiks hromatiskās adaptācijas procesā. Pētījuma [40] autori uzskatīja, ka ilgākais pusdzīves laiks (aptuveni 20 s) saistīts ar procesiem tīklenē, laterālajos ceļgalveida ķermeņos vai garozas līmeņu sākumposmā. Daudz īsāks pusdzīves laiks (40 ms – 70 ms) varētu būt saistīts ar procesiem fotoreceptoros, turpretim trešais komponents, kura pusdzīves laiks ir aptuveni 10 ms, varētu būt saistīts ar redzes garozas procesiem [40]. Promocijas darbā gaitā veiktajā pētījumā iegūtais pusdzīves laiks $\tau = 0.81$ s ir ievērojami garāks nekā 10 ms, bet ievērojami īsāks nekā 20 s. Pusdzīves laiks $\tau = 0.81$ s vistuvāk ir vērtībai 40 ms – 70 ms, un līdz ar to var izteikt hipotēzi, ka ar eksponenciālo atkarību saistītie procesi atrodas fotoreceptoros.

Hromatiskās adaptācijas laika atkarības analīzētās arī pētījumā [41]. Pētījumā [41] eksperimenta dalībnieks adaptējās dažādiem gaismas avotiem: D65, A, D90 and GRN, kas mainījās ik pēc noteikta laika perioda. Katrā adaptācijas stāvoklī eksperimenta dalībniekam bija jāmaina stimula krāsa tā, lai tas izskatītos ahromātisks. Grafikā tika attēlota krāsu koordinātu izmaiņu atkarība no adaptācijas fāzes ilguma. Iegūtā atkarība bija ļoti aproksimējama kā divu eksponenciālu funkciju summa. Vienai no funkcijām pusdzīves laiks bija aptuveni 1 s, savukārt otrai – 40 s – 50 s. Pētījuma [41] autori secināja, ka abu komponentu mehānismi, iespējams, atrodas tīklenē. Promocijas darbā iegūtā pusdzīves laika vērtība $\tau = 0.81$ s ir ļoti tuva pusdzīves laika vērtībai $\tau = 1$ s, ko ieguva pētījuma [41] autori. Tas liecina, ka piesātinājuma adaptācijas eksponenciālā atkarība no laika varētu būt saistīta ar tīklenes procesiem.

3.4. Asinsvadu redzamā diametra atkarība no acs aberācijām

3.4.1. Ievads

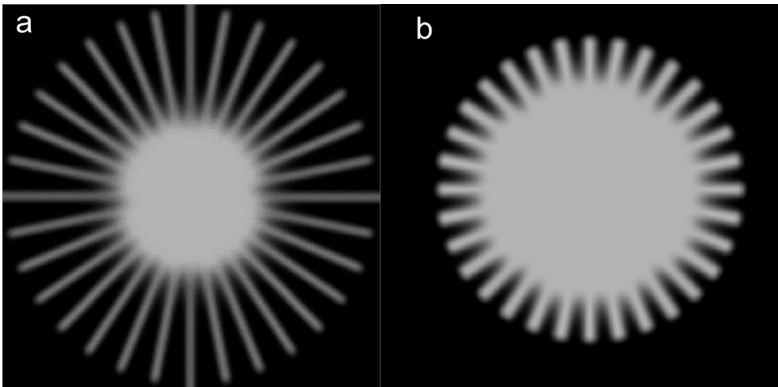
Ir maz pētījumu, kuros analizēts, kā acs optiskā kvalitāte ietekmē tīklenes lielmēroga struktūru – redzes nerva diska, tīklenes asinsvadu, nervu u. c. redzamo formu. Promocijas darbā pievērsta uzmanību acs aberāciju ietekmei uz tīklenes asinsvadu redzamo diametru (turpmāk tekstā – diametru), kas acs aberāciju dēļ var atšķirties no patiesā diametra. Oftalmoloģijā asinsvadu diametrs ir svarīgs parametrs, jo tas ietekmē artēriju/vēnu diametra attiecību jeb A/V attiecību. A/V attiecība tiek novērtēta ikreiz, kad pacients apmeklē oftalmologu. Normāli A/V attiecība ir robežās starp 2/3 un 4/5. A/V attiecība tiek novērtēta, zīlītei esot paplašinātai. Šādā stāvoklī acī ir ievērojams apjoms aberāciju, un tas var ietekmēt A/V attiecību. A/V attiecība var atšķirties no normālās vērtības gan redzes sistēmas patoloģiju gadījumos, gan arī vispārēju organisma slimību gadījumā.

Promocijas darbā izteikta un pārbaudīta hipotēze, ka aberāciju dēļ A/V attiecība var tikt novērtēta par zemu vai par augstu, kā arī var palikt nepamanītas dažādas patoloģijas, kas rada A/V attiecības izmaiņas.

3.4.2. Eksperimentālā daļa

3.4.2.1. Aberāciju simulācija staru figūrā

Lai novērtētu dažādu aberāciju ietekmi uz līnijas platuma pieaugumu, tika izmantota tā saucamā staru figūra. Stari ar Gausa (*Gaussian*) profilu un platumu 13 un 22 pikseļi pusaugstumā tika orientēti 16 dažādos virzienos (skat. 3.4.2.1.1. attēlu.). Stari bija ahromātiski (RGB = 128,128,128), un tie tika rādīti uz melna fona (RGB = 0,0,0). Vertikālā stara virziens tika pieņemts par 0° virzienu, un katra nākamā stara virziens pieauga pulksteņrādītāja kustības virzienā par 11.25°. Staru figūrā tika simulētas šādas aberācijas: horizontālais astigmātisms c_2^2 , vertikālā koma c_3^{-1} un horizontālā trislapiņu aberācija c_3^3 . Viļņu frontes un punkta izplūdes funkcijas tika aprēķinātas Zernikes koeficientu vērtību 0.1 μm ; 0.2 μm un 0.3 μm un zīlītes diametra 6 mm gadījumā.

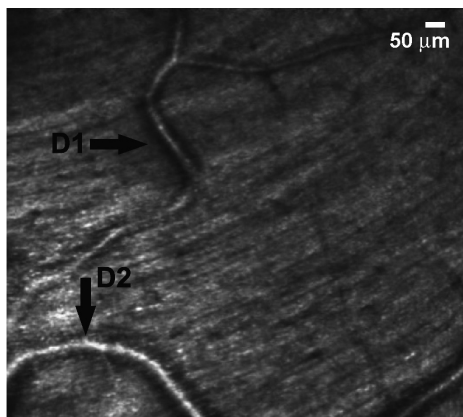


3.4.2.1.1. attēls. Staru figūra, kas tika izmantota, lai novērtētu dažādu aberāciju ietekmi uz staru platuma pieaugumu. (a) Staru figūra ar šauriem stariem. (b) Staru figūra ar platiem stariem.

3.4.2.2. Aberāciju simulācija tīklenes attēlā

Acs aberāciju ietekme uz tīklenes asinsvadu diametru tika noteikta, izmantojot aberāciju simulācijas metodi. Simulācijai tika izvēlēts tīklenes attēls, ko ieguvis prof. Austins Rorda (*Austin Roorda*), izmantojot adaptīvās optikas skenējošo lāzera oftalmoskopijas metodi (skat. 3.4.2.2.1. attēlu) [42]. Prof. Austins Rorda deva rakstisku atļauju iegūto attēlu izmantot simulācijas nolūkiem.

Iegūtais tīklenes apgabals atrodas aptuveni 4.5 grādos virs foveolas. Tīklenes attēlā redzamo asinsvadu diametrs ir aptuveni 50 mikrometri.



3.4.2.2.1. attēls. Aberāciju simulācijai izmantotais tīklenes attēls, ko ieguvis prof. Austins Rorda, izmantojot adaptīvās optikas skenējošās lāzereftalmoskopijas metodi [87].

Tīklenes attēlā tika simulētas aberāciju kopas, kas raksturīgas šādām cilvēku grupām:

- 1) bērni, kam ir augstas pakāpes tālredzība [43];
- 2) pacienti ar intraokulārajām lēcām [44];
- 3) pacienti, kam ir keratokonuss [45];
- 4) cilvēki ar ļoti augstu redzes asumu [46];
- 5) tuvredzīgi pieauguši cilvēki [47];
- 6) divas pieaugušo grupas [48].

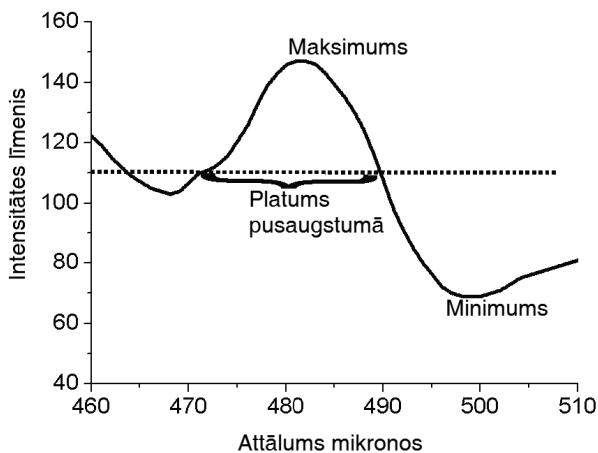
Tā kā visu Zernikes koeficientu vērtības nebija pieejamas nevienai no minētajām aberāciju kopām, tad trūkstošā informācija tika iegūta no pētījuma [48]. Pētījumā [48] izmērītas Zernikes koeficientu vērtības līdz aberāciju 4. kārtai lielā emetropu cilvēku grupā. Aprēķinot punkta izplūdes funkciju, tika izvēlēts zīlītes diametrs $\varnothing_D = 6$ mm. Vietās, kas parādītas ar bultām, tika izmērīti asinsvadu diametri D1 un D2, un tika aprēķināta diametru attiecība D1/D2.

3.4.2.3. Staru platuma un asinsvadu diametra aprēķināšana

3.4.2.3.1. Pusaugstuma platuma metode

Gan staru figūras staru platums, gan tīklenes attēla asinsvadu diametrs tika aprēķināts kā šķērsriezuma intensitātes sadalījuma platums pusaugstumā.

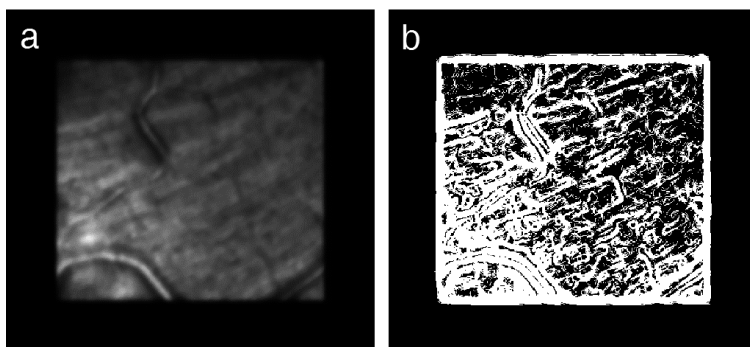
3.4.2.3.1.1. attēlā redzama asinsvada šķērsriezuma intensitātes atkarība no attēla lineārajām koordinātām (μm). Šādā veidā tika aprēķināts staru figūras staru platums katrai stara virzienā, aberācijas veida un tās apjoma kombinācijai.



3.4.2.3.1.1. attēls. Asinsvada šķērs griezuma intensitāte relatīvās vienībās spožuma skalā. Asinsvada diametra mērs bija platums pusaugstumā.

3.4.2.3.2. Malu detektēšanas metode

Datorprogrammas, kas paredzētas tīklenes attēlu analīzei, izmanto malu detektēšanas algoritmus, lai noteiktu, kur atrodas asinsvadu malas. Lai noteiktu, vai šādu datorprogrammu analīzes rezultātus ietekmē acs aberācijas, asinsvadu diametrs tika noteikts, izmantojot Kirša (*Kirsch*) malu detektēšanas algoritmu.



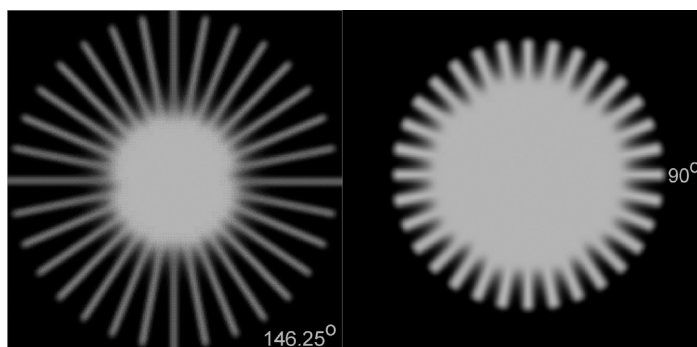
3.4.2.3.2.1. attēls. Tīklenes attēli asinsvadu diametra aprēķināšanai, izmantojot pusaugstuma platuma (a) un malu detektēšanas (b) metodi.

Tīklenes attēlā vēlreiz tika simulētas iepriekš uzskaitītās aberāciju kopas. Atšķirībā no pusaugstuma platuma metodes šajā gadījumā tika lietots Kirša malu detektēšanas algoritms. Kirša malu detektēšanas algoritma pamats ir pirmās kārtas atvasinājuma aprēķināšana noteiktos virzienos un gradienta noteikšana. Kirša malu detektora sliekšnis tika manuāli izvēlēts tā, lai asinsvadi nekur netiktu

pārrauti. 3.4.2.3.2.1. attēlā salīdzinājumam parādīti tiklens attēli, no kuriem viens tika izmantots pusaugstuma platuma metodē, bet otrs malu detektēšanas metodē. Pēc pārveidošanas binārā formātā tika lietota manuāla asinsvada šķērs griešana, un, izmantojot iegūto intensitātes profilu, tika aprēķināts asinsvada diametrs. Diametrs tika aprēķināts abiem asinsvadiem, un pēc tam tika aprēķināta diametru attiecība $D1/D2$.

3.4.2.4. Staru platumu attiecības korelācija ar asinsvadu diametru attiecību

Staru figūrā tika simulētas tās pašas aberāciju kopas, kas tika simulētas tiklens attēlā. Lai novērtētu saistību starp dažādu aberāciju kopu ietekmi uz staru platuma attiecību un tiklens asinsvadu diametra attiecību, tika aprēķināta platākā asinsvada virzienā vērstā (90°) stara platuma attiecība pret šaurākā asinsvada virzienā (146.25°) vērstā stara platuma attiecību. Šaurais stars ir analogs asinsvadam ar diametru $D1$, turpretim platais stars staru figūrā ir analogs asinsvadam ar diametru $D2$ (skat. 3.4.2.4.1. attēlu). Staru platuma attiecība tika aprēķināta katras aberāciju kopas gadījumā. Asinsvadu diametru attiecība, kas tika aprēķināta tiklens asinsvadiem, un staru platuma attiecība, kas tika aprēķināta, izmantojot staru figūru, tika salīdzināta, aprēķinot savstarpējo korelāciju.



3.4.2.4.1. attēls. Staru platuma attiecības aprēķināšana dažādām aberāciju kopām.

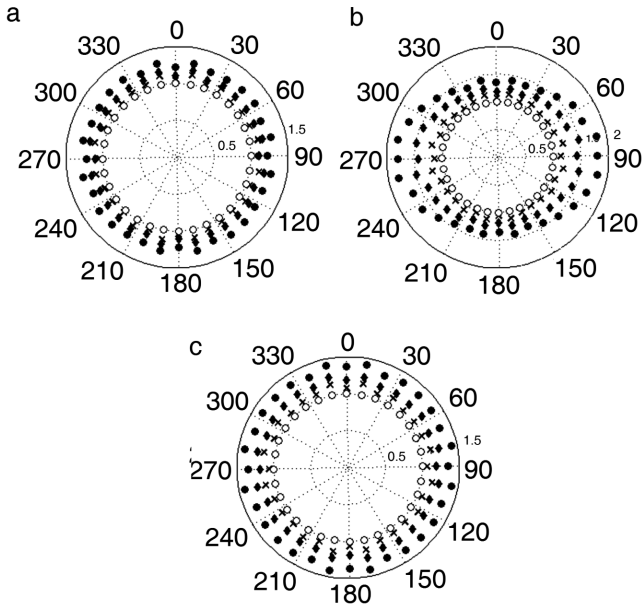
Šaurākais stars ir analogs tievajam asinsvadam, kura diametrs ir $D1$, turpretim platais stars ir analogs platajam asinsvadam, kura diametrs ir $D2$. Šaurā stara virziens ir 146.25° , platākā stara virziens ir 90° .

3.4.3. Rezultāti

3.4.3.1. Staru figūras staru platuma pieaugums

Staru figūras staru platuma pieaugums simulēto aberāciju dēļ redzams 3.4.3.1.1. attēlā. Rezultāti parādīti horizontālā astigmātisma c_2^2 , vertikālās komas c_3^{-1} un horizontālās trīslapiņu aberācijas c_3^3 gadījumā (stara platums pusaugstumā 13 pikseli). Rezultāti attēloti polārajā koordinātu sistēmā. Rādiusvektora garums ir

aberācijas radītais stara platuma pieaugums. Polārais leņķis pieaug pulksteņrādītāja kustības virzienā un norāda stara orientāciju.



3.4.3.1.1. attēls. Stara platuma pieauguma atkarība no stara virziena. Grafiks (a) parādīts horizontālajam astigmātismam c_2^2 , grafiks (b) vertikālajai komai c_3^{-1} , grafiks (c) horizontālās trīslapiņas aberācijai jeb c_3^3 . Visi grafiki aprēķināti šaurajam staram ar platumu 13 pikseļi pusaugstumā. Tukšie aplīši atbilst gadījumam, kad staru figūrā aberācijas nav simulētas. Krustiņi atbilst RMS vērtībai 0.1 μm , rombiņi – 0.2 μm , aizpildītie aplīši – 0.3 μm .

Redzams, ka aberācijas, kam ir dažāda viļņu frontes simetrija, atšķirīgi ietekmē stara platuma pieaugumu. Paplašināšanās efekts ir atkarīgs ne tikai no viļņu frontes simetrijas un aberācijas apjoma, bet arī no staru patiesā platumā un staru virziena. Vislielākās platumā izmaiņas novērojamas komas gadījumā šīs aberācijas asimetriskās viļņu frontes dēļ, savukārt vismazākās izmaiņas novērojamas astigmātisma gadījumā. Neatkarīgi no tā, kāds bija aberācijas veids un apjoms, platā staram (platumā pusaugstumā 22 pikseļi) gadījumā stara platuma pieaugums mainījās daudz šaurākā intervālā.

3.4.3.2. Dažādu aberāciju kopu ietekme uz asinsvadu diametra attiecību

3.4.3.2.1. Pusaugstuma platumā metode

3.4.3.2.1.1. tabulā redzama aprēķinātā diametru attiecība $D1/D2$ visām aberāciju kopām. Tabulā redzams, ka diametru attiecība mainās plašās

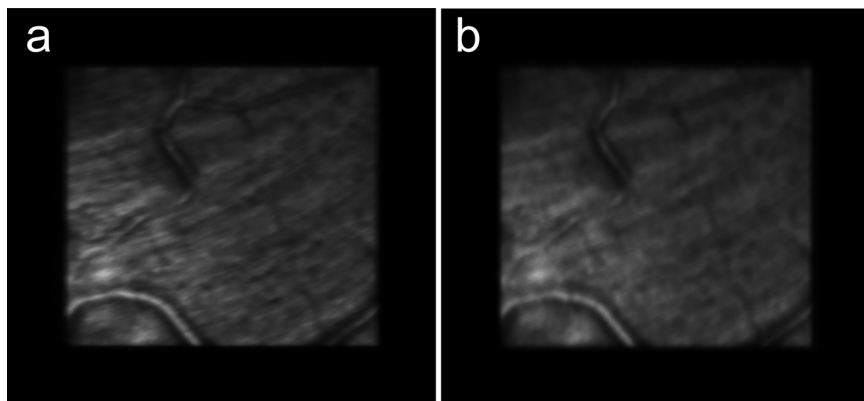
robežās – maksimālā diametru attiecības izmaiņa ir aptuveni 0.5, kas ir kliniski nozīmīgs lielums. Nopietnu patoloģiju gadījumā A/V attiecība var mainīties arī par daudz mazāku lielumu.

**3.4.3.2.1.1. tabula. Asinsvadu diametra attiecība D1/D2 dažādām aberāciju kopām.
Diametru attiecība aprēķināta, izmantojot pusaugstuma platuma metodi.**

Cilvēku grupa	Asinsvadu diametra attiecība
Bērni ar lielu tālredzību	0.70
Pacienti ar intraokulārām lēcām	1.02*
Pacienti ar keratokonusu	0.73*
Cilvēki ar īpaši augstu redzes asumu	0.98
Tuvredzīgi pieaugušie	0.88
Pieaugušie ar normālu redzi (pirmā grupa)	0.67
Pieaugušie ar normālu redzi (otrā grupa)	0.58
Nav aberāciju	0.70

*Diametru attiecības novērtēšanai tika izmantots pilnais platums, nevis platums pusaugstumā.

3.4.3.2.1.1. attēlā redzama divu dažādu aberāciju kopu (cilvēki ar ļoti augstu redzes asumu (A) un otrā pieaugušu cilvēku grupa (B)) ietekme uz asinsvadu diametru. Redzams, ka diametrs D1 ir lielāks cilvēku grupā, kurai ir ļoti augsts redzes asums, turpretim D2 ir lielāks otrajā pieaugušu cilvēku grupā.



3.4.3.2.1.1. attēls. Aberāciju ietekme uz asinsvadu redzamo diametru cilvēku grupā, kuras locekļiem ir ļoti augsts redzes asumu (a) un otrajā pieaugušo cilvēku grupā (b). Diametrs D1 ir lielāks cilvēku grupā, kurai ir ļoti augsts redzes asums, turpretim D2 ir lielāks otrajā pieaugušu cilvēku grupā.

3.4.3.2.2. Malu detektēšanas metode

Asinsvadu diametra attiecība, kas noteikta, izmantojot pusaugstuma platuma un malu detektēšanas metodi, redzama 3.4.3.2.2.1. tabulā.

3.4.3.2.2.1. tabula. Asinsvadu diametra attiecība D1/D2 dažādām aberāciju kopām, izmantojot pusaugstuma platuma metodi un malu detektēšanas metodi.

Cilvēku grupa	Asinsvadu diametra attiecība (pusaugstuma platuma metode)	Asinsvadu diametra attiecība (malu detektēšanas metode)
Bērni ar lielu tālredzību	0.70	0.58
Cilvēki ar īpaši augstu redzes asumu	0.98	0.78
Tuvredzīgi pieaugušie	0.88	0.88
Pirmā pieaugušo grupa	0.67	0.68
Otrā pieaugušo grupa	0.58	0.43
Nav aberāciju	0.70	0.67

Keratokonusa pacientu grupai un intraokulāro lēcu pacientu grupai asinsvadu platumu nebija iespējams aprēķināt, izmantojot malu detektēšanas metodi, jo tikienes attēla izplūdums bija tik liels, ka asinsvadi vairs nebija detektējami.

3.4.3.3. Staru platuma attiecības korelācija ar asinsvadu diametru attiecību

3.4.3.3.1. tabulā visām aberāciju kopām apkopota staru platuma attiecība un asinsvadu diametra attiecība, kas aprēķinātas, izmantojot pusaugstuma platuma metodi.

3.4.3.3.1. tabula. Staru platuma attiecība un asinsvadu diametra attiecība, kas aprēķinātas, izmantojot pusaugstuma platuma metodi.

Cilvēku grupa	Staru platuma attiecība	D1/D2(pusaugstuma platuma metode)
Bērni ar lielu tālredzību	0.66	0.70
Pacienti ar intraokulārām lēcām	0.94	1.02*
Pacienti ar keratokonusu	0.76	0.73*
Cilvēki ar īpaši augstu redzes asumu	0.74	0.98
Tuvredzīgi pieaugušie	0.72	0.88
Pirmā pieaugušo grupa	0.69	0.67
Otrā pieaugušo grupa	0.65	0.58
Nav aberāciju	0.66	0.70

*Diametru attiecības novērtēšanai tika izmantots pilnais platums, nevis platums pusaugstumā.

3.4.4. Analīze

Eksperimenti ar staru figūru pierāda, ka noteikta veida aberācijas dažādi ietekmē atšķirīgos virzienos orientētu staru intensitātes sadalījumu šķēsgriezumā, turklāt paplašināšanās efekts ir atkarīgs ne tikai no stara virziena, bet arī no stara sākotnējā platuma. Relatīvais paplašināšanās efekts samazinās, stara platumam pieaugot.

Aberāciju simulācija staru figūrā un tiklenes attēlā liecina, ka acs aberācijas var būtiski ietekmēt A/V attiecību. Vispārīgā gadījumā tiklenes vēnas ir platākas nekā artērijas. Pamatojoties uz rezultātiem, kas iegūti, izmantojot staru figūru, var secināt, ka paplašināšanās efekts acs aberāciju dēļ ir vairāk izteikts artērijām nekā vēnām. Var secināt, ka A/V attiecības izmaiņas ir atkarīgas gan no artēriju un vēnu virziena, gan arī no to patiesā diametra. Pamatojoties uz rezultātiem, kas iegūti staru figūras metodē, var arī secināt, ka A/V attiecības novērtēšanai jāizvēlas paralēlas artērijas un vēnas, kā tas minēts pētījumā [49]. Pētījumā [49] A/V attiecības novērtēšanai ieteikts izmantot paralēlus galveno artēriju un vēnu posmus. Citā pētījumā [50] uzsvērts, ka artēriju un vēnu zariem, kas tiek izmantoti A/V attiecības novērtēšanai, jābūt vienai un tai pašai dalījuma kārtai, turpretim nav uzsvērts, ka šiem zariem jābūt paralēliem. A/V attiecības novērtēšanai izmantojot artērijas un vēnas, kas nav paralēlas, A/V attiecību ietekmē orientācijas efekts. Īpaša uzmanība oftalmoskopijas rezultātu interpretēšanā jāpievērš, apskatot acs dibenu acīs, kurās ir keratokonuss. Jāņem arī vērā, ka acs augstāko kārtu aberācijas pieaug asaru plēvītes iztvaikošanas dēļ, jo oftalmoskopijas laikā pacients aci mirkšķina reti.

Aberāciju simulācija staru figūrā un tiklenes attēlā apstiprina, ka dažādas aberāciju kopas dažādi ietekmē asinsvadu diametru un līdz ar to arī A/V attiecību. A/V attiecību būtiski var ietekmēt ne tikai aberācijas, kas raksturīgas cilvēkiem, kam ir keratokonuss, bet arī aberācijas, kas raksturīgas cilvēkiem ar ļoti labu redzi. A/V attiecības izmaiņas, kas apjoma ziņā līdzinās novērotajām diametra attiecības izmaiņām, ir klīniski nozīmīgas, un līdz ar to nav zināms, vai A/V attiecība ir pārāk liela vai maza kādas slimības dēļ vai acs optiskās kvalitātes dēļ. A/V attiecība var ne tikai tikt novērtēta par zemu vai pārvērtēta, bet arī pārāk plati vai šauri asinsvadi acs aberāciju dēļ var izskatīties normāli. Viena no pirmajām hipertensijas pazīmēm ir tiklenes arteriolu sašaurināšanās paaugstināta asinsspiediena dēļ [51]. Arteriolu sašaurināšanās bieži tiek klasificēta atkarībā no A/V attiecības [52]. Ja $A/V > 1/2$, tad sašaurināšanās tiek klasificēta kā 1. klases sašaurināšanās (no mazas līdz vidējai). Ja $A/V < 1/2$, tad sašaurināšanās tiek klasificēta kā 2. klases sašaurināšanās (no vidējas līdz izteiktai).

Sistoliskā spiediena izmaiņas ir saistītas ar A/V attiecības izmaiņām [53]. Pētījuma [53] autori atklāja, ka 10 mm Hg izmaiņa sistoliskajā asins spiedienā rada A/V attiecības izmaiņas 0.02. A/V attiecības izmaiņas sistoliskā asins spiediena svārstību dēļ var palikt nepamanītas acs aberāciju dēļ. Tiklenes arteriolu sašaurināšanās ir saistīta ar hipertensiju un diabēta risku [54]. Šie pētnieki atklāja, ka pacientiem ar zemāku A/V attiecību ir lielāks risks saslimt ar diabētu. Pacientiem, kuri saslima ar diabētu, A/V attiecība bija 0.69, bet tiem, kuri nenaslima, A/V attiecība bija 0.73. Starpība starp abām vērtībām ir tikai 0.04.

A/V attiecību ietekmē arī redzes nerva diska patoloģijas un papiledēma [55]. Divas visbiežākās redzes nerva diska patoloģijas ir priekšējā išēmiskā optiskā neiropātija un optiskais neirīts. Abos gadījumos pacienta sūdzības ir līdzīgas, un ir grūti šīs patoloģijas atšķirt. Pētījuma [56] autori atklāja, ka A/V attiecība 1:3 bija 40 % pacientu, kuriem bija priekšējās išēmiskās optiskās neiropātija, bet tikai 8 %

pacientu, kuriem bija optiskais neirīts. Līdz ar to acs aberācijas var apgrūtināt abu šo patoloģiju atšķiršanu.

Maz ticams, ka oftalmologi, novērtējot acs dibenu ar tiešās vai netiešās oftalmoskopijas metodi, pievērs uzmanību pacienta un savām acs aberācijām un to apjomam, kā arī tam, kā tās ietekmē A/V attiecību. Oftalmologi A/V attiecības novērtēšanai izmanto skalu ar lielu soli. Izmantojot šādu rupju skalu, A/V attiecību izmaiņas, kuru kārtā ir simtdaļas, netiek pamanītas. Tiklenes asinsvadu intensitātes profilu izmanto automātiskas un pusautomātiskas datorprogrammas, kas analizē tiklenes attēlus un novērtē A/V attiecību. Tā kā šādas datorprogrammas spēj aprēķināt A/V attiecību ar dažu simtdaļu lielu precizitāti, jāpastāv iespējai šādās datorprogrammās acs aberāciju efektus koriģēt.

3.5. Viļņu frontes korektoru izveide

3.5.1. Ievads

Adaptīvās optikas pētījumos visbiežāk izmantotie viļņu frontes korektori ir deformējami spoguļi un telpiski gaismas modulatori. Redzes uztveres pētījumi, izmantojot viļņu frontes korektorus, pārsvarā tiek veikti pie optiskā galda, uz kā uzmontēta sarežģīta optiskā sistēma. Redzes zinātnē tiek veikti pētījumi, kā radīt viļņu frontes korektorus, kas būtu lietojami ikdienā. Intraokulārās lēcas tiek uzskatītas par visvairāk iespējamo pastāvīgo augstāko kārtu aberāciju korekcijas līdzekli [57, 58]. Vairāki pētnieki [59, 60, 61] izstrādājuši viļņu frontes korektorus, ko būtu iespējams izmantot kā tradicionālos korekcijas līdzekļus (brilles un kontaktlēcas). Viļņu frontes korektori izveidoti arī fotorezista slānī [60]. Pētījuma [59] autori sasniedza 80 % acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmeni. Viļņu frontes korektori izveidoti arī organiskajā stiklā [60], izmantojot virpošanas tehnoloģiju. Pētījumā [61] tika sasniegts ne tikai ievērojams acs augstāko kārtu aberāciju korekcijas līmenis, bet arī būtisks redzes asuma uzlabojums.

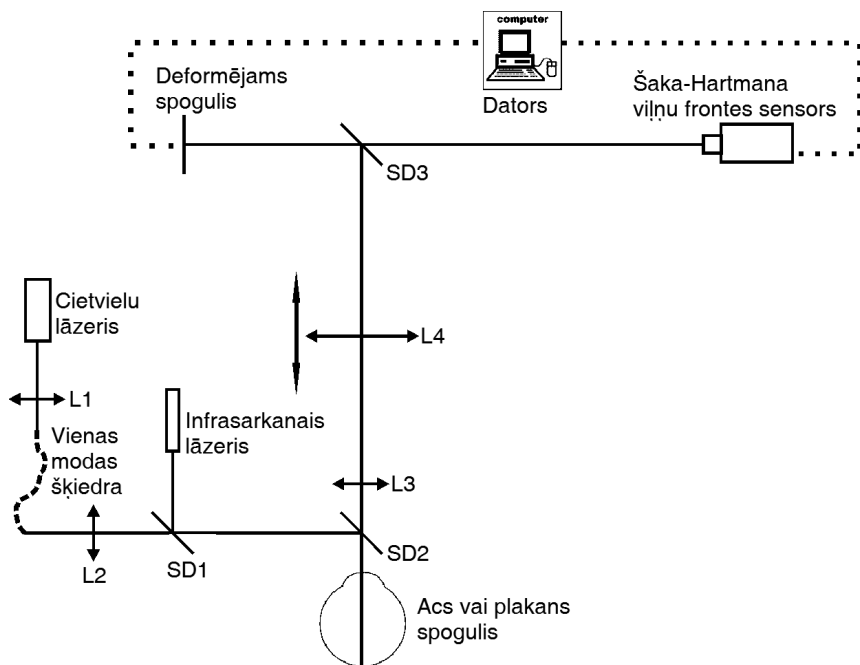
Promocijas darbā veiktā pētījuma mērķis bija izveidot viļņu frontes korektorus fotorezista slānī, izmantojot bināro spožuma skalas fāzu masku, un novērtēt šo korektoru struktūru un optiskās īpašības, izmantojot dažādas metodes. Binārā spožuma skalas fāzu maska ir vienkāršākā litogrāfijā izmantotā maska. Populārākā metode viļņu frontes korektoru novērtēšanā ir Šaka-Hartmana aberometrija, kas promocijas darbā salīdzināta ar profilometrijas un skenējošās elektronu mikroskopijas metodi. Pēdējo divu metožu priekšrocība ir ievērojami augstāka izšķirtspēja nekā Šaka-Hartmana viļņu frontes sensoriem.

3.5.2. Eksperimentālā daļa

3.5.2.1. Optiskā sistēma

Aberāciju mērīšanai un korekcijai tika izmantota adaptīvās optikas sistēma, kas shematiski redzama 3.5.2.1.1. attēlā. Vispirms tika izmērītas un koriģētas adaptīvās optikas sistēmas kārtu aberācijas. Optiskās sistēmas aberācijas tika izmērītas

un koriģētas, izmantojot cietvielu RGB lāzera ($\lambda = 670 \text{ nm}$) izstaroto starojumu. Lāzera stars tika fokusēts uz vienas modas polarizāciju uzturošās šķiedras galu, izmantojot lēcu L1, savukārt otrs šķiedras gals tika novietots lēcas L2 fokālajā plaknē. Kūlis tika paplašināts, izmantojot Badāla sistēmu, kas arī koriģēja optiskās sistēmas defokusu. Badāla sistēmas lēcas tika novietotas tā, lai defokusa vērtība būtu 0. Pēc izešanas caur Badāla sistēmu staru kūlis tika virzīts deformējamā spoguļa virzienā. Pēc atstarošanās no deformējamā spoguļa staru kūlis tika virzīts Šaka-Hartmana viļņu frontes sensorā. Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora iegūtie dati tika pārsūtīti uz datoru, kas ar vadības bloku starpniecību kontrolēja deformējamā spoguļa formu. Šo režīmu sauc par slēgtās cilpas režīmu, un tas attēlots, izmantojot punktēto līniju.



3.5.2.1.1. attēls. Optiskā sistēma aberāciju mērīšanai. Optiskā sistēma sīkāk aprakstīta tekstā. L – lēca; SD – stara dalītājs.

3.5.2.2. Aberāciju mērīšana un korekcija

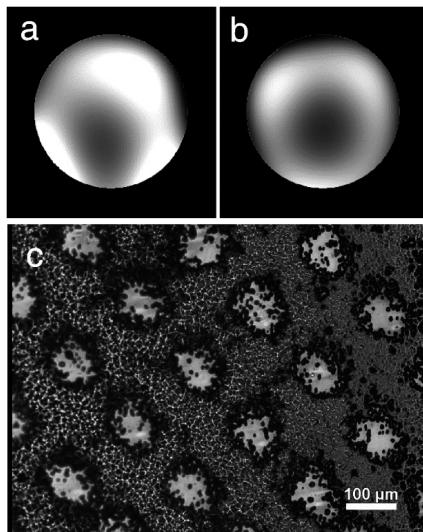
Adaptīvās optikas sistēmas aberācijas tika izmērītas un koriģētas 5 reizes, un tika aprēķināta visu elektrodu spriegumu vidējā vērtība. Lai saglabātu deformējamā spoguļa formu adaptīvās optikas sistēmas aberāciju korekcijai, spoguļa elektrodiem tika pieliktas aprēķinātās vidējās spriegumu vērtības. Pēc tam 5 reizes tika izmērītas adaptīvās optiskās sistēmas atlikušās aberācijas. Izmantojot visu

mērījumu datus, tika aprēķināta vidējā vērtība un standartklūda. Starp secīgiem mērījumiem bija dažu minūšu pauze.

Diviem eksperimenta dalībniekiem (VK un LE) 5 reizes tika izmērītas labās acs un adaptīvās optikas sistēmas atlikušo aberāciju summa. Izmantojot visu mērījumu datus, tika aprēķināta mērījumu vidējā vērtība un standartklūda. Acs un adaptīvās optikas sistēmas atlikušo aberāciju summas mērīšanai tika izmantots infrasarkanais lāzers, kura starojuma viļņa garums $\lambda = 850$ nm. Lai aprēķinātu acs aberācijas, no summārajām aberācijām tika atņemtas adaptīvās optiskās sistēmas atlikušās aberācijas.

3.5.2.3. Fāzu maskas izveidošana

Izmantojot trešās un ceturtais kārtas acs aberāciju Zernikes koeficientu vērtības, programmā Matlab R2007b (*Mathworks*) tika ģenerēta šo aberāciju viļņu fronte. Apvērstās viļņu frontes tika pārvērstas spožuma skalas bitkartes attēlā, kas kodē apvērstās viļņu frontes fāzi. Fāzu maskas tika izveidotas, bitkartes failus izdrukājot uz caurspīdīgas plēves. Fāzu maskas bija riņķiņi, kuru diametrs bija 5 mm. Binārās spožuma skalas fāzu maskas abiem eksperimenta dalībniekiem VK un LE redzamas attiecīgi 3.5.2.3.1. (a) un (b) attēlā. 3.5.2.3.1. (c) attēlā redzams binārās spožuma skalas fāzu maskas attēls, kas iegūts, gaismas mikroskopam pievienojot CCD kameru. Fāzu maska sastāvēja no printera pulvera apgabala, kam bija mainīga caurlaidība, kā arī apgabaliem, kuros printera pulvera nebija. Attālums starp apgabaliem, kuros pulvera nav, bija aptuveni 180 μm . Šo apgabalu diametrs bija aptuveni 100 μm .



3.5.2.3.1. attēls. Eksperimenta dalībnieku VK (a) un LE (b) fāzu maskas. Attēla daļā (c) redzams binārās spožuma skalas fāzu maskas attēls gaismas mikroskopā. Attēls iegūts, mikroskopam pievienojot CCD kameru.

3.5.2.4. Viļņu frontes korektoru izveidošana

3.5.2.4.1. Fotorezista slāņa uzklāšana substrātam

Fotorezista slānis tika uzklāts abām stikla plāksnītes virsmām, izmantojot tā saucamo iegremdēšanas metodi. Plāksnīte tika iegremdēta tvertnē, kura piepildīta ar pozitīvu fotorezistu AZ-1350-H (*Shipley*). Pēc tam plāksnīte tika celta ārā no tvertnes ar ātrumu aptuveni 1 mm/s. Pēc tam plāksnīte tika žāvēta istabas temperatūrā aptuveni 30 minūtes. Pēc tam, kad fotorezista slānis bija nožuvis, stikla plāksnīte tika karsēta +90°C 1 minūti. Šo posmu sauc par pirmkarsēšanu.

3.5.2.4.2. Apgaismošana

Pēc pirmkarsēšanas maska tika novietota uz plāksnītes. UVB starojuma avots bija 250 W dzīvsudraba tvaiku augstspiediena lampa (*Osrām*). Attālums starp fotorezista slāni un dzīvsudraba lampu bija 10 cm. Ekspozīcijas ilgums bija 1 minūte un 30 sekundes.

3.5.2.4.3. Attīstīšana

Fotorezista slānis tika attīstīts 2.38 % tetrametilamonija hidroksīda (ķīmiskā formula $C_4H_{13}NO$; saīsinājums TMAH; ražotājs Sigma-Aldrich, Šveice) šķīdumā. Tā kā TMAH tvaiki ir indīgi, tad atšķaidīšana un attīstīšana tika veikta vilkmes skapī. Fotorezista slānis tika attīstīts 30 sekundes ilgi istabas temperatūrā. Pēc attīstīšanas plāksnīte tika karsēta +120°C 1 minūti.

3.5.2.5. Virsmas profila novērtēšana

3.5.2.5.1. Aberometrija

Viļņu frontes korektoru novērtēšanai ar aberometrijas metodi tika izmantota 3.5.2.1.1. attēlā redzamā shēma. Acs vietā tika novietots plakans spogulis. Vispirms tika izmērīta neapgaismotā attīstītā fotorezista apgabala aberāciju un adaptīvās optikas sistēmas atlikušo aberāciju summa. Lai aprēķinātu neapgaismotā attīstītā fotorezista apgabala aberācijas, no izmēritajām summārajām aberācijām tika atņemtas adaptīvās optikas sistēmas atlikušās aberācijas. Pēc tam tika izmērīta viļņu frontes korektoru aberāciju un adaptīvās optikas sistēmas atlikušo aberāciju summa. Lai aprēķinātu viļņu frontes korektoru aberācijas, no izmēritajām summārajām aberācijām tika atņemtas adaptīvās optikas sistēmas atlikušās aberācijas un neapgaismotā attīstītā fotorezista apgabala aberācijas.

3.5.2.5.2. Skenējošā elektronu mikroskopija

Viļņu frontes korektoru novērtēšanai ar skenējošās elektronu mikroskopijas metodi tika izmantots skenējošais elektronu mikroskops (modelis Zeiss EVO 50). Viļņu frontes korektoru aplūkošanai tika izmantots spriegums $U = 5$ kV. Pirms viļņu frontes korektoru novērtēšanas ar skenējošo elektronu mikroskopu tie tika pārklāti ar 5 – 10 nm biezu zelta/pallādija (Au/Pd) slāni. Plāksnīte tika sasaldēta

šķidrā slāpekļī, un tajā tika iegriezta rievā, kas sakrita ar attīstītā viļņu frontes korektora vertikālo diametru. Pēc sasaldēšanas plāksnīte un fotorezista slānis kļuva trausls, un līdz ar to tas bija viegli pārlaužams un aplūkojams no sāniem skenējošā elektronu mikroskopā.

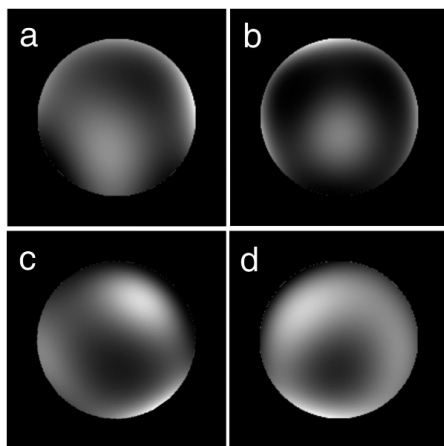
3.5.2.5.3. Profilometrija

Pētījumā izmantotā profilometra ražotājs ir DekTak, profilometra modelis ir D150. Viļņu frontes korektori tika skenēti vertikālā diametra garumā un virzienā, izmantojot 12.5 μm dimanta adatu. Vienas līnijas skenēšanai bija nepieciešamas 60 sekundes. Koordinātas un virsmas dziļums tika saglabāts ASCII formātā. Lielas virsmas dziļuma izmaiņas parauga mēģinājumu pielipušu putekļu dēļ tika filtrētas.

3.5.3. Rezultāti

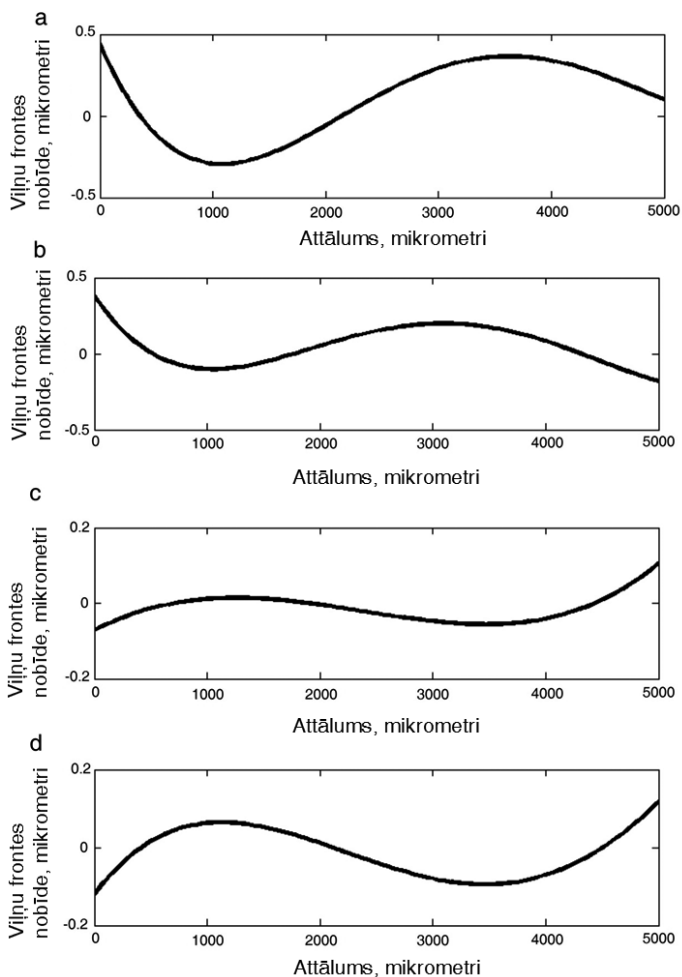
3.5.3.1. Aberometrija

3.5.3.1.1. attēlā redzamas eksperimenta dalībnieku VK un LE trešās un ceturtais kārtas acs aberāciju viļņu frontes un tām atbilstošo viļņu frontes korektoru viļņu frontes. Zernikes koeficienti aprēķināti 5 mm zīlītei. Viļņu frontes aprakstam tika izmantots Amerikas optikas biedrības (OSA) Zernikes polinomu standarts. Kaut gan viļņu frontes korektori spēcīgi izkliedēja gaismu, tomēr uz Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora veidojās asi punkti, un viļņu frontes formu bija iespējams rekonstruēt. Salīdzinot acs viļņu fronti ar atbilstošo viļņu frontes korektoru viļņu fronti, redzams, ka katrā punktā abu viļņu frontu deformāciju virziens ir pretējs. Kaut gan viļņu frontes korektoru aberāciju Zernikes koeficientu vērtības ir ievērojami mazākas nekā acs augstāko kārtu aberāciju Zernikes koeficientu vērtības, tomēr viļņu frontes korektoru viļņu frontes forma ir tāda, kāda nepieciešama acs augstāko kārtu aberāciju korekcijai.



3.5.3.1.1. attēls. Eksperimenta dalībnieku VK (a) un LE (b) acs viļņu frontes. Attiecīgoviļņu frontes korektoru viļņu frontes redzamas kvadrantos (c) un (d).

Trešās un ceturtās kārtas acs aberāciju RMS vērtības ir šādas: $0.239 \mu\text{m}$ (VK) un $0.108 \mu\text{m}$ (LE). Saskaitot acs viļņu frontes Zernikes koeficientu un viļņu frontes korektora viļņu frontes Zernikes koeficientu vērtības, atbilstošā RMS vērtība samazinājās līdz $0.206 \mu\text{m}$ un $0.070 \mu\text{m}$.



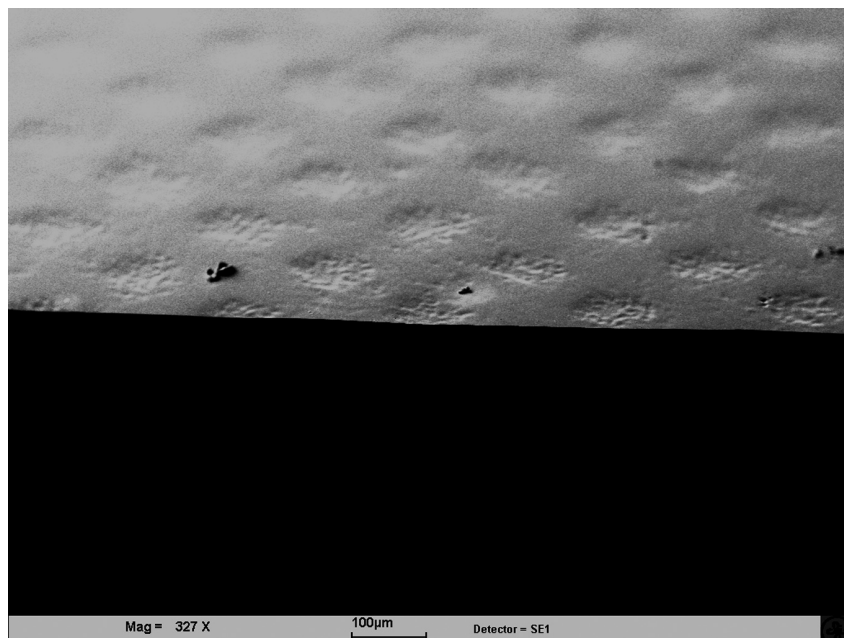
3.5.3.1.2. attēls. Trešās un ceturtās kārtas aberācijām atbilstošo acs viļņu frontu un viļņu frontes korektoru viļņu frontu šķērsgriezums. (a) – eksperimenta dalībnieka VK acs viļņu frontes šķērsgriezums; (b) – eksperimenta dalībnieces LE acs viļņu frontes šķērsgriezums; (c) un (d) – attiecīgo viļņu frontes korektoru viļņu frontes šķērsgriezums.

No viļņu frontēm tika izgriezts vertikālā virzienā vērsts vienu pikseli plats griezum, un tika iegūts šī griezuma profils (skat. 3.5.3.1.2. attēlu). Redzams, ka acs viļņu frontes novirzes un viļņu frontes korektoru viļņu frontes novirzes ir

spoguļattēli, turklāt viļņu frontes korektoru viļņu frontes novirzes ir daudz mazākas nekā acs viļņu frontes novirzes. Acs viļņu frontes šķērsriezums aptuveni ir viļņu frontes korektora viļņu frontes šķērsriezuma negatīvs daudzkārtņš. Lai novērtētu viļņu frontes korektoru pielietojamību acs viļņu frontes aberāciju kompensēšanai, tika aprēķināta RMS vērtība viļņu fronteī, kas iegūta, saskaitot acs viļņu fronti un viļņu frontes korektora viļņu frontes daudzkārtņi (skat. 3.5.3.1.2. tabulu).

3.5.3.1.2. tabula. RMS vērtība viļņu fronteī, kas iegūta, saskaitot acs viļņu fronti un dažādus viļņu frontes korektoru viļņu frontes daudzkārtņus.

Dauzkārtņis	RMS vērtība (μm)	
	Eksperimenta dalībnieks	
	VK	LE
0	0.239	0.108
1	0.216	0.070
2	0.199	0.056
3	0.189	0.080
4	0.189	0.121
5	0.197	0.168



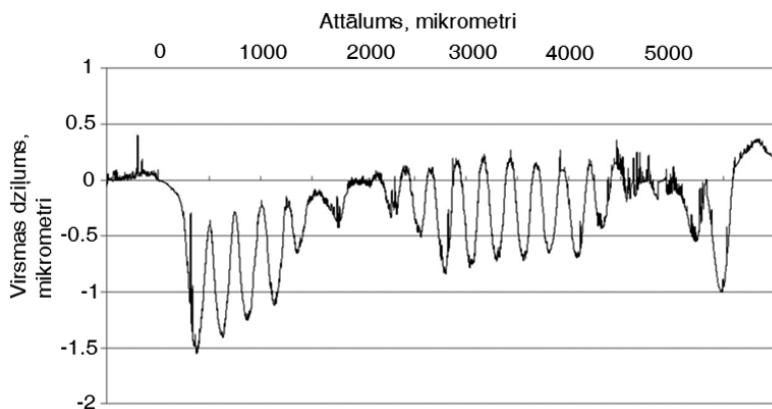
3.5.3.2.1. attēls. Fotorezista virsma pēc attīstīšanas. Gludo virsmu apgaismošanas laikā aizsedza printera pulveris, turpretim nelidzenā virsma veidojās vietās, kur pulvera nebija. Nelidzenumu izmērs ir aptuveni 10 μm .

3.5.3.2. Skenējošā elektronu mikroskopija

3.5.3.2. attēlā redzama fotorezista virsma pēc attīstīšanas. Graudu lielums ir aptuveni 10 μm , un šī iemesla dēļ ir novērojama spēcīga Mī (*Mie*) izkliede. Grumbu kopējais laukums ir ievērojams, salīdzinot ar viļņu frontes modulatoru kopējo laukumu. Nelidzeno apļu diametrs ir aptuveni 100 μm .

3.5.3.3. Profilometrija

Profilometrijas rezultāti parāda, ka fotorezista virsmas dziļums strauji mainās (skat. 3.5.3.3.1. attēlu). Zemākie punkti attēlā atbilst riņķiem ar graudainu virsmu, turpretim augstākie punkti atbilst fotorezista gludajai virsmai. Graudaino virsmu profilometrs nav detektējis tāpēc, ka adatas gala diametrs ir 12.5 μm , bet graudu izmērs ir 10 μm . Apliecējas dziļuma izmaiņas ir salīdzināmas ar viļņu frontes šķēsgriezuma dziļuma izmaiņām.



3.5.3.3.1. attēls. Viļņu frontes korektoru virsmas dziļuma izmaiņas diametra garumā (eksperimenta dalībnieks VK). Viļņu frontes korektori tika skenēti aptuveni vertikālā diametra virzienā. Viena skena garums ir 5 mm.

3.5.4. Analīze

Viļņu frontes korektoru viļņu frontes forma ir tāda, kāda nepieciešama acs viļņu frontes aberāciju kompensēšanai. To apstiprina acs viļņu frontes un viļņu frontes korektoru viļņu frontes karte. Pareizu viļņu frontes korektoru viļņu frontes formu apstiprina arī viļņu frontu šķēsgriezuma profils. Viļņu frontes korektoru Zernikes koeficientu vērtības ir salīdzināmas ar šo koeficientu vērtībām lielā cilvēku grupā [48], turpretim viļņu frontes korektoru viļņu frontes deformācijas ir par mazu, lai kompensētu eksperimenta dalībnieku acs aberācijas. Ja profilometra dati tiek aprakstīti ar apliecēju, tad redzams, ka apliecējas novirzes ir salīdzināmas ar acs viļņu frontes nobīdēm. Tā kā apliecējas amplitūda aptuveni sakrīt ar acs

viļņu frontes šķērsriezuma amplitūdu, tad paredzams, ka viļņu frontes korektoru viļņu frontes Zernikes koeficientu absolūtajām vērtībām būtu jāsakrīt ar acs viļņu frontes Zernikes koeficientu absolūtajām vērtībām. Novērotās atšķirības iemesls varētu būt tas, ka viļņu frontes korektoru virsma nav līdzena, bet tās dziļums strauji mainās. Cits veids, kā iegūt vienmērīgu gaismas intensitātes maiņu un līdz ar to arī virsmas dziļuma maiņu, ir tā saucamās reducējošās optikas lietošana. Reducējošā optika tiek izmantota litogrāfijā, lai uz fotorezista slāņa virsmas iegūtu mazu lielas fāzu maskas attēlu. Pētījumā [60] izmantota fotoreducēšanas metode, lai izveidotu fāzu masku, bet sīkāk šis process nav aprakstīts.

Kā redzams, acs viļņu frontes Zernikes koeficientu vērtību un viļņu frontes korektoru viļņu frontes Zernikes koeficientu vērtību daudzkārtņu saskaitīšana samazināja RMS vērtību. Lielākais RMS vērtības samazinājums bija aptuveni 0.05 μm . Iespējama iemesls salīdzinoši nelielam RMS vērtības samazinājumam varētu būt atšķirības starp acs savietojumu ar optisko asi un viļņu frontes korektora savietojumu ar optisko asi. Pētījumā [60] norādīts, ka precīzs viļņu frontes korektora savietojums ar acs optisko asi ir būtisks priekšnosacījums sekmīgai aberāciju korekcijai.

Binārās spožuma skalas fāzu maskas pielietojamību viļņu frontes korektoru izveidē ierobežo gaismas difrakcija. Kaut gan viļņu frontes korektoru aberācijas bija izmērāmas, tomēr mērījumus apgrūtināja gaismas izkliede. Lai viļņu frontes korektorus būtu iespējams izmantot redzes funkciju uzlabošanai, gaismas izkliede tajos ir jāsamazina. Var secināt, ka gaismas izkļiedes cēlonis ir nelīdzenumi, kas novēroti ar skenējošo elektronu mikroskopu. Nelīdzenumu cēlonis, savukārt, ir tuvā lauka difrakcija binārās spožuma skalas fāzu maskas caurumos. Nelīdzenumu struktūra līdzinās gaismas intensitātes sadalījumam, kāds vērojams, gaismai difragējot tuvā laukā taisnstūrveida atverē. Atkarībā no gaismas lokālās intensitātes difrakcijas ainā attīstīšanas laikā tiek aizskalots prom dažāds fotorezista slāņa biežums. Nelīdzenumu kopējais laukums ir ievērojama daļa no viļņu frontes korektora kopējā laukuma.

Neraugoties uz to, ka, novietojot masku noteiktā attālumā no fotorezista slāņa, var tikt iegūta vienmērīgāka virsmas dziļuma maiņa, tomēr tas var palielināt difrakcijas un gaismas izkļiedes efektu. Ir zināms, ka litogrāfijas metodi, maskai cieši pieguļot fotorezistīvajam slānim, ievērojami ierobežo gaismas izkliede [62]. Var secināt, ka halogēna lampas izmantošana dzīvsudraba lampas vietā varētu samazināt gaismas izkļiedes efektu. Koherences garums dzīvsudraba spektra līnijās ir vairāki desmiti mikrometru [63], turpretim halogēna lampas starojumam tas ir mazāks nekā 1 mikrometrs [64].

Viļņu frontes korektori, kas izgatavoti, izmantojot bināro spožuma skalas fāzu masku, ir izmantojami aberometru kalibrēšanai [65]. Pētījumā [65] mērītas fāzu plāksnīšu aberācijas ar Šaka-Hartmana aberometru un Maha-Zēndera (*Mach-Zehnder*) interferometru, savukārt, pēc tam šīs plāksnītes tika izmantotas staru gaitas aberometra kalibrēšanai. Izmantojot izgatavotos viļņu frontes korektorus aberometru kalibrācijai, gaismas izkliede nav būtiska, ja ir iespējams aprēķināt punktu centroīdas un ģenerēt interferogrammu.

3.6. Kalibrācijas parametru ietekme uz aberāciju mērījumiem

3.6.1. Ievads

Adaptīvās optikas pētījumos nepieciešams definēt, kas ir atskaites stāvoklis jeb plakana viļņu fronte. Šī definīcija ir bitkartes fails, kas satur informāciju par punktu atrašanās vietu. Turpmāk tekstā bitkartes fails, kas satur informāciju par punktu atrašanās vietu, tiks saukts par atskaites stāvokli. Ideālā gadījumā visi atskaites stāvokļa punkti ir novietoti vienādā attālumā, kas vienāds ar attālumu starp mikrolēciņu centriem un kam atbilst noteikts attālums pikseļos. Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora ražošanas process nav pilnīgs, un līdz ar to mikrolēciņu novietojums nav pilnīgi simetrisks. Šī iemesla dēļ ideāls atskaites stāvoklis ir tāds, ko rada plakana viļņu fronte, kas ieiet Šaka-Hartmana viļņu frontes sensorā.

Literatūrā ir pieejams maz informācijas, kā jāiestata atskaites stāvoklis. Pētījumā [66] Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora kalibrēšanai izmantota sfēriska viļņu fronte, kuras avots bija vienas modas polarizāciju uzturošas šķiedras gals. Šķiedras izmantošana nodrošina ļoti mazu aberāciju apjomu sfēriskā viļņu frontē. Vairāku metru attālumā no šķiedras gala viļņu frontes liekums kļūst mazs, un līdz ar to ir iespējams iegūt atskaites stāvokli, kas ir tuvs ideālam. Kā norādīts pētījumā [67], atskaites stāvokļa iestatīšanai var izmantot vai nu sfērisku viļņu fronti ar lielu liekuma rādiusu līdzīgi tam, kā tas darīts pētījumā [66], vai arī izmantot plakana viļņu fronti, kādu iegūst, punktveida gaismas avotu novietojot savācējlēcas paraksiālā rajona fokusā. Promocijas darbā veiktā pētījuma mērķis bija novērtēt acs aberāciju mērījumu sistematisko kļūdu, ko rada atšķirīgs punktu novietojums atskaites stāvoklī, kas iestatīts, izmantojot asfērisku un sfērisku lēcu.

3.6.2. Eksperimentālā daļa

3.6.2.1. Eksperimenta dalībnieki

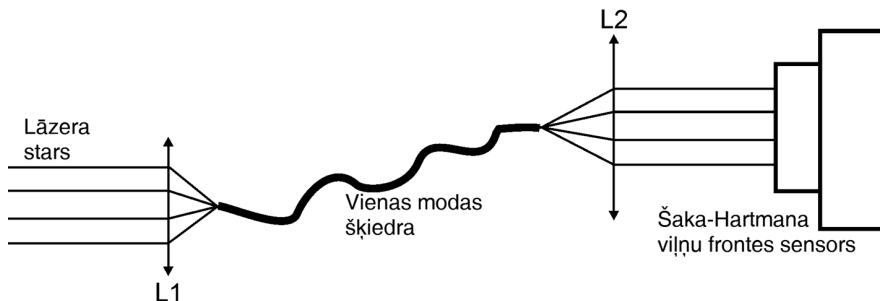
Eksperimentā piedalījās 6 dalībnieki. Visu eksperimenta dalībnieku refrakcijas dati parādīti tabulā. Nevienam no eksperimenta dalībniekiem nebija redzes sistēmas patoloģijas. Eksperimenta dalībnieku labās acs refraktīvā kļūda redzama 3.6.2.1.1. tabulā.

3.6.2.1.1. tabula. Eksperimenta dalībnieku refraktīvā kļūda

Eksperimenta dalībnieks	Sfēra	Cilindrs
VK	-0.50 D	-0.50 D
GK	-5.00 D	-0.75 D
KL	+0.50 D	0.00 D
JS	-3.75 D	0.00 D
LE	+0.50 D	+0.25 D
MD	-2.00 D	-1.50 D

3.6.2.2. Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora kalibrācija

Ekspērimētā tika izmantota optiskā sistēma, kas līdzinās tai, kas tika izmantota pētījumā [67]. Optiskā sistēma shematiski parādīta 3.6.2.2.1. attēlā. 670 nm lāzera stars tika fokusēts uz vienas modas polarizāciju saglabājošas šķiedras galu, izmantojot lēcu L1. No šķiedras izejošais kūlis tika kolimēts, otru šķiedras galu novietojot lēcas L2 fokusā. Kūlis tika kolimēts, izmantojot gan sfērisku, gan asfērisku lēcu.



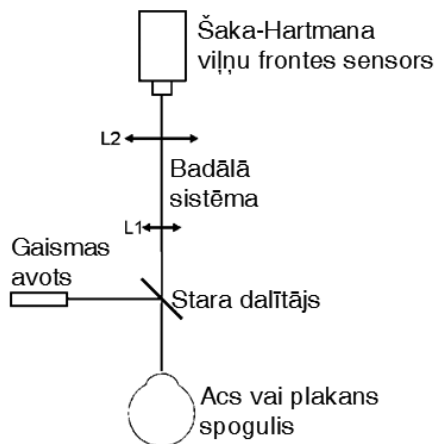
3.6.2.2.1. attēls. Atskaites plaknes iestāšanās adaptīvās optiskās sistēmā. Lāzera stars tiek fokusēts uz vienas modas šķiedras galu, savukārt otrs gals novietots asfēriskas lēcas fokusā. Kad kolimēts kūlis ieiet Šaka-Hartmana sensorā, tiek izvēlēts atskaites stāvoklis. L – lēca.

Izmantojot sfērisku lēcu, šķiedras gals tika novietots paraksiālā rajona fokusā. Kūlis tika kolimēts, šķiedras galu novietojot no lēcas tādā attālumā, lai kūļa diametrs lēcas tuvumā un vairāku metru attālumā no tās būtu vienāds. Brīdī, kad kūlis bija kolimēts, tika iestatīts atskaites stāvoklis.

3.6.2.3. Aberāciju mērīšana

Aberāciju mērīšana tika iedalīta divos posmos. Viļņu frontes aprakstam tika izmantots OSA Zernikes polinomu standarts. Pirmajā posmā tika izmērītas adaptīvās optiskās sistēmas un acs summārās aberācijas, izmantojot optisko sistēmu, kas shematiski redzama 3.7.2.4.1. attēlā. Summārās aberācijas tika mērītas, izmantojot infrasarkano lāzeri, kura viļņa garums $\lambda = 850$ nm. Badāla sistēma, kas sastāvēja no lēcām L1 un L2, tika izmantota, lai koriģētu defokusu un paplašinātu acs zīlīti līdz Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora ieejas zīlītes izmēram. Lēcas L1 un L2 bija novietotas tā, lai defokuss būtu 0 D attiecībā pret asfērisko atskaites stāvokli. Starp secīgiem mērījumiem bija dažu minūšu pauze.

Nākamajā posmā tika izmērītas optiskās sistēmas aberācijas. Optiskās sistēmas aberācijas tika mērītas, izmantojot cietvielu RGB lāzeri, kura viļņa garums $\lambda = 670$ nm, kolimētam kūlim atstarojoties no plakana spoguļa. Starp secīgiem mērījumiem bija dažu minūšu pauze. Lai aprēķinātu acs aberācijas, optiskās sistēmas aberācijas tika atņemtas no summārajām aberācijām.

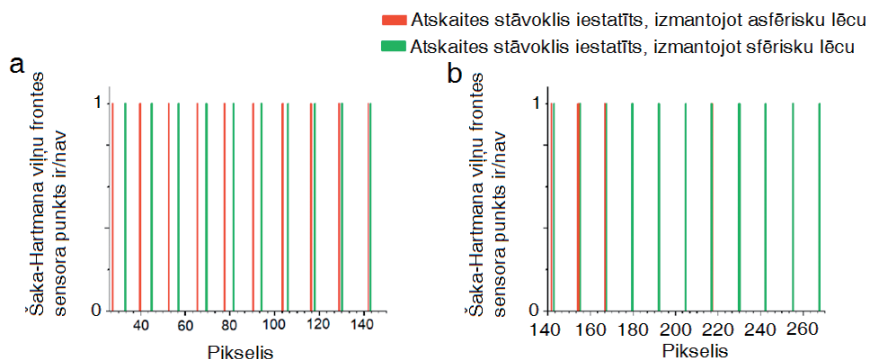


3.6.2.4.1. attēls. Optiskā sistēma acs aberāciju mērīšanai. Shēmas sīkāks apraksts tekstā. L – lēca.

3.6.3. Rezultāti

3.6.3.1. Centroidu nobīdes

Centroidu nobīdes pikseļu matricas centrālajā un perifērajā daļā parādītas 3.6.3.1.1. attēlā (a) un (b). Sarkanās līnijas ir centroidu atrašanās vietas, ja atskaites stāvoklis iestatīts, izmantojot asfērisku lēcu. Zaļās līnijas ir centroidu atrašanās vietas, ja atskaites stāvoklis iestatīts, izmantojot sfērisku lēcu.



3.6.3.1.1. attēls. Centroidu koordinātas atskaites stāvoklī, kas iestatīts, izmantojot asfērisku lēcu (sarkanās līnijas) un sfērisku lēcu (zaļās līnijas). Attēla daļā (a) redzamas centroidu koordinātas Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora perifērijā, turpretim attēla daļā (b) – sensora centrālajā daļā. Centrālajā daļā centroidas pārklājas, turpretim perifērijā sfēriskas lēcas gadījumā tās ir nobīdītas uz iekšu salīdzinājumā ar centroidām asfēriskas lēcas gadījumā.

3.6.3.1.1. attēlā redzams, ka centrālajā pikseļu matricas apgabalā centroīdas, kas aprēķinātas sfēriskam un asfēriskam atskaites stāvoklim, sakrīt, turpretim tālā perifērijā centroīdas, kas aprēķinātas sfēriskam atskaites stāvoklim, ir nobīdītas par 4.9 pikseļiem uz iekšu no asfēriskā stāvokļa centroīdām sfēriskās aberācijas dēļ. Mikrometros šī nobīde ir $4.9 \cdot P = 57.58 \mu\text{m}$. Izmantojot sakarību starp viļņu frontes slīpumu un punkta nobīdi, iespējams aprēķināt viļņu frontes slīpumu un liekuma rādiusu $R \approx 0.163 \text{ m}$, kam atbilst optiskais stiprums $+6.1 \text{ D}$.

Lēcas sfēriskā aberācija tika aprēķināta, izmantojot brīvi pieejamu programmu OSLO, kas paredzēta optikas simulācijām. Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora ieejas zilīte ir 36 mm liela, tādēļ tika aprēķināta lēcas sfēriskā aberācija 18 mm attālumā no optiskās ass. Norādot virsmas liekuma vērtības, fokālo garumu un diametru, tika aprēķināts, ka lēcas gareniskā sfēriskā aberācija ir 3 mm. Tas atbilst optiskā stipruma pieaugumam 0.15 D virzienā no lēcas centra uz perifēriju.

Mikrolēciņu priekšā ir novietotas tā saucamās pārvades lēcas, kuru fokālais garums ir 240 mm un 40 mm. Uz mikrolēciņu krītošās viļņu frontes liekuma rādiuss aprēķināms, izmantojot lēcas pamatvienādojumu:

$$\frac{1}{l'} = \frac{1}{l} + F \quad (3.6.3.1.1.)$$

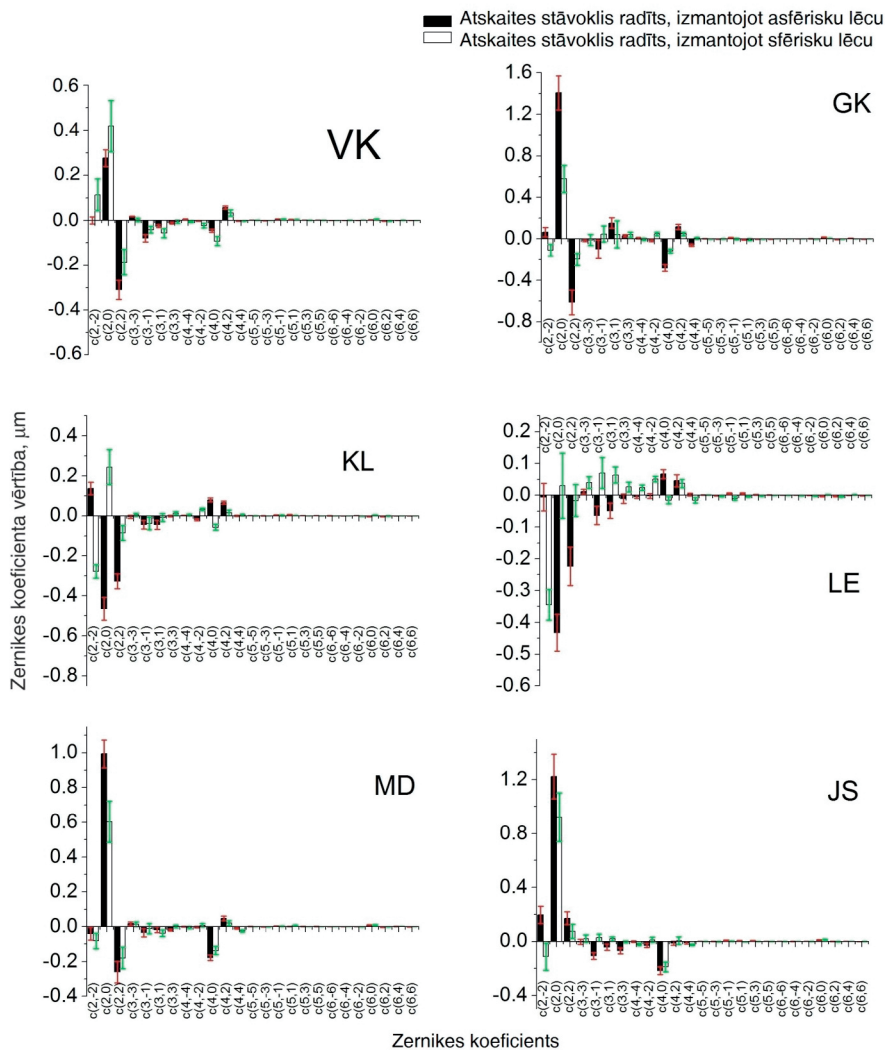
kur l' ir attēla attālums no lēcas, l ir objekta attālums no lēcas, bet F ir lēcas optiskais stiprums. Izmantojot lēcas pamatvienādojumu, iespējams aprēķināt, ka uz mikrolēciņu matricas krītošās viļņu frontes liekums $R \approx 207 \text{ mm}$, kam atbilst optiskais stiprums $+4.82 \text{ D}$. Šī vērtība ir tuva tai, kas tika aprēķināta, izmantojot centroīdu nobīdes. Pamatototies uz šiem aprēķiniem, var secināt, ka 0.15 D ir ticams sfēriskās aberācijas apjoma novērtējums sfēriskai lēcai, kas tika izmantota atskaites stāvokļa iestatīšanai.

3.6.3.2. Acs aberāciju mērījumi

3.6.3.2.1. attēlā parādīti kalibrēšanas rezultāti visām aberācijām no 2. kārtas līdz 6. kārtai. Nobīde un prizmatiskie efekti grafikos nav parādīti tāpēc, ka šīs aberācijas nemaina viļņu frontes formu. Grafiki parādīti visiem eksperimenta dalībniekiem.

3.6.3.2.1. tabula. Eksperimenta dalībnieku aberāciju RMS vērtības attiecībā pret abiem atskaites stāvokļiem (A – asfērisks, S – sfērisks).

Eksperimenta dalībnieks	Kopējā RMS vērtība (μm)		Zemāko kārtu aberāciju RMS vērtība (μm)		Augstāko kārtu aberāciju RMS vērtība (μm)	
	A	S	A	S	A	S
VK	0.431	0.488	0.415	0.472	0.114	0.123
GK	1.578	0.601	1.536	0.522	0.363	0.299
KL	0.596	0.387	0.583	0.290	0.123	0.080
JS	1.279	0.952	1.252	0.931	0.258	0.196
LE	0.501	0.369	0.487	0.346	0.115	0.128
MD	1.045	0.652	1.028	0.635	0.190	0.148



3.6.3.2.1. attēls. Visu eksperimenta dalībnieku Zernikes koeficienti attiecībā pret abiem atskaites stāvokļiem. Parādīti Zernikes koeficienti no 2. līdz 6. kārtai.

Vislielākais apjoms bija zemāko kārtu aberācijām. Zemāko kārtu aberāciju apjoms arī visvairāk mainījās atkarībā no izvēlēta atskaites stāvokļa. No augstāko kārtu aberācijām sfēriskai aberācijai c_4^0 bija vislielākais apjoms neatkarīgi no tā, pret kuru atskaites stāvokli aberācijas tika mērītas. 3.6.3.2.1. tabulā parādītas katra novērotāja kopējais RMS, zemāko kārtu aberāciju RMS un augstāko kārtu aberāciju RMS. No visām augstāko kārtu aberācijām komas un sfēriskās aberācijas apjomu visvairāk ietekmēja atskaites stāvokļa izvēle.

Gan kopējais RMS, gan zemāko kārtu aberāciju RMS, gan augstāko kārtu aberāciju RMS bija mazāks, kad aberācijas tika mērītas attiecībā pret sfērisko atskaites stāvokli. Visvairāk atskaites plaknes maiņa ietekmēja zemāko kārtu aberāciju RMS, turpretim augstāko kārtu aberāciju RMS samazinājās tikai par dažām simtdaļām.

3.6.4. Analīze

Vispirms analizēti dati, kas iegūti, aberācijas mērot attiecībā pret sfērisko atskaites stāvokli. Eksperimenta dalībnieku LE, KL un VK refraktīvā kļūda labi atbilst optiskā stipruma vektoriem M , J_0 un J_{45} . Eksperimenta dalībniekiem KL un LE novērojama maza pozitīva sfēriskā aberācija, turpretim VK novērojama maza negatīva sfēriskā aberācija. Visiem trim eksperimenta dalībniekiem sfēriskās aberācijas apjoms un zīme atbilst pētījumiem, kuros analizēta aberāciju attīstība dzīves laikā. Emetropu un tālredzīgu cilvēku grupā vērojama pozitīva sfēriskā aberācija, kas dzīves laikā pieaug. Tuvredzīgai populācijai raksturīga negatīva sfēriskā aberācija.

Optiskā stipruma vektori labi sakrīt ar refrakcijas datiem eksperimenta dalībniekiem JS un MD, turpretim neatbilstība vērojama eksperimenta dalībniecei GK (skat. 3.7.3.2.1. tabulu). Neatbilstība var rasties lielās refraktīvās kļūdas dēļ. Liela refraktīvā kļūda rada lielas punktu nobīdes, kas var būt iemesls punktu piekārtšanai nepareizajām mikrolēciņām. To sauc par savērpšanās efektu [68]. Visiem trim eksperimenta dalībniekiem novērojama negatīva sfēriskā aberācija, kas sākotnēji šķiet pretēji sfēriskās aberācijas izmaiņām līdz ar vecumu, proti, sfēriskā aberācija pieaug pozitīvā virzienā, tomēr ir pētījumi, kuros iegūtie rezultāti apstiprina, ka tuvredzīgiem cilvēkiem ir novērojama negatīva sfēriskā aberācija [69, 70].

Tālāk analizēti aberāciju mērījumi attiecībā pret sfērisko atskaites stāvokli. Līdzīgi kā sfēriskā atskaites stāvokļa gadījumā, zemāko kārtu aberāciju apjoms bija lielāks nekā visu pārējo aberāciju apjoms, un sfēriskās aberācijas apjoms bija lielāks nekā pārējo augstāko kārtu aberāciju apjoms. Vispārīgā gadījumā gan kopējā RMS vērtība, gan zemāko kārtu aberāciju RMS vērtība, gan augstāko kārtu aberāciju RMS vērtība bija mazāka, mērot attiecībā pret sfērisko atskaites stāvokli (skat. 3.7.3.2.1. tabulu). Eksperimenta dalībniekiem KL un LE bija vērojams sfēriskās aberācijas samazinājums. Sfēriskās aberācijas samazinājums varētu būt skaidrojams ar sfērisko aberāciju atskaites stāvokli. Eksperimenta dalībniekam VK samazinājās gan defokuss, gan sfēriskā aberācija. Eksperimenta dalībniekiem GK, JS un MD bija novērojams tuvredzības apjoma samazinājums. Optiskā stipruma vektori, kas aprēķināti, izmantojot Zernikes koeficientus, kas mērīti attiecībā pret sfērisko atskaites plakni, apkopoti 3.7.3.2.1. tabulā. Mazas tuvredzības/tālredzības vietā var tikt izmērīta pretējā veida ametropija. Vidēja līmeņa miopija (JS un MD) tiek novērtēta par zemu. Eksperimenta dalībniecei GK neatbilstība starp optiskā stipruma vektoriem un refraktīvo kļūdu bija vēl lielāka, salīdzinot ar neatbilstību sfēriskā atskaites stāvokļa gadījumā. Var secināt, ka sfēriska atskaites stāvokļa lietošana ierobežo Šaka-Hartmana viļņu frontes sensora dinamisko apgabalu līdzīgi kā savērpšanās efekts, pie tam abi šie efekti summējas.

Iegūtie rezultāti parāda, ka izmērītais aberāciju apjoms mainās atkarībā no atskaites stāvokļa. Kā bija sagaidāms, atskaites stāvokļa maiņa vairāk ietekmēja zemāko nekā augstāko kārtu aberācijas. Vairāki pētnieki analizējuši Zernikes koeficientu vērtību sadalījumu lielā cilvēku grupā. Aberāciju apjoms atšķiras ne tikai, tās mērot ar dažādām aberometrijas metodēm, bet arī ar dažādiem Šaka-Hartmana viļņu frontes sensoriem [71]. Pētījumā [71] salīdzināti četri dažādi Šaka-Hartmana viļņu frontes sensori, no kuriem divu sensoru (Irx3 un Keratron) darbības pamatā ir Šaka-Hartmana princips. Aberācijas tika mērītas 5 milimetru zīlītei. Defokusa c_2^0 atšķirība starp Irx3 un Keratron bija 0.92 μm jeb aptuveni 1 D. Atšķirīgs bija ne tikai defokusa apjoms, bet arī sfēriskās aberācijas un trīslapiņu aberācijas apjoms. Promocijas darbā veiktajā pētījumā var secināt, ka iemesls aberāciju atšķirībai ir dažāda kalibrēšanas procedūra katram sensoram.

Pētījumā [72] salīdzināts Bausch un Lomb Zywave Šaka-Hartmana viļņu frontes sensors un autorefraktometrs. Piecu milimetru zīlītei tika iegūta 0.3 D liela defokusa atšķirība. Šai defokusa atšķirībai atbilst 0.3 μm liela koeficienta c_2^0 atšķirība (zīlītes izmērs 5 mm). Pētījumā [73] salīdzināti WaveScan, LADARWave un ZyWave viļņu frontes aberometri, kas strādā, pamatojoties uz Šaka-Hartmana principu. Pētījumā [73] tika iegūta 0.2 μm RMS vērtības atšķirības starp izmērīto augstāko kārtu aberāciju apjomu.

Pētījumā [48], izmantojot viļņu frontes sensoru Allegreto, lielā emetropu cilvēku grupā tika izmērītas viļņu frontes aberācijas līdz 6. kārtai. Pētījuma [48] autori novēroja mazu pozitīvu sfērisko aberāciju (+0.08 μm 6 mm zīlītei). Citos pētījumos [74, 75] tika iegūta ievērojami lielāka sfēriskās aberācijas vērtība. Ir zināms, ka līdz ar vecumu sfēriskā aberācija pieaug pozitīvā virzienā. Kā iespējamo iemeslu novērotajai atšķirībai pētījuma [48] autori min aberometra iekšējo pozitīvo sfērisko aberāciju, kas kompensē negatīvu sfērisko aberāciju. Līdzīgā veidā tiek skaidroti arī promocijas darbā iegūtie rezultāti.

Atskaites plaknes izvēle var ietekmēt arī aberāciju korekciju, izmantojot adaptīvo optiku. Izmērītais aberāciju apjoms vairāk atbilst objektīvai refrakcijai un literatūrā iegūto pētījumu rezultātiem tad, ja mērījumiem tiek izvēlēta atskaites stāvoklis, kas iestatīts, izmantojot asfērisku lēcu. Ja aberāciju korekcijai tiek izvēlēta atskaites plakne, kas iestatīta, izmantojot sfērisku lēcu, tad pēc adaptīvās optikas korekcijas daļa acs aberāciju paliek nekompensētas.

Praktiskā nozīmība

1. Promocijas darbā veikto pētījumu rezultāti sniedz iespēju analizēt, cik ikdienā būtiskas ir acs optiskās nepilnības. Iegūtās zināšanas par redzes sistēmas adaptācijas procesiem sniedz iespēju prognozēt, cik lielā mērā aberācijas jākorrigē. Vernjē asuma pētījumi apliecina, ka aberāciju radīto apmiglojumu redzes sistēma ir iemācījusies izmantot savā labā specifisku redzes funkciju nodrošināšanai.

2. Aberāciju simulācijas eksperimenti pierāda, ka, izmantojot datorprogrammas, kas automātiski analizē tīklenes attēlus, ir jāņem vērā aberāciju efekti. Ja oftalmologa rīcībā ir aberometrs, tad tīklenes attēlus iespējams apstrādāt matemātiski, neitralizējot aberāciju efektus un to ietekmi uz tīklenes struktūru redzamo formu.

3. Precīzai aberāciju mērīšanai/korekcijai nepieciešama rūpīga adaptīvās optikas sistēmas kalibrācija. Kalibrācijai bieži tiek izmantotas fāzu plāksnītes, kam ir noteikts optiskais stiprums un aberāciju struktūra. Promocijas darbā parādīts, ka šādas plāksnītes iespējams izgatavot, izmantojot ļoti vienkāršu bināro spožuma skalas masku un nav nepieciešamas sarežģītas litogrāfijas metodes.

Izmantotā literatūra

1. L. Zhu, P. C. Sun, D. U. Bartsch, W. R. Freeman, Y. Fainman. „Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror”. *Applied Optics* 38, 6019 – 6026 (1999).
2. E. Hecht. *Optics* (4th edition). Pearson Addison Wesley, 539 (2003).
3. X. Cheng, A. Bradley, S. Ravikumar, L.N. Thibos. „The visual impact of Zernike and Seidel forms of monochromatic aberrations”. *Optometry & Vision Science* 87, 300 – 312 (2010).
4. S. Marcos, L. Sawides, E. Gamba, C. Dorronsoro. „Influence of adaptive-optics ocular aberration correction on visual acuity at different luminances and contrast polarities”. *Journal of Vision* 13, 1–12 (2008).
5. J. Liang, D. R. Williams, D. T. Miller. „Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics”. *Journal of the Optical Society of America A* 14, 2884 – 2892 (1997).
6. N. Yamane, K. Miyata, T. Samejima, T. Hiraoka, T. Kiuchi, F. Okamoto, Y. Hiro-hara, T. Mihashi, T. Oshika. „Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after compensational laser in situ keratomileusis”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 45, 3986–3990 (2004).
7. J. R. Jiménez, J. J. Castro, R. Jiménez, E. Hita. „Interocular differences in higher-order aberrations on binocular visual performance”. *Optometry and Vision Science* 85, 174 – 179 (2008).
8. L. Chen, P. B. Kruger, H. Hofer, B. Singer, D. R. Williams. „Accommodation with higher-order monochromatic aberrations corrected with adaptive optics”. *Journal of the Optical Society of America A* 23, 1 – 8 (2006).
9. S. Li, Y. Xiong, J. Li, N. Wang, Y. Dai, L. Xue, H. Zhao, W. Jiang, Y. Zhang, J. C. He. „Effects of monochromatic aberration on visual acuity using adaptive optics”. *Optometry and Vision Science* 86, 868 – 874 (2009).
10. P. Artal, L. Chen, E. J. Fernández, B. Singer, S. Manzanera, D. R. Williams. „Neural compensation for the eye’s optical aberrations”. *Journal of Vision* 4, 281 – 287 (2004).
11. L. Chen, P. Artal, D. Gutierrez, D. R. Williams. „Neural compensation for the best aberration correction”. *Journal of Vision* 7, 1 – 9 (2007).
12. D. X. Hammer, R. D. Ferguson, C. E. Bigelow, N. V. Iftimia, T. E. Ustun. „Adaptive optics scanning laser ophthalmoscope for stabilized retinal imaging”. *Optics Express* 14, 3354 – 3367 (2006).
13. P. Godara, A. M. Dubis, A. Roorda, J. L. Duncan, J. Carroll. „Adaptive optics retinal imaging: emerging clinical applications”. *Optometry and Vision Science* 87, 930 – 941 (2010).
14. A. Roorda, F. R. Borja, W. Donnelly, H. Queener, T. Hebert, M. Campbell. „Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy”. *Optics Express* 10, 405 – 412 (2002).
15. A. R. Elkington, H. J. Frank, M. J. Greaney. *Clinical optics*. Wiley-blackwell, 235 (1999).
16. J. J. Hunter, M. C. W. Campbell. „Potential effect on the retinoscopic reflex of scleral Eexpansion surgery for presbyopia”. *Optometry and Vision Science* 83, 649 – 656 (2006).
17. <http://www.imagine-eyes.com/content/view/26/51/>
18. http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/1351/1384175/image/simple_adaptive_optics.gif
19. V. Lakshminarayanan, J. M. Enoch. „Vernier acuity and aging”. *International Ophthalmology* 19, 109 – 115 (1995).
20. M. Ozolinsh, I. Martín, D. Lauva, V. Karitans. „Howard-Dolman stereovision test at different opponent colour stimuli”. (pieņemts publicēšanai žurnālā *Journal of Modern Optics*).
21. A. W. Snyder, D. T. Miller. „Photoreceptor diameter and spacing for highest resolving power”. *Journal of the Optical Society of America A* 67, 696 – 697 (1977).

22. G. Westheimer. „The spatial sense of the eye”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 18, 893 – 912 (1979).
23. R. A. Williams, J. M. Enoch, E. A. Essock. „The resistance of selected hyperacuity configurations to retinal image degradation”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 25, 389 – 399 (1984).
24. M. H. Hennig, F. Wörgötter. „Eye micro-movements improve stimulus detection beyond the Nyquist limit in the peripheral retina”. *Advances in Neural Information Processing Systems* 16, 1475 – 1482 (2004).
25. A. W. Snyder. „Hyperacuity and interpolation by the visual pathways”. *Vision Research* 22, 1219–1220 (1982).
26. M. Malania, M. H. Herzog, G. Westheimer. „Grouping of contextual elements that affect Vernier thresholds”. *Journal of Vision* 7, 1 – 7 (2007).
27. R. A. Crone, O. M. Leuridan. „Tolerance for aniseikonia. II. Determination based on the amplitude of cyclofusion”. *Albrecht von Graefes Archiv fur klinische und experimentelle Ophthalmologie* 188, 17–22 (1973).
28. M. A. Webster, Y. Mizokami, L. A. Svec, S. L. Elliott. „Neural adjustments to chromatic blur”. *Spatial Vision* 19, 111–132 (2006).
29. J. S. Werner, S. L. Elliott, S. S. Choi, N. Doble. „Spherical aberration yielding optimum visual performance: Evaluation of intraocular lenses using adaptive optics simulation”. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* 35, 1229 – 1233 (2009).
30. S. Süsstrunk, J. Holm, G. D. Finlayson. „Chromatic adaptation performance of different RGB sensors”. *IS&T/SPIE Electronic Imaging 4300*, 1 – 12 (2001).
31. J. H. Hateren, H. P. Snippe. „Phototransduction in primate cones and blowfly photoreceptors: different mechanisms, different algorithms, similar response”. *Journal of Comparative Physiology A* 192, 187 – 197 (2006).
32. D. Tranchina, J. Sneyd, I. D. Cadenas. „Light adaptation in turtle cones. Testing and analysis of a model for phototransduction”. *Biophysical Journal* 60, 217 – 237 (1991).
33. G. L. Fain, H.R. Matthews, M. C. Cornwall, Y. Koutalos. „Adaptation in vertebrate photoreceptors”. *Physiological Reviews* 81, 117–151 (2001).
34. C. J. Bartleson. „Changes in color appearance with variations in chromatic adaptation”. *Color Research & Application* 4, 119–138 (2007).
35. D. Alleysson, S. Süsstrunk. „On adaptive non-linearity for color discrimination and chromatic adaptation”. *Proc IS&T Conf on Color in Graphics, Imaging and Vision* 1, 190–195 (2002).
36. J. S. Wang, M. E. Estevez, M. C. Cornwall, V. J. Kefalov. „Intra-retinal visual cycle required for rapid and complete cone dark adaptation”. *Nature Neuroscience* 12, 295–302 (2009).
37. A. Daugirdienė, H. Vaitkevičius. „Colour perception: contrast and adaptation”. *Biologija* 2, 32 – 36 (2002).
38. F. Keller, P. Koeppel, C. Emde. „Exponential function of chymotrypsin action”. *Enzyme* 31, 39–44 (1984).
39. J. B. Hurley. „Shedding light on adaptation”. *The Journal of General Physiology* 119, 125 – 128 (2002).
40. O. Rinner, K. R. Gegenfurtner. „Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination”. *Vision Research* 40, 1813–1826 (2000).
41. M. D. Fairchild, L. Reniff. „Time course of chromatic adaptation for color appearance judgments”. *Journal of the Optical Society of America A* 12, 824–833 (1995).
42. <http://vision.berkeley.edu/roordalab/aoslo.htm>
43. A. A. Martinez, P. R. Sankaridurg, T. J. Naduvilath, P. Mitchell. „Monochromatic aberrations in hyperopic and emmetropic children”. *Journal of Vision* 9, 1 – 14 (2009).

44. A. Guirao, M. Redondo, E. Geraghty, P. Piers, S. Norrby, P. Artal. „Corneal optical aberrations and retinal Image quality in patients in whom monofocal intraocular lenses were implanted” *Archives of Ophthalmology* 120, 1143 – 1151 (2002).
45. R. Kosaki, N. Maeda, K. Bessho, Y. Hori, K. Nishida, A. Suzaki, Y. Hirohara, T. Mihashi, T. Fujikado, Yasuo Tano. „Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with keratoconus”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 48, 3062 – 3068 (2007).
46. Y. Levy, O. Segal, I. Avni, D. Zadok. „Ocular higher-order aberrations in eyes with supernormal vision”. *American Journal of Ophthalmology* 139, 225 – 228 (2005).
47. J. C. He, P. Sun, R. Held, F. Thorn, X. Sun, A. Gwiazda. „Wavefront aberrations in eyes of emmetropic and moderately myopic school children and young adults”. *Vision Research* 42, 1063 – 1070 (2002).
48. S. Plainis, I. G. Pallikaris. “Ocular monochromatic aberration statistics in a large emmetropic population”. *Journal of Modern Optics* 55, 759–772 (2008).
49. C. Muramatsu, Y. Hatanaka, T. Iwase, T. Hara, H. Fujita. „Automated detection and classification of major retinal vessels for determination of diameter ratio of arteries and veins”. *Proc. of SPIE* 7624, 76240J-1 (2010).
50. N. L. Stokoe, R. W. D. Turner. „Normal retinal vascular pattern”. *British Journal of Ophthalmology* 50, 21 – 40 (1966).
51. T. T. Nguyen, J. J. Wang, F. M. A. Islam, P. Mitchell, R. J. Tapp, P. Z. Zimmet, R. Simpson, J. Shaw, T. Y. Wong. „Retinal arteriolar narrowing predicts incidence of diabetes: the australian diabetes, obesity and lifestyle (AusDiab) study”. *Diabetes* 57, 536 – 539 (2007).
52. B. J. H. Born, C. A. A. Hulsman, J. B. L. Hoekstra, R. O. Schlingemann, G. A. Montfrans. „Value of routine funduscopy in patients with hypertension: systematic review”. *BMJ* 331, 1–5 (2005).
53. A. R. Sharrett, L. D. Hubbard, L. S. Cooper, P. D. Sorlie, R. J. Brothers, F. J. Nieto, J. L. Pinsky, R. Klein. „Retinal arteriolar diameters and elevated blood pressure”. *American Journal of Epidemiology* 150, 263 – 270 (1999).
54. T. Y. Wong, A. Shankar, R. Klein, B. E. K. Klein, L. D. Hubbard. „Retinal arteriolar narrowing, hypertension, and subsequent risk of diabetes mellitus”. *Archives of Internal Medicine* 165, 1060 – 1065 (2005).
55. P. Jain, A. Gupta, B. K. Sharma. „A correlative study of ophthalmoscopy and fluorescein angiography in systemic hypertension”. *Indian Journal of Ophthalmology* 38, 169 – 174 (1990).
56. E. Z. Rath, U. Rehany, S. Linn, S. Rumelt. „Correlation between optic disc atrophy and aetiology: anterior ischaemic optic neuropathy vs optic neuritis”. *Eye* 17, 1019 – 1024 (2003).
57. L. Wang, D. D. Koch. „Effect of decentration of wavefront-corrected intraocular lenses on the higher-order aberrations of the eye”. *Archives of Ophthalmology* 123, 1226 – 1230 (2005).
58. R. Bellucci, S. Morselli. „Optimizing higher-order aberrations with intraocular lens technology”. *Current Opinion in Ophthalmology* 18, 67 – 73 (2007).
59. S. Fomins, M. Reinfelde, A. Larichev, N. Iroshnikov, A. Gerbreders, M. Ozolinsh. „Photoinduced AsSeS thin film phase plates as adaptive optics mirrors for eye aberration correction”. *Proc. SPIE* 7142, 71421C (2008).
60. R. Navarro, E. M. Barriuso, S. Bará, and T. Mancebo. „Phase plates for wave-aberration compensation in the human eye”. *Optics Letters* 25, 236 – 238 (2000).
61. G. Yoon, T. M. Jeong, I. G. Cox, D. R. Williams. „Vision improvement by correcting higher-order aberrations with phase plates in normal eyes”. *Journal of Refractive Surgery* 20, 523 – 527 (2004).
62. R. Voelkel, U. Vogler, A. Bich, P. Pernet, K. J. Weible, M. Hornung, R. Zoberbier, E. Cullmann, L. Stuerzebecher, T. Harzendorf, U. D. Zeitner. “Advanced mask aligner lithography: new illumination system”. *Optics Express* 18, 20968 – 20978 (2010).

63. C. Falldorf, W. Osten, E. Kolenovic. „Speckle shearography using a multiband light source”. *Optics and Lasers in Engineering* 40, 543 – 552 (2003).
64. Y. Chen, H. Zhao, Z. Wang. „Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source”. *Optical Review* 16, 26 – 29 (2009).
65. P. Rodríguez, R. Navarro, J. Arines, S. Bará. „A new calibration set of phase plates for ocular aberrometers”. *Journal of Refractive Surgery* 22, 275 – 284 (2006).
66. A. Chernyshov, U. Sterr, F. Riehle, J. Helmcke, J. Pfund. “Calibration of a Shack–Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts”. *Applied Optics* 44, 6419 – 6425 (2005).
67. G. Artzner. „On the absolute calibration of Shack-Hartmann sensors and UT laboratory wavefront measurements”. *Pure and Applied Optics* 3, 121 – 132 (1994).
68. L. Lundström, P. Unsbo. “Unwrapping Hartmann-Shack images from highly aberrated eyes using an iterative b-spline based extrapolation method”. *Optometry and Vision Science* 81, 383 – 288 (2004).
69. F. Karimian, S. Feizi, A. Doozande. „Higher-order aberrations in myopic eyes”. *Journal of Ophthalmic and Vision Research* 5, 3 – 9 (2010).
70. G. Yoon, S. MacRae, D. R. Williams, I. G. Cox. „Causes of spherical aberration induced by laser refractive surgery”. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* 31, 127 – 135 (2005).
71. N. Visser, T. T. Berendshot, F. Verbakel, A. N. Tan, J. Brabander, R. M. Nuijts, “Evaluation of the comparability and repeatability of four wavefront aberrometers”. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 10, 1302 – 1311 (2011).
72. M. J. Dobos, M. D. Twa, M. A. Bullimore. „An evaluation of the Bausch & Lomb Zywave aberrometer”. *Clinical and Experimental Optometry* 92, 238 – 245 (2009).
73. C. L. Liang, S. H. H. Juo, C. J. Chang. „Comparison of higher-order wavefront aberrations with 3 aberrometers”. *Journal of Cataract & Refractive Surgery* 31, 2153 – 2156 (2005).
74. J. Bao, R. Le, J. Wu, Y. Shen, F. Lu, J. C. He. „Higher-order wavefront aberrations for populations of young emmetropes and myopes”. *Journal of Optometry* 2, 51 – 58 (2009).
75. J. F. C. Mochón, N. L. Gil, A. Benito, P. Artal P. „Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population”. *Vision Research* 42, 1611 – 1617 (2002).

Publikāciju saraksts

1. M. Ozolinsh, M. Colomb, G. Ikaunieks, V. Karitans. "Color stimuli perception in presence of light scattering". *Visual Neuroscience*, 23, 597-601 (2006).
2. V. Karitans, M. Ozolinsh, G. Kupriša. "Electronic eye occluder with time-counting and reflection control". *Proc. SPIE 7142, 71421B-71421B-8* (2008).
3. S. Fomins, M. Ozolinsh, G. Krumina, V. Karitans. „Ferroelectric Liquid Crystal Glasses For Amblyopia Research” *Integrated Ferroelectrics* 103, 10 – 18 (2008).
4. V. Karitans, M. Ozolinsh. „Method for compensation of eye movements in adaptive optics”. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 47, 51 – 56 (2010).
5. M. Kuibida, V. Karitans. „Influence of optical aberrations of an eye on resolution of dichoptic images”. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 47, 55 – 61 (2010).
6. V. Karitans, M. Ozolinsh, L. Ekimane, K. Luse. „Dependence of Vernier acuity on the extent of retinal blur”. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 48, 49 – 57 (2011).
7. K. Luse, A. Pausus, V. Karitans, M. Ozolins, M. Tukisa. „Evaluation of retro-reflective coating performance by reflectance and perceived relative brightness measurements”. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 23, 1 – 5 (2011).
8. V. Karitans, M. Ozolinsh, S. Fomins, A. Svede, G. Krumina, N. Iroshnikov. „Influence of ocular aberrations on the diameter of retinal blood vessels”. *Journal of Modern Optics* 58, 1703 – 1709, 2011.
9. M. Ozolinsh, I. Martin, D. Lauva, V. Karitans. „Howard-Dolman stereovision test at different opponent colour stimuli”. *Journal of Modern Optics* 58, 1749 – 1754, 2011.
10. V. Karitans, M. Ozolinsh, L. Ekimane, K. Luse. „Presence of spherical aberration in the reference as a possible source of variations in magnitude of measured ocular aberrations”. (Pieņemts publicēšanai žurnālā 'Optica Applicata' un tiks publicēts 42. sējumā, 3. numurā).

Konferenču tēzes

1. V. Karitans, M. Ozolinsh. "Perception of saturation of colours and dominant wavelength discrimination in central and peripheral retina." Eiropas Redzes Uztveres Konference ECVP-2007, Arezzo, Italy, 23.08.2007.-27.08.2007. Perception Supplement 36 p.193
2. M. Ozolinsh, V. Karitans. „Vai viegli ieskatīties pašam sev acīs?“ Pirmais Latvijas inovatīvās mikroskopijas seminārs, Daugavpils, Latvija, 27.04.2007-29.04.2007.
3. V. Karitans, M. Ozolinsh. „Dynamical Visual Acuity in the Presence of Light Scattering.” Photonics and Informatics, St. Petersburg, Russia, 04.09.2006. – 07.09.2006. Proceedings pp. 269-270.
4. V. Karitans, M. Ozolinsh, G. Kuprisha "Electronic eyeoccluder with time-counting and reflection control." 6th International Conference Advanced optical materials and devices, Riga, Latvia, 24.08.2008. – 27.08.2008. Programme and Abstract p. 90.
5. V. Karitāns, M. Ozoliņš, S. Fomins, "Adaptīvā optika redzes zinātnei – hiperasuma pētījumi acīar koriģētām augstāko kārtu aberācijām." LU CFI. 25. zinātniskā konference, vēltīta doc. Ludviga Jansona simtgadei, Rīga, Latvija, 11.02.2009. -13.02.2009. Tēžu grāmata 48. lpp.
6. V. Karitans, M. Ozolinsh, „Vernier acuity in presence/absence of eye aberrations.” Developments in Optics and Communications-2009, Riga, Latvia, 24.04.2009.-26.04.2009. Abstract book p.41.
7. V. Karitans, M. Ozolinsh, S. Fomins, „Dependence of Vernier acuity on the presence/absence of aberrations of a human eye.” Eiropas Redzes Uztveres Konference ECVP-2009, Regensburg, Germany, 24.08.2009.-28.08.2009. Perception Supplement 38 p.128
8. V. Karitans, M. Ozolinsh, „Methods of Compensating Eye Movements in Adaptive Optics Systems” Developments in Optics and Communications- 2010, Riga, Latvia, 23.04.2010. – 25.04.2010. Abstract book p. 35
9. V. Karitans, M. Kuibida, „Aberāciju ietekme uz dihoptiskuattēlu atšķiršanas spēju” Konference Lāzeram 50, Daugavpils, Latvija, 28.06.2010. – 29.06.2010. Tēžu grāmata p. 23
10. V. Karitans, M. Ozolinsh, „Simulating Retinal Vascular Disorders by Imposing Different Types of Higher-order Aberrations on Retinal Images”. 5th European Meeting on Visual and Physiological Optics (EMVPO), Stockholm, Sweden, 22.08.2010. – 24.08.2010. Abstract book p.58.
11. V. Karitans, M. Ozolinsh, K. Luse. „Dependence of wavefront aberrations on spectral properties of Shack-Hartmann wavefront sensor”. Functional Materials and Nanotechnologies – 2011, Riga, Latvia, 05.04.2011. – 08.04.2011. Abstract book p. 102.
12. K. Luse, A. Pausus, V. Karitans, M. Ozolins, M. Tukisa. „Evaluation of commercial retroreflective coating performance in decreased visibility conditions”. Functional Materials and Nanotechnologies – 2011, Riga, Latvia, 05.04.2011. – 08.04.2011. Abstract book p. 100.
13. V. Karitans, M. Ozolinsh, S. Fomins, N. Iroshnikov, A. Larichev. „A/V Ratio as Predicted by Full Width at Half Maximum and by Blood Vessel Tracking in Presence of Ocular Aberrations”. Adaptive Optics: Methods, Analysis, Applications, Toronto, Canada, 08.07.2011.– 14.07.2011. Abstract book p. 32.
14. V. Karitans, M. Ozolish. „Vernier acuity as a function of higher-order ocular aberrations”. DOC-2011, Riga, Latvia, 28.04.2011. – 30.04.2011. Abstract book p. 68.
15. E. Skutele, V. Karitans. „Producing of ray tracing aberrometer for studying wavefront deformations”. DOC-2011, Riga, Latvia, 28.04.2011. – 30.04.2011. Abstract book p. 70.
16. K. Luse, M. Ozolins, V. Karitans, I. Jekabsons. „Effect of position of retroreflective signs on recognition of pedestrian in reduced visibility conditions”. DOC-2011, Riga, Latvia, 28.04.2011. – 30.04.2011. Abstract book p. 26.

Pateicības

Vēlos izteikt sirsnīgu pateicību darba vadītājam prof. **Mārim Ozoliņam** par sniegto palīdzību un izrādīto ieinteresētību darba tapšanas gaitā. Pateicos prof. **Ivaram Lācim** par atsaucību un palīdzību. Paldies **Sergejam Fominam, Kārlim Kundziņam, Eļinai Laizānei un Modrim Loginam** par vērtīgiem padomiem un praktisku palīdzību, kā arī Latvijas Universitātes Fizikas un Matemātikas fakultātes Optometrijas un Redzes zinātnes nodaļai un Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas Institūta kolēģiem par atbalstu. Paldies visiem studentiem, kas piedalījās eksperimentos, kā arī maniem draugiem un tuviniekiem par morālo atbalstu.

Darbs tapis ar Eiropas Sociālā Fonda projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” atbalstu.



Latvijas Universitātes
Cietvielu fizikas institūts

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

