



LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE

KRĀSU UN FORMAS NOZĪME ATTĒLU ATPAZĪŠANĀ

Sergejs Fomins

Promocijas darbs

Doktora zinātniskā grāda iegūšanai fizikā

Apakšnozare: medicīniskā fizika

Rīga, 2010

Saturs

Anotācija	4
Abstract	5
Ievads	6
1. TEORĒTISKĀ DAĻA	9
1.1. Redzes garozas struktūras formu un krāsu uztverei	9
1.2. Redzes sistēmas hierarhiskā uzbūve ventrālajā plūsmā	9
1.2.1. Tīklene	9
1.2.2. Laterālais ceļagalveida ķermenis	13
1.2.3. Primārā redzes garoza V1	14
1.2.4. Receptīvā lauka jēdziens	15
1.3. Tekstūru segregācija jeb atšķiršana	20
1.4. Stimulu maskēšanas metode	21
1.4.1. Maskēšanas pielietojums un izmantošana	22
1.5. Krāsu redze	23
1.5.1. Krāsu sajūta	23
1.5.2. Krāsu raksturojošās īpašības	23
1.5.3. Tīkles fotoreceptoru jutības līknes un krāsu saskaņošanas funkcijas	24
1.5.4. CIE definētā krāsu attēlošana	25
1.5.5. Fizioloģiski pamatotas krāsu telpas	26
1.5.6. Citas bieži lietotajās krāsu telpas	30
1.6. Krāsu redzes teorijas	30
1.6.1. Trihromātiskā krāsu redzes teorija	30
1.6.2. Oponento krāsu teorija	30
1.6.3. Modernā oponento krāsu teorija	31
1.7. <i>Bezold-Brücke</i> fenomens un unikālās krāsas	31
1.8. Krāsu pēcefekts un aizpildījuma fenomens	32
1.9. Krāsu redzes traucējumi	33
EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA	34
2. TEKSTŪRU ATPAZĪŠANAS EKSPERIMENTI	34
2.1. Uztveres treniņi ar tekstūru atpazīšanas uzdevumu	34
2.1.1. Dalībnieki	34
2.1.2. Stimuli un metodes	34
2.1.3. Iekārta un programma	36
2.1.4. Eksperimenta gaita	37
2.1.5. Rezultāti un to analīze	37
2.1.6. Diskusija	45
2.2. KONTEKSTA IESPAIDS TEKSTŪRU UZTVĒRĪ	45
2.2.1. Dalībnieki	45
2.2.2. Stimuli un metode	45
2.2.3. Rezultāti	46
2.2.4. Diskusija	48

2.3. METODES PIELIETOJUMI AMBLIOPIJAS PĒTĪJUMIEM.....	48
2.3.1. Ievads	48
2.3.2. Pielietota aparatūra un metodes	49
2.3.3. Eksperimenta dalībnieks	50
2.3.4. Rezultāti	50
2.3.5. Diskusija.....	51
2.4. Secinājumi	51
3. KRĀSU REDZES TESTU MULTISPEKTRĀLĀ ANALĪZE.....	52
3.1. Ievads.....	52
3.2. Darbā izmatotie krāsu redzes deficītu noteikšanas testi	52
3.3. Izmantotā aparatūra un metodes	53
3.4. Analīze.....	54
Kross korelācija.....	55
3.5. REZULTĀTI	56
3.5.1. Kross korelācijas kontrasts.....	56
3.5.2. Testu krāsu koordinātes	58
3.6. Diskusija	60
3.7. Secinājumi	60
4. PAPILDKRĀSU NOTEIKŠANA	61
4.1. Pēcefekta noteikšanas metodikas izstrāde un papildkrāsu noteikšana	61
4.1.1. Eksperimenta dalībnieki	61
4.1.2. Metodika un stimul krāsu pēcefekta radīšanai	61
4.1.3. Eksperimenta gaita	62
4.1.4. Monitora raksturošana.....	62
4.1.5. Rezultāti	64
4.2. Papildkrāsu noteikšana krāsu redzes traucējumu gadījumā	66
4.2.1. Eksperimenta dalībnieki.....	66
4.2.2. Datu analīze.....	66
4.2.3. Monitora raksturošana.....	66
4.2.4. Rezultāti	67
4.2.5. Diskusija.....	71
4.3. Pēcefekta kontrasta mehānismi	73
4.3.1. Stimuls, dalībnieki un metode.....	73
4.3.2. Rezultāti	73
4.3.3. Diskusija.....	76
4.4. Secinājumi	76
5. KRĀSU AIZPILDĪŠANA STARP KONTŪRAM DAŽĀDĀM FORMĀM.....	77
5.1. Eksperimenta dalībnieki	77
5.2. Metodika un stimuli.....	77
5.3.1. Eksperimenta uzbūve	77
5.4. Rezultāti.....	78
5.4.1. Divdimensionālā datu attēlošana	80

5.4.2. Rezultāti CIE xy krāsu koordinātēs	81
5.4.3. Pēcefekta maksimālo lielumu salīdzinājums starp stimuliem.....	81
5.5.Diskusija	82
5.6.Secinājumi	82
AIZSTĀVAMĀS TĒZES	83
Literatūras saraksts.....	84
Publikāciju saraksts	91
Tēzes starptautiskās konferencēs	92

Anotācija

Redzes uztvere ir sarežģīts process, kurš ir atkarīgs no stimula veida (forma, krāsa, kustība) un tā optiskajiem parametriem (spožuma, kontrasta, spektrālā sastāva u.c.). Formas uztvere redzes sistēmā sākas ar vizuālo detaļu novietojuma virziena un elementu garuma kodēšanu, kas hierarhiskā redzes sistēmas modelī atbilst primāras redzes garozas līmenim. Darbā ir pētīti orientētu virsmas tekstūru atpazīšanas raksturlielumi atkarībā no stimulu konteksta (blakus esoša papildus modulācija). Izmantotā metodika atšķirās no iepriekš pielietotajām konteksta izraisītas modulācijas pētījumiem, kad kontrasta vietā ir izmantoti temporālie stimuli kopā ar maskēšanas metodi. Parādīts, ka uztveres treniņi ar teksturētām virsmām uzrāda atpazīšanas uzlabojumu, vismaz divreiz samazinot sākuma atpazīšanas sliekšni. Redzes treniņos ar hromatiskām tekstūrām tika noskaidrots, ka lielākais sliekšņa pazeminājums ir novērojams pie sarkani-zaļajiem stimuliem. Piedāvāta metodika redzes parametru uzlabošanai ambliopijas gadījumā.

Krāsu uztvere sākas tīklenē, kur krītoša gaisma tiek absorbēta trīs tipu receptoros un tālāk elektrisko signālu veidā nosūtīta augstākām smadzeņu zonām. Gadījumos, kad ģenētisko faktoru dēļ iztrūkst kāds no foto receptoru pigmentiem, izpaužas krāsu redzes traucējumi, kuru diagnostikai visbiežāk pielieto krāsu redzes testus tabulu veidā. Šīs pseidoizohromatiskās tabulas ne vienmēr ļauj viennozīmīgi atklāt krāsu redzes traucējumus, kam par iemeslu var būt drukāto testu lapu nodzeltēšana vai nepareiza apgaismojuma izvēle testa laikā. Lai objektīvi izanalizētu testu pielietojamību krāsu redzes traucējumu diagnosticēšanā, darbā tiek piedāvāti risinājumi, kas izmanto attēlu multispektrālās analīzes iespējas. Pielietotās metodes izmanto cilvēka hromatiskās jutības īpatnības un ietver mašīnu redzes elementus. Izveidotā metode ļauj pētīt pseidoizohromatisko testu dizainu un analizēt to pielietojamību dažādos apgaismojumos. Dotā pētījuma rezultāti ir nozīmīgi krāsu redzes traucējumu pārbaudes testu izveidē un analīzē.

Krāsu uztvere fizioloģiski balstās uz trīs tīklenes fotoreceptoru tipiem un rada tādas parādības kā metamerisms, krāsu pastāvīgums, krāsu indukcija, kā arī redzes ilūzijas. Neskatoties uz to, ka jau sen ir izpētīta vāļišu gaismas jutība, krāsu redzes mehānismiem redzes garozā tiek pievērsta pastiprināta uzmanība arī patlaban. Darbā tika pētīti krāsu pēcefekti personām ar normālu trihromātisko un arī traucētu krāsu redzi un atrastas būtiskās atšķirības tiem novēroto pēcefektu krāsās. Mūsu rezultāti kopumā sakrīt ar citu autoru darbos iegūtajiem, taču sniedz papildus informāciju par krāsu pēcefekta mehānismiem. Darbā izveidotā pēcefekta izpētes metode var tikt attīstīta, kā alternatīva metode krāsu redzes traucējumu testēšanā.

Krāsu un formas redzes uztvere „dala” līdzīgus apstrādes ceļus (ventrālā plūsma). Pēc objekta formas (kontūras) uztveršanas, notiek neapzināta citu objekta parametru aizpildīšana, piemēram, krāsa vai tekstūra. Pēcefekta aizpildīšanas (*filling-in*) pētījumos ir parādīts, ka augstākajos redzes garozas līmeņos formas uztvere ir saistīta ar krāsu kodēšanu. Krāsas, kas veido spēcīgākos pēcefektus aizpildīšanas eksperimentos, ir atšķirīgas no pamata krāsu asīm laterālajā ceļgalveida ķermenī un unikālo toņu virzieniem.

Abstract

Visual perception is a complex process, which depends on the attributes of the stimulus (shape, color, and movement), surround and its optical parameters (radiance, contrast, spectral composition). Form perception in the hierarchical organization of the visual system starts in the primary visual cortex, there most of the simple cell neurons are tuned to the elongated oriented details of different spatial frequency. Texture segmentation characteristics are studied in the current work, depending on the context around the stimuli. The methodology used is different from other contextual modulation studies, where contrast is used instead of the temporal stimulus. It is shown that perceptual training with textured surfaces show improvement in recognition, at least twice reducing the initial detection threshold. Visual exercises for chromatic textures showed that the largest threshold decrease is observed at the red-green stimuli. Method of temporally variable stimuli is used together with ferroelectric shutter goggles to improve the visual characteristics in the case of amblyopia.

Color perception starts at the level of retinal photoreceptors, where the incident light is absorbed by three classes of receptor and in the form of electrical signals is sent to higher cortical areas. Due to genetic factors receptor pigments can be absent, which result in the deficiencies of the color vision. The most popular available color vision diagnostic tests are pseudoisochromatic table. However, not always these tests clearly reveal color vision deficiencies, which could be due to the aging of the printed or choice of the improper source of light. To objectively analyze the performance of the color vision diagnostic plates, we offer solutions based on the multispectral imaging with applied algorithms. The methods use chromatic sensitivities of the photopigments to model a performance of the defective color vision together with machine vision elements for the objective evaluation of the test diagnostic efficiency. The established method makes it possible to study pseudoisochromatic tables design and analyze their applicability in different lighting conditions. Study gains important results for the analysis and design of the color vision deficiency tests.

Color perception is physiologically based on the three classes of retinal photoreceptors with the following postreceptoral and cortical processing, which causes different phenomena such as, metamerism, color constancy, color induction, as well as visual illusions. Despite the fact that cone sensitivities are well studied, color vision mechanisms of visual cortex are widely studied field our days. Color aftereffects are studied in the subjects with normal trichromatic color vision, as also in subjects with impaired color vision. Significant differences in the aftereffect colors are found for subjects. Our results generally concur with the findings of other authors, but provide additional information on color aftereffect mechanisms. Aftereffect method could be used for diagnostics of color vision deficiencies.

Color and shape perception is processed in the ventral pathway. Surface perception includes the processes of construction of shape based on the contour information with following assignment of the visible features, such as color, brightness and texture. Contour filling-in studies have shown that in the cortex form perception is related to the color processing. Colors that produce the strongest aftereffect filling-in are not always complementary, and can be produce between more than two colors. Identified strongest colors are not aligned along unique hue direction or cardinal direction of color space.

Ievads

Redzes sistēmu var iedalīt divās nosacīti atdalītās informācijas apstrādes plūsmās: dorsālā, kurā notiek kustīgu objektu analīze, un ventrālā, kas ir atbildīga par formu un krāsu uztveri. Šajā darbā ir pētīti tie stimulu parametri, kuru apstrāde notiek ventrālajā plūsmā.

Formas uztvere hierarhiskajā redzes sistēmas organizācijā, sākas ar vienkāršo orientēto elementu atpazīšanu. Redzes ainas mums apkārt, satur neskaitāmu daudzumu šādu elementu un procesi redzes primārajā garozā notiek bez uzmanības klātbūtnes. Tas padara orientētu virsmu (jeb tekstūru) izmantošanu redzes eksperimentos par lielisku rīku redzes garozas procesu izpētei.

Pasaulē plaši zināms uzskats, ka jo vecāks cilvēks kļūst, jo mācīšanās process kļūst grūtāks. Agrā bērnībā viss mācīšanās process vairāk vērsts uz jaunu funkciju un iemaņu attīstīšanu, vēlāk pēc kritiskā perioda, kad smadzeņu plasticitāte ir vislielākā, viss vērsts uz esošo funkciju un iemaņu pilnveidošanu. Uztveres mācīšanās ir svarīgs process, jo mūsdienās viss ir vērsts uz pilnveidošanos un jaunu uzdevumu un iemaņu apgūšanu. Ikdienā ilgstoši darot kādu darbu, kur nepieciešama koncentrēšanās uz specifiskām detaļām, mēs nemaz nenojaušam, kam īsti mūsu uztvere ir pielāgojusies un ko esam iemācījušies pēc šī darba veikšanas. Iespējams jau notikusi uztveres mācīšanās kādam konkrētam stimulam vai detaļai. Uztveres mācīšanās ir svarīgs process, jo tas parāda, ka arī pieaugušam cilvēkam ir saglabājusies smadzeņu plasticitāte – spēja mācīties un pielāgoties jauniem redzes apstākļiem un stimuliem. Tas parāda, ka, ja cilvēkam ir motivācija, tas treniņa rezultātā var panākt uzlabojumus. Uztveres mācīšanās varētu būt nozīmīga dažādu profesiju pārstāvjiem, kuriem nepieciešama ātra un precīza specifisku attēlu atšķiršana, kas darba rezultātā var tikt izmantota pat spontāni.

Tekstūru uztveres sliekšņi ir atkarīgi no vairākiem faktoriem: tekstūras kontrasta, telpiskās frekvences un arī krāsu informācijas. Kā rada pētījumi [1, 2] to atpazīšana ir atkarīga arī no apkārt esošo objektu klātbūtnes. Atkarībā no tā vai perifērijā esoša objekta orientācija sakrīt ar centrālā redzes stimula orientāciju, ir atkarīga centrālā stimula uztvere. Iepriekš tika veikti vairāki pētījumi, kuros noskaidroti atbildes pastiprinājuma vai bremsēšanas mehānismi stimuliem ar dažādiem kontrastiem. Stimulācija ārpus receptīvā lauka var, gan inhibēt, gan uzlabot uztveres dinamiku centrālajā receptīvajā laukā, gadījumos kad tiem ir zemāks kontrasts nekā stimuliem perifērijā [3].

Kaut gan kontrasts ir svarīga stimula īpašība, stimula uztveri būtiski ietekmē arī tā izmaiņas laikā. Mēs piedāvājam pārbaudīt konteksta izraisīto iespaidu uz tekstūru atpazīšanu, izmantojot laikā mainīgus maskētus.

Vairums redzes signālu nonāk V1 garozā, kas ir lielākais un svarīgākais redzes sistēmas apgabals. Mūža laikā cilvēkiem mēdz parādīties problēmas, kad nepietiekoša kairinājuma dēļ, procesi V1 zonā netiek pietiekoši attīstīti, kas noved pie pavājinātām redzes funkcijām kādā no acīm. Šādu stāvokli sauc par ambliopiju (acs vājumu) kuras īpatsvars bērnu populācijā ir 1 – 3 % apmērā [4]. Ambliopijas ārstēšanai izmanto aizklāšanas metodi kas veicina vājāk redzošas acs pastiprinātu iesaistīšanu redzes procesā. 2005.gadā Izraēlas kompānija *Ophthocare* prezentēja oklūzijas terapijai paredzētās šķidro kristālu brilles, ar kuru palīdzību būtu iespējams vingrināt vājāko aci. Uz šī pamata, izveidojām brilles redzes treniņiem, kas izmanto šķidro kristālu filtrus abu acu attēlu sadalīšanai. Redzes sistēmas stimulēšanai tika izmantoti laikā mainīgi signāli ar augstu kontrastu, lai nodrošinātu pietiekamu slodzi redzes sistēmai, un veicinātu tās vingrināšanu.

Krāsu uztvere sākas tīklenē, kur gaisma tiek uztverta ar trīs tipu vāļišu palīdzību ar secīgu signālu transformāciju. Gadījumos, kas iztrūkst kāds no vāļišu pigmentiem, rodas krāsu redzes

traucējumi. Traucējuma tips un pakāpe ir atkarīgi no ģenētiskajiem faktoriem, bet visi no tiem noved pie zināmas nespējas atšķirt noteikto krāsu toņus. Eksistē dažādi krāsu redzes testi, ar kuriem var noteikt traucējuma tipu un pakāpi, bet ne vienmēr šie plaši pieejamie testi sniedz viennozīmīgu diagnozi. Tam par iemeslu var būt drukāto testu lapu nodzeltēšana vai nepareiza apgaismojuma izvēle. Lai veiktu objektīvu testu pielietojamības un arī izpildījuma analīzi krāsu redzes traucējumu diagnosticēšanā, mūsu darbā tiek piedāvāti risinājumi, kas izmanto attēlu multispektrālās analīzes iespējas. Spekrālo attēlu iespējams pārrēķināt uz vāļišu jūtību attēliem, kurus tālāk var izmantot krāsu testu uztveršanas modelēšanai pie dažādām vāļišu signālu kombinācijām. Darba uzdevums ir noteikt pseidoizohromatisko testu dizainu un analizēt to pielietojamību dažādos apgaismojumos. Pētījuma rezultāti ir nozīmīgi krāsu redzes traucējumu pārbaudes testu objektīvai izveidei un analīzei. Tiks ekonomēts laiks, jo nebūs nepieciešamas klīniskās pārbaudes, kā arī parādīsies iespēja paredzēt testa izpildījuma rezultātus dažādos apgaismojumos.

Pateicoties sarežģītai neirālai redzes sistēmas uzbūvei, novēro šīs neirālās arhitektūras rādītās parādības, ko sauc par ilūzijām. Viena no senām un plaši zināmām ir krāsu pēcefekts (*Helmholtz*). Tā skaidrošanai parasti izmanto tīklenes pigmentu izbalināšanos [5], kaut gan daži vecāki [6] un pēdējos gados veiktie binokulārie pētījumi [7] liecina arī par neirālās pēcefekta komponentes līdzdalību. Kopumā pēcefekta noteikšana ir sarežģīts darbs, t;a ir saistīta ar uztveres sajūtu, kuras mērījumiem jāizmanto metodes, kas iekļauj salīdzināšanas metodiku. Pēcefekta veidotās krāsas, ko sauc par papildkrāsām (angļu-"*complementary*", vācu - "*gegenfarben*") jau sen tika mēģināts noteikt [8]. Mūsdienu stimulu demonstrēšanas metodes (kalibrētie trihromātiskie displeji), kā arī precīzākas eksperimentu dalībnieku atbilžu vākšanas metodes, var nodrošināt ticamākus datus par krāsu pēcefekta papildkrāsām un tās veidojošiem mehānismiem.

Eksistē vairākas krāsu redzes deficītu simulācijas [9, 10], kas ļauj pārveidot krāsainu attēlu par hipotētiski atbilstošu cilvēkam ar krāsu redzes traucējumiem. Metodēs, kas atspoguļo deitanopu un protanopu krāsu uztveri, sarkanie un zaļie toņi parasti tiek aizstāti ar ziliem un dzelteniem. Mēs piedāvājam pēcefekta rādīto papildkrāsu noteikšanas metodiku izmantot cilvēkiem ar krāsu redzes traucējumiem. Noteiktās papildkrāsas krāsu redzes traucējumu gadījumā var būt noderīga šo personu krāsu uztveres pētīšanai.

1980. gados nozīmīgi attīstījās izpratne par tīklenes un LCK ar krāsu saistītiem procesiem [11, 12]. Ir izveidotas fizioloģiski pamatotas krāsu telpas, kas atspoguļo vāļišu ierosinājumu un postreceptoros mehānismus (MBDKL telpa). No otras puses, eksistē vairāki pētījumi par krāsu uztveri, proti, unikālām krāsām [13, 14, 15], kuri balstās uz cilvēku atbildes sniegšanu par krāsas toņa atbilstību pamatkrāsām. Ir noskaidrotas četras pamatkrāsas, jeb fokālās krāsa, kas izrādās sakrīt arī ar unikālām krāsām [16]. Kaut gan ir veikti vairāki pētījumi par garozas neironu hromatisko jūtību, joprojām ir maz zināms par krāsas apstrādi garozas līmenī (V1, V2, V4 zonās). Vizuālās informācijas uztveres procesā bieži novēro dažādus fenomenus un ilūzijas. Iepriekš minētais pēcefekts ir cieši saistīts ar aizpildīšanas (*filling-in*) procesu, kas ir saistīts ar neapzināto iztrūkstošas informācija aizpildīšanu [17]. Salīdzinot ar pēcefektu, kas rodas ilgstoši (vairāk kā 30 s) novērojot krāsaino virsmu un pamatā balstīts uz pigmentu izbalēšanu, aizpildījums ir neirāls process [17, 18]. Mūsu darbā tiek izmantots signāls, kas uz īsu laiku ar krāsainu objektu stimulē tīklenes apgabalu, pēc kā seko objekta kontūras, kas tiek aizpildītas ar pretējo krāsu. Šāds eksperiments sniedz informāciju par pēcefekta krāsām, kurām ir neirāla daba, par ko liecina arī pēcefekta krāsas maiņa pamainot objektu kontūras. Diemžēl pēcefekta krāsa nevar tikt noteikta tiešajā piemeklēšanas veidā, jo stimula laiks ir īss, līdz ar ko tā salīdzināšana vai aprakstīšana ir apgrūtināta. Lai spriest par aizpildīšanas procesā iegūtām krāsām tika piedāvāta metodika, kas izmanto divu krāsaino stimulu pārus un šo hromatisko pāru veidoto pēcefektu stipruma noteikšanu. Mūsu hipotēze ir sekojoša:-katrai pēcefekta veidotai krāsai

eksistē arī krāsa (papildkrāsa), kura to veido, līdz ar ko šo krāsu pāris veidos spēcīgu (izteiktu) pēcefektu mūsu eksperimentā. Jā krāsas nav papildkrāsas, tas veidos vājāku pēcefektu. Hipotētiski, mūsu piedāvātais eksperimenta novērtējums var izpausties arī unikāliem toņiem.

1. TEORĒTISKĀ DAĻA

1.1. Redzes garozas struktūras formu un krāsu uztverei

Vairākus desmitus gadu ir zināma redzes sistēmas sarežģītā uzbūve, kas ietver vairāk kā 50 dažādas zonas. *Felleman et al* 1991. gadā ir veikuši redzes sistēmas zonu analīzi pēc pieciem galveniem primātu smadzeņu organizācijas principiem: redzes zonu liels skaits, augsts saišu sadalījums starp redzes zonām, atgriezeniskās saites, hierarhiskā uzbūve, izdalīti apstrādes ceļi [19]. Lai ienestu zināmu skaidrību un nenomaldītos tik lielā zonu skaitā, redzes sistēmu daļa divos funkcionāli atšķirīgos apstrādes ceļos. Pēc *Ungerleider et al* (1982) abi apstrādes ceļi sākas pēc primārās redzes garozas (V1) un sastāv no vairākām zonām. Ventrālo plūsmu veidojošas zonas atrodas pārsvarā temporālā smadzeņu daļā un ventrālajai plūsmai ir svarīga loma objektu atpazīšanā un krāsu informācijas apstrādē. Dorsālā plūsma anatomiski izvietojas parietālā smadzeņu garozā un tā atbild par kustības uztveri un objekta novietojumu (koordinātēm) telpā [20]. Pierādījumi divu apstrādes plūsmu eksistencei galvenokārt balstās uz garozu bojājumu pētījumiem. Inferiori temporālās zonas bojājumi noved pie plaša spektra uztveres traucējumiem, piemēram, krāsu, objektu un formu atpazīšana, bet neiespaido telpisko uzdevumu izpildi, piemēram, attāluma noteikšana starp objektiem [20].

Ventrālais objektu apstrādes ceļš sākas primārajā redzes garozā (V1) un turpinās zonās V2, V4, PIT (aizmugurējā infero-deniņu garozā, sauktā arī par TE), CIT un AIT (centrālā un priekšējā infero-deniņu garozā, sauktā arī par TE). Anatomiskie pētījumi ir parādījuši, ka šīs zonas ir savstarpēji blīvi savienotas. Vienvirziena un atgriezenisko projekciju struktūra liek domāt, ka pastāv hierarhija, kurā V1 ir pirmais apstrādes posms un IT ir pēdējais un, iespējams, augstākais [19]. Receptīvā lauka izmērs un ierosinājuma sarežģītības līmenis pārvietojoties pa zonām „augšup” pakāpeniski pieaug. Šīs īpašības atbilst priekšstatam par hierarhisku formu apstrādi t.i. idejai, ka vienkārša, zema līmeņa informācija tiek iegūta sākotnējos apstrādes posmos un pēc tam vēlākos posmos sintezēta, izveidojot sarežģītāku struktūru (*Barlow, 1972; Hubel un Wiesel, 1959, 1968*).

Formu apstrādes pirmais posms ietver līniju, malu un citu lineāri organizētu attēla elementu analīzi. Šis ir galvenais ar formu saistītais apstrādes posms V1 un V2 zonu līmenī. Tas ir saskatāms arī ventrālā ceļa starpposmos – V4 (*Desimone un Schein, 1987*) un PIT (*Tanaka et al., 1991*). Sarežģītāki kontūru fragmenti, piemēram, leņķi un izliekumi, varētu veidot otro strukturālās sarežģītības līmeni. Kontūras fragmenta formas un relatīvās pozīcijas pieskaņošana šķietami ir vēl izteiktāka PIT/CIT (*Brincat un Connor, 2001*). Leņķu un izliekumu selektivitāte arī ir izpētīta ventrālā ceļa pirmajos posmos: V1 un V2 (*Dobbins et al, 1987; Hammond un Andrews, 1978; Hegde un Van Essen, 2000; Heggelund un Hohmann, 1975; Hubel un Wiesel, 1965; Versavel et al., 1990*).

Daudziem neironiem piemīt selektivitāte uz asiem līklīniju stimuliem (koncentrisku, hiperbolisku un spirālveida), kas liecina par izliekumu informācijas summāciju (*Gallant et al, 1993, 1996; Wilson, 1999*). 1982. gadā (*Perrett et al.*) testēja šūnas augšējās deniņu rievās (STS) dibenā IT garozā, kas parādīja reakcijas selektivitāti uz stimuliem - sejas. Viņi secināja, ka daudzas šūnas reaģēja uz vairāku elementu sejas iezīmēm ar ļoti dažādām formām (piem., sejas elementiem), kas liek domāt, ka pastāv uz elementiem balstīta sintēze [21, 22, 23].

1.2. Redzes sistēmas hierarhiskā uzbūve ventrālajā plūsmā

1.2.1. Tīklene

Primātu tīklenes uzbūve ir līdzīga vispārīgai mugurkaulnieku tīklenes shēmai. Gaisma krīt uz tīklieni un tiek pārveidota ar fotoreceptoriem elektriskajā signālā, kas tiek pārvadīts uz

bipolārām šūnām un tālāk uz ganglionārām šūnām, kuru aksoni formē optisko nervu. Divi papildus šūnu slāņi ir horizontālās un amakrīnās šūnas, kas veido laterālas saites ar trim iepriekšējiem elementiem. Šī sarežģītā organizācija nodrošina bāzi tīklenes antagonistiskās centra un perifērijas receptīvo lauka organizācijai. Pēc vairāku zinātnieku datiem tīklene satur aptuveni 80 šūnu tipus: četrus fotoreceptoru veidus, 10 dažādas bipolārās šūnas, divu tipu horizontālās šūnas, 30 līdz 40 veidu amakrīnās šūnas, un 20 tipus ganglionāro šūnu [24].

Fotoreceptori ir specializēti sensorie receptori. Tie satur pigmentu, kas absorbē gaismas kvantus un enerģiju pārvērš elektriskajā impulsā. Šis ir redzes uztveres pirmais posms. Fotoreceptori miera stāvoklī ir viegli depolarizēti un to miera potenciāls ir ap -50mV . Gaismas iedarbībā tie hiperpolarizējas un potenciāls izmainās uz -70mV . Tas ir īpatnēji, jo klasiski stimulējot neironu, tiek izsaukta depolarizācija nevis hiperpolarizācija. Hiperpolarizācijas lielums fotoreceptoram ir atkarīgs no stimulējošās gaismas intensitātes. Lielākas intensitātes stimulē izraisa lielāku hiperpolarizāciju nekā mazāk intensīvs stimulē. Šis ir iemesls kāpēc fotoreceptoru potenciālus sauc par graduētiem potenciāliem [25].

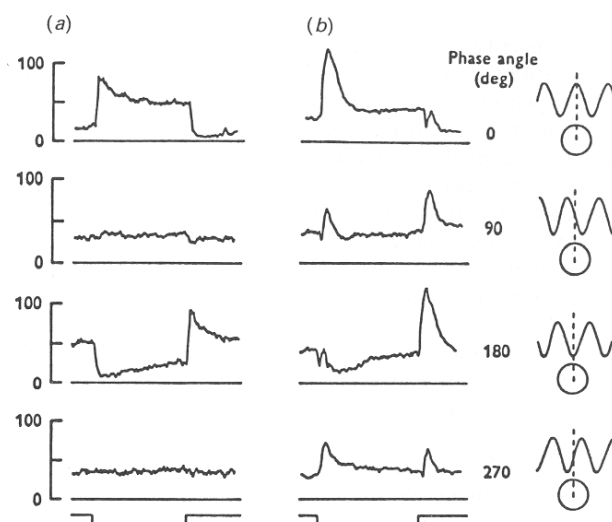
Tīklenē ir divas fotoreceptoru klases: vāļītes un nūjiņas, kuru nosaukumi radušies no raksturīgās receptoru formas. Nūjiņām ir augsta gaismas jutība, atbildes signālu var radīt pat atsevišķs fotons. Palielinoties apkārtējās vides apgaismojuma līmenim, nūjiņas kļūst mazāk jutīgas un samazinās nūjiņu signāla pārraide uz redzes garozu. Dienas laikā, vai arī labi apgaismotās telpās, nūjiņu signāli nav aktīvi. Otrai receptoru grupai, vāļītēm ir daudz zemāka jutība uz gaismu. Palielinoties gaismas intensitātei, vāļītes kļūst aktīvas. Vāļītes ir krāsu uztveres receptori. Krāsu sajūtu rada triju tipu vāļītes, kam ir dažāda spektrālā jutība. Vāļītes pēc to spektrālās jutības iedala trīs klasēs: L tipa (garo viļņu jutības), M tipa (vidējo viļņu jutības) un S tipa (īso viļņu jutības) vāļītes. Vāļīšu relatīvās spektrālās jutības līknes redzamas attēlā. Spektrālās jutības tiek mērītas veicot saskaņošanas funkcijas, nevis mērot signālus no izolētiem fotoreceptoriem [26].

Liels skaits fotoreceptoru, kas izvietoti relatīvi lielā tīklenes apgabalā, veido sinapses ar plašu horizontālo šūnu dendrītisko tīklu. Gaismai krītot uz jebkuru no šiem fotoreceptoriem, var izmainīties horizontālo šūnu aktivitāte. Vāļītes un nūjiņas tālāk savienojas ar bipolārajām šūnām. Bipolārās šūnas gaismas iedarbībā var tikt hiperpolarizētas vai depolarizētas. Un atkarībā no darbības, tās iedala divos tipos: *on* un *off* bipolārajās šūnās [27].

1.2.1.1.ON un OFF ceļi

Pazīmju pamanīšana ir galvenais redzes sistēmas fizioloģijas pamats. Uz tīklieni krītošais attēls tiek sadalīts vairākās komponentēs. Tas tiek panākts ar dažāda izmēra receptīviem laukiem. Signāla sadalījums divos dažādos atzaros sākas no bipolārām tīklenes šūnām. Bipolārās šūnas dažādi reaģē uz fotoreceptoru signālu, dažas šūnas ir vairāk jutīgas uz ātrām gaismas modulācijām un citas uz lēnākām. Mediators, ko rada fotoreceptori, ir viens un tas pats, tas ir glutamāts. Atkarībā no bipolāras šūnas veida, tas vai nu bremzējas vai pāriet uzbudinātā stāvoklī [28].

Tālāk signāls aiziet līdz ganglionārām šūnām. Starp dažādiem ganglionāro šūnu tipiem var izdalīt divus nozīmīgus šūnu veidus. Tie ir neironi, kuriem piemīt ilgstoša ierosināšana X (toniskās) un īslaicīgi ierosinādamās Y (fāziskās) šūnas (*Cleland and Levick, 1974a; Enroth – Cugell and Ronson, 1966*) (1.1.att.). X un Y šūnas pieder arī pie ON un OFF kanāliem [28].



1.1.attēls. a) Toniskās X un b) fāziskās Y šūnas atbildes atkarībā no stimula novietojuma (pa labi) (Enroth-Cugell un Robson, 1966) [28].

Ganglionārās šūnas sūta signālu tālāk pa optisko nervu uz Laterāli genikulāro ķermeni. Augstāko zīdītāju redzes sistēmā parasti optiskie ceļi nonāk LČK dorsālajā daļā, kas ir talāma daļa. LČK neironi ir pārsvarā ON un OFF tipa centru šūnas [24].

Veicot pierakstu no ganglionārām un genikulārām šūnām, izdevās noteikt, ka katrs LČK neirons saņem signālu no vienas līdz trijām ganglionārām šūnām. ON tipa genikulārās šūnas veido sinapses tikai ar ON ganglij šūnām, kas izpildās arī OFF kanālam (*Clelland et al, 1971a.*). X un Y ceļi arī netiek sajaukti LČK. Abi šie ceļi paliek nesajaukti līdz primārai redzes garozai [24].

Redzes garozas (V1) ‘vienkāršās’ šūnas tika atrastas 4. slānī, kur notiek LČK aksonu projekcija. Šīs šūnas joprojām pakļaujas ON un OFF organizācijai. Bet tālāk novietotās ‘sarežģītās’ šūnas ir grūti kaut kādā veidā raksturot, kā ON vai OFF (*Hubel, 1988; Hubel and Wiesel, 1959*) [24].

Tik tālu ir skaidrs, ka šiem diviem kanāliem ir svarīga loma mugurkaulnieku redzes informācijas apstrādē. Tie abi divi paliek neatdalīti līdz V1 garozai, bet joprojām nav skaidrības – kādā nolūkā. Kaut gan fotofilmas un video kameras nesadala signālu divās daļās, tās ir spējīgas atspoguļot apkārtējo pasauli. Iespējams, ka mugurkaulnieku X ganglionārās šūnas ar lineāro matēto un spožo apgabalu summēšanu ir spējīgas sniegt informāciju par ēnām un gaišām vietām attēlā [24].

Ir noteiktas patoloģijas un mutācijas, kas skar tikai ON kanālu. Pārsteidzoši, ka cilvēki un dzīvnieki ar ON kanālu deficītiem pietiekoši labi izpilda redzes uzdevumus. Galvenais deficīts ir nakts redzes zudums. Eksperimentos ar pelēm tika noskaidrots, ka OFF kanāls viens pats var nodrošināt pietiekoši labu redzi [28].

„On”- bipolarās šūnas:

Midget bipolarās šūnas, saņem informāciju no vienas vai neliela skaita M vai L vāļītēm (parvo - P ceļš);

S- vāļiņu bipolarās šūnas veido difūzus savienojumus ar S vāļītēm (konio - K ceļš);

Difūzās bipolarās šūnas saņem signālus no dažādām vāļītēm (magno - M ceļš);

Nūjiņu bipolarās šūnas saņem signālu no daudzām nūjiņām;

„Off: bipolarās šūnas:

Midget bipolarās šūnas saņem signālus no S, M un L vāļītēm (P ceļš);
Difūzās bipolarās šūnas saņem informāciju no dažādām vāļītēm (M ceļš);

1.2.1.2 Ganglionāro šūnu tipi

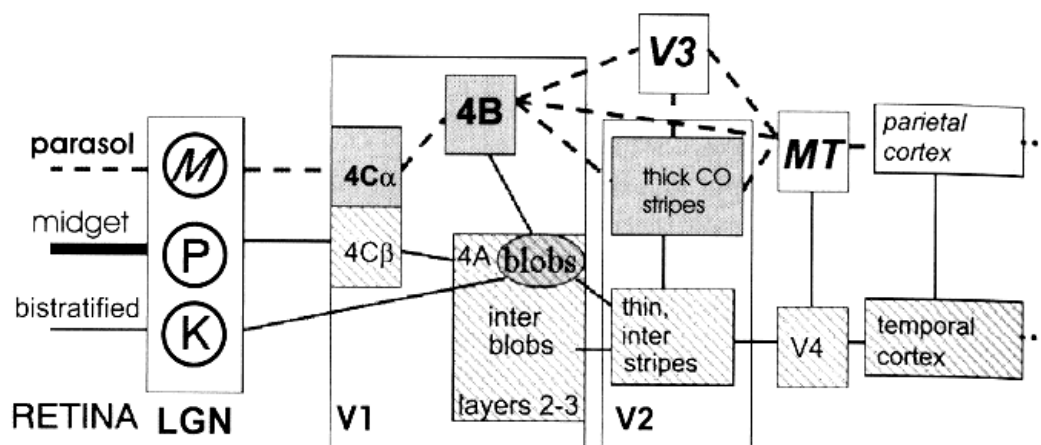
Bipolārās šūnas savienojas ar ganglionārajām šūnām, kas informāciju aizvada tālāk. Lielākā daļa pētījumu saistībā ar redzes sistēmas anatomisko uzbūvi veikta uz primātiem, primātu redzes sistēma ir ļoti līdzīga cilvēka redzes sistēmai. Tīklenes ganglionārās šūnas iedala divās klasēs: **P** šūnās, jo tās projicējas LČK parvocelulārajos slāņos, otrs tips ir **M** šūnas, jo tās projicējas LČK divos magnocelulārajos slāņos. Trešā šūnu klase projicējas starpslāņos (starp P un M šūnām) - **Konio celulārās šūnas**. Skaita ziņā ir apmēram 1 000 000 P- tipa šūnas tīklenē un parvocelulārie neironi LČK un 100 000 M- tipa šūnas tīklenē un tik pat magnocelulārie neironi LČK [24].

Pirmos novērojumus par ganglionāro šūnu anatomiskajām atšķirībām atklāja *Polyak* (1941). Šie divi tipi tika nosaukti par ‘saulessarga-’ (*parasol*) un ‘pundur-’ (*midget*) šūnām. Vēlākos darbos tika noskaidrots, ka ‘punduršūnas’ pārsvarā saņem signālu no vienas bipolarās šūnas (gan no ON, gan no OFF tipa) un *parasol* ganglionārās šūnas no vairākām bipolarām šūnām. Receptīvā lauka izmēri pieaug, abiem šūnu tipiem attālinoties no tīklenes centrālās daļas. *Croner* un *Kaplan* (1995) ir noskaidrojuši, ka M šūnu receptīvā lauka izmēri ir lielāki nekā P šūnu receptīvā lauka izmēri vienādā attālumā no foveas [6].

Cits morfoloģiski atšķirīgs ganglionāro šūnu tips ir bistratificētās (*bistratified*) šūnas, kas veido saites ar augšējo un apakšējo laminu iekšējā pleksiformā slānī (1.2.att.) [24].

Parasol un *midget* ganglionārās šūnas projicē savus aksonus LČK magnocelulārā (M) un parvocelulārā (P) zonā. Dotā nomenklatūra parasti rāda jūkli sakarā ar to, ka anatomiski iet runa par P (*parasol*) un M (*midget*) tīklenes ganglionārām šūnām. Segregācija divos apstrādes ceļos sākas jau pirmajā sinapsē: no bipolarās šūnas uz ganglionāro. Trešajā apstrādes ceļā ganglionāro šūnu aksoni beidzās LČK starpslāņos (interlaminārie), kurus sauc par konio celulāriem (K) slāņiem. Pārējo ganglionāro šūnu projekcijas diemžēl vēl nav zināmas, nav skaidrības arī par arī K ceļa rašanos [6].

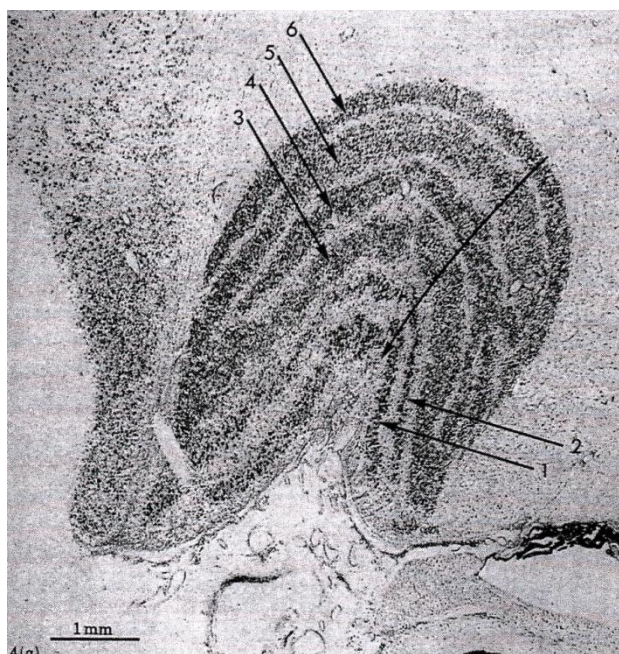
Pētījumos ar kaķiem tika noskaidrots, ka M un P ganglionāro šūnu attiecība ir nemiīga ap foveas apgabalu. Tomēr cilvēkiem ir citādāk. *Dacey* un *Petersen* (1992) ir netieši izmērījuši šo attiecību, izmērot dendrītiskā lauka izmēru divās tīklenes ekscentritātēs, kas parādīja, ka attiecība P/M tīklenes centrā var būt līdz 30/1 [24].



1.2.attēls. Vienkāršota M, P, K ceļu diagramma primātu redzes sistēmā [24].

1.2.2. Laterālais ceļagalveida ķermenis

Laterālais ceļagalveida ķermenis (LCK) ir primārais talāma kodols, kas savieno neirālos ceļus no tīklenes uz primāro redzes garozu V1. Tā anatomija un neironu īpašības plaši pētītas primātiem. LCK ir segmentēta struktūra, kas sadala informāciju no tīklenes dažādos slāņos: tīklenes parvocelulārās jeb P- šūnas projicējas dorsālajos LCK slāņos (3- 6), bet magnocelulārās jeb M- šūnas projicējas ventrālajos slāņos (1-2). Pārējie šūnu veidi veido konio celulāros slāņus starpslāņu reģionos. Primāta LCK struktūra redzama 1.5. attēlā. Neironiem šajos atšķirīgajos slāņos ir dažādas neurofizioloģiskas un anatomiskas īpašības, tādējādi nodrošinot pamatus funkcionālai segregācijai, kas balstīta uz krāsu un telpas un laika īpašībām. Primātiem lielākā daļa no LGCK neironiem ir P šūnas. Uzska, ka šīs šūnas veido pamatu sarkanās un zaļās krāsas redzei, jo tām ir L/M- šūnu oponente, augsta kontrastjutība uz sarkani- zaļu krāsu kontrastu (*Derrington et al.*, 1984; *Lee et al.*, 1990), un P- šūnu slāņa bojājumi izraisa ievērojamu krāsu jutības samazināšanos (*Merigan et al.*, 1991). S vāļišu signāli ir zilās- dzeltenās krāsu uztveres pamats, no tīklenes tiek pārvadīts pa retiem specializētiem neironiem, kas galvenokārt sastopami LCK konio celulārajos slāņos. LCK struktūra ir unikāla, jo šajā talāmiskajā līmenī atbildes no dažādiem krāsu signāliem ir atdalītas, turpretim smadzeņu garozas līmenī tās saplūst kopā [29].



1.3. attēls .Primāta LCK struktūra. Ar bultiņām un cipariem apzīmēti seši slāņi: 1, 2 koniocelulārie, 3,4 –M ceļiem atbilstošie slāņi, 5,6 – P ceļiem atbilstošie slāņi [30]

Lai arī jau sen psihofizikāli pierādīts, ka sākotnējie etapi krāsu uztverē sastāv no sarkani-zaļas un zili- dzeltenas sistēmas (*Hurvich and Jameson*, 1957; *Buchsbaum and Gottschalk*, 1983), tikai relatīvi nesen ir pierādīts, ka informācija no L-M un S vāļišu oponentajiem mehānismiem tiek vadīta pa anatomiski, fizioloģiski un morfoloģiski dažādiem retinokortikulāriem ceļiem. L- M vāļišu informācijas pārvadi nodrošina *midget* ganglionārās šūnas (*Lee et al.*, 1987). Intracelulāros tīklenes anatomiskos pētījumos atklājās, ka S- (L+ M) informāciju pārvada specializētas *midget* bipolārās šūnas un *bistratified* ganglionārās šūnas (*Dacey & Lee*, 1994; *Calkins et al.*, 1998). Šis sadalījums turpinās arī laterālajā

ceļgalveidaķermenī, kurā S- vāļišu oponentie neironi drīzāk aizņem konio celulāros slāņus (*Martin et al.*, 1997; *Chaterjee & Calloway*, 2003), nevis parvocelulāros kā tika agrāk uzskatīts. Skaidrs, ka divām sistēmām ir atšķirīga filogēnētiska izcelsme. [29, 30]

Informācija no LCK tiek pa taisno vadīta uz 4 primārās redzes garozas slāni (V1). Magnocelulārās šūnas veido sinapses slānī 4C α un Parvocelulārās projicē slānī 4C β . Netieši tiek veidotas sinapses abiem šiem tipiem ar slāni 6, kas savukārt sūta signālus atpakaļ uz LCK (*Gilbert un Kelly*, 1975) [29].

No V1 informācija tiek vadīta tālākos redzes sistēmas centros. M/P/K ceļu kopdarbība pirms un pēc primārās redzes garozas ļauj runāt par sistēmu vai plūsmu (dorsālā un ventrālā) paralēlo darbību [29].

1.2.3. Primārā redzes garoza V1

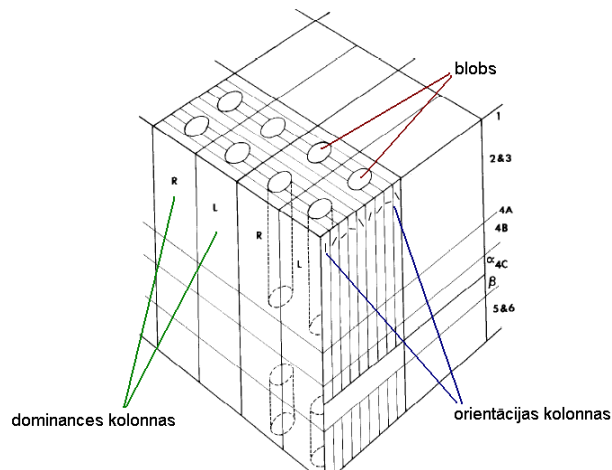
V1 garoza ir organizēta gan vertikālos slāņos, gan horizontālās kolonnās. Dotā tipa organizācija ir attīstības mehānismu sekas. Primātu primārās redzes garozas laminārā uzbūve nodrošina tās pārsteidzošās funkcijas. Atšķirībā no citu zīdītāju smadzeņu garozām (piemēram, kaķa), kur tikai slāņi 1, 2/3, 4, 5 un 6 ir izdalīti, primātiem slāņi 2/3 un 4 ir iedalāmi vairākos apakšslāņos. Izmantojot Brodmaņa (1909) smadzeņu zonu numurēšanas sistēmu, makaka V1 slānis 4C ir analogisks slānim 4 pārējās garozās, un slāņi 2-4B ir līdzīgi 2/3 slāņiem citu zīdītāju garozās (*Hassler*, 1967; *Casagrande, Kaas*, 1994) [12]. Slāņi 2-4B ir sadalīti 2/3A, 3B, 4A un 4B apakšslāņos un slānis 4C vēl sīkāk uz 4C α (augšējais), 4C β (apakšējais) un 4Cctr (pa vidu starp iepriekšējiem). Šis iedalījums ir cieši saistīts ar tiešajām un netiešajām saitēm no genikulāriem (LCK) ceļiem [31].

Primātu kolonveida V1 organizāciju pirmoreiz aprakstīja Hubel un Wiesel (1968, 1974). Tika atklāts, ka, līdzīgi kaķiem, neironi labāk aktivizējas, kad tos ierosina ar noteikta virziena stimulu. Šūnas uzrādīja arī izvēlīgu aktivizāciju atkarībā no redzes lauka ipsilaterālās vai kotralaterālās daļas stimulācijas [31].

Primātu kolumnāro V1 organizāciju pirmoreiz aprakstījuši Hubel un Wiesel (1968, 1974). Tika atklāts, ka, līdzīgi kaķiem, neironi labāk aktivizējas, kad tos stimulē ar noteikta virziena stimulu. Šūnas uzrādīja arī izvēlīgu aktivizāciju atkarībā no redzes lauka stimulācijas, ipsilaterālās vai kotralaterālās daļas [31].

Jaunākie *in vivo* optiskās attēlošanas eksperimenti sniedza daudz detalizētāku informāciju par orientācijas un okulārās dominances kolonnām primātu V1, kā arī kolonnu organizāciju atkarībā no citiem parametriem, virziena selektivitātes un telpiskās frekvences. Orientācijas kolonnas veido radiālās struktūras ar virziena izvēles šūnām izvietotām gar kolonu kontūrām, pakāpeniski mainot savu orientāciju. Katrā kolonnas vietā virziens tiek attēlots ortogonāli orientācijai, tikai puse no visiem iespējamiem virzieniem ir attēlota katrā vietā (180 grādi). Okulārā dominance mainās strauji monokulārā slānī 4C, bet augstākos slāņos dominance mainās pakāpeniski un pārklāšanās vietā parādās binokulāritātes apgabali (1. 4.att.) [31,32].

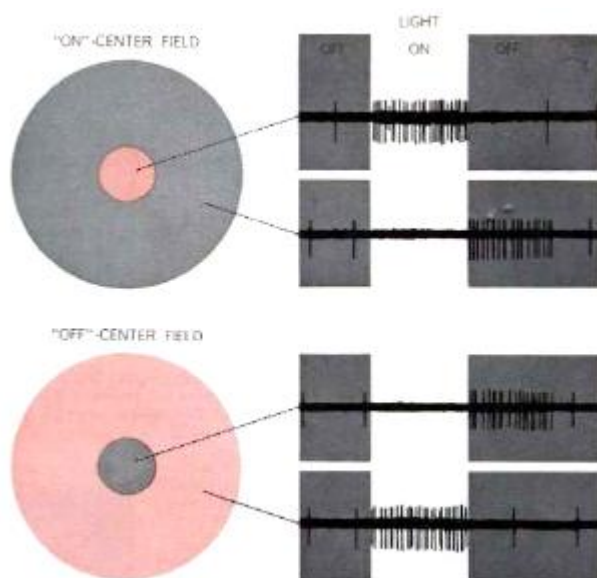
Kolonveida organizācija ietver ne tikai orientācijas izvēli un acu dominanci. Mitohondriālo enzīmu krāsošana ir parādījusi periodiski tumšākas zonas V1 2/3 slānī, ko nosauca par 'lāsēm' (*blobs*). Lāses novietojas virs acs dominances kolonnām un satur neironus ar lielāku kontrastjutību un zemāku telpisko frekvenču selektivitāti, nekā šūnas ārpus lāsēm (*interblobs*) [33]. Hromatisko informāciju kodējošie signāli nonāk tieši lāšu apgabalos.



1.4.attēls. *Ice-cube* V1 organizācijas modelis [33]. P un M šūnu aksoni projicējās 4C α un 4C β slāņos [32].

1.2.4. Receptīvā lauka jēdziens

Receptīvā lauka jēdziens tika ieviests, pateicoties novērojumiem zīdītāju tīklenēs. Kaķa ganglionāro šūnu ierosinājuma pieraksti parādīja, ka atkarībā no apgaismošanas vietas iespējams iegūt dažādas atbildes un receptīvais lauks var tikt sadalīts koncentriskās zonās. Aptuveni 1950. gadā *Kuffler* pierakstījis kaķa ganglionāro šūnu atbildi uz spoža punkta stimulu, uzreiz stimulējot centrālo un perifēro daļu. Tika secināts, ka augstas jutības centrālā zona var tikt uzbudināta gan ar spožu signālu, gan bez signāla (ON un OFF atbildes), un perifērijai piemīt oponentas īpašības salīdzinājumā ar centru [34].



1.5.attēls. ON un OFF centra receptīvie lauki un to izliesmošanas frekvence [35].

Anatomiski receptīvo lauku veido noteikts receptoru skaits, kas nosūta savus signālus vienam neironam caur vienu vai vairākām sinapsēm [36]. Raksturojot receptīvo lauku, parasti piemin, ka ir nepieciešams pareizi to stimulēt, lai iegūtu vajadzīgo atbildi. Šūnas receptīvā lauka karte ļauj pareģot šūnas uzvedību [36].

1.2.4.1. Receptīvie lauki tīklenē

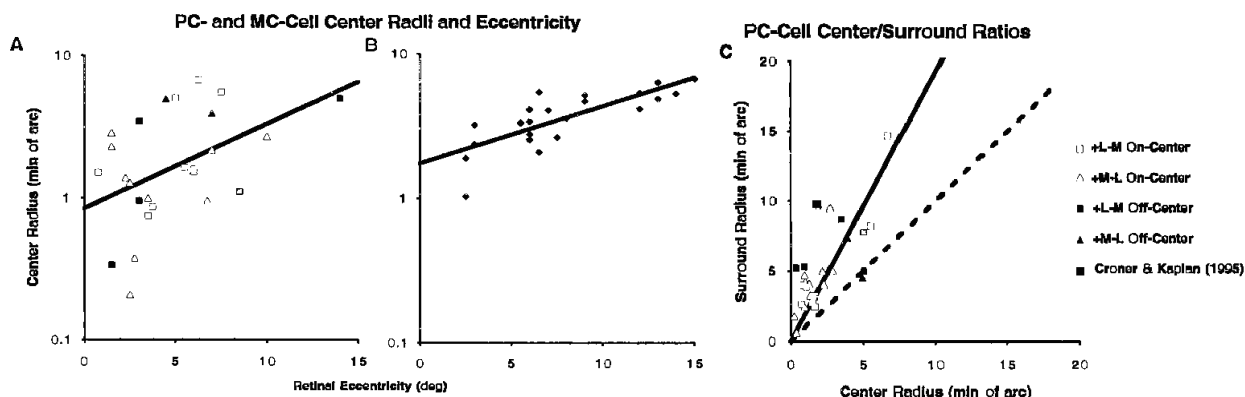
Pateicoties *Rodiek(1965)* darbiem, tīklenes ganglionāro šūnu receptīvais lauks ieņēmis savu klasisko receptīvā lauka izskatu. Receptīvais lauks (RL) ir divu telpiski atšķirīgu mehānismu lineāra kombinācija. Pirmais ir šaurāks un jutīgs centrā un otrs ir ar lielāku diametru, līdz ar ko mazāk jutīgs un nosedz perifēriju. Lai to aprakstītu, izmanto divu Gausa funkciju starpību ar dažādiem pusplatuma lielumiem centrētiem vienā punktā. Respektīvi, perifērijas pusplatumam jābūt lielākam par centra sigmu σ jeb perifērijas rādiusam r_s lielākam par centra rādiuss r_c . Jūtība S punktā r receptīvā laukā modelī ir [37]:

$$S(r) = k_c \exp\left[-(r/r_c)^2\right] - k_s \exp\left[-(r/r_s)^2\right] \quad (1)$$

kur k_c ir centra apgabala jutība, r_s ir centrālā apgabala rādiuss, k_s un r_s ir RL perifērijas raksturojošie lielumi.

Vēlāk tika atklāts (*Enroth-Cugell un Pinto, 1972*), ka dotais modelis nevar tikt pielietots Y šūnu tipam. Centra Gausa funkcijas attiecība pret perifēriju ir vairāk balansēta X šūnām, nekā Y [37].

Vairākos avotos ir atzīmēta receptīvā lauka izmēra palielināšanās, attālinoties no tīklenes centra [29].



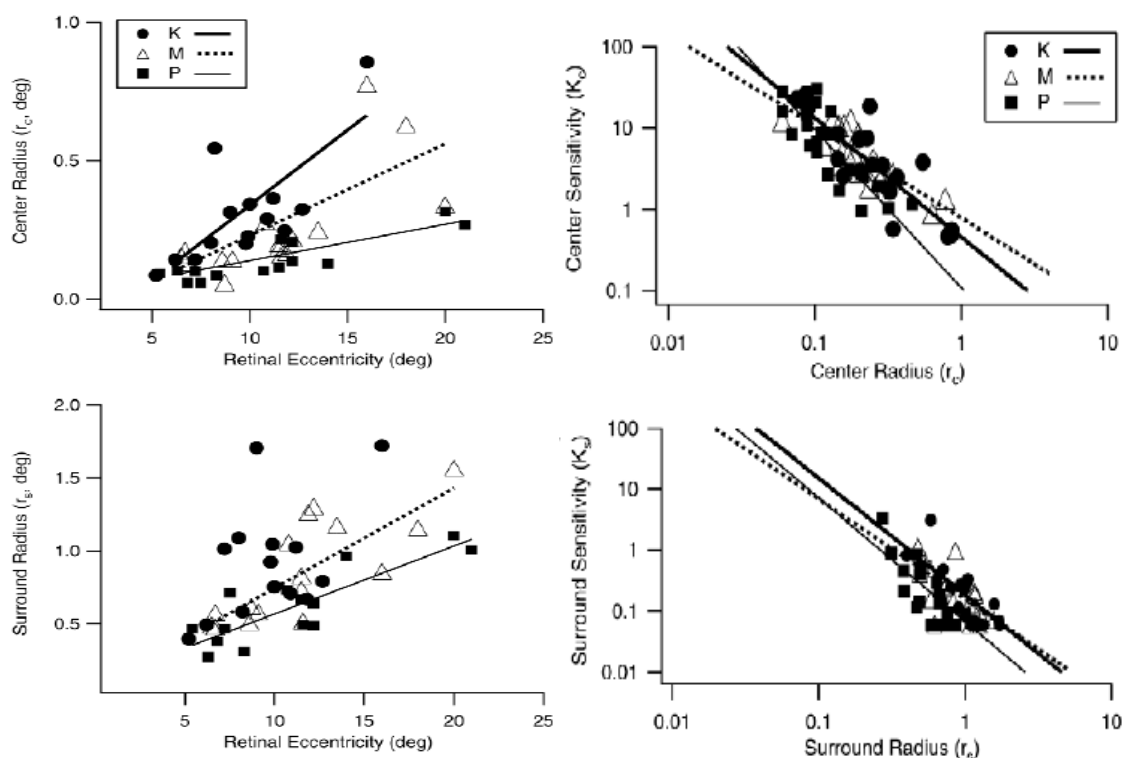
1.6.attēls. (A, B) Receptīvā lauka centra rādiusa atkarība no ekscentritātes. (C) RL centra un perifērijas salīdzinājums Parvocelulārām šūnām (B.B. Lee, J. Kremers, and T.YEH. 1998) [29].

Pēc augstāk minēto autoru datiem rādiusu attiecība starp RL centru un perifēriju var tikt lineāri aproksimēta kā 1:2 (1.attēls, C).

Salīdzinot ar citām redzes sistēmas daļām, tīklenē ir vismazākie receptīvie lauki.

1.2.4.2. LČK receptīvie lauki

Tālāk no tīklenes receptīvā lauka izmēri sāk pieaugt. Receptīvā lauka forma LČK ir līdzīga ganglionāro šūnu receptīvajam laukam un ir aprakstāma ar Gausa starpību funkciju [36, 37]. *Xu et al.* noteicis LČK receptīvo lauku centra un perifērijas rādiusu *Aotus Trivigatus* pērtiņa trim šūnu pamata tipiem (1.7.att.) [38].



1.7.attēls. K, M un P ceļu RL centra un perifērijas rādiusa lielumi atkarībā no ekscentritātes (pirmā kolonna). RL jutība atkarībā no rādiusa izmēra [38].

1.2.4.3. V1 receptīvie lauki

Hubel un *Wiesel* bija vieni no pirmajiem, kas aprakstīja redzes garozas receptīvos laukus. Veicot šūnu atbilžu pierakstus kaķim anestēzijā, tie atrada jauna veida šūnas (iepriekš neredzētas) citos redzes sistēmas līmeņos. Sagrupējot šūnu tipus, zinātnieki piedāvāja receptīvo lauku modeļus šūnām redzes garozā [39].

Vienkāršās šūnas

Līdzīgi, kā tīklenes un LČK receptīvais lauks, V1 vienkāršo šūnu RL var tikt pētīts ar gaismas punktu. Tam piemīt uzbudināmības un bremzēšanas apgabali, kā arī antagonistiska darbība, stimulējot visu lauku. V1 vienkāršās šūnas RL galvenā atšķirība ir uzbudināmības un bremzēšanas apgabalu telpiskais izvietojums. Tie veido nevis koncentrisku struktūru, bet ir izvietoti paralēli. Dotā RL modelis parasti ir Gabora funkcija, kas veidojas no divu funkciju: kosinusa un Gausa kombinācijas (8.att.) [39].

$$X = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)$$

$$Y = y \cos(\alpha) - x \sin(\alpha)$$

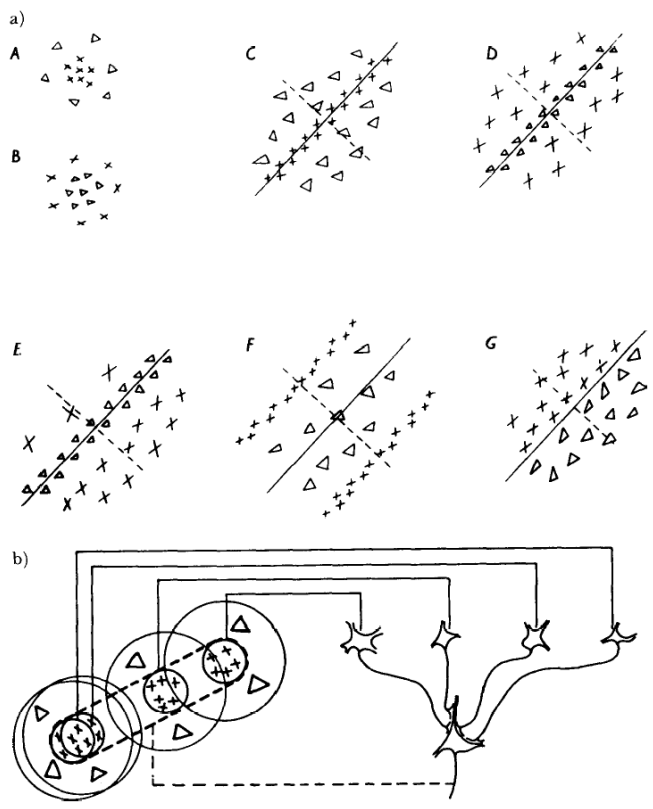
$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\left[\frac{X^2 + Y^2}{\sigma^2}\right]\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda X} + \theta\right)$$

(2)

kur x un y ir telpiskās koordinātes, α ir telpas leņķis, σ Gausa funkcijas pusplatums, λ sinusoīdas frekvence un θ ir režģa fāze [40].

Vienkāršās šūnas darbojas kā līniju detektori. Jaunākajos pētījumos atklājās doto šūnu receptīvā lauka detaļas. Tās periodiskā funkcijas daļa var saturēt vairāk par pusotru periodu (De

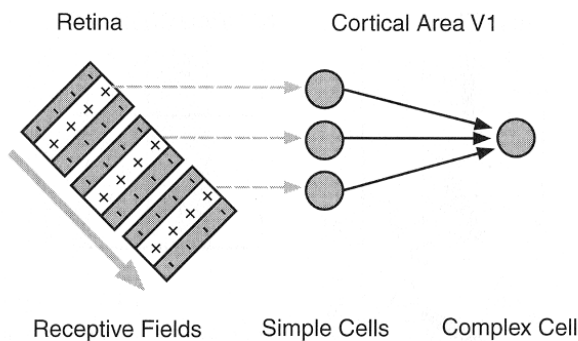
Valois un De Valois, 1988). Šūnas ar mazāku receptīvo lauku satur vairākas daivas un ar lielākiem receptīvajiem laukiem mazāk daivu [41].



1.8.attēls. a) Receptīvie lauki LČK un tīklenē (A,B). V1 vienkāršās šūnas RL (C-G).
Vienkāršā šūna saņem signālus no vairākām LČK šūnām [41].

Kompleksās šūnas

RL šim tipam nevar tikt viennozīmīgi sadalīts uzbudināmības un bremzēšanas joslās. Tas rada nevienmērīgas atbildes, kad to stimulē ar gaismas punktu. Tomēr, kad gaismu pārvieto pa RL virsmu noteiktā virzienā, šūna rada spēcīgu atbildes impulsu. Saliktās šūnas ir stipri nelineāras, un tām ir lielāki receptīvie lauki. Tiek uzskatīts, ka saliktās šūnas sastāda aptuveni 75 % no visām šūnām V1. Pēc Hubel un Wiesel domām saliktās šūnas saņem signālu no vairākām vienkāršām šūnām (1.9.att.). Šis uzskats liekas ticams, kaut gan dažas saliktās šūnas saņem signālus arī no LČK [39,41].



1.9.attēls. Receptīvo lauku pārkārtošanās hierarhiskajā sistēmā [41]

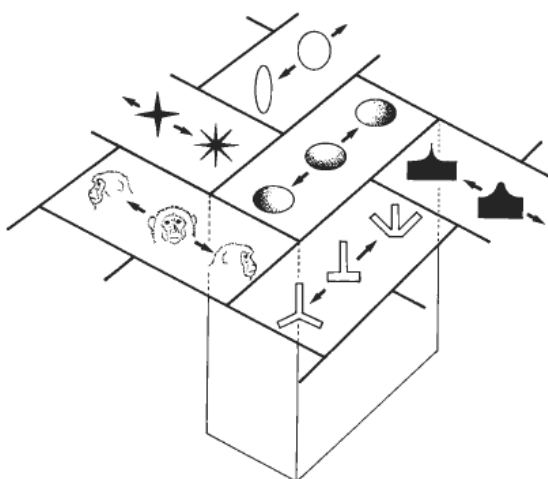
hierarhijas starposms, tai piemīt potenciāls parādīt mehāniskas detaļas, kas augstākos līmeņos var tikt apslāpētas. Daudzi V4 neironi ir pieskaņoti lineāram novietojumam tāpat kā V1 un V2 šūnas, tomēr daži atlasa sarežģītākas formu īpašības [49, 50, 51].



1.12. attēls. Dažu stiprāko atbildi veicinošo stimulu piemēri. Fona tumšums apzīmē ierosinājuma stiprumu (Cadieu et al, 2007). [50, 51]

1.2.4.6. InferoTemporālā garoza

TE garoza reprezentē pēdējo tā saucamo "vizuālo" posmu ventrālajā redzes plūsmā. Neironi šajā zonā visspēcīgāk reaģē uz vidēji sarežģītiem objektiem un redzes pazīmēm. Šādu stimulu piemēri ir doti 1.13.attēlā. Kritiskā TE neironu īpatnība ir to jutība uz sarežģītākiem stimuliem nekā orientācijas, izmēra, krāsas vai tekstūru stimuliem. Bet tajā pašā laikā atrastie stimuli ir nepietiekoši lai aprakstīt reālos objektus ar viena neirona darbību. Dažu TE zonas neironu interesanta īpatnība ir to jutība uz cilvēka sejas attēliem. Wang et al (1998) optiskās attēlošanas eksperimentos ir atraduši nelielus TE garozas neironu apgabalus, kas tika ierosināti tikai ar sejas attēliem.

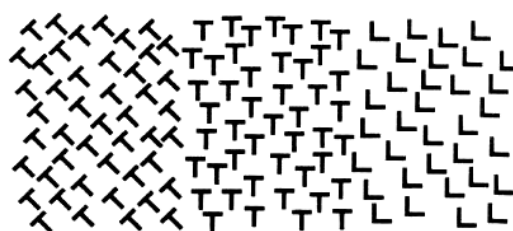


Attēls 1.13. TE zonas stabiņu uzbūves shematiskais attēlojums, pēc Tanaka (2003) [52].

1.3. Tekstūru segregācija jeb atšķiršana

Tekstūru atšķiršanai ir piepūli neiesaistoša redzes stimulu sadalīšana atšķirīgos segmentos, balstoties uz telpisko gradientu. [53] Pirmie nozīmīgākie atklājumi par tekstūru uztveres dabu bija Jacob Beck. Viņa eksperimentā subjektiem bija jāatšķir, kurš no visiem reģioniem, kurā attēloti abstrakti tekstūras elementi, no visiem atšķiras visvairāk (skatīt 1.4. attēlu). Piemēram, atšķirība starp noliekto T burtu kreisajā pusē un T burtu centrā, tiek uztverta ātrāk un vieglāk, nekā L burta atšķirība no centrālā T burta. Beck sāka ar hipotēzi, ka rādītais panelis, kas satur lielu skaitu elementu, tiks grupēts uz formas līdzību pamata. Taču drīz viņš atklāja, ka faktori, kas ir pamatā tekstūru atšķiršanai katrā ziņā nav tādi paši, kā tie, kas nosaka formu līdzību tiem pašiem elementiem, kad tie tiek uztverti kā atsevišķas figūras. No daudziem šādiem eksperimentu rezultātiem Beck secināja, ka tekstūru atšķiršana rodas no

iezīmju blīvuma atšķirību noteikšanas zināmiem vienkāršiem apzīmējumiem, kā līniju orientācija, vispārējais gaišums, krāsa, izmērs un kustība. [53]



A. Texture Segregation



B. Shape Similarity

1.14. att. Tekstūru atšķiršana, izmantojot formu līdzību. [53]

Citas nozīmīgas idejas par tekstūru atšķiršanu nāca no *Bela Julesz* – cilvēka, kas izgudroja izkliedētu punktu stereogrammu (*random dot stereogram*). Viņa uzsvēra, ka tekstūras var tikt izšķirtas vienā no diviem veidiem: caur „normālu” tekstūru atšķiršanu, kas notiek bez piepūles un vienlaikus visā redzes laukā, vai caur „apzinātu rūpīgu apskati”. Rūpīga apskate ietver uzmanības koncentrēšanu uz noteiktām daļām, lai atrastu formas atšķirības starp atsevišķiem elementiem. Vēlākos pētījumos tiek secināts, ka uzmanība tiek uzskatīta par svarīgu, lai kontrolētu uztveres apstrādi, piemēram, ietekmējot sacensību starp stimuliem neirālai reprezentācijai. Savukārt *Julesz* paziņoja, ka normāla tekstūru atšķiršana ir uzmanību neiesaistošs process. To apstiprina arī pētījums ar redzes izsuktajiem potenciāliem (VEP). Tā rezultāti parāda, ka tekstūru atšķiršanas agrīnās stadijas uzmanību neiesaista, turpretī uzdevuma svarīgums ir izšķirošs tālākiem procesiem. Laika koordinācija ir savienojama ar atkārtoti apstrādātu paraugu, ar sākotnēju apgrieztu galveno stimulu, īpašību apstrādi un sekojošu augstāko līmeņu informācijas modulējošām lejupejošām saitēm. Tā kā uzmanības efekti notiek pāri modalitātēm, tie nevar tikt vienkārši izskaidroti ar sacensību redzes garozā [54].

Julesz un *Beck* darbi par tekstūru atšķiršanu ir svarīgi, jo tie pirmie sāka neatlaidīgi virzīt uz priekšu teorētiskās saiknes starp trīs savstarpēji saistītiem tematiem: uztveres pētījumu rezultātiem par tekstūru segregāciju, redzes garozas fizioloģiju un redzes skaitļošanas teorijām [55].

1.4. Stimulu maskēšanas metode

Maskēšana ir stimula, ko sauc par mērķi, redzamības samazināšana vai pilnīga izslēgšana, rādot īsu stimulu, ko sauc par masku. Pasaule ar to tika iepazīstināta 19.gs beigās un 20.gs sākumā. Kopš tā laika maskēšana ir plaši pētīta un, kā pats par sevi interesants fenomens, ir noderīga redzes apstrādes procesa dinamikas izpētē. Dinamisku redzes aspektu pētīšanā, maskēšana kā tehnika balstās uz sekojošiem pieņēmumiem [56].

No stimulu sākuma līdz nomērāmu efektu parādīšanās laikam uzvedībā vai apzinātā saprašānā, nepieciešams intervāls no dažiem desmitiem līdz diviem vai trīs simtiem milisekunžu;

informācija, ko rada stimuli, tiek aktīvi apstrādāta iepriekš minētā intervāla laikā;

apstrāde var notikt vairākos specializētos daudzpakāpju redzes ceļos;

atbildes uz masku un mērķi var savstarpēji mijiedarboties specifiskos apstrādes līmeņos.

Iepriekšējās četrās desmitgadēs vairumā pētījumu tika apskatīti tieši postretinālie maskēšanas procesi jeb norises, sevišķi tās, kas lokalizējas smadzeņu garozas līmenī. Ir secināts, ka maskai un mērķim jāastāv no telpiska parauga, kura kontūras ir ar noteiktu spožuma vai viļņa garuma atšķirību attiecībā pret fonu, uz kura tie tiek rādīti. Rezultāti, kas iegūti šajos pētījumos, ir atkarīgi no monitora izvēles, redzes apstākļiem, stimuliem, laika un uzdevuma parametriem [56].

Monitora parametri ietver spožumu un fona, uz kura tiek rādīti stimuli, RGB avotu viļņa garumiem Stimulu parametri ietver to skaitu, formu, izmērus, spožumu, krāsu, tīklenes ekscentricitāti, mērķa un maskas telpiskās pārklāšanās pakāpi.

Laika parametrs ietver mērķa un maskas stimulu ilgumu, bez tam arī laika intervālu starp stimula un maskas parādīšanos. Tas visbiežāk tiek raksturots stimula un maskas asinhronas parādīšanās izteiksmē (SOA). Priekšlaicīgā maskēšana (*forward masking*) ir, kad maska parādās pirms mērķa parādīšanās. Novēlotā maskēšana (*backward masking*) ir algoritms, kurā maska parādās tikai pēc tam, kad parādīts mērķis. Speciāli apstākļi, kur maskas un mērķa parādīšanās ir sinhrona, tiek saukta par vienlaicīgo jeb sinhrono maskēšanu.[56].

Redzes apstākļi ietver monokulāru, binokulāru vai divdaļīgu skatīšanos uz mērķa un maskas stimuliem. Pirmajās divās mērķis un maska tiek rādīta vienām un tām pašām acīm, divdaļīgās skatīšanās apstākļos, atsevišķām acīm. Pēdējie apstākļi var labāk izdalīt postretinālos, apstrādes līmeņus smadzeņu garozā [56].

1.4.1.Maskēšanas pielietojums un izmantošana

Redzes maskēšanas pētījumi ir informatīvi dažādos veidos:

Novēlotās parauga maskēšanas fenomens - sevišķi pretēja intuitīva atradne, ka maska var atsevišķi kavēt mērķa redzamību, pat ja mērķis tiek rādīts pirms maskas, ir interesanta pati par sevi. Pēdējo divu desmitgažu laikā paziņoti vairāki kvalitatīvi šī fenomena izskaidrojumi, un to pārbaudei, protams, nepieciešami paraugu maskēšanas pētījumi;

redzes apstrādes process ir dinamisks, īslaicīgi notiekošs fenomens, un paraugu maskēšanas var būt noderīga, lai izpētītu temporālās sekvenču un smadzeņu garozas līmeņa, un informācijas apstrādes nepieciešamību, lai atpazītu stimulu, sākot no vienkāršām ģeometriskām figūrām līdz sejām un sarežģītākām ainām;

augstāka līmeņa redzes izziņas procesi, tādi kā uztveres grupēšana, redzes tēlainība un selektīvā uzmanība, var izmainīt redzes maskēšanu. Bez tam maskēšana spēlē nopietnu lomu temporālu parametru pētījumos, kas raksturo redzes uzmanību, īpaši pētījumos, kur izmatota īsu sērijveida redzes stimulu rādīšana;

redzes maskēšana nesniedz tikusi izmantota arī, lai noskaidrotu tās saistību ar maskēšanu, kas notiek izmantojot trankraniālo magnētisko stimulāciju (TMS);

abas, gan redzes, gan TMS maskēšana, ir svarīgi metodiski darbarīki, kas šobrīd izmantoti, lai pētītu redzes apzināšanos un tās ietekmi uz strīdīgo „virspusējās uztveres” lauku. Fakts, ka informācija padarīta nepieejama apzinātam ziņojumam, sakarā ar redzes paraugu maskēšanu, tomēr var ietekmēt motoro, izziņas un emocionālo procesu daudzveidību, ir vairākkārtīgi vispāratzīts pēdējo gadu laikā;

redzes maskēšana tiek izmantota klīnisku anomāliju pētījumos, kas saistīti ar redzes un smadzeņu funkcijām, tādām kā ambliopija, Parkinsona slimība, disleksija, šizofrēnija, kā arī specifisku subjektu populācijām. Tādēļ redzes maskēšana var nodrošināt labāku uztveres anomāliju izpratni un rādītājus jebkurā no šīm subjektu populācijām.[56]

1.5. Krāsu redze

1.5.1. Krāsu sajūta

Redzamā gaisma ir elektromagnētiskā starojuma spektra daļa, kuras robežas parasti tiek definētas no 380 līdz 760 nm. Redzamā gaisma atrodas intervālā starp ultravioleto un infrasarkanā starojumu. Atkarībā no viļņa garuma, starojums rada dažas krāsas sajūtu cilvēka redzes sistēmā.[57]

Baltu gaismu var sadalīt spektrā ar prizmas palīdzību, gaismai izejot cauri prizmai, tā tiek izkliedēta, telpiski sadaloties viļņa garuma komponentēs un rezultātā tiek iegūts spektrs. Šī gaismas sadalīšanās spektrā parāda, ka baltas gaismas sajūtu rada dažādu krāsu stimulu summa, kas katrs atsevišķi izraisa dažādas krāsas sajūtas (sarkanu, oranžu, dzeltenu, zaļu, u.t.t.). Gandrīz visas krāsas, ko cilvēks ikdienā uztver veidojas no dažādas spektrālā sastāva izstarojošiem gaismas avotiem vai atstarojošām virsmām.

1.5.2. Krāsu raksturojošās īpašības

Lai aprakstīt un raksturot krāsas ir nepieciešams izdalīt to īpašības. Tās ir svarīgi, jo bieži lieto terminus krāsa un tonis kā sinonīmus, bet termins krāsa ietver sevī visu īpašību spektru: tonis, piesātinājums, spožums; bet krāsas toni var aprakstīt ar dominanto viļņa garumu.

Krāsas tonis

Krāsas tonis (*Hue*) ir izteiksmes veids, ko lieto, kad tonim dod nosaukumu, piemēram, sarkans, zaļš, zils, oranžs. Krāsas tonis mainās pakāpeniski līdz ar viļņa garumu. Bet izolētas spektra krāsas nenodrošina visu krāsu gammu, ko spēj uztvert cilvēka redzes sistēma. Sajaucot īso viļņu garuma gaismu ar garo viļņu garuma gaismu, iegūstam purpura krāsu toņus, kas nav spektrālās krāsas, taču tās ietilpst uztveramo krāsu gammā (skat. CIE x,y diagrammu, att.1.17) [58].

Piesātinājums

Piesātinājums (*saturation*) raksturo atšķirību starp stimula krāsu un neitrālo toni (balto vai pelēko krāsu). Maksimāli piesātinātas krāsas mēdz dēvēt arī par tīrām krāsām. Spektrāli piesātinājumu varētu aprakstīt ar spektrālās joslas platumu. Jo šaurāka josla, jo piesātinātāka krāsa. Visu monohromatisko krāsu piesātinājums nav vienāds, tas ir atkarīgs no viļņa garuma. Piemēram, gaisma ar viļņa garumu 580 nm izskatās mazāk piesātināta par citu viļņa garumu gaismu. [58]

Spožums un gaišums

Spožums raksturo cik spoža ir izstarotāja virsma. Atstarotai gaismai lieto terminu krāsas gaišums, bet izstarojošiem objektiem - spožums. Arī spožuma uztvere ir atkarīga no viļņa garuma (*Wagner* un *Boynton*,1972). Fotopiskos apstākļos 555 nm stimul tiek uztverts kā spožāks salīdzinot ar tādas pašas enerģijas citu monohromatisku stimulu [58].

Krāsu temperatūra

Krāsu temperatūra ir vienkāršots veids kā raksturot gaismas avota spektrālās īpašības. Tas ir viens no gaismas avota būtiskākajiem raksturlielumiem. Krāsu temperatūra ir piekārtota sakarsēta absolūti melna ķermeņa starojumam, kas atbilst gaismas avotam. Tātad līdz kādai temperatūrai jāsakarsē absolūti melns ķermenis, lai tā starojums atbilstu gaismas avotam. Krāsu temperatūru mēra Kelvinos (K). Daudzi gaismas avoti, piemēram, fluorescentās spuldzes staro atšķirīgi no sakarsēta ķermeņa virsmas. Šādiem gaismas avotiem virsmas temperatūra neatbilst starojumam kā tas ir melna ķermeņa gadījumā un arī spektrālās īpašības ir atšķirīgas, tāpēc lieto

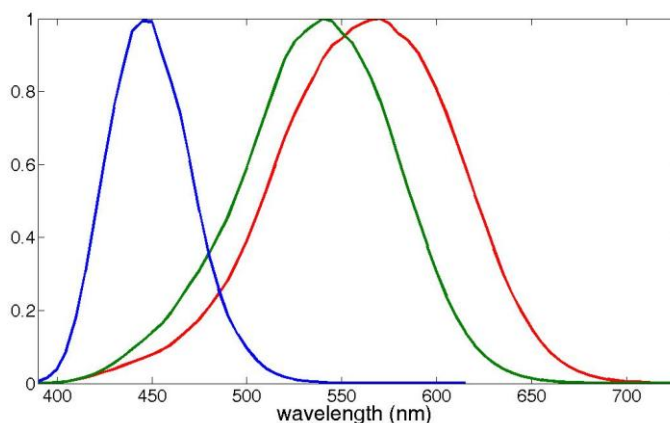
jēdzienu *korelētā krāsu temperatūra*. Tā ir absolūti melna ķermeņa temperatūra, kas cilvēka redzes sistēmā rada vislīdzīgāko sajūtu dotajam gaismas avotam [59, 60].

Krāsu pastāvība (*color constancy*)

Krāsas tiek izmantotas, lai pamanītu un atpazītu objektus. Lielākā daļa gaismas, ko uztveram ir gaisma, kas atstarojas no objektiem apkārtējā vidē. Atstarotās gaismas viļņa garums ievērojami mainās, mainoties apgaismojumam, neskatoties uz to, ka objekta atstarošanas parametri paliek nemainīgi. Cilvēka redzes sistēma spēj novērtēt un atšķirt objekta krāsu neskatoties uz objekta krāsas maiņu un do to fenomenu sauc par krāsu konstantumu jeb krāsu pastāvību. [58, 61]. Ar krāsu nemainību parasti saista V4 zonas aktivitāti. Krāsu pastāvība uzlabojas, ja tiek novērtēta kustīga objekta krāsa [61].

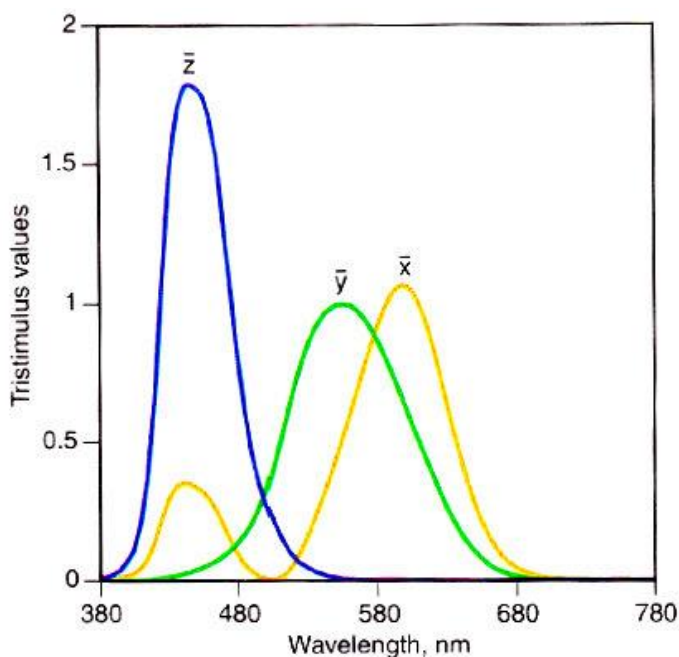
1.5.3. Tīklenes fotoreceptoru jutības līknes un krāsu saskaņošanas funkcijas

Vālītes līdzīgi kā jebkuri starojuma detektori integrē uz tiem krītošā starojuma signālu pie atbilstošiem viļņa garumiem. Katra tāda integrācija nodrošina trīs signālus, vienu katram vālīšu tipam ar tam raksturīgu spektrālo jutību. Spektrāli dažādi stimuli redzes sistēmā var izraisīt vienu un to pašu atbildi, šo parādību sauc par metamērismu, un attiecīgās krāsas par metamērām. Krāsu saskaņošanas eksperimenti tiek balstīti uz metamērisma fenomenu.



Attēls 1.15. Normalizētas vālīšu jutības funkcijas pēc *Stockmann et al (2000)* [62].

Krāsu saskaņošanas eksperimenta būtība ir tāda, ka stimulam ir divas daļas, kur viena ir testa viļņa garums. Otru daļu veido triju krāsu aditīvs salikums. Eksperimenta dalībniekam ir jāpieskaņo sarkanās, zilās un zaļās krāsas daudzumi, lai stimula abas stimulu puses sakristu. Tā kā krāsu uztvere mainās atkarībā no tīklenes ekscentritātes, ir ieviesti standarti krāsu saskaņošanas eksperimentiem pēc leņķiskā izmēra: 2° un 10° . Kā pamatkrāsas 1931. gada standartā tika izmantoti monohromatiski sarkans (700 nm), zaļš (546,1 nm) un zils (435,8 nm) stimuli. Iespējams izmantot arī citas primārās krāsas, taču tad rezultāti atšķiras. Eksperimentā tiek noteikts pamatkrāsu daudzums, kas nepieciešams, lai pieskaņotu stimula krāsu, un iegūtas krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ [60].



1.16.attēls. Krāsu saskaņošanas funkcijas 1931. gada standarta novērotājam [26].

Tāpēc, ka $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ saskaņošanas funkcijām bija arī negatīvas vērtības, bija apgrūtināti aprēķini un sarežģīta mērinstrumentu ražošana. Tika veikta pamatkrāsu transformācija uz iedomātu krāsu sistēmu XYZ un iegūtas saskaņošanas funkcijas $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$, kurām visas vērtības bija pozitīvas. $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$, un $\bar{z}(\lambda)$ sauc par CIE 1931 krāsu saskaņošanas funkcijām (skat. 1. 16.attēlu). Šīs saskaņošanas funkcijas tika noteiktas tādām neliela izmēra stimulam, kas atbilst 2° leņķiskajam izmēram. Tās arī sauc par 2° saskaņošanas funkcijām. 1964. gadā tika izveidotas krāsu saskaņošanas funkcijas 10° novērotājam. Aprēķinos rekomendēts lietot 10° saskaņošanas funkcijas, ja stimula leņķiskais izmērs pārsniedz 4° . Mazākiem stimuliem lieto 2° saskaņošanas funkcijas [26, 59, 60].

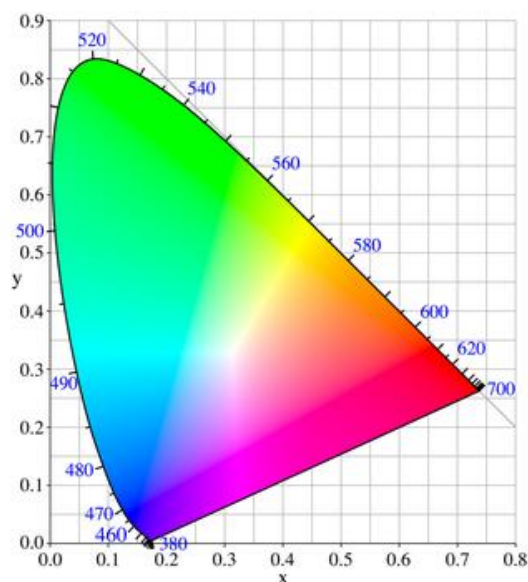
1.5.4. CIE definētā krāsu attēlošana

Krāsu telpas ir koordinātu sistēmas, ar kuru palīdzību iespējams raksturot un vizualizēt krāsas. Cilvēks krāsu var raksturot ar krāsas toni, spožumu un piesātinājumu. Elektronikā krāsu var raksturot kā sarkanās, zilās un zaļās komponentes nepieciešamā daudzuma attiecību, lai radītu krāsu. Parasti krāsas raksturošanai krāsu telpās lieto trīs koordinātes vai parametrus. Šie parametri raksturo krāsas atrašanās vietu izvēlētajā krāsu telpā.

Ir izveidotas vairākas krāsu telpas, bet neviena nav piemērota pilnīgi visiem gadījumiem. Ir lineāras un nelineāras krāsu telpas. Lineārā krāsu telpā stimula izmaiņa par, piemēram, 10 vienībām radīs tādu pašu izmaiņu uztverē. Liela daļa no krāsu telpām nav šādā veidā lineāras. Krāsu raksturošanai RGB un HSL krāsu telpas ir biežāk sastopamās. RGB telpa pašlaik ir visvairāk pētītā, jo elektroniskā grafika galvenokārt ir RGB telpā. Atkarībā no uzdevuma var izvēlēties katram gadījumam piemērotāko krāsu kodēšanas sistēmu. Eksperimentos, kuros tiek veikta krāsu saskaņošana vai piemeklēšana visērtāk izmantot HSL krāsu kodēšanas sistēmu, kas arī tika izmantota manā darba piedāvātajās metodēs.

CIE x,y krāsu diagramma

Krāsu uztveres pētījumos viena no pirmajām matemātiski definētajām krāsu telpām bija CIE 1931 XYZ krāsu telpa, ko izveidoja *International Commission on Illumination* 1931. gadā. Šī telpa tika izveidota balstoties uz krāsu saskaņošanas eksperimentālu datu sērijām. CIE krāsu diagramma parāda relatīvos daudzumus iedomāto pamatkrāsu, kas nepieciešami, lai iegūtu jebkuru reālu krāsu. CIE krāsu diagrammā ir attēlotās visas fiziski iespējamās krāsas, ko cilvēks var uztvert. Spektrālās krāsas ir izvietotas pa diagrammas perimetru. Violetie toņi, kas ir zilās un sarkanās krāsas salikums, atrodas uz taisnās līnijas, kas savieno 400 un 700nm. Baltā krāsa atrodas pašā diagrammas centrā ar koordinātēm $x=0.33$ un $y=0.33$. Diagramma izmantojama lai noteikt gaismas avota krāsu temperatūru, kā arī dominējošo viļņa garumu (att.1.17). [59]



1.17. attēls. CIE 1931 krāsu telpa [59].

CIE telpa ir viena no visbiežāk lietotajām krāsu telpām gan zinātnē gan arī ražošanā. No tās ir atvasinātas arī citas CIE definētas krāsu telpas, kā CIE LUV un CIE LAB [26]. XYZ telpas koeficientus izmanto arī pārrēķinam uz fizioloģiskās vāļišu ierosinājuma telpām, par kurām tiks runāts nākošajā sadaļā.

1.5.5. Fizioloģiski pamatotas krāsu telpas

Neskatoties uz to kā CIE ieviestas krāsu diagrammas un telpas tiek bieži izmantotas, lai raksturot krāsas, tam par pamatu kalpojuši maldīgi priekšstati par krāsu redzi, kas izriet no krāsu saskaņošanas eksperimentiem [63]. 20.gadsimta 80.gados tika mēģināts labot šos klasiskos priekšstatus, ievēdot jaunu telpu saimi kam pamatā ir vāļišu spektrālas jutības dati (1.15.attēls), kā arī ir ņemti vērā krāsu oponences principi. Šīs telpas nav plaši zināmas, bet to pielietojums var sniegt vairākus labumus salīdzinājumā ar CIE krāsu diagrammu un citiem CIE diagrammas atvasinājumiem.

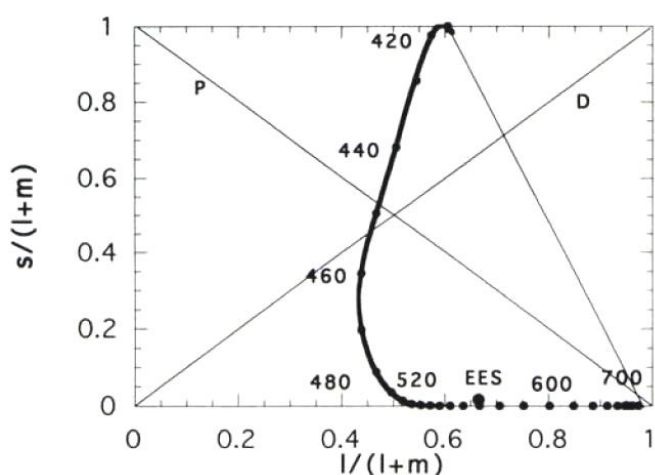
MacLeod un Boynton (MB) krāsu diagramma (vāļišu ierosinājuma diagramma)

Vāļišu ierosinājuma diagramma, jeb vienkāršāk, krāsu diagramma ir projekcijas plakne, ko iegūst no CIE saskaņošanas funkcijām. Atšķirībā no CIE sistēmas *MacLeod* un *Boynton* [64, 65] ir piedāvājuši taisnstūra plakni, kas ir normalizēta pret Y_j (kas ir spožums izmaiņām CIE 10 grādu kolorimetriskajam novērotajam pēc *Jud et al* (1951) datiem. MB diagramma iekļauj specifisko pieņēmumu, ka $\hat{s}(\lambda)$ (jeb S vāļītes) neiegulda spožumā, kas izriet no spožuma

funkcijas, kura atbilst L un M vāļišu jutību summai. Lai iegūt LMS vērtības šai krāsu diagrammai veic sekojošu matricas transformāciju no XYZ krāsu saskaņošanas funkcijām:

$$\begin{bmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,15516 & 0,54307 & -0,03287 \\ -0,15516 & 0,45692 & 0,03287 \\ 0 & 0 & 0,01608 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(\lambda) \\ Y(\lambda) \\ Z(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Par diagrammas koordinātēm izmanto vērtības $l=L/(L+M)$, $m=M/(L+M)$ un $s=S/(L+M)$. Horizontālā ass apraksta stiprumu mijiedarbību starp L un M vāļišu signāliem, uz vertikālās ass ir attēlots S vāļišu signāla stiprums vienāda spožuma plaknē (attēls 1.18.). [63]



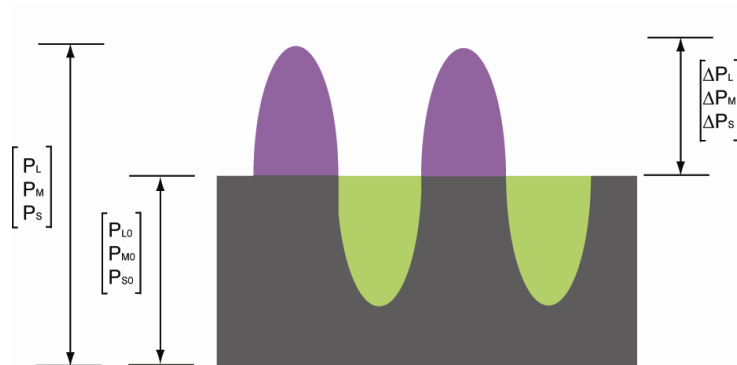
Attēls 1.18. MacLeod un Boynton piedāvātā krāsu diagramma ar normalizāciju pa y asi. P un D līnijas parāda dihromātu konfūzijas līknes. EES – ir balta punkta koordinātes, S vāļišu ieguldījums netiek ņemts vērā. [64].

Neskatoties uz šeit piedāvāto aprēķinu eksistē vāļišu jutības dati no citiem pētījumiem, kā arī dažādas saskaņošanas funkciju modifikācijas. Lietojot katru no tām mainās arī transformēšanas koeficienti no XYZ uz LMS. Atkarībā no izvēlētām XYZ vērtībām ir piedāvāti dažādi transformāciju varianti CRT displejiem. Tāpēc displeja baltā punkta koordinātes var mainīties robežās vērtībās no 0,648 līdz 0,7 [66].

Valīšu kontrasta un oponentās modulācijas telpa (DKL)

Vāļišu ierosmes diagramma dod iespēju aprakstīt sākotnējo gaismas kodēšanu, kas notiek tīklenes vāļišu posmā. Pateicoties tam, ka vāļišu ierosinājums ir vienāds gaismas kvantu absorbcijai trīs tipu pigmentos, ir vienkāršāk izsekot kā notiek tālākās redzes mehānismu kombinācijas un vāļišu signālu apstrāde [67].

Šī loģika balstās uz diviem klasiskiem priekšstatiem par tīklenes procesiem. Pirmkārt, fotopigmenta ierosme tiek analizēta kā kontrasta signāls, jeb tas nonāk tālākā analizē relatīvā formā. Otrkārt, signāli no trīs tipu vāļītēm tiek kombinēti trijos paralēlajos apstrādes kanālos (oponentā krāsu teorija): viens kopīgais un divi krāsu oponentie. Izejot no šiem spriedumiem ir iespējams izveidot divas telpas: vāļišu kontrasta telpa un oponentās modulācijas telpa. Abas no šīm telpās ir saistītas ar MacLeod Boynton krāsu diagrammu. [67]



Attēls 1.19. Shematiskais attēlojums oponentās modulācijas stimula aprakstam. Sinusoidāli modulēts stimuls ($P_L P_M P_S$) uz monotona fona ($P_{LO} P_{MO} P_{SO}$) [50].

Attēlā 1.19. ir parādīts tipiska redzes stimula (sinusoidālais režģis) shematiskais attēlojums. P_{LO} , P_{MO} , P_{SO} apraksta vāļišu ierosinājuma koordinātes fonam; P_L , P_M , P_S apraksta vāļišu koordinātes stimulam, ko mēs vēlamies aprakstīt. Attiecīgi, diferenciālas vāļišu ierosinājuma koordinātes ir šo divu signālu starpība (vienādojums 4). [67]

$$(C_L C_M C_S) = \left(\frac{\Delta P_L}{P_{LO}} \frac{\Delta P_M}{P_{MO}} \frac{\Delta P_S}{P_{SO}} \right) \quad (4)$$

Transformācija no vāļišu ierosinājuma uz vāļišu kontrasta telpu ir sava veida pārkalibrācija, kad fona koordinātes atrodas divdimensionālas telpas nulles punktā.

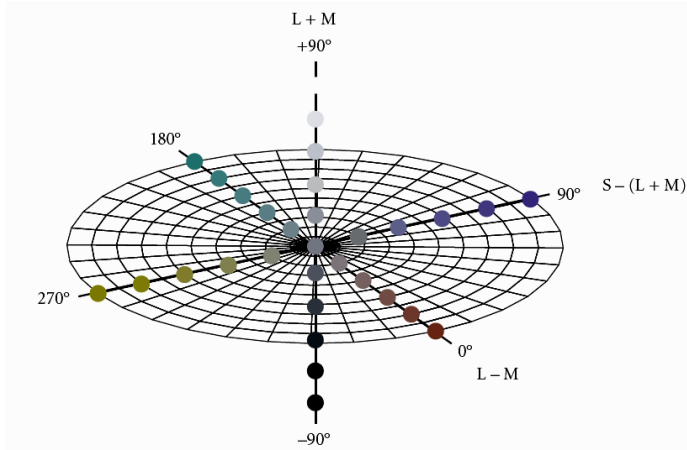
Vāļišu kontrasta telpas galvenā priekšrocība ir *Von Kries/Weber* tīklenes apstrādes posma normalizācija modeļa iekļaušana stimula attēlojumā. *Von Kries* (1905) [59] ir ierosinājis signālu neatkarīgu normalizāciju trijos vāļišu ceļos. *Weber* likums var tikt interpretēts, kā katrā ceļā normalizācija pieņem savu specifisko formu. Kritiskā vāļišu kontrasta telpas komponente ir fona koordinātes, no kurām ir atkarīgs stimulu izvietojums šajā telpā.

Monohromatiskiem stimuliem kontrasta aprēķins ir vienkārša darbība, kur parasti tiek izmantoti Michelson vai Weber kontrasta vienādojumi. Savādāka situācija ir ar hromatiskiem stimuliem. Kaut gan CIE LAB telpā ir iespējams aprēķināt attālumus starp krāsām, tomēr tam nav nekāda sakara ar tīklenes mehānismiem. Vāļišu kontrasta telpa padara hromatiskā kontrasta aprēķinu daudz ticamāku. *Chaparro et al* (1993) ir piedāvājis definēt krāsu kontrastu ar kopējo vāļišu kontrastu (vienādojums 5).

$$= \sqrt{C_L^2 + C_M^2 + C_S^2}. \quad (5)$$

Kopējā vāļišu kontrasta labums ir tāds, ka tas nav atkarīgs no izmantotās aparatūras, novērotāja un stimula konfigurācijas īpatnībām. Atšķirībā no pārējām kontrasta vienībām, vāļišu kontrasts var sasniegt tikai $C_{\max} = \sqrt{3}$ maksimālo vērtību, nevis kā parasti $C_{\max} = 1$. [67]

DKL jeb oponentās modulācijas krāsu telpa (no izveidotāju uzvārdiem *Derrington, Krauskopf, Lennie* [68]), kā arī vāļišu kontrasta telpa, ir balstīta uz oponentes modeļa pamatprincipiem (*Hurvich, Jameson*, 1955). Pēc tam, kad ir aprēķināts diferenciālais vāļišu signāls, tas tiek pārkodēts trīs mehānismos: spožuma kanāls un divi oponentie hromatiskie kanāli. Oponentās modulācija telpa atspoguļo šos hipotētiskos mehānismus (attēls 2.3.). [69]



Attēls 1.20. Oponentās modulācijas (DKL) krāsu telpa. Horizontālais režģis atbilst vienāda spožuma plaknei, kas iekļauj L-M (0°-180°) un S-(L+M) (90°-270°) kardinālās mehānisma asis. Vertikālā ass ir spožuma L+M ass (-90° +90°)[69].

Spožuma un oponento mehānismu aprēķins DKL telpā

Spožuma kanāla atbilde ir vienāda ar diferenciāla stimula fotopisko spožumu. Ja mēs gribētu izrēķināt diferenciālās XYZ vērtība būtu nepieciešams invertēt vienādojuma 2 centrālo matricu un pareizināt ar vāļišu kontrasta stimulu:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9449 & -3.5001 & 13.1745 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 62.1891 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta P_M \\ \Delta P_S \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Dotas matricas otra rinda parāda, ka spožuma mehānisms sastāv no L un m vāļišu signāliem

$$\Delta R_{Lum} = K_{Lum} (W_{Lum,L} \Delta P_L + W_{Lum,M} \Delta P_M + W_{Lum,S} \Delta P_S), \quad (7)$$

kur $W_{Lum,L} = 1$, $W_{Lum,M} = 1$, $W_{Lum,S} = 0$. Mehānisma kopēja atbilde ir apzīmēta ar R , katrs no svāriem apzīmēts ar W .

Atšķirībā no spožuma mehānisma, krāsu kanālam jāatbilst diviem svarīgiem nosacījumiem. Pirmkārt, atbilde R ir vienāda ar nulli, kad kontrasta signāls ir tik pat liels kā fons (vienādojums 5). Otrkārt, S vāļītes neienes ieguldījumu mehānisma atbildē (vienādojums 4) [67, 69].

$$(\Delta P_L \Delta P_M \Delta P_S) = k(P_{L0} P_{M0} P_{S0}) \quad (8)$$

$$\Delta R_{L-M} = K_{L-M} (W_{L-M,L} \Delta P_L + W_{L-M,M} \Delta P_M + W_{L-M,S} \Delta P_S), \quad (9)$$

Otrajam krāsu mehānismam (S-(L+M)) ir arī jāatbilst diviem nosacījumiem. Līdzīgi kā L-M mehānismā atbilde kļūst vienāda nullei, kad diferenciālajam signālam ir tādas pašas koordinātes kā fonam. Pie otra nosacījuma mehānisma atbilde ir nulle, kad diferenciāls S vāļišu signāls ir vienāds ar spožuma mehānisma diferenciālo signālu (L+M). [58]

$$\Delta R_{S-Lum} = K_{S-Lum} (W_{S-Lum,L} \Delta P_L + W_{S-Lum,M} \Delta P_M + W_{S-Lum,S} \Delta P_S), \quad (10)$$

šajā gadījumā svāri ieņem sekojošo izskatu $W_{S-Lum,L} = -W_{Lum,L}$, $W_{S-Lum,M} = -W_{Lum,M}$ un $W_{S-Lum,S} = -(W_{S-Lum,L} P_{L0} + W_{S-Lum,M} P_{M0}) / P_{S0}$. Katram no

mehānismiem ir savi svāri W , kas mainās atkarībā no izvēlēta fona un konstante k definē mehānisma atbildes vienības.

Apkopojot iepriekš uzrakstītus svaru aprēķinus ir iespējams izveidot kopējo aprēķinu matricu

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta R_{Lum}}{K_{Lum}} \\ \frac{\Delta R_{L-M}}{K_{L-M}} \\ \frac{\Delta R_{S-Lum}}{K_{S-Lum}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \frac{-P_{Lo}}{P_{Mo}} & 0 \\ -1 & -1 & \frac{P_{Lo} + P_{Mo}}{P_{So}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_L \\ \Delta P_M \\ \Delta P_S \end{bmatrix} \quad (11)$$

Viena matricas rinda satur svarus katram oponentes modeļa mehānismam [67].

1.5.6 Citas bieži lietojamās krāsu telpas

RGB krāsu modelis

RGB telpa tiek lietota krāsu signāla kodēšanai datortehnikā, kas darbojas uz trīs hromoforu principa (trihromātiska sistēma). Tā ir ērta izmantošanai displejos un citās attēlošanas ierīcēs, kas balstās uz aditīvo krāsu sajaušanas principu. Parasti *Windows* sistēmām RGB vērtības katram kanālam tiek digitalizētas 8 bitu vienībās (0- 255), un lai kodētu krāsu katram pikselim, nepieciešami 24 biti. [26]

HSL krāsu telpa

Katru krāsu var aprakstīt cilindriskā koordinātu sistēmā ar dimensijām: krāsas tonis, piesātinājums un spožums. Krāsas tonis ir normēts lielums robežās no 0 līdz 360. Krāsu gammu var izkārtot riņķī, un ar leņķisko pozīciju raksturot krāsas toni. Piesātinājums mainās pa riņķa rādiusu kā parādīts attēlā. Spožums mainās pa vertikālo dimensiju.

HSL krāsu telpa ir RGB krāsu telpas pārveidojums. Šī krāsu telpa veidota, lai krāsu būtu iespējams mainīt pēc intuitīviem uztveres lielumiem. Tādējādi šī telpa ir vispiemērotākā krāsu „piekārtošanas” eksperimentos. [60]

1.6. Krāsu redzes teorijas

1.6.1. Trihromātiskā krāsu redzes teorija

Trihromātiskā krāsu redzes teorija balstās uz principu, ka tīklenē ir trīs dažādu tipu vāļītes. Tātad ir trīs atsevišķi kanāli, kas nodrošina krāsu redzi. Trihromātiska krāsu redze ir spēja izšķirt dažādas krāsas, ko nodrošina mijiedarbība starp trim krāsu jutīgiem vāļīšu veidiem. Trihromātiskā teorija radusies jau 18. gs., tās autors ir *Thomas Young*. Vēlāk *Herman von Helmholtz* izskaidroja Junga idejas balstoties uz krāsu saskaņošanas eksperimentiem, kas parādīja, ka cilvēkiem ar normālu krāsu redzi nepieciešami trīs viļņa garumi, lai radītu visas iespējamās krāsu sajūtas. Savā laikā trihromātiskā teorija nespēja izskaidrot, kā kombinējas sarkanā un zaļā gaisma, veidojot dzeltenu gaismu vai kāpēc cilvēki ar krāsu redzes anomālijām neatšķir sarkano un zaļo vai zilo un dzeltenu krāsu. [26]

1.6.2. Oponento krāsu teorija

Ideja, ka sarkanās- zaļās un zilās- dzeltenās krāsu redzes informācijas apstrāde redzes ceļos ir atdalīta, ir sena jau kopš Evalda Heringa klasiskajiem novērojumiem. Klasiskā oponentā krāsu teorija izvirzīja ideju, ka krāsu uztvere balstās uz bipolāriem krāsu kanāliem: sarkani- zaļo

un dzelteni- zilo kanālu. Ar bipolāru tiek domāts, ka katrā brīdī viens kanāls var dot signālu tikai par vienu no krāsām, ko tas spēj kodēt. Piemēram, dotajam stimulam sarkani- zaļais kanāls dod atbildi tikai par sarkano vai zaļo komponenti, bet ne par abām- sarkano un zaļo. Tas pats attiecas arī uz zili- dzelteno kanālu, vienlaicīgi tiek kodēta tikai zilā vai dzeltenā komponente. Herings arī izvirzīja hipotēzi, ka spožums tiek kodēts ar atsevišķa melni- balta kanāla palīdzību. [25, 54]

1.6.3. Modernā oponento krāsu teorija

Modernajā krāsu redzes koncepcijā tiek pieņemts, ka darbojas gan trihromātiskā, gan oponento krāsu teorija. Abas šīs teorijas darbojas dažādos posmos. Pirmajā posmā ir nozīmīga gaismas absorbcija trīs dažādu spektrālo jutību vāļītēs. Bet tālākā informācijas apstrāde norisinās oponentu procesu veidā. [25]

Vēlos 1950-tajos gados *Leo Hurvich* un *Dorothea Jameson* ieguva kvantitatīvus datus, kas parādīja, ka krāsu oponentei ir liela nozīme krāsu uztverē (*Hurvich*, 1981). Šie autori izmantoja toņa dzēšanas (*hue cancelation*) eksperimentus. Toņa dzēšanas eksperimentu izmanto oponento krāsu koordinātu noteikšanā. Piemēram, sajaucot nelielu daudzumu gaismas, kas izskatās sarkana ar nelielu daudzumu zaļās nokrāsas gaismu, iegūst gaismu, kas kļūst mazāk sarkana. Palielinot zaļās gaismas daudzumu, sarkanā nokrāsa samazināsies līdz vispār izzudīs un iegūtā gaisma neizskatīsies ne zaļa, ne sarkana. Šis nulles punkts nozīmē, ka tiek raidīti oponenti signāli sarkanajā un zaļajā sistēmā. [25]

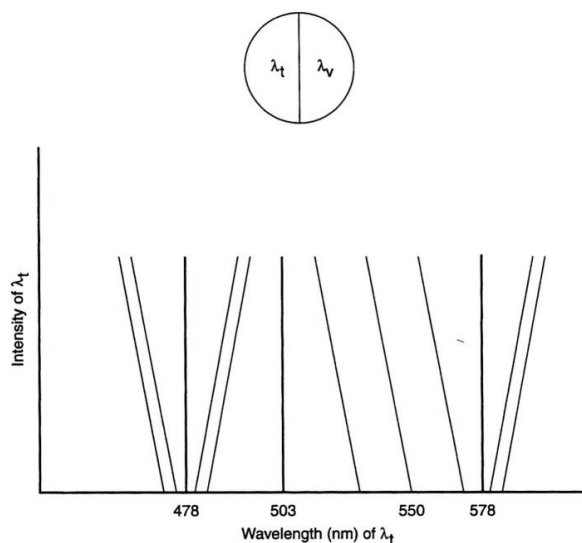
Saskaņā ar *Hurvich* un *Jameson*, visas krāsas var tikt izskaidrotas ar relatīvo aktivitāti sarkani zaļajā un zili dzeltenajā un spožuma kanālā. Šis modelis korekti paredz unikālo krāsu lokāciju, kas izvietotas sarkani-zaļā un dzelteni- zilā kanālu krustpunktos. Šajos punktos aktīvs ir tikai viens no abiem kanāliem un rada tīras, piesātinātas krāsas sajūtu, piemēram, 578nm- dzeltenā krāsa. [25, 70]

Tīklenē ir četri dažādi sarkani- zaļo oponento P šūnu veidi, tādējādi arī parvocelulārie neironi LCK. L- on centra un M- off centru ierosina sarkanā un inhibē zaļā gaisma. M- on un L- off centra šūnas ierosina zaļā uz inhibē sarkanā gaisma. *Hubel* un *Wiesel* parādīja, ka parvocelulārie neironi LCK ir jutīgi uz maziem, spožiem stimuliem, ko projicē receptīvā lauka centrā, bet tie ir krāsu selektīvi uz lielāku izmēru stimuliem. Tas ir tāpēc, ka lielāks stimulds efektīvāk vienlaikus stimulē krāsu oponento centru un apkārtni. Parvocelulārie neironi ir visvairāk krāsu selektīvi, kad tiek ierosinātas antagonistiskas ietekmes no divām vāļīšu klasēm: viena centrā un otra- apkārtne. Tīklenē dzelteni- zilajai sistēmai ir savas specializētās midget bipolārās šūnas un maza lauka ganglionārās šūnas. LCK līmenī S vāļīšu oponentie neironi aizņem atsevišķu ceļu. S vāļīšu oponente ir parādīta koniocelulārajos LCK slāņos primātiem. Arī smadzeņu garozas līmenī V1 ir pierādījumi, ka sarkani- zaļo un dzelteni- zilu vāļīšu oponentie ceļi ir atsevišķi. Vēl līdz šim nav izskaidrots kāpēc sarkani- zaļajai sistēmai ir tik liels īpatsvars tīklenes centrālajā daļā. L/M vāļīšu oponente ir ļoti jutīga tīklenes centrālajā daļā, bet virzienā uz perifēriju kritas. [71]

1.7. Bezold-Brücke fenomens un unikālās krāsas

Lielākajai daļai viļņa garumu rodas neliela izmaiņa krāsas tonī, ja tiek palielināta stimula intensitāte. Šo parādību sauc par *Bezold-Brücke* fenomenu. Lai demonstrētu šo parādību, novērotājam tiek rādīts stimulds, kas sastāv no divām daļām (skatīt attēlā zemāk). Stimula kreisajā daļā tiek rādīts testa stimulds λ_t . Labajā pusē tiek rādīts stimulds λ_v , sākotnēji stimuli abās pusēs ir identiski. Eksperimenta laikā tiek palielināta λ_t stimula intensitāte. Kreisās puses stimula λ_t viļņa garums tiek mainīts, lai tā krāsa joprojām atbilstu stimulam labajā pusē λ_v . Piemēram, zaļi- dzeltena testa stimula (550nm) intensitātes palielināšana rada sajūtu, ka stimula krāsa ir

dzeltenāka (tas ir „garāka viļņa garuma krāsa”). Lai saglabātu sākotnējo testa stimula krāsas toni, jāsamazina viļņa garums. Šīs nobīdes pie dažādiem viļņu garumiem ir attēlotas grafikā. Visi stimuli, kas atrodas uz vienas taisnes, rada vienas un tās pašas krāsas sajūtu, šīs taisnes sauc par krāsas toņa kontūrlīnijām. Attēlā redzamas kontūrlīnijas pie dažādiem viļņa garumiem, gandrīz visas līnijas ir noliekotas [26, 59].



1.21. attēls. *Bezold-Brücke* fenomēns [26].

Tika veikti vairāki pētījumi par unikālo toņu nemainību. Trīs no unikālajiem toņiem ir parādīti attēlā 1.19 ar vertikālajām taisnēm. Dažādos avotos tiek minētas dažādas unikālo toņu vērtības [72, 73, 74, 75]. Unikālo krāsu vērtības ir vairāk mainīgas zilai un zaļai krāsām. Unikālais sarkanais tonis ir veidots no divām spektrālām krāsām, tāpēc tas bieži netiek minēts literatūrā. Datu analīzei mēs izvēlējamies unikālajiem toņiem atbilstošus viļņa garumu pēc *Pridmore* (1999) datiem [72] ar 25 cd/m² spožumu. Sarkanai krāsai atbilst gaismā ar viļņu garumiem 495/629 nm, unikālām dzeltenam - 578 nm, zaļajam unikālām tonim tas ir 542 nm un zilajam – 478 nm. Izvēlēto unikālo toņu viļņu garumus var attēlot uz CIE x,y diagrammas. Mūsu darbos tika izmantotas līnijas, kas iet no pelēka punkta uz CIE x,y diagrammas malu.

1.8. Krāsu pēcefekts un aizpildījuma fenomens

Krāsu pēcefekta veidošanās ir viena no būtiskiem fenomeniem, kas palīdz izprast krāsu redzi. Pēcefekts veidojas garākā laikā (vismaz 30 sekundes) aplūkojot krāsainu stimulu ar augstu piesātinājuma pakāpi. Krāsu pēcefekts ir cieši saistīts ar krāsu adaptāciju. Adaptācija ir attiecināma uz krāsu selektīvo neironu jutības pazemināšanos, ilgāku laiku aplūkojot doto stimulu [5]. Pēcefekta rezultātā ir novērojama papildkrāsas (komplementāras) parādīšanās uz neitrāla (balta, pelēka) testa laukuma. Piemēram, stimulējot tīkli ar piesātinātu sarkanas krāsas stimulu, pēc ilgākas iedarbības, L+M- oponentās šūnas tīklenē kļūst mazāk jutīgas, bet attiecīgās M+L- šūnas šajā stimulācijas periodā tiks nomāktas. Parasti fiksējot skatu uz baltu stimulu L+M- un M+L- šūnu atbilde ir līdzsvarā. Šajā gadījumā, kad sarkanais stimulants tiks aizstāts ar baltu laukumu, L+M- šūnas būs mazāk jutīgas uz baltu stimulu kā parasti, bet M+L- šūnas pēc ilgāka nomākuma dos stiprāku atbildes reakciju, un uz baltā fona būs redzams zaļas krāsas pēcefekts, kas ir pigmenta izbalēšanas un post receptoru tīkla izraisītas sekas [54].

Vizuālās informācijas uztveres procesā bieži novēro dažādus fenomenus un ilūzijas. Iepriekš minētais pēcefekts ir cieši saistīts ar aizpildīšanas (*filling-in*) procesu, kas ir saistīts ar neapzināto iztrūkstošas informācija aizpildīšanu [17]. Aizpildījums var izpausties dažādos veidos

un tai skaitā arī kā formas krāsu aizpildījums. Izšķir tiešo aizpildījumu, kas notiek kad mēs aplukojam kādu objektu un aizpildījums bez tiešas tīklenes receptoru ierosināšanas. Salīdzinot ar pēcefektu, kas rodas ilgstoši (vairāk kā 30 s) novērojot krāsaino virsmu un pamatā balstīts uz pigmentu izbalēšanu, aizpildījums ir neirāls process [17, 18]. Pēc Komatsu virsmas uztveri var aprakstīt ar diviem secīgiem procesiem. Pirmā procesa laikā tiek konstruēta objekta forma, pēc pieejamas kontūru informācij, un otra procesa fāzē objektam tiek piešķirtas pārējas īpašības, kā krāsa, spožums vai tekstūra [17].

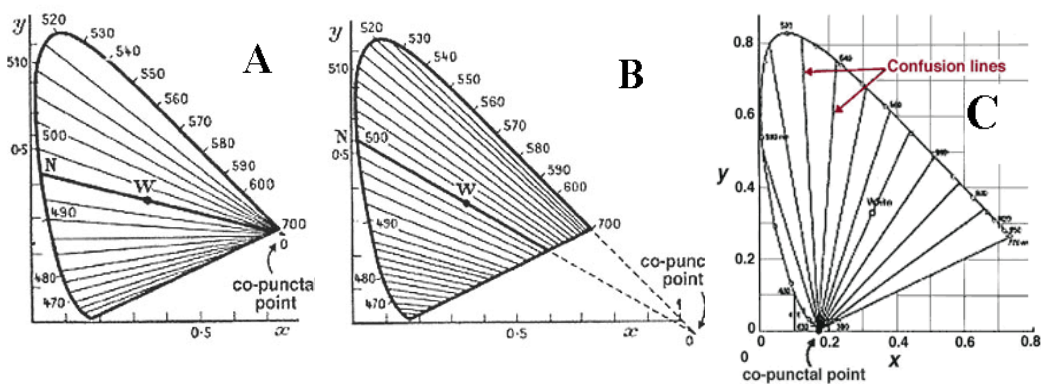
1.9. Krāsu redzes traucējumi

Krāsu redzes traucējumi tiek definēti kā mainīgs stāvoklis, kas norāda uz izmaiņām krāsu saskaņošanā un /vai atšķiršanā, turklāt citas redzes funkcijas (piemēram, redzes asums) netiek traucētas. Krāsu redzes traucējumi var būt gan iedzimti, gan iegūti.[7]

Normālas krāsu redzes gadījumā krāsu sajūta veidojas no trīs pigmentu tipiem attiecīgajās vāļītēs (trihromātiskā krāsu redze). Gadījumos, kad iztrūkst kāds no pigmentiem sajūta veidojas no paliekošajiem pigmentu tipiem, ko sauc par dihromāziju. Dihromātiem trūkst viens no vāļīšu fotopigmentiem: deiteranopam – M vāļīšu pigments, protanopam – L vāļīšu pigments, bet tritanopam – C vāļīšu pigments. Dihromāzijas aizstāšanas modelis (attiecināms uz deiteranopiju un protanopiju) paredz, ka trūkstošais fotopigments tiek aizstāts ar citu fotopigmentu. Ja dihromāziju pieņemtu, kā zaļo (M) vai sarkano (L) gaismas viļņu jutīgo vāļīšu iztrūkumu, tad dihromāti uzrādītu klīniski nosakāmu redzes asuma pazemināšanos [76].

Anomāliem trihromātiem ir trīs fotopigmenti, bet vienam no tiem ir izmainīts absorbcijas spektrs. Deiteranomālaiem trihromātiem pigmentu absorbcijas spektrs ir nobīdīts uz garo gaismas viļņu pusi, savukārt protanomāliem trihromātiem – uz īso gaismas viļņu pusi[76].

Līdz ar kāda no pigmentiem iztrūkumu mainās arī cilvēka viļņu garumu izšķiršana, ko var attēlot CIE x, y krāsu diagramma. Līnijas attēlā 1.22 ir zināmas, kā konfūzijas līknes. Cilvēkams ar noteiktu krāsu redzes traucējumu ir grūtības atšķirt krāsas, kas atrodas uz attiecīgajam līknēm. Šīs krāsas tiek izmantotas krāsu redzes testos, kas ir balstīti uz *Stilling* principiem. Principi, ko izklāstījis *Stilling* 1877. gadā ir izmantoti vairākumā pseidoisohromatisko testu dizainā (*Rabkin, Ishihara, HRR American Optical, Cambridge Colour test*) [59, 76, 77]. Testa fons un aplēpta figūra, kuru krāsas ir piemeklētas pēc konfūzijas līknēm, ir izveidoti no nelieliem plankumiem. Sakarā ar to kā spožuma uztvere, var būt atšķirīga dažādiem krāsu redzes traucējumiem, plankumiem ir dažādi haotiski izveidoti spožumi, kas ienes spožuma troksni attēlā un tas nevar tikt izmantots, kā īpašība aplēptas figūras pamanīšanai. [77]



1.22. attēls. Dihromātu konfūzijas līnijas un to konverģences punkti CIE x,y, diagrammā (A) protanopam, (B) deiteranopam, (C) tritanopam [77].

EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2. TEKSTŪRU ATPAZĪŠANAS EKSPERIMENTI

2.1. Uztveres treniņi ar tekstūru atpazīšanas uzdevumu

Tekstūras ir vienkāršota forma, kuras uztverē aktīvi piedalās primārā redzes garoza. Darba mērķis ir noteikt tekstūru atpazīšanas uzdevuma pildīšanas uzlabojumu, pēc vairākām eksperimenta reizēm.

2.1.1. Dalībnieki

Eksperimentā piedalījās 15 dalībnieki, kuru vecums ir robežās no 20 līdz 24 gadiem (vidējais vecums $21,3 \pm 1,4$ gadi). 10 no tiem pildīja eksperimentu ar krāsainiem stimuliem, 5 ar melnbaltiem stimuliem. No 10 dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar krāsainiem stimuliem, 5 dalībniekiem bija sarkani-zaļš stimuluss un 5 dalībniekiem bija zili-dzeltens stimuluss.

Visiem dalībniekiem, kas piedalījās eksperimentā, bija binokulāra redze un redzes asums 1.0 vai tuvs tam, kas, ja nepieciešams, tika nodrošināts ar korekciju. Dalībnieki ar pazeminātu redzes asumu eksperimentu pildīja ar ierasto korekciju, kas tiek nēsāta ikdienā.

Korekciju, pildot eksperimentu, izmantoja 6 no 15 dalībniekiem. No tiem 5 dalībnieki (K.V., V.N., K.K., M.O., K.M.) eksperimentu pildīja ar brillēm un 1 (dalībnieks L.C.) ar kontaktlēcām. Korekcijas stiprums dalībniekiem bija robežās no -3,00 D līdz -6,25 D un vienam dalībniekam +2,25 D. Korekcija dalībniekus eksperimenta pildīšanas brīdī apmierināja, t.i., sūdzības par neskaidru redzi netika novērotas.

Galvenais kritērijs dalībnieku atlasē bija normāls redzes asums un binokulārās redzes esamība. Visi pētījuma dalībnieki noliedza acu vai organisma vispārējās saslimšanas dotajā brīdī, kā arī pagātnē.

2.1. tabula

Dalībnieki un atbilstošās stimulu krāsas eksperimenta laikā

I.L.	Balts-melns	V.N.	Sarkans-zaļš	M.F.	Zils-dzeltens
K.V.	Balts-melns	A.O.	Sarkans-zaļš	L.C.	Zils-dzeltens
L.S.	Balts-melns	J.L.	Sarkans-zaļš	K.M.	Zils-dzeltens
Z.K.	Balts-melns	K.K.	Sarkans-zaļš	E.F.	Zils-dzeltens
Z.S.	Balts-melns	M.O.	Sarkans-zaļš	E.P.	Zils-dzeltens

2.1.2. Stimuli un metodes

Pētījumā kā stimuluss tiek izmantots Gabora režģis. Šis stimula izvēle padara eksperimenta atkārtamību lielāku, jo tas plaši tiek izmantots arī citos testos. Stimula svarīgākās īpašības ir

krāsa, kontrasts, izmērs, virziens un ātrums, kādā tas tiek rādīts eksperimenta laikā. Šajā eksperimentā mainīgs lielums ir ātrums un kontrasts. Ātrums mainās vienādi visiem dalībniekiem, taču kontrasts atšķiras dažādiem dalībniekiem.

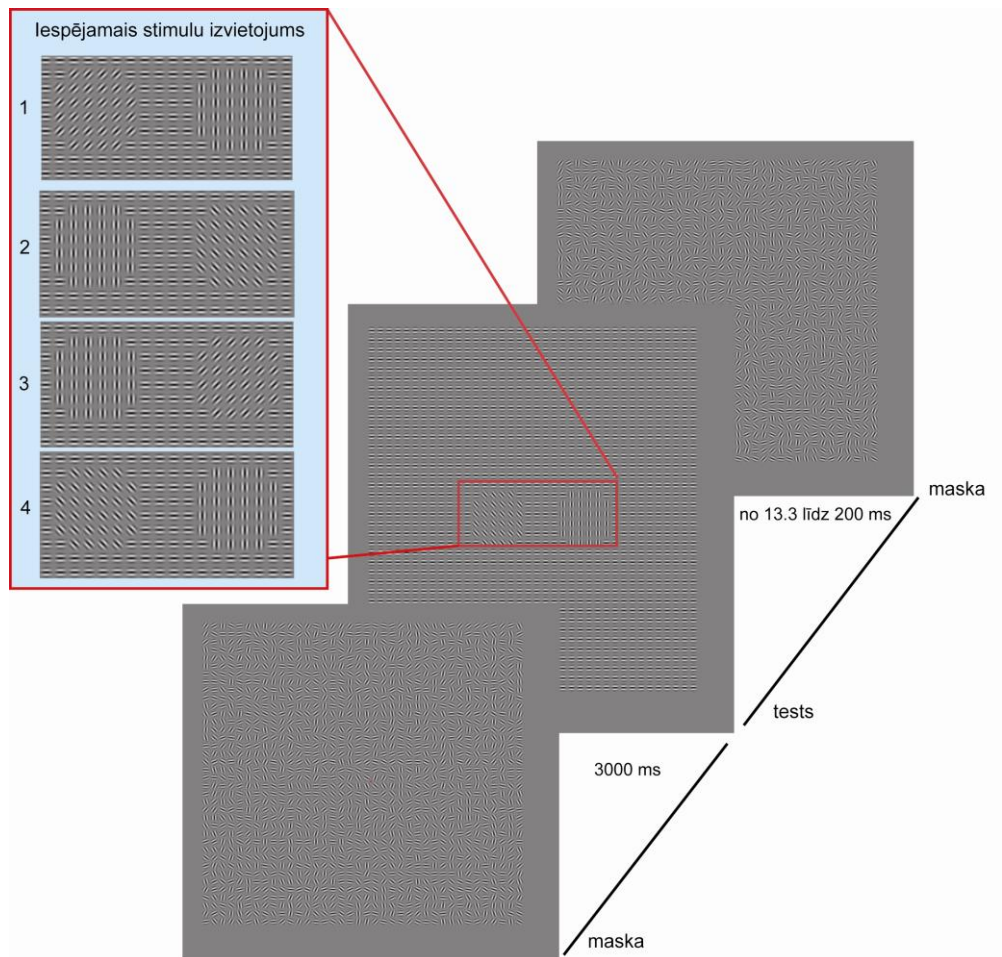
Stimuliem ir arī atšķirīgas krāsas. Krāsu kombinācijas ir melni-balts (skatīt 2.2. attēlu A), zili-dzeltens (skatīt 2.2. attēlu B), sarkani-zaļš (skatīt 2.2. attēlu C).

Stimulam ir izvēlēti trīs dažādi kontrasti, kas aprēķināti izmantojot Maikelsona formulu: $C_M = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$. Melni-baltā stimula kontrasts ir $94,6\% \pm 3,38\%$, zili-dzeltenā ir $67,4\% \pm 0,47\%$, sarkani-zaļā ir $47,1\% \pm 0,26\%$. Samazinoties kontrastam, samazinās arī acs izšķirtspēja. Fona spožums - $68,47 \pm 0,16 \text{ cd/m}^2$. Spožums tika mērīts ar **Konica Minolta Chroma Meter CS100A**. Atšķirīgi kontrasti izvēlēti, lai pārlicināties, vai stimulu kontrasts ietekmē šo eksperimentu un tā rezultātus.

Katra stimulu veidojošā detaļa ir $4,93 \times 4,89 \text{ mm}$ liela. Viss stimuluss kopā sastāv no 6 šādām detaļām katrā virzienā, un tā izmērs ir $29,56 \times 29,31 \text{ mm}$. 60 cm attālumā, kādā sēž dalībnieks, stimula leņķiskais izmērs uz tīklenes ir 1.8 grādi. Stimulss veidots no Gabora režģiem, ko var aprakstīt ar 2.vienādojumu 1.1.sadaļā, kur θ ir viļņa orientācija, λ ir sinusoīdas viļņa garums, γ ir telpiskā novietojuma attiecība, σ ir Gausa funkcijas dispersija. Mūsu gadījumā σ ir 1,1594 mm. Sinusoīdas fāze ir $\pi/4$, respektīvi, centrā atrodas tumšākais laukums.

Stimuliem ir 2 dažādi rādīšanas virzieni: vertikālais un slīpais (skatīt 2.1.attēlu). Slīpais virziens var būt noliekts pa labi vai pa kreisi. Slīpais virziens ir 45° leņķī attiecībā pret vertikālo virzienu.

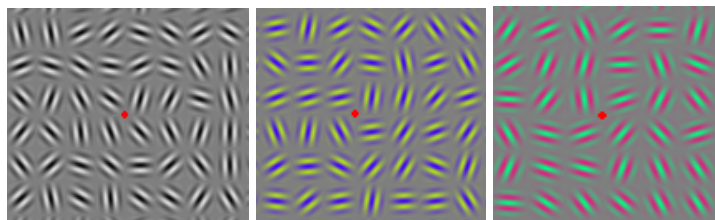
Iespējamās stimulu kombinācijas ir četras: labajā pusē vertikālais stimulss, kreisajā slīpais, kas noliekts pa labi; labajā pusē vertikālais stimulss, kreisajā slīpais, kas noliekts pa kreisi; kreisajā pusē vertikālais stimulss, labajā slīpais, kas noliekts pa labi; kreisajā pusē vertikālais stimulss, labajā slīpais, kas noliekts pa kreisi (skatīt 2.1. attēlu). Šajā eksperimentā dalībniekam jāpasaka tikai tas, kurā pusē atrodas slīpais stimulss.



2.1.att. Iespējamās stimulu kombinācijas.

Stimuliem ir 15 dažādi rādīšanas jeb ekspozīcijas laiki un katram laikam ir 10 atkārtojumu reizes. Tātad viena eksperimenta veikšanas reize sastāv no 150 stimulu kombinācijām, kas katru reizi tiek rādītas nejaušā secībā, ko izvēlas datorprogramma. Rādīšanas laiki ir sākot no 13,33 ms līdz 199,95 ms ar soli 13,33 ms. Starplaiks starp iepriekšējā un nākamā stimula parādīšanos ir 1500 ms.

Starplaikā uz ekrāna ir maska, ko varētu nosaukt arī par fonu, un fiksācijas punkts (skatīt 2.2.attēlu). Tiek izmantota stimulu un maskas asinhronā parādīšanās (SOA), kā arī priekšlaicīgā maskēšana (*forward masking*). Stimulam parādoties, šī maska pazūd un fonu veido horizontāli novietotas stimula detaļas (skatīt 2.1.attēlu).



2.2.att. Stimulu maska melni-baltam, zili-dzeltēnai un sarkanzaļam stimuliem.

2.1.3. Iekārta un programma

Eksperiments realizēts uz *Cambridge Research Systems* stimulu ģenerators *VISAGE*. Vadības dators, kas nodrošina datorprogrammas darbību un, kurā var tikt mainīti visi tās parametri, ir savienots ar šo stimulu ģenerators. Savukārt ģenerators ir savienots ar datoru stimulu rādīšanai. Stimulu ģenerators saņem informāciju arī no pults, kas tiek izmantota atbilžu veikšanai. Kad cilvēks atbild, nospiežot attiecīgo pults pogu, uz vadības datoru tiek raidīts signāls. Vadības datorā nonāk informācija par pareizajām un nepareizajām atbildēm, reakcijas laikiem, kā arī stimulu ekspozīcijas laikiem. Tur šī informācija var tikt saglabāta un izmantota datu analīzei.

Divu alternatīvu piespiedu psihofizikālā metode (*2AFC*), tika pielietota datu vākšanai. Dalībniekam, skatoties uz fiksācijas punktu, vienlaicīgi tiek rādīti 2 stimuli un, nospiežot attiecīgu pogu, jāpasaka, kurš ir slīpā virzienā. Dalībnieks no datora ekrāna atrodas vidēji 60 - 70 cm attālumā, tā lai varētu samērā brīvi saskatīt stimulu, kas tiek rādīts uz datora ekrāna, un justies ērti. Tas nepieciešams, jo viens piegājiens aizņem vidēji 8 minūtes. Datorprogramma pierēģistrē dalībnieka atbilžu pareizību un dalībnieka reakcijas laikus. Reakcijas laiki parāda cik ātri dalībnieks spēj reaģēt uz stimulu, kas parādās uz ekrāna, un cik ātri nospiež attiecīgo pults pogu. Ja slīpais stimul ir pa kreisi no fiksācijas punkta, tad jāspiež pults kreisajā pusē esošā poga, ja labajā, tad attiecīgi poga pults labajā pusē. Datorprogramma izveidota tā, ka iespējams labot atbildi, ja dalībniekam šķiet, ka pieļauta kļūda.

CRT Samsung monitora frekvence ir 75 Hz. Šis tehniskais parametrs ir tas, kas nosaka mūsu gadījumā mazāko pieejamo stimula rādīšanas laiku – 13,33 ms.

2.1.4. Eksperimenta gaita

Eksperimenta sākumā dalībniekiem tika doti mutiski norādījumi par eksperimenta gaitu un mērķi. Eksperimenta laikā dalībnieks skatās ar abām acīm ar vai bez brillēm, atkarībā no redzes asuma. Pirms īstā eksperimenta uzsākšanas, dalībniekam tiek atļauts izmēģināt datorprogrammu, lai saprastu kā viss notiek, lai uztvertu un ieraudzītu stimulus, kā arī patrenētos attiecīgi reaģēt un nospiež nepieciešamo taustiņu.

Kad dalībnieks ir pilnībā sapratis eksperimenta gaitu, var sākties īstais eksperiments, kura dati izmantoti rezultātu apstrādei. Dalībnieks ir apsēdies ērti un nepieciešamajā attālumā (60-70cm). Tā kā katram dalībniekam eksperiments jāpilda 10 reizes, eksperiments tiek veikts vairākos posmos. Pirmajā reizē eksperiments tiek pildīts tikai vienu reizi, nākamie tiek pildīti ar dažādiem starplaikiem, ar minimāli pieļaujamo starplaiku 30 minūtes.

2.1.5. Rezultāti un to analīze

Psihometrisko līkņu dati [78] tika aprakstīti ar Bolcmaņa sigmoidas funkciju (skatīt 11.vienādojumu), kur kā fiksētās vērtības izvēlētas sākuma vērtība 0,5 un beigu vērtība 1, jo iespēja uzminēt pareizo atbildi ir 50% un maksimālais iespējamais pareizo atbilžu skaits ir 100%. Ir pieņemts psihometriskās funkcijas 75 % uzskatīt par atpazīšanas sliekšni:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2, \quad (11)$$

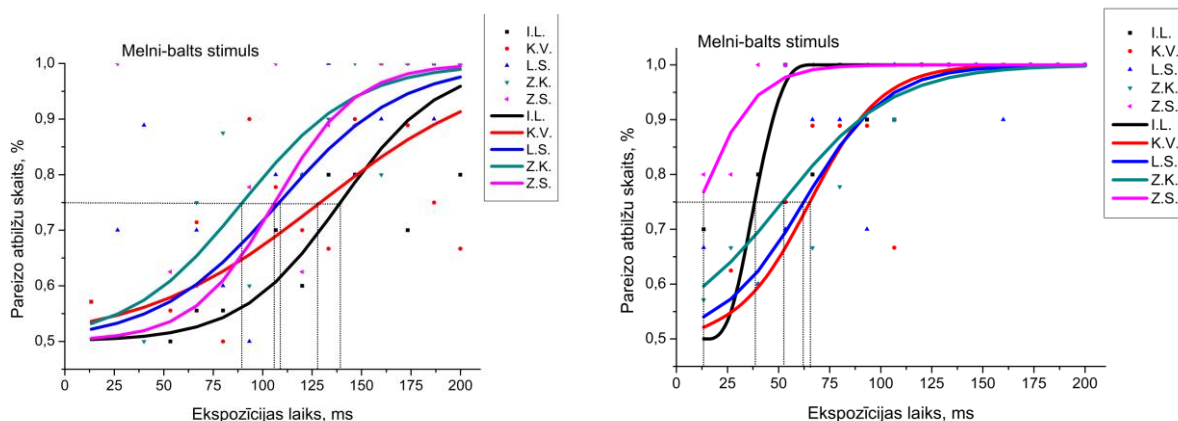
kur A_1 – minimālā vērtība, A_2 – maksimālā vērtība, x_0 – funkcijas centrālais punkts, dx – līknes slīpums.

Datu analīzē netiks iekļautas 2 dalībnieku (K.M. un M.F.) atsevišķu pildīšanas reižu dati, jo tie nesasniedz sliekšni ar 75% pareizajām atbildēm pat pie maksimālā ekspozīcijas laika, un šie dati būtiski atšķiras no pārējo šīs grupas dalībnieku datiem.

2.1.5.1. Ekspozīcijas laiki, pie kuriem tiek sasniegts sliekšnis pirmajā eksperimenta veikšanas reizē

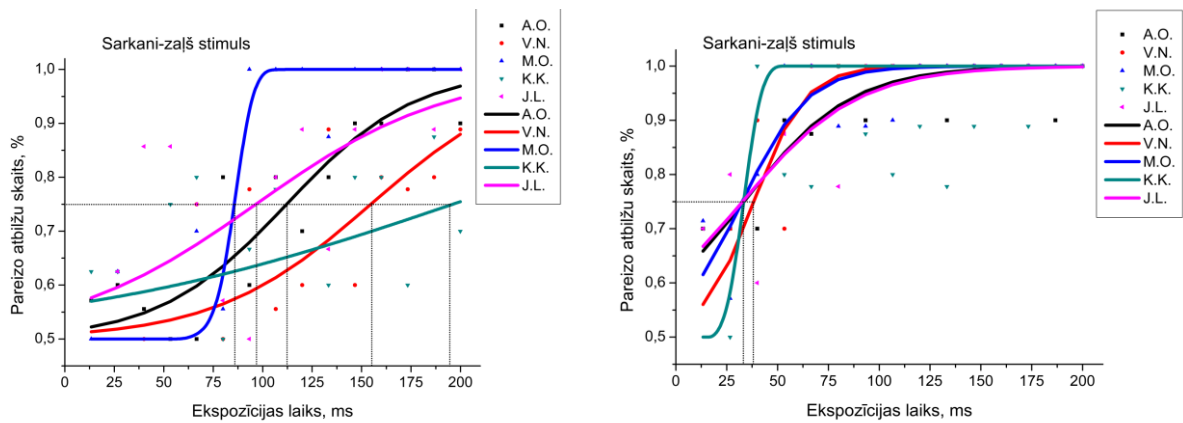
Lai analizētu un salīdzinātu ekspozīcijas laikus, pie kuriem tiek sasniegts sliekšnis pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē, katras grupas ietvaros, tika izveidoti 3 grafiki, attiecīgi katrai dalībnieku grupai. Šie grafiki, kas attēlo katras grupas visu dalībnieku pareizo atbilžu attiecību ir redzami 2.3., 2.4., 2.5. attēlā. Tajos var novērot, ka katras grupas ietvaros pastāv atšķirības starp dažādiem dalībniekiem, t.i., sliekšnis 75% tiek sasniegts pie atšķirīgiem stimulu ekspozīcijas laikiem.

Analizējot psihometriskās līknes, dalībniekiem pie melni-baltā stimula redzams, ka dalībnieks Z.K. 75% sliekšni sasniedz pie 89,42 ms stimula ekspozīcijas laika, turpretī citiem, lai sasniegtu šo sliekšni vajadzīgs lielāks ekspozīcijas laiks (I.L. 139,27ms; K.V. 127,77ms; L.S. 108,91ms; Z.S. 105,83ms). Ekspozīcijas laika intervāls, pie kura tiek sasniegts sliekšnis pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē ir 49,84 ms (skatīt 2.3. attēlu). Šīs atšķirības varētu būt skaidrojamas ar dalībnieku individuālajām īpašībām, kas ietver redzes asumu, koncentrēšanās spējas u.c. Vidējais laiks pie kursa, tiek sasniegts sliekšnis pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē ir 114,24ms.



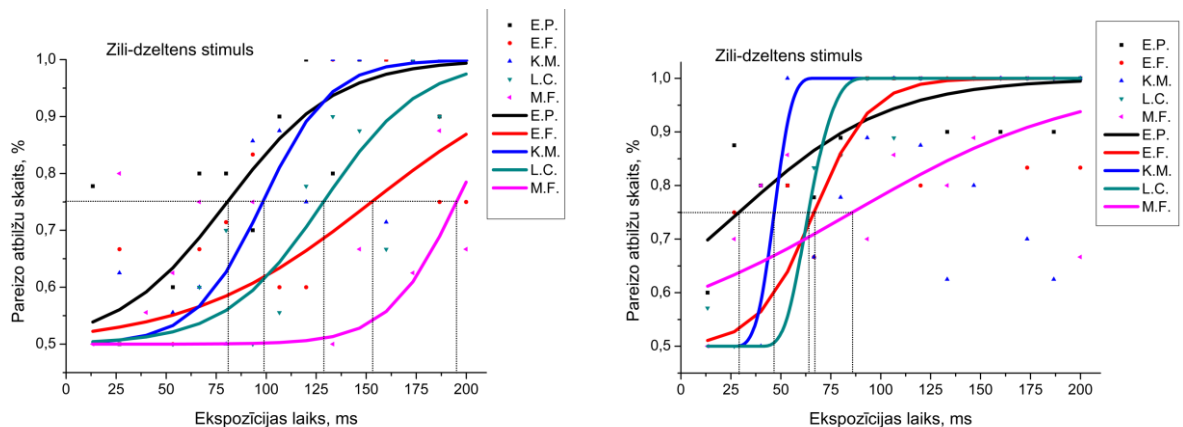
2.3.att. Psihometriskā līkne, pirmajai eksperimenta pildīšanas reizei, dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar melni-balto stimulu

Analizējot psihometriskās līknes, dalībniekiem pie sarkani-zaļa stimula, redzams, ka laiki, pie kuriem dalībnieki sasniedz sliekšni 75% pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē, ir krasi atšķirīgi pat vienas grupas ietvaros, salīdzinot ar grupu, kas pildīja eksperimentu ar melni-balto stimulu. Dalībnieki sliekšni sasniedz pie ekspozīcijas laika robežās no 85,91ms līdz 194,55ms (M.O. 85,91ms; J.L. 96,88ms; A.O. 112,33ms; V.N. 155,15ms; K.K. 194,55ms). Ekspozīcijas laika intervāls, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, ir 108,64ms (skatīt 2.4. attēlu), kas ir vairāk kā divas reizes lielāks laika intervāls, salīdzinot ar melni-balto stimulu grupu. Vidējais stimulu radīšanas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis pie sarkani-zaļa stimula, ir 128,97ms, kas ir par 14,73 ms lielāks kā pie melni-balta stimula. To var skaidrot ar faktu, ka sarkani-zaļā stimula kontrasts ir mazāks, līdz ar to tas ir grūtāk pamanāms. Protams, tāpat kā iepriekš, jāņem vērā arī individuālās atšķirības.



2.4.att. Psihometriskā līkne, pirmajai eksperimenta pildīšanas reizei, dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar sarkani-zaļo stimulu

Psihometriskās līknes dalībniekiem pie zili-dzeltena stimula, redzams, ka ekspozīcijas laika intervāls, pie kura tiek sasniegts sliekšnis 75% ir 114,08ms, kas ir par 5,44ms lielāks kā sarkani-zaļajam stimulam (E.P. 81,75ms; K.M. 98,90ms, L.C. 129,25ms; E.F. 153,45ms; M.F. 195,15ms). Skatīt 2.5. attēlu. Vidējais stimulu radīšanas laiks, pie kura, tiek sasniegts sliekšnis pie zili-dzeltenā stimula, ir 131,41ms, kas ir par 2,44ms lielāks kā pie sarkani-zaļa stimula un par 17,16ms lielāks kā pie melni-balta stimula. Atšķirība starp sarkani-zaļo stimulu un zili-dzelteno stimulu skaidrojama ar stimulu ar kontrasta atšķirībām, kas, salīdzinot ar melni-baltā stimula kontrastu, ir nelielas.



2.5.att. Psihometriskā līkne, pirmajai eksperimenta pildīšanas reizei, dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar zili-dzelteno stimulu

No šī secinām, ka kļūdu lielumu atkarībā no stimulu radīšanas laika, pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē ietekmē stimulu kontrasts. Samazinoties kontrastam, ekspozīcijas laika intervāls, pie kura tiek sasniegts sliekšnis 75%, kļūst lielāks. Ekspozīcijas laiku, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, iespējams ietekmē arī individuālās atšķirības.

2.1.5.2. Uzlabojumi, salīdzinot pirmo un pēdējo eksperimenta pildīšanas reizi

Analizējot psihometriskās līknes, kas iegūtas no datiem pēdējās eksperimenta veikšanas reizē, un salīdzinot tās ar līknēm, kas iegūtas no sākotnējām eksperimenta veikšanas reizēm, vērojams acīmredzams uzlabojums pareizo atbilžu skaitā pie maziem stimulu ekspozīcijas

laikiem. 75% pareizo atbilžu sliekšnis pietuvojas y asij, un dalībnieks ir spējīgs sasniegt šo sliekšni pat pie mazākiem ekspozīcijas laikiem nekā pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē.

Skatoties uzlabojumus pie melni-baltā stimula, redzams, ka, tāpat kā pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē, pastāv atšķirības stimulu ekspozīcijas laikos, pie kuriem katrs dalībnieks sasniedz sliekšni. Laika intervāls, kurā šis sliekšnis tiek sasniegts ir 52,22ms (Z.S. 13,33ms; I.L. 38,61ms; Z.K. 52,57ms; L.S. 62,04ms; K.V. 65,55ms). Skatīt 2.6. attēlu. Vidējais ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis ir 46,42ms. Salīdzinot to ar vidējo ekspozīcijas laiku sliekšņa sasniegšanai pirmajā eksperimenta pildīšanas reizē, stimulu ekspozīcijas laiks, 75% sliekšņa sasniegšanai, ir samazinājies par 67,82ms.

Individuālie uzlabojumi katram dalībniekam ir atšķirīgi. Tie ir robežās no 36,86ms līdz pat 100,66ms. Pie melni-baltā stimula vislielākais uzlabojums ir dalībniekam I.L., kur ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, ir samazinājies par 100,66ms. Vismazākais uzlabojums ir dalībniekam Z.K., kur ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, ir samazinājies par 36,86ms. Attiecīgi pārējiem dalībniekiem uzlabojums ir: Z.S.-92,50ms; K.V.-62,22ms; L.S.-46,86ms.

Pētot psihometriskās līknes dalībnieku grupai, kas pildīja eksperimentu ar sarkani-zaļo stimulu, redzams, ka pēdējā eksperimenta pildīšanas reizē, ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, dažādiem dalībniekiem atšķiras minimāli (skatīt 2.6. attēlu). To var redzēt skatoties uz laika intervālu, kurā šis sliekšnis tiek sasniegts, tas ir tikai 4,91ms (V.N. 38,09ms; A.O., M.O., K.K. un J.L. 33,17ms). Vidējais ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis ir 34,15ms, kas ir par 12,27ms mazāks kā dalībniekiem pie melni-baltā stimula. Salīdzinot to ar pirmo eksperimenta pildīšanas reizi, stimulu ekspozīcijas laiks, 75% sliekšņa sasniegšanai, ir samazinājies par 94,81ms. Tātad uzlabojums ir lielāks kā pie melni-balta stimula.

Neatkarīgi no tā, ka pēdējā eksperimenta pildīšanas reizē ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis, ir minimāli atšķirīgs, uzlabojumu lielums dažādiem dalībniekiem atšķiras. Pie sarkani-zaļā stimula vislielākais uzlabojums ir dalībniekam K.K., kur ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegta sliekšņa vērtība 75%, ir samazinājies par 161,38ms. Turpretī vismazākais uzlabojums ir dalībniekam M.O., kur ekspozīcijas laiks sliekšņa sasniegšanai ir 52,74ms. Pārējiem dalībniekiem uzlabojums attiecīgi ir: V.N.-117,07ms; A.O.-79,16ms; J.L.-63,71ms.

Analizējot psihometriskās līknes zili-dzeltenā stimula dalībnieku grupā (2.6. attēls), novērojamas līdzības ar melni-baltā stimula dalībnieku grupu. Arī pie šī stimula pastāv atšķirības stimulu ekspozīcijas laikos, pie kuriem katrs dalībnieks sasniedz sliekšni. Ekspozīcijas laika intervāls, kurā tiek sasniegts šis sliekšnis, ir līdzīgs intervālam pie melni-baltā stimula. Intervāls pie zili-dzeltenā stimula ir 56,78ms (E.P. 29,13ms; K.M. 46,60ms; L.C. 64,06; E.F. 67,05; M.F. 85,91ms), no melni-baltā tas atšķiras tikai par 4,56ms. Turpretī no sarkani-zaļā par 51,87ms. Vidējais ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegts sliekšnis ir 58,55ms, kas ir par 12,13ms lielāks kā pie melni-balta stimula un par 24,40ms lielāks kā pie sarkani zaļa stimula. Salīdzinot ar pirmo eksperimenta pildīšanas reizi, stimulu ekspozīcijas laiks, 75% sliekšņa sasniegšanai, ir samazinājies par 72,85ms.

Skatoties individuālos uzlabojumus, novēro, ka vislielākais uzlabojums ir dalībniekam M.F., kur ekspozīcijas laiks, pie kura tiek sasniegta sliekšņa vērtība, ir samazinājies par 109,17ms. Vismazākais uzlabojums šai grupā ir dalībniekam E.P., kur ekspozīcijas laiks ir samazinājies par 51,86 ms. Pārējiem dalībniekiem attiecīgi: K.M.-52,30ms; L.C.-64,76ms; E.F.-86,18ms.

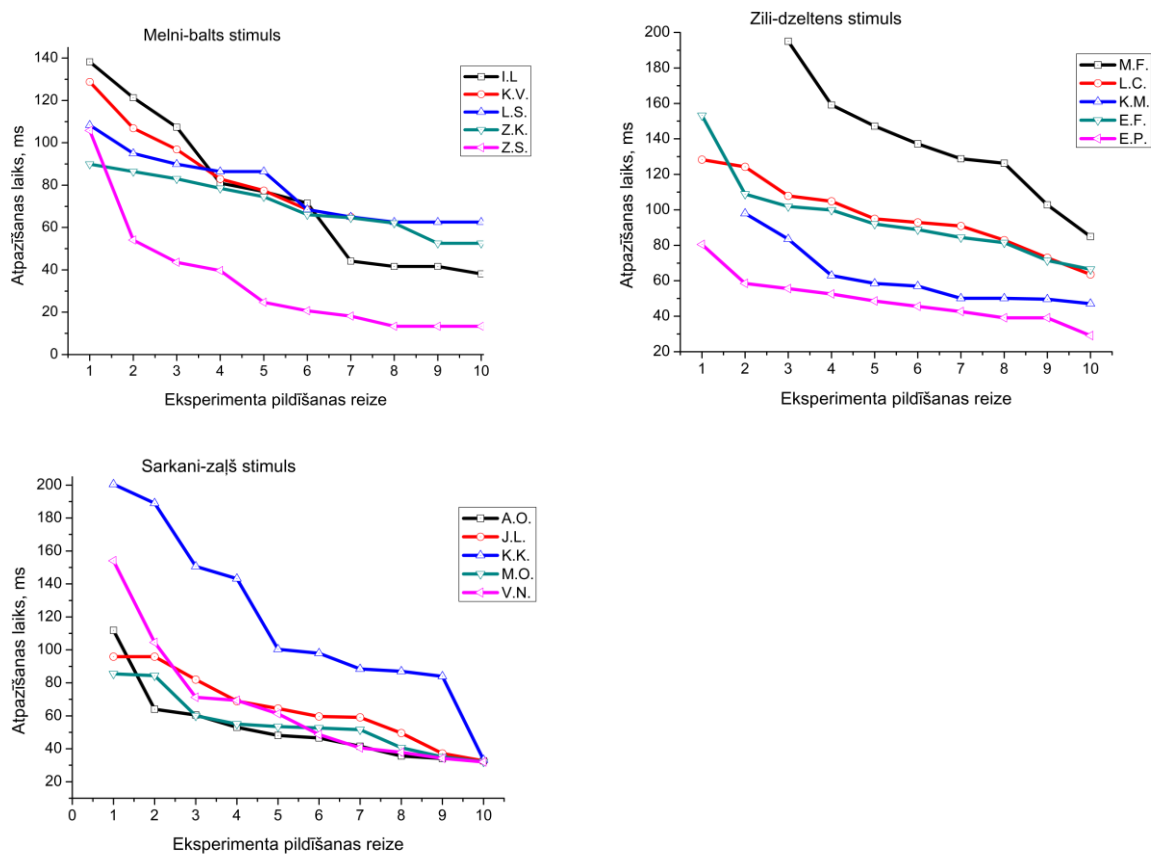
No šī secinām, ka uzlabojumu lielumi atšķiras dalībnieku grupām ar dažādu krāsu un kontrastu stimuliem. Vislielākais uzlabojums ir dalībnieku grupai, kas pildīja eksperimentu ar sarkani-zaļo stimulu, vismazākais dalībnieku grupai ar melni-balto stimulu. Tā kā melni-baltā

stimula kontrasts ir vislielākais (94,6%), un attiecīgi sarkani-zaļā stimula kontrasts ir vismazākais (47,1%), var secināt, ka uzlabojuma lielums pieaug samazinoties stimula kontrastam. Tas varētu būt skaidrojams ar uzdevuma grūtības pakāpes palielināšanos, samazinoties kontrastam. Šādas subjektīvās sajūtas par uzdevuma grūtību pauž arī eksperimenta dalībnieki, ieraugot, piemēram, cita dalībnieka eksperimentu ar melni-baltajiem stimuliem. No datiem iegūstam, ka uzlabojums ir lielāks pie sarkani-zaļa stimula (maza kontrasta stimul) un mazāks pie melni-balta stimula (augsta kontrasta stimula). Noskaidrošanas vērts ir fakts, vai uzlabojuma lielums atkarīgs no stimulu krāsas vai no kontrasta vai no abiem faktoriem. Tā kā mūsu eksperimentā mainoties krāsai, mainās arī kontrasts, mēs nevaram droši apgalvot, ka tieši kontrasts vai krāsa ietekmē uzlabojuma lielumu. Individuālā uzlabojuma lieluma variācijas, salīdzinot visas 3 grupas ir robežās no 36,86ms līdz 161,38ms, tas ir diezgan plašā laika intervālā.

2.1.5.3. Atpazīšanas sliekšņa izmaiņas atkarībā no eksperimenta pildīšanas reizes

Attēlā 2.6. ir attēlotas sliekšņa izmaiņas atkarībā no eksperimenta pildīšanas reizes, vērtējot pēc ekspozīcijas laika izmaiņām, pie kura tiek sasniegts 75% sliekšnis. Katrs punkts grafikā parāda konkrēto ekspozīcijas laika vērtību, kas nepieciešama, lai sasniegtu sliekšni, attiecīgajā pildīšanas reizē. Tas nepieciešams, lai novērotu cik izteiktas ir šīs sliekšņa izmaiņas un mācīšanās efekts pie dažādu krāsu, kontrastu stimuliem.

Pie melni-balta stimula mācīšanās efekts sākotnējās eksperimenta pildīšanas reizēs ir lielāks un straujāks salīdzinot ar pēdējām eksperimenta pildīšanas reizēm. Tas redzams grafikā pie 7,8,9,10 eksperimenta pildīšanas reizes, kad vērojams, ka grafiks ir taisne, ar minimālām, sliekšņa sasniegšanai nepieciešamām, ekspozīcijas laika izmaiņām. No tā secinām, ka mācīšanās procesam ir ierobežojumi, un pie noteiktas eksperimenta pildīšanas reizes katrs dalībnieks sasniedz mācīšanās gala vērtību.



2.6.att. Sliekšņa izmaiņas atkarībā no eksperimenta pildīšanas reizes melni-baltajam stimulam, skatoties pēc ekspozīcijas laika izmaiņām, pie kura tiek sasniegts 75% sliekšnis

Dalībnieku grupai, kas eksperimentu pildīja ar zili-dzelteno stimulu, vērojamas līdzīgas izmaiņas (attēls 2.6.). Tāpat kā pie melni-balta stimula, sākotnēji mācīšanās efekts jeb ekspozīcijas laika izmaiņas sliekšņa sasniegšanai ir lielākas. Atšķirībā no melni-baltā stimula, zili-dzeltenajam stimulam, pēdējām eksperimenta pildīšanas reizēm vēl novērojama ekspozīcijas laika, kas nepieciešamas sliekšņa sasniegšanai, izteiktāka samazināšanās. Tas varētu liecināt par to, ka ar 10 eksperimenta pildīšanas reizēm nepietiek, lai sasniegtu galējo vērtību, pie kuras laiks, lai sasniegtu sliekšni, kļūst nemainīgs.

Analizējot līknes, kas iegūtas no dalībniekiem, kuri pildīja eksperimentu ar sarkani-zaļo stimulu, tāpat kā pie pārējiem stimuliem, sākumā novēro lielākas ekspozīcijas laikus, kas nepieciešami, lai sasniegtu sliekšni, izmaiņas (attēls 2.6.). Līdzīgi kā pie zili-dzeltenā stimula, laiki pēdējās eksperimenta pildīšanas reizēs nesasniedz nemainīgu vērtību. Kaut arī atšķirībā no datiem, kas iegūti pie citas krāsas stimuliem, pie sarkani-zaļā stimula vērojams, ka visiem dalībniekiem, neatkarīgi no mācīšanās efekta lieluma, pēdējā eksperimenta pildīšanas reizē nepieciešams vienāds ekspozīcijas laiks, lai sasniegtu sliekšņa vērtību. Arī šajā gadījumā var secināt, ka nepieciešamas vēl papildus eksperimenta pildīšanas reizes, lai sasniegtu mācīšanās efekta gala vērtību.

Salīdzinot visu dalībnieku sliekšņu izmaiņas atkarībā no eksperimenta pildīšanas reizes, vērojams, ka sākotnējās pildīšanas reizēs sliekšņa izmaiņas ir lielākas, salīdzinot ar pēdējām eksperimenta pildīšanas reizēm. Tas pats novērots arī *A.Karni* un *D.Sagi* pētījumā [79]. Novērtējot mācīšanās efektu, tāpat kā uzlabojuma lielumu analizē, tiek secināts, ka tas atšķiras dažādiem dalībniekiem (skatīt 2.6.attēlu). No iepriekš apskatītajiem datiem, varam secināt, ka ar

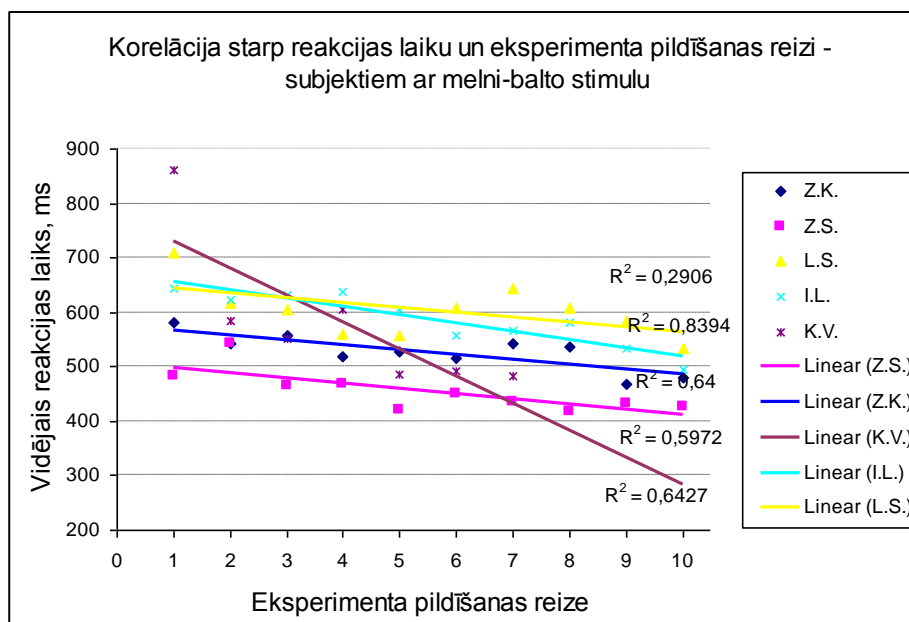
10 eksperimenta pildīšanas reizēm nepietiek, lai sasniegtu nemainīgu ekspozīcijas laika vērtību, pie kuras tiek sasniegta sliekšņa vērtība, un turpmāks uzlabojums novērots netiek. Vistuvāk ekspozīcijas laika nemainīgas vērtības sasniegšanai, pildot eksperimentu tikai 10 reizes, ir dalībnieku grupa, kas pildīja eksperimentu ar melni-balto stimulu. Tas ļauj domāt, ka šajā dalībnieku grupā papildus vajadzīgais eksperimentu skaits būtu vismazākais.

2.1.5.4. Reakcijas laika atkarība no eksperimenta pildīšanas reizes

Ir konstatējami reakcijas laika uzlabojumi atkarībā no pildīšanas reizes (skatīt 2.7., 2.8., 2.9. attēlus). To apstiprina arī korelācijas analīze, kas parāda, ka 7 dalībniekiem ir cieša korelācija, 7 dalībniekiem vidēji cieša un tikai vienam (M.F.) dalībniekam ir vāja korelācija starp reakcijas laiku un eksperimenta pildīšanas reizi. Analizējot pa stimulu krāsu grupām redzam, ka pie melni-baltā stimula vidēji cieša korelācija ir 3 dalībniekiem (L.S., Z.S., Z.K.), cieša 2 dalībniekiem (I.L., K.V.), pie sarkani-zaļā stimula cieša 3 dalībniekiem (J.L., K.K., V.N.), vidēji cieša 2 (M.O., A.O.) un pie zili-dzeltenā cieša 2 dalībniekiem (K.M., E.F.), vidēji cieša 2 (E.P., L.C.) un vāja 1 dalībniekam. Determinācijas koeficients R^2 2.7., 2.8., 2.9. attēlā parāda (23), ka pie melni-baltā stimula ticamība ir robežās no 29% līdz 83,9% (t.i., tik lielu daļu no reakcijas laika izmaiņām var izskaidrot ar lineāro korelāciju), pie zili-dzeltenā robežās no 0,0003% līdz 88,5%, pie sarkani-zaļā robežās no 53,7% līdz 84,4%. Salīdzinoši plašo ticamības amplitūdu pie zili-dzeltenā stimula var skaidrot ar šai dalībnieku grupā esošo vājo korelāciju dalībniekam M.F.

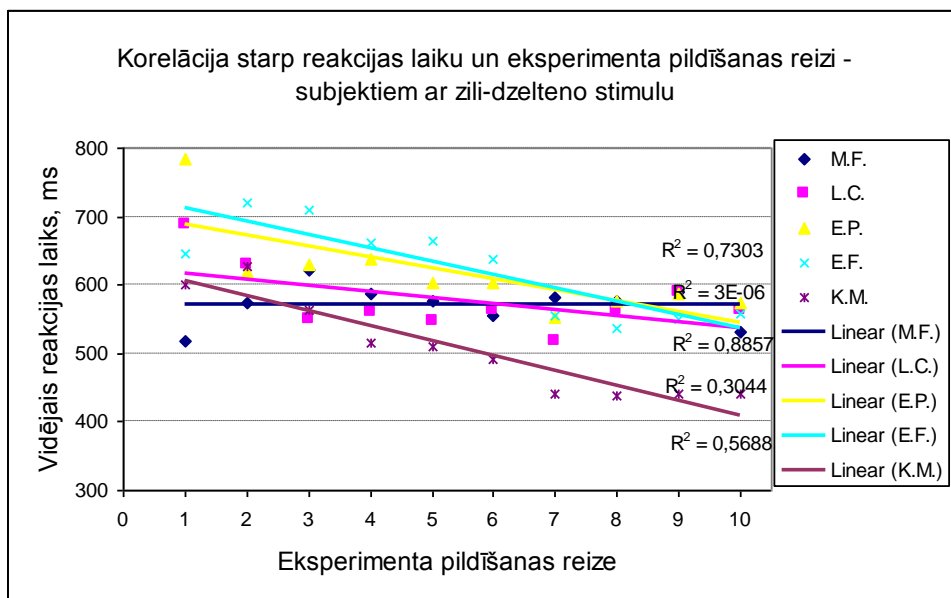
Veicot ANOVA testu, lai pārbaudītu korelācijas koeficienta būtiskumu, tika iegūts, ka ar varbūtību 97,5% varam apgalvot - visiem dalībniekiem starp reakcijas laiku un eksperimenta pildīšanas reizi pastāv negatīva lineāra sakarība.

Analizējot reakcijas laika kvantitatīvās izmaiņas atkarībā no eksperimenta pildīšanas reizes pie melni-balta stimula, vērojamas reakcijas laika samazināšanās robežās no 79,45ms (dalībniekam Z.K.) līdz 296,18ms (dalībniekam K.V.). Pārējiem dalībniekiem reakcijas laika izmaiņas attiecīgi par: L.S. - 79,73ms; Z.S. - 87,59ms; I.L. - 135,32ms. Vidējais reakcijas laika uzlabojums pie melni-balta stimula, salīdzinot pirmo un pēdējo eksperimenta pildīšanas reizi, ir 135,65ms. Tas nozīmē, ka treniņa rezultātā dalībnieki iemācās ātrāk reaģēt.



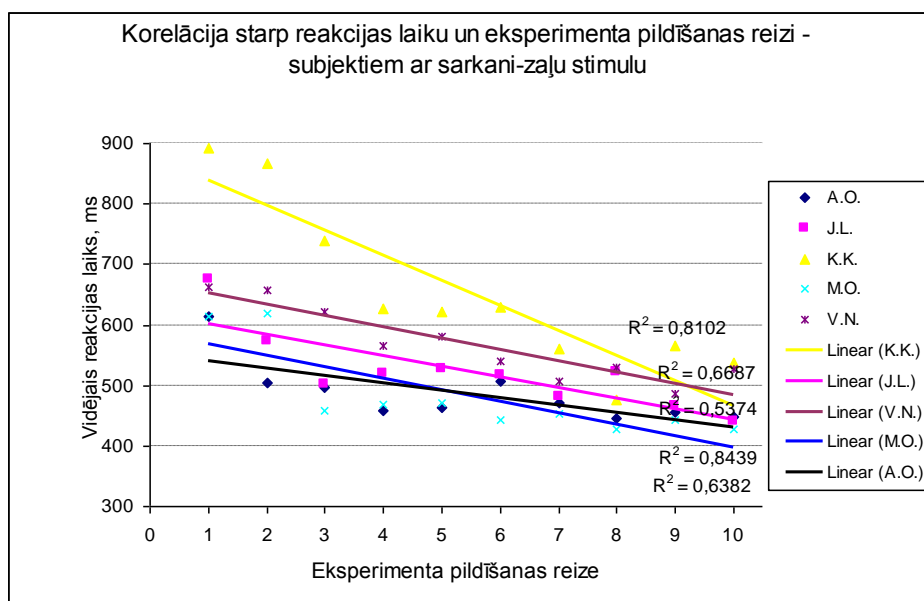
2.7.att. Reakcijas laika atkarība no eksperimenta pildīšanas reizes

Skatoties reakcijas laika izmaiņas pie zili dzeltena stimula, tāpat kā pie melni-baltā vērojama reakcijas laiku samazināšanās. Atšķirībā no melni-baltā stimula dalībnieku grupas, šeit novēro, ka vienam dalībniekam (M.F.) uzlabojumu nav. Atceramies, ka arī korelācijas analizē, šim dalībniekam korelācija starp reakcijas laiku un eksperimenta pildīšanas reizi bija vāja. Pārējiem uzlabojums ir robežās no 79,79ms (dalībniekam L.C.) līdz 196,72ms (K.M.). Attiecīgi dalībniekiem E.P. un E.F. uzlabojums ir par 149,94ms un 167ms. Vidējās reakcijas laika izmaiņas ir par 148,36ms, kas ir lielākas izmaiņas nekā dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar melni-baltu stimulu.



2.8.att. Reakcijas laika atkarība no eksperimenta pildīšanas reizes

Dalībnieku grupai, kas pildīja eksperimentu ar zili-dzeltenu stimulu, reakcijas laika izmaiņas, analizējot pirmās un pēdējās eksperimenta pildīšanas reizes datus, ir vislielākās. Reakcijas laika izmaiņas ir robežās no 108,82ms (dalībniekam A.O.) līdz 370,92ms (dalībniekam K.K). Dalībniekam J.L. izmaiņas ir par 160,7ms, dalībniekam M.O. par 173,83ms, dalībniekam V.N. par 316,98ms. Vidējais uzlabojums ir par 226 ms.



2.9.att. Reakcijas laika atkarība no eksperimenta pildīšanas reizes

Reakcijas laika uzlabojumi notikuši visiem dalībniekiem, izņemot vienu. Salīdzinot reakcijas laika izmaiņas visās trīs dalībnieku grupās, var secināt, ka vislielākā vidējā reakcijas laika izmaiņa ir dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar sarkani-zaļo stimulu, kuram kontrasts ir vismazākais. Vismazāk reakcijas laiks mainījies dalībniekiem, kas pildīja eksperimentu ar melni-balto stimulu. Tas varētu būt skaidrojams ar uzdevuma grūtības pakāpi, jo iespējams sākumā, lai pamanītu un reaģētu uz mazāka kontrasta stimuliem, vajadzīgs ilgāks laiks. Šie dati un secinājumi lieliski sasaucas ar uzlabojumu pareizo atbilžu skaitā pie mazākiem ekspozīcijas laikiem, jo arī tur vērojams lielākas izmaiņas tieši pie sarkani-zaļa stimula, kuram kontrasts ir vismazākais.

2.1.6. Diskusija

Reakcijas laika uzlabojuma individuālās atšķirības var tikt skaidrotas ar faktoriem, kas ietekmē reakcijas laiku. Tie ir psihiskie faktori, kas ietver sevī uzmanību, motivāciju, emocionālo stāvokli, intelektu un atmiņu, un organiskie faktori, kas ietver nogurumu, dažādu ķīmisko vielu ietekmi (kafija, tabaka), diennakts ritmus, kā arī laika apstākļus. Koncentrēta uzmanība un možums samazina reakcijas laiku, savukārt to trūkuma rezultātā reakcijas laiks ir lielāks. Kā tika novērots eksperimenta gaitā, ja dalībnieks nav motivēts un ieinteresēts eksperimenta uzdevumā, tad tas noved pie lielāka kļūdu skaita un lēnākas reaģēšanas, kas izpaužas kā eksperimenta datu nederīgums analīzes veikšanai. Jāņem vērā, ka arī diennakts laikā novērojamas sarežģītas reakcijas laika svārstības un gan fizisks, gan garīgs nogurums, kā arī pazemināts atmosfēras spiediens būtiski pagarina reakcijas laiku. Tā kā mūsu eksperiments nav vērsts uz reakcijas laika ietekmējošu faktoru analīzi un ietekmes lieluma noteikšanu, šis ir tikai iespējama minējums par to, kas varētu izraisīt novērotās individuālās atšķirības reakcijas laiku uzlabojumos.

2.2. KONTEKSTA IESPAIDS TEKSTŪRU UZTVĒRI

Lai noskaidrot iespējamo konteksta informācija iespaidu uz orientēto tekstūru uztveri, tika veikti pētījumi ar kolineāri un ortogonāli orientētiem Gabora stimuliem perifērijā, ar uzdevumu atšķirt diagonāli orientētu virsmu redzes lauka centrālajā daļā.

2.2.1. Dalībnieki

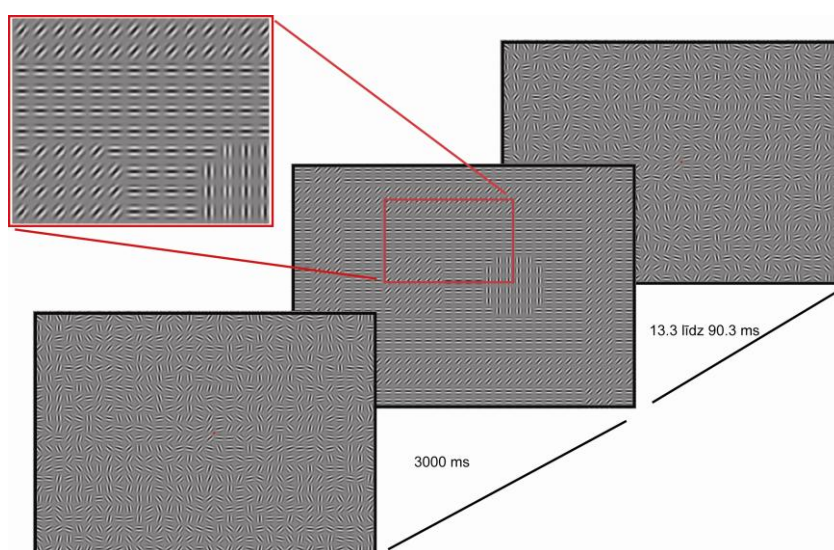
Trīs personas ar iepriekšēju tekstūru atpazīšanas pieredzi piedalījās eksperimentā. Ne vienai no personām nebija vajadzības lietot optisko korekciju. Dalībnieku vidējais vecums 26 +/- 1 gadi.

2.2.2 Stimuli un metode

Mērījumi veikti izmantojot divu izvēļu piespiedu psihofizikālo metodi (2AFC) metodi, ar testa uzdevumu identificēt stimula izvietojumu pa kreisi vai pa labi no fiksācijas punkta. Redzes stimuluss sastāv no divām orientētām apaļām virsmām, kas veidotas no Gabora režģiem (2.10. attēls). Vienas stimula detaļas izmērs ir 0.46 grādi un tā iekļauj 1.5 sinusoīdas funkcijas ciklus.

Katrs testa objekts tika prezentēts 2.76 redzes leņķa grādos. Eksperiments veidots līdzīgi kā iepriekšējā sadaļā 2.1., ar fiksētu kontrastu un dažādiem īsiem radīšanas laikiem. Pateicoties tam, ka visi pētījuma dalībnieki ir pieredzējuši līdzīgu testu pildīšanā tika izvēlēts īsāks stimulu radīšanas diapazons no 13.3 līdz 90.3 ms. Katra stimulu radīšanas sērija sekoja pēc 3000 ms ilgas pauzes ar randomizētu, no Gabora režģiem haotiski veidotu struktūru, kas kalpoja kā maska. Testa radīšanas laikā perifērijā pa ekrāna perimetru tika izvietoti kolonēri vai ortogonāli orientēti Gabora stimuli. Psihometriskā funkcija tika noteikta trīs apkārtnes gadījumos: bez kontekstuālas informācija un arī pie diviem konteksta variantiem: kolonēra un ortogonālā.

Eksperimenta dalībnieku uzdevums ir noteikt diagonāli orientētas virsmas atrašanas virzienu un pieteikt savu izvēli ar pogas nospiešanu uz pults. Stimuli katram laikam tika rādīti 10 reizes, kas kopā ar 7 atkātojumiem sastāda 70 mērījumus vienai stimulu kompozīcijai (piemēram, ar kolonēri orientētu perifēro stimulu). Katra no pētāmajam personām veica mērījums 6 reizes pie katras stimulu kompozīcijas, kopā izpildot 9 mērījumu sērijas.



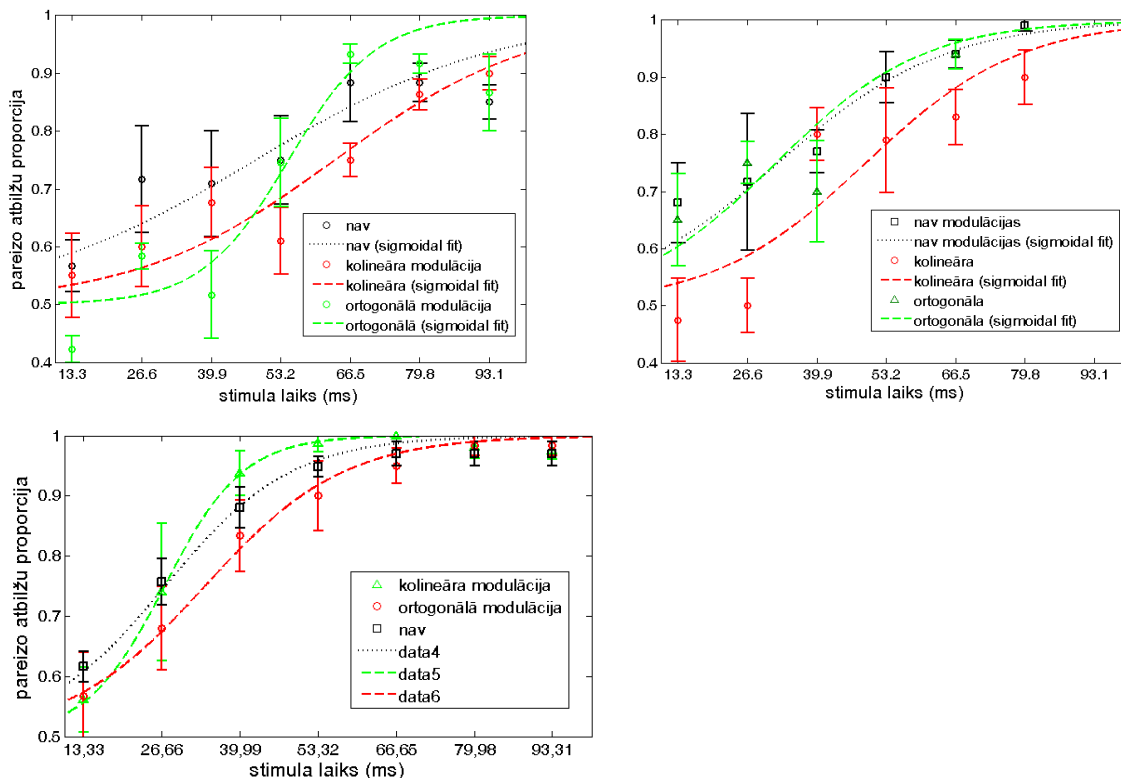
Attēls 2.10. Eksperimenta apraksts. Pēc 3000ms ilgas maskas, seko testa stimuls ar diagonālu un vertikāliem elementiem, no kuriem jāizvēlas diagonālā objekta atrašanas vieta. Diagonālais objekts var būt pagriezts pa 45 vai pa 135 grādiem.

Mērījumi veikti izmantojot *CRS VISAGE* stimulu ģeneratoru un *Samsung CRT* monitoru ar 75 Hz atjaunošanas frekvenci. Fona spožums, ap kuru mainās Gabora režģi tika uzstādīts uz 77 cd/m^2 . Noteikta Maikelsona kontrasta vērtība Gabora režģiem ir $C_m = 94\%$. Spožuma vērtības izmērītas ar kolorimetru *KONICA MINOLTA CS-100A*.

2.2.3. Rezultāti

Iepriekš veiktais pētījums (2.1.)parādīja, kā mainās cilvēku atbildes veicot atkārtoti tekstūru atpazīšanas uzdevumu. Šajā pētījumā tika iesaistīti jau pieredzējuši cilvēki, kam tika mērītas izmaiņas pareizo atbilžu skaitā veicot mērījumus ar vienādi vai otrādi orientētu stimulu perifērijā. Eksperimenta dalībniekiem tika aprēķinātas pareizo atbilžu vidējās vērtības visos piegājienos un noteiktās psihometriskās funkcijas tika aproksimētas ar Bolcmaņa funkciju. Dotajā eksperimenta neuzskatījām, kā reakcijas laikam būtu liela nozīme datu analizē.

Attēlā 2.11. ir visu trīs dalībnieku psihometriskās funkcijas piedāvātajiem stimulu variantiem (bez modulācijas, kolineāra un ortogonāla modulācija perifērijā). Kolineāra perifēra stimula gadījumā var novērot pareizo atbilžu samazinājumu pie 53.3 ms un 66.5 ms visiem eksperimenta dalībniekiem. Ortogonālā stimula gadījumā atbildes ir vai nu tādas pašas kā bez konteksta, vai psihometriskās funkcijas pārliekums notiek mazākā laika intervālā (dalībnieks RP).



Attēls. 2.11. Psihometriskās funkcijas eksperimenta dalībniekiem (RP, SF, LZ).

Divu alternatīvu piespiedu metodes gadījumā pareizo atbilžu sliekšnis ir 75 % , pie kura var noteikt laiku aproksimētām Bolcmaņa funkcijām. Rezultāti ir apkopoti tabulā 2. Ortogonālā modulācija augsta kontrasta stimuliem ir maz atšķirīga no gadījuma bez modulācijas. Savukārt, kolineāri orientētai modulācijai ir supresējoša darbība. Atpazīšanas sliekšņa vidējās izmaiņas, starp kolineāro modulāciju un bez modulācijas, no 3 dalībniekiem ir 31 % +/- 7%.

Tabula.2. Sliekšņu vērtības pie dažādas kontekstuālas modulācijas

Modulācija	Dalībnieki		
	R.P.	S.F.	L.Z.
bez	48	30	26.7
ortogonālā (M_o)	54	30	26.7
kolineāra (M_k)	64	53.2	34.5
starpība (M_k -bez)	16	23.2	7.8
starpība %	25%	44%	23%

2.2.4. Diskusija

Eksperimenta mērķis bija noteikt vai redzes informācija perifērijā izmaina centrālā stimula uztveri, atkarībā no demonstrēšanas laika. Tika atrasts, kā kolineāri orientēti stimuli perifērijā samazina pareizo atbilžu skaitu stimuliem centrā, proti, palielina atpazīšanas sliekšni. Bieži vien tas izpildās stimuliem ar ekspozīciju diapazonā no 50 līdz 65 ms. Zināmā mērā līdzīgā supresija tika novērota arī *Polat et al* (1998) [1] pētījumos, kur atšķirībā no mūsu pētījuma, mainīgais parametrs bija stimulu kontrasts. No viņu rezultātiem tika secināts, ka stimulācija ārpus receptīvā lauka var, gan inhibēt, gan uzlabot uztveres dinamiku centrālajā receptīvajā laukā [1].

Mainot stimula demonstrēšanas laiku mēs novērojām supresiju pie 53ms un 65 ms, tad ja maskai perifērijā izmantojām kolineāri orientētas virsmas. Tātad konteksta izraisīta supresija ir saistīta ar kolineāro perifēro stimulāciju. Ortogonālas perifērās stimulācijas gadījumā supresējoša vai pastiprinoša modulācija netika novērota.

2.3. METODES PIELIETOJUMI AMBLIOPIJAS PĒTĪJUMIEM

2.3.1. Ievads

Iepriekš aprakstītas metodes var tikt izmantotas redzes treniņos vai pavājinātu redzes funkciju izpētei. No viena līdz trīs procentiem bērnu, tātad arī pieaugušie cilvēki, cieš no ambliopijas. K.V. Vraitas savos darbos, ambliopiju definē kā “vāju redzi, kuras cēlonis ir anormāla vizuālā attīstība, kā anormālas vizuālās stimulācijas sekas”. Pie tam, likvidējot tikai ambliopijas cēloni (piemēram, ar atbilstošas korekcijas izrakstīšanu), ambliopiju pilnībā novērst nav iespējams [4].

Vecākais un populārākais ambliopija terapijas veids ir tieša, puscaurspīdīga vai pilnīga labāk redzošas acs aizklāšana (oklūzija). Aizklājot labāk redzošo aci panāk vājās acs pastiprinātu trenēšanu, kas ar laiku uzlabo šīs acs parametrus [81].

Pasaulē jau eksistē metodes, kas izmantojot elektroniski vadāmas brilles, ļauj uzstādīt oklūzijas laiku un ilgumu. Piemēram, kompānija *Ophthocare* (www.ophthocare.com) piedāvā šķidro kristālu brilles oklūzijas terapijai. Šķidro kristālu filtri ir iebūvēti optiskajās lēcās un briļļu darbības režīms ir kontrolējams ar programmējamu brillēs iebūvētu mikročipu. *Ophthocare* brilles ļauj mainīt oklūzijas laikus sākot no 5 sekundēm [82].

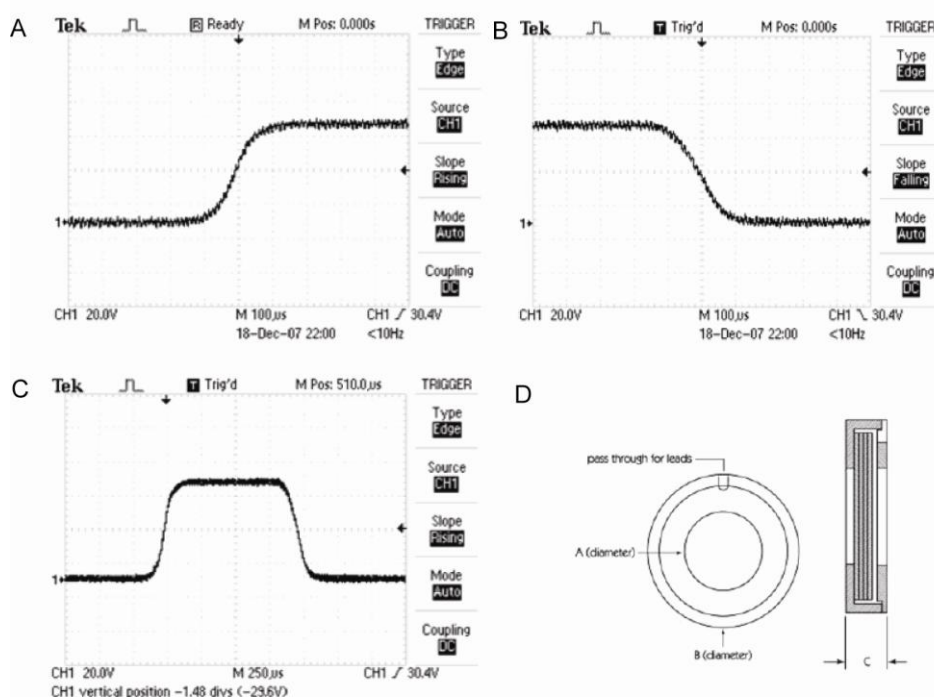
Pierādījumi no dzīvnieku un cilvēku elektrofizioloģiskajiem pētījumiem, dod apstiprinājumu tam, ka tīklene un laterālais ceļgalveida ķermenis (LCK) parāda būtībā normālu fizioloģisko stāvokli arī pie ambliopijas. Pašreiz pieņemtais uzskats ir tāds, ka ambliopijas gadījumā izmaiņas notiek primārās redzes garozas līmenī (V1). Neurofizioloģiskie pētījumi nepārprotami pasaka to, ka ambliopija, šķielēšanas un anizotropijas ambliopijas gadījumā, ir neiroloģiska anomālija [82].

Neatkarīgi no tā kā signāls no abām acīm tiek sasummēts, ir zināms, ka divas acis var ietekmēt viena otru. Vienkāršākais sadarbības piemērs ir zīlītes reakcija uz gaismas spožumu, kas ir redzama abām acīm, ja gaismas tiek raidīta tikai vienā acī. Binokulārā sadarbība izpaužas arī pēcefekta gadījumos, kad radot pēcefektu vienā acī tiek iegūts pēcefekts arī skatoties caur otro acī [83, 84, 85]. Binokulārā summācija ambliopijas gadījumos ir traucēta, bet dažos pētījumos ir noskaidrots kā kontrasta informācijas summācija šķielēšanas ambliopijas gadījumā notiek pietiekošos apmēros [86]. Tās liecina par to, ka kontrasta stimulācija nebūtu piemērots redzes treniņiem dotā tipa ambliopijas gadījumā. Literatūrā bieži tiek minēts uztveres treniņu labvēlīgais iespaids [87].

Mūsu eksperimentos atpazīšanas uzdevumā manipulācijas notiek ar stimula demonstrēšanas laiku fiksētam kontrastam, kas ierosina redzes sistēmas temporālo darbību, un var uzrādīt labākus rezultātus nekā tikai mainīga kontrasta stimuli. Mēs piedāvājam izmantot zināšanas par mijiedarbību primārajā redzes garozā, kombinējot iepriekš izmantojamo īslaicīgas redzes sistēmas stimulācijas metodi kopā ar šķidro kristālu filtriem, lai veicinātu traucēto neirālo ceļu iesaistīšanu redzes procesā.

2.3.2. Pielietota aparatūra un metodes

Izveidotajās brillēs mēs izmantojam *Displaytech* (www.displaytech.com) šķidro kristālu filtrus (ŠKF). Tiem ir, laba spektrālā caurlaidība redzamā spektra diapazonā un arī mūsu mērķiem derīgs dizains.



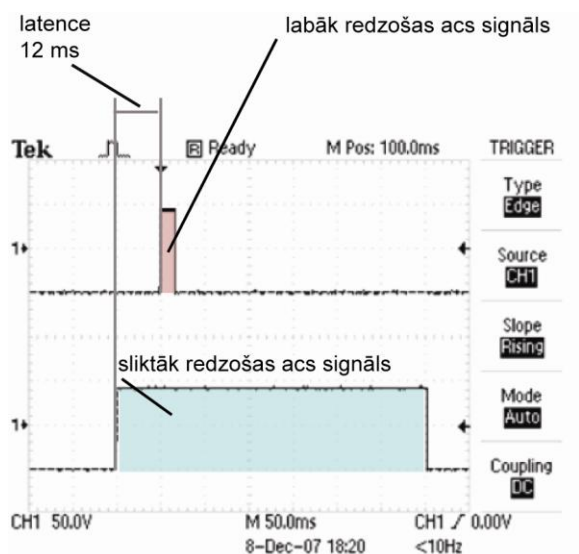
Attēls 2.14. Segnetoelektrisko šķidro kristālu filtru optiskās pārslēgšanas raksturlielumi: kāpuma laiks 200 μs (A); krituma laiks 220 μs (B); viena impulsa garums – 1.25 ms (C). Dati ir iegūti ar Tektronix TDS2024B osciloskopu. D: filtra forma un fiziskie izmēri: A-25.40mm (apertūra); B-37.85mm (diametrs); C-6.90 (biezums) [88].

ŠKF nodrošina maksimālo slēgšanas ātrumu 0.2 ms, kas vairāk kā atbilst mūsu uzdevuma ekspozīcijām, kā arī šīs ierīces ļauj sasniegt modulācijas dziļumu 30 dB (vai 1000:1 kontrasta attiecību) [89]. Divi *Displaytech* filtri tika ielikti briļļu rāmī, lai tās varētu izmantot acīs nonākošas informācijas atdalīšanai.

Mūsu pieeja balstās uz iepriekš aprakstītiem (sadaļas 2.1. un 2.2.) tekstūru atšķiršanas pētījumiem [90]. Tajos tika parādīts kā pildot atšķiršanas uzdevumus, notiek reakcijas laika un atpazīšanas sliekšņa uzlabojums. Ambliopijas gadījumā šāda veida stimulācijai būtu lieliska ietekme, jo izmantotie stimulu laiki atbilst procesiem kas notiek primārajā redzes garozā (līdz 150 ms).

Izejot no zināšanām par acu sadarbību, mēs piedāvājām eksperimenta sākumā veikt īslaicīgu labāk redzošās acs stimulāciju. Signālam ir jābūt mazākam par atpazīšanai nepieciešamo, bet tai pat laikā pietiekoši stipram, lai izraisīt izmaiņas redzes ceļos.

Atšķirībā no tekstūras uzdevumiem šoreiz stimulācija tika samainīta uz *Snellen* "C" burtu, kas arī ietver Atšķirībā no tekstūras uzdevumiem šoreiz stimulācija tika samainīta uz *Snellen* "C" burtu, kas arī ietver orientācijas iespēju. Viena stimula leņķiskais izmērs sasniedz 1.5 grādus aplūkojot to 50 cm attālumā no monitora. Eksperimenta dalībniekam tika prezentēti divi stimuli, no kuriem bija jāatšķir diagonāli pagrieztais. Tika veikti manuāli reakcija laika pieraksti un uzņemtas psihometriskās funkcijas 10 stimula laikiem no 15 līdz 150 ms, mērot katru ierosmes veidu a10 reizes. Sliktāk redzošā acs bija „atvērta” visu eksperimenta laiku, bet labāk redzošā tika „atvērta” katra mērījuma sākumā uz 10, 7.5, 5, 2.5 un 1.25 milisekundēm.



Attēls 2.15. Iekārtas darbības princips. Impulsi izmērīti ar *Tektronix TDS2024B* osciloskopu.

2.3.3. Eksperimenta dalībnieks

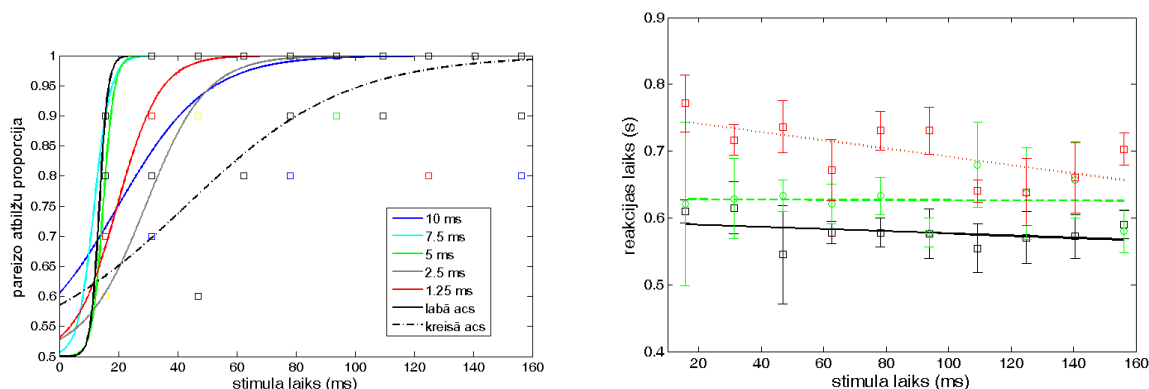
Lai pārbaudīt metodiku un tās efektu tika pieaicināts redzes aprūpes speciālists ar anizotropijas ambliopiju kreisajā acī (vecums 33 gadi). Noskaidrotais redzes asums labajā acī ir 1.0 un kreisajā acī redzes asums sasniedz tikai 0.35 vienības. Eksperimenta dalībnieks ātri saprata uzdevumu un bija motivēts piedalīties eksperimentā. Pēc pirmajiem iepazīšanas eksperimentiem tik saprasts, ka gaisma, kas nāk caur spraugu starp seju un brillēm no kreisās acs puses traucē koncentrēties uzdevumam, ko nācās aizklāt.

2.3.4. Rezultāti

Tika veikti manuāli reakcijas laika pieraksti katram stimula radīšanas laikam. No veiktajiem desmit mērījumiem tika aprēķinātas pareizo atbilžu proporcijas (psihometriskā funkcija). Psihometriskās funkcijas katram signālam ir parādītas attēlā 2.16. (pa kreisi). Melnā raustītā līnija apraksta atbildi, ko dalībnieks sniedz pildot eksperimentu tikai ar kreiso (sliktāk redzošo) aci un melnā pilnā līkne parāda atbildes pildot uzdevumu ar labāk redzošo aci. Vislabākais izpildījums ir novērojams pie palīg impulsiem 7.5 ms un 5 ms. Īsie impulsi (1.25, 2.5 ms) un garākais impulss (10 ms) uzlabo atpazīšanu, bet uzlabojums nesasniedz izpildījumu

līdzīgu, kā labāk redzošai acij. Atpazīšanas sliekšnis, izteikts stimula laikā kreisajai acij ir aptuveni 50 ms, tajā pat laikā labās acs un arī izmantojot 5 un 7 ms garos impulsus atpazīšanas sliekšnis sasniedz vērtību 15 ms.

Novērots uzlabojums arī reakcijas laikos (RL). attēlā 2.16 (pa labi) ir parādītas vidējās RL vērtības trīs gadījumiem: labai acij, kreisai acij un pildot uzdevumu ar 5 ms garu impulsu. Pildot uzdevumu ar labo aci dalībnieka vidējais reakcija laiks ir 580 ms. Izmantojot eksperimenta veikšanai tikai kreiso aci RL mainās no 750 ms ar īsām stimula ekspozīcijām līdz 670 ms ar garākām. Zaļā līnija attēlā 2.16 parāda reakcijas laiku 5 ms garam impulsam. Kaut gan RL nesasniedz rezultātus, ko esam ieguvuši skatoties ar labo aci, ir novērojams ievērojams RL uzlabojums, kas īsiem stimula laikiem ir aptuveni 100 ms, un gariem stimula laikiem ir ap 30 ms (spriežot pēc lineārām regresijas funkcijām).



Attēls 2.16. Psihometriskā funkcija dažādiem impulsiem labāk redzošai acij (pa kreisi). Reakcijas laiks pildot eksperimentu tikai ar labo aci (melnā līnija un punkti), un tikai ar kreiso aci (sarkanā līnija un punkti), abas acis ar impulsu 5 ms labai acij (zaļā līnija un punkti).

2.3.5. Diskusija

Binokulārās mijiedarbība pētījumi norāda uz parasti nelielu redzes asuma uzlabojumu ambliopajā acī pēc redzes treniņiem [86]. Pieraksti no pērtiķu V1 garozas kompleksām šūnām uzrādījuši spēcīgu ierosinājuma samazinājumu temporālam stimulam, anizotropas ambliopijas gadījumā [91]. Kā rāda pēdējie redzes izsaukto potenciālu (*visual evoked potential*) pētījumi, anizotropas ambliopijas gadījumā izsaukto potenciālu intensitāte samazinās vairāk nekā divreiz. Savukārt, signāla kavējums (jeb latence) sasniedz 25 ms salīdzinot ambliopas acs potenciālus ar veselas acs datiem [92].

Ātras darbības brilles, kas palīdz kontrolēt acīs nonākošos signālus, var izmantot kompensējošo signālu demonstrēšanai ambliopa redzes sistēmā, tādā veidā panākot uztveres uzlabojumu.

2.4. Secinājumi

1. Treniņos ar tekstu rētām virsmām ir parādīts krietns atpazīšanas sliekšņa uzlabojums, kas sastāda 200 procentus.
2. Metode ir izmantota ambliopijas pētījumiem kopā ar šķidro kristālu brillēm (P1).
3. Kolineāri orientēti konteksta stimuli samazina atpazīšanas sliekšni pa 30 procentiem, salīdzinājumā ar ortogonālo kontekstu (P2).

3. KRĀSU REDZES TESTU MULTISPEKTRĀLĀ ANALĪZE

3.1. Ievads

Pirmie krāsu redzes deficītu testi parādījās jau 20 gadsimta sākumā (Išihara, Rabkin). Nedaudz pirms tika attīstītas metodes krāsu redzes pārbaudei. Bet joprojām vienkāršākie un biežāk lietojamie testi ir pseidoizohromatiskās tabulas, kas ļauj atrast krāsu redzes defektus un arī veikt to klasificēšanu [77]. Pēdējos gados tika veikti vairāki kolorimetriskie pētījumi, kas nosaka dizainā pielietoto krāsu atbilstību diagnostiskiem mērķiem, kā arī klīniskie pētījumi lai noskaidrot testu diagnosticēšanas jutību un specifiskumu. Var izdalīt divas pamata metodes, saistītas ar minētiem pētījumu virzieniem.

Pirmā metode saistīta ar krāsu redzes testu klīniskiem pētījumiem ar pietiekošu dalībnieku skaitu, kas sniedz testu klīniskā izpildījuma parametrus. Vairākuma šādos pētījumos Išiharas tests ir nosaukt par vislabāk izpildāmo testu [93,94,95]. Līdzīgi rezultātu iegūti arī citu autoru pētījumos, kad Išiharas testu izpildījumu salīdzina ar Hahn un SPP testu [87]. Otrs tests, kas pēc literatūras datiem pēc izpildījuma var līdzināties Išiharas testam ir *American Optical HRR* [94,96].

Kolorimetriskās un spektrometriskās metodes ir objektīvās un ļauj noteikt testos izmantota krāsu atbilstību dihromātu konfūzijas līknēm [97,98]. Tika parādīts, ka dažāda vecuma testiem mēdz būt atšķirības kolorimetriskajās vērtībās [89], kas ne vienmēr ir saistītas ar testa vecumu, bet kādreiz arī ar izmantotām tintēm. Testos izmantoto tinšu kolorimetriskā kontrole ir nepieciešams faktors jauno testu izveidē [98]. Spektrometriskās metode, savukārt, ir vēl precīzākas un hipotētiski ļauj paredzēt krāsu uztveres variācijas, ko var radīt dažāds apgaismojums [94, 99, 100].

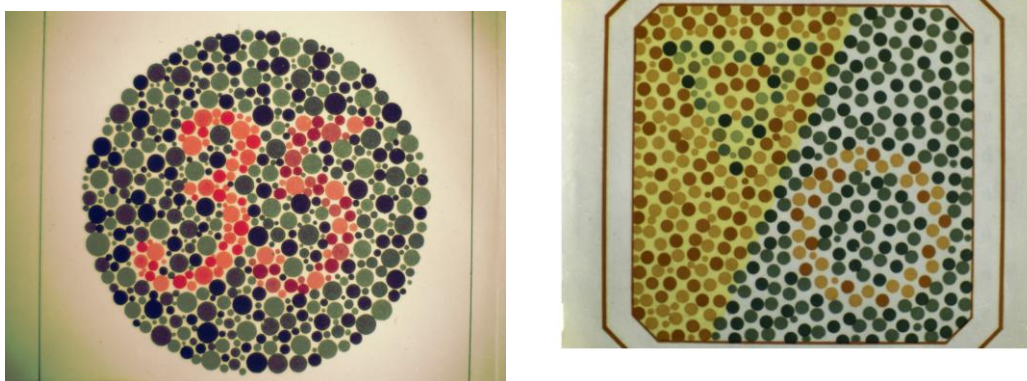
Attīstot objektīvās metodes jaunāko tehnoloģiju kontekstā tiek piedāvāts veikt pseidoizohromatisko tabulu multispektrālo skenēšanu ar sekojošo apstrādi kas iekļauj cilvēka redzes īpatnības, testu izpildījuma noteikšanai. Veicot attēla uzņemšanu visa redzamā spektra diapazonā, var sniegt vairākus labumus. Pirmkārt, tiek iegūti spektrālie dati katram iegūtā attēla pikselim. Otrkārt, pieejamā telpiskā informācija var tikt izmantota divdimensionālai attēla apstrādei ar matemātisko metožu pielietošanu. Šo faktu kopums, ļauj noteikt hipotētisko testu izpildījumu, balstoties uz zināšanām par cilvēka tīklenes pigmentu jutību un krāsu informācijas procesiem tālākos redzes trakta posmos.

Galvenais pētījuma mērķis ir metodoloģijas attīstīšana, kas var tikt pielietota esošo pseidoizohromatisko tabulu analīzei un sniegt atbildi par to izpildījumu, neiesaistoties klīniskos pētījumos. Izstrādājamā metode var būt arī noderīga jauno testu izstrādei un pārbaudei, kā arī metodes var tikt pielietotas dažādu krāsaino (arī poligrāfisko) materiālu atbilstību standartiem dažādos apkārtnes apgaismojumos.

3.2. Darbā izmatotie krāsu redzes deficītu noteikšanas testi

Darbā tika izmantoti divu krāsu redzes testu tabulas, kas izmanto līdzīgus principus un ļauj atšķirt deiteranopiju no protanopijas. Mēs izvēlējamies tabulu nr.17 no Rabkina testa [101] un nr.13 no pieejama 1965.gada Išiharas testa [102] (attēls 3.1). Izvēlētas tabulas ļauj diagnosticēt protanomālijas un deitranomālijas gadījumus. Rabkina tests diagnosticē anomāliju trijās pakāpēs un Išiharas tests divās pakāpēs. Šajos testos, ir divas apslēptas figūras, viena no

tam ir neredzamā protanopam un augstas protanomālijas pakāpes personām (Išiharas testā 'pieci' un Rabkina testā 'riņķis'), otra figūra ir neredzama deiteranopiem un augstas pakāpes deiteranomalajām personām (Išiharas tests – 'trīs' un Rabkina tests – 'trīsstūris').

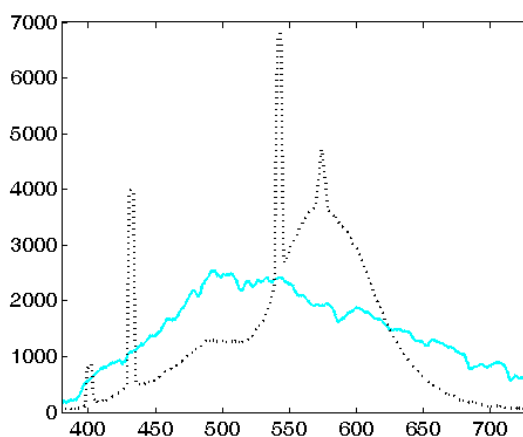


Attēls 3.1. Išiharas testa tabula nr.13 un Rabkina testa tabula nr.17 (pa labi). RGB attēlošanas variants no *CRI Nuance* programmatūras.

3.3. Izmantotā aparatūra un metodes

Multispektrālai attēlu iegūšanai tika izmantota *CRI Nuance Vis 07* kamera ar *Nikon AF Micro-Nikkor 60 mm f2.8D* objektīvu, kas uzmontēts mikroskopa vietā. Kamera ļauj nolasīt telpisko attēlu 1290 reiz 920 pikseļu lielumā spektrālajā diapazonā no 420 līdz 720 nm ar soli 10 nm. Lai izvairītos no spožuma izmaiņām ko ienes objektīvs tika pielietots korekcijas koeficients. Baltā etalona atstarošanas spektri tika nolasīti ar *Ocean Optics USB 400 VIS/IR* spektrometru un ar *Nuance* kameru, lai ieviest spektrālas korekcijas koeficientu.

Apgaismojuma izvēlē vadījāmies no Išiharas testā minētiem ieteikumiem, ka testu jāizpilda telpā ar dienas gaismu. Nav ieteicams testu pildīt tiešo saules staru gaismā un izmantojot elektriskos gaismas avotus [102]. Savā pētījumā izvēlējamies izmantot divus gaismas avotus, lai salīdzināt to iespaidu uz piedāvāto analīzes rezultātu. Tie bija, kā jau ir minēts, dienas gaisma, kas brīvi ienāk pa logiem, bet tiešie stari nekrīt uz testa virsmas, un kā otru gaismas avotu izmantojām luminiscentās gaismas lampas, kas bija pieejamas mūsu eksperimentālajā telpā Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā. Abu gaismas avotu atstarošanas spektri ir izmērīti ar *Ocean Optics USB 400 VIS/IR* spektrometru no *CERAM* keramiskā baltā etalona un tie parādīti attēlā 3.2. Spektrālā atstarošanās tika izmērīta ekspozīcijas laikam 1s un ir attēlota atņemot troksni ko rāda spektrometrs tumsā. Vienas sekundes ekspozīcijas laiks tika izvēlēts arī multispektrālo attēlu iegūšanai ar *CRI Nuance* kameru.



Attēls 3.2. Atstarošanas spektrs diviem gaismas avotiem. Ar pilni līniju apzīmēts dienas gaisma atstarošanas spektrs un ar raustīto līniju attēlots luminiscento lampu atstarošanas spektrs.

3.4. Analīze

Ņemot vērā informāciju par to, ka iedzimtu krāsu deficītu gadījumos personām iztrūkst L vai M tīklenes vāļīšu pigmenti, ir iespējams spektrālos datus pārvērst par vāļīšu signāliem (L, M, S) un veikt dihromātijas simulēšanu. Lai analizētu datus vāļīšu signālu kontekstā iegūtais spektrs ir jāpārrēķina trim vāļīšu signāliem. Katrs multispektrālā attēla pikselis tiek pareizināts ar katras vāļītes jutības funkciju (12. vienādojums) un šis pareizināšanas rezultāts sasummēts lai iegūt kopējo vāļītes ierosinājuma attēlu.

$$L(\lambda) = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * l(\lambda);$$

$$M(\lambda) = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * m(\lambda);$$

$$S(\lambda) = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * s(\lambda),$$

(Vienādojums

12)

kur $W(\lambda)$ attēla pikseļa spektrālie dati; $l(\lambda)$, $m(\lambda)$, $s(\lambda)$ ir vāļīšu jutības funkcijas pēc *Stiles & Burch* 10 grādu novērotājam [103].

Parasti krāsu redzes testos pielietotas tintes analizē pēc kolorimetriskām vērtībām, kuram jāizvietojas uz dihromātu konfūzijas līknēm [77]. Situācijā, kad attēls ir pārvērst par vāļīšu summāro signālu ir pareizi jāinterpretē, lai to būtu iespējams izmantot tālākai analīzei. Vāļīšu signālu attiecība personām ar normālu krāsu redzi un to ieguldījums oponento krāsu procesā ir zināms. Gadījumā kad iztrūkst kādas no L vai M vāļītēm varam tikai iedomāties kā notiek signālu pārvade. Balstoties uz krāsu fizioloģisko telpu pieņēmumiem, vāļīšu signāli tiek apstrādāti trijās plaknēs: L+M, L-M un S-(L+M). [12]. Spožuma informācija tiek uztverta no L+M vāļīšu signālu kombinācijas, L-M sniedz informāciju par ciāna un sarkano krāsām un S-(L+M) iedarbojās uz dzelteno un zilo toņu apstrādi.

Saskaņā ar to, ka protanopijas gadījumā iztrūkst L vāļītes un deiteranopijas gadījumā iztrūkst M vāļītes [77], mēs ierosinām izmantot sekojošu izteiksmi krāsu redzes anomālijas (A) aprakstam:

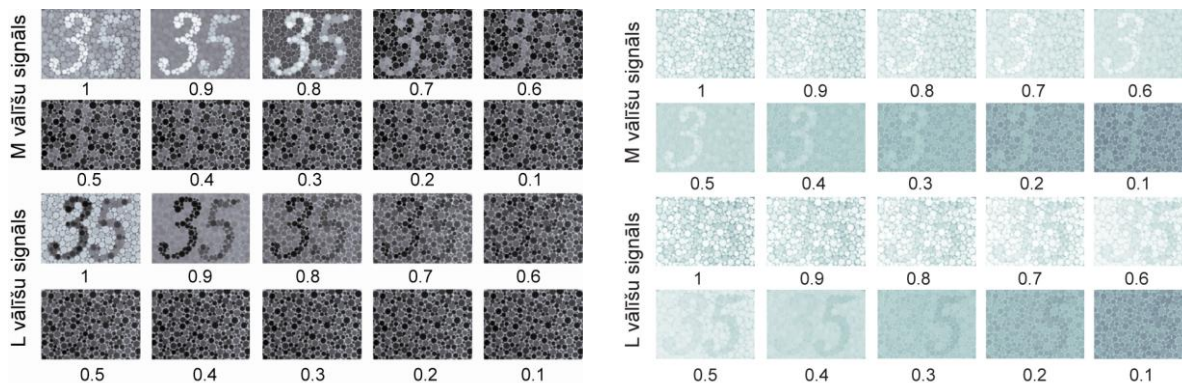
$$13) \quad A = aL - bM, \quad (\text{vienādojums})$$

kur a, b ir robežās no 0 līdz 1. Deficītu gadījumā a vai b ir vienādi ar 0. Dots pieeja ir atspoguļota attēlā 3.3.A. Tomēr mēs nebijām pārliecināti par to, kādā veidā S vāļišu signāls sniedz ieguldījumu kopējā signālu apstrādē, tāpēc mēģinājam pārbaudīt, kā S signāls iespaidos piedāvāta risinājuma rezultātu (vienādojums X). Šajā gadījumā vienādojums X pārtop par :

$$14) \quad A = aL - bM - S, \quad (\text{vienādojums})$$

kad S vienmēr ir pilns signāls (jeb normalizēts pret vieninieku). Piemēram, ja L signāls ir 0, vienādojums 13 pieņem formu $M-S$. Kā rāda grafiskais atspoguļojums attēlā 3.3.B. tāda veida pieeja ir pamatota, ko iespējams atrast arī literatūrā [104].

Jā S signāls tiek ņemts vērā, nav iespējams iegūt situāciju kad ir redzami abas divas apslēptās figūras, bet tiek iegūta pietiekoši laba anomāliju simulācija. Neizmantojot S signālu tiek iegūta abu apslēpto figūru redzamība, bet anomāliju simulācija nav pilnvērtīga. No kā var secināt, kā būtu nepieciešams izmantot abus vienādojumus 13 un 14.



Attēls 3.3. (A) L un M signālu attiecība Išiharas testam nr.13. Pirmā un otrā rinda parāda M signāla samazinājumu (atbilst deitan traucējumiem) un rindas 3 un 4 parāda L signāla samazinājumu (atbilsts protan traucējumiem). (B) L un M signālu attiecības izmaiņas iekļaujot S vāļišu signālu.

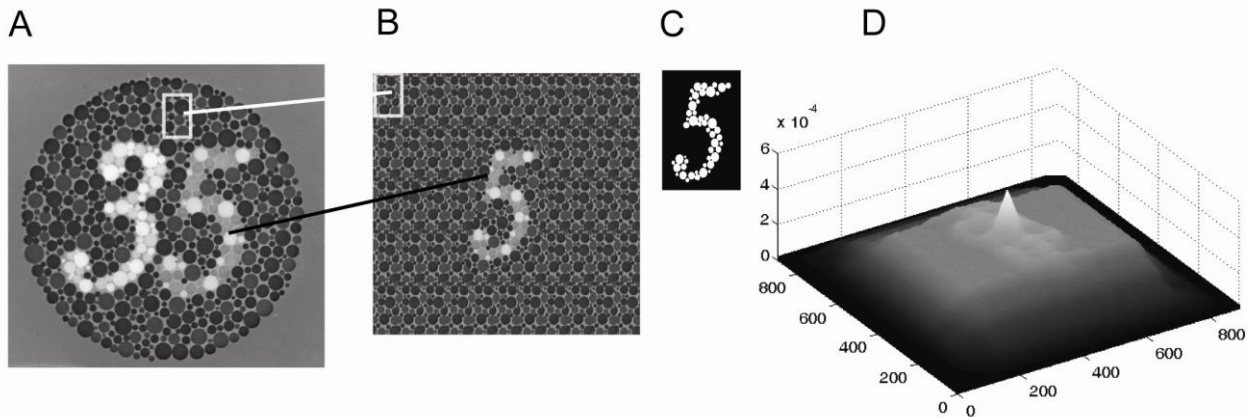
Kross korelācija

Apslēptā testa figūra ("3" vai "5" no Išiharas testa nr.13) ir ievietota viendabīgā fonā, kas sastāv no punktiem ar atšķirīgiem spožuma līmeņiem. Lai objektīvi noteikt apslēpta testa figūras klātbūtni, mēs piedāvājam pielietot divu dimensiju kross korelācijas procedūru starp piedāvātajām L un M vāļišu signālu kombinācijas attēliem un augsta kontrasta apslēpto figūru (melni balts trijnieks vai piecinieks).

Sākumā, apslēptās testa figūra kontūras tiek izgrieztas no testa attēla, ievietots uz baltā fona kontūras aizpildītas ar melno krāsu (attēlā 3.4.C). Augsta kontrasta figūru apzīmēsim ar burtu F (figūra). Pēc tam, katrā no simulētajiem vāļišu kombinācijas attēliem, pie visiem a un b variantiem, tiek izgriezta apslēptā figūra un apkārt tai tiek pagarināts fons (attēls 3.4.B). Dots attēlu, ko lietosim korelācijai ar F , nosauksim par T (tests). Kross korelācija starp T un F izskatīsies sekojoši:

$$K(i, j) = \sum_{m=0}^{M_a-1} \sum_{n=0}^{N_a-1} T(m, n) \otimes (F(m+i, n+j)), \quad (\text{vienādojums } 15)$$

kur $0 < i < M_a + M_b - 1$ un $0 < j < N_a + N_b - 1$. Skaitļi M_a un N_a vienādojumā 15 ir T dimensijas, M_b un N_b attēla F izmēri.



Attēls 3.4. A: Işıharas testa tabula nr.13 ar $L - 0.7 M$ signālu attiecību. B: Apslēpta figūra ar pagarināto fonu (T). C: Augsta kontrasta apslēpta figūra (F), ko izmanto korelācijai ar T . D: F un T kross korelācija rezultāts K .

Pārbaudes stimula (T) fons tika paplašināts, lai nodrošinātu pietiekami daudz vietas korelācijai un lai fona korelācijas vērtības būtu viegli atšķiramas no korelācijas ar apslēpto augsta kontrasta figūru (F). Korelācijas rezultāts tika normalizēts pret F autokorelācija augstāko vērtību.

Korelācijas maksimālo vērtību kopā ar pļedestāla līmeni, ko rāda korelācija ar fonu, var izmantot, lai aprēķinātu kontrastu, kuru var interpretēt, kā apslēptas figūras atpazīstamības kritēriju. Vēbera (jeb spožuma) kontrastu izmanto gadījumos, kad neliela izmēra objekti izvietoti uz lielāka izmēra foniem, kas atbilst mūsu uzdevumam . To aprēķina kā :

$$C_v = \frac{I - I_b}{I_b}, \quad (\text{vienādojums } 16)$$

kur I ir objekta spožums, kas mūsu gadījumā ir maksimālā korelācijas vērtība; un I_b ir vidējā vērtība korelācijai, vietā kur F nepieskārās apslēptai figūrai un veido zemās korelācijas vērtības ar fonu. I_b attēlā 3.4.D. ir redzams kā viendabīgs pelēkais fons.

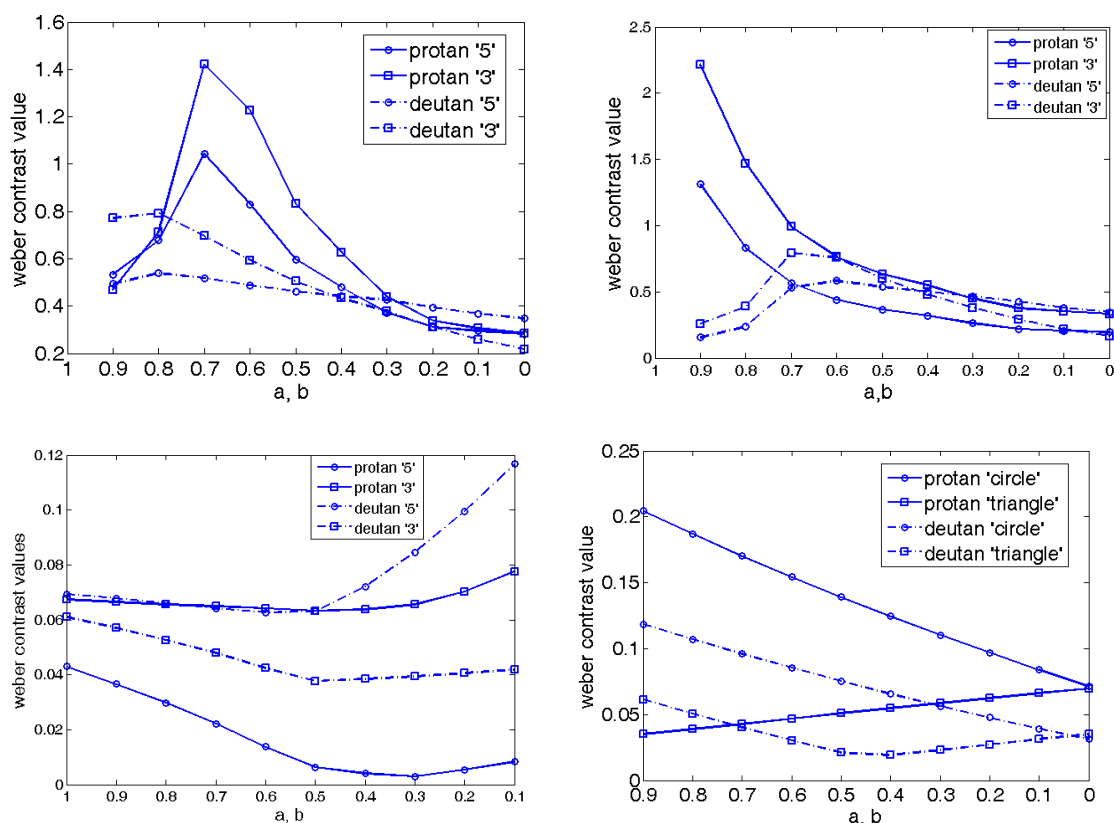
3.5. REZULTĀTI

3.5.1. Kross korelācijas kontrasts

Spožuma kontrasta vērtības tika aprēķinātas korelācijas rezultātiem pie dažādām a un b (vai L un M) proporcijām (attēls 3.5.). Apstākļos, kad S vāļišu signāls netiek iekļauts aprēķinā Vēbera kontrasta vērtība parasti samazinās kopā ar vāļišu signālu. Divas augšējās diagrammās

3.5.attēlā parāda rezultātus Išihas tabulai nr.13 pie dienas gaismas apgaismojuma (attēlā 3.5. pa kreisi) un luminiscentai lampai (attēlā 3.5. pa labi). Pie abiem apgaismojumiem latents objekts deitranopijas traucējumiem ir ar zemāku kontrasta vērtību, pie lielām a un b vērtībām. Korelācija rezultāts aptuveni sakrīt kad a un b sasniedz vērtību 0.5 pie dienas gaismas un luminiscentas lampas gadījumā jau sākot no 0.7 vērtībās.

Iekļaujot kontrasta aprēķinos S vāļišu signālu kopējā aina mainās, ko var redzes apakšējos grafikos attēlā 3.5. Var skaidri redzēt, ka izrēķinātas kontrasta vērtības atbilst testa uzdevumam un figūra "3" ir skaidri redzama pie protanopijas traucējumiem. Savukārt, kad tiek simulēts M vāļišu iztrūkums (jeb deitran traucējumi) lielāks ir figūras "5" kontrasts. Līdzīgā veidā tika izrēķinātas kontrasta vērtības arī Rabkina 17-tās tabulas figūrām: trīsstūrim un riņķim (attēls 3.5.D). Kaut gan kontrasta vērtības ir lielākas, to sakritība ar testa uzdevumu nav tik viennozīmīga, kā Išihas nr13 testam. Kad tiek samazināts L vāļišu ieguldījums, riņķa figūra ir skaidri redzama un trīsstūra figūras kontrasts ir krietni mazāks. Iztrūkstot L signālam pavisam abas vērtības kļūst vienādas. Kad tiek samazināts M vāļišu signāls novērojama līdzīga situācija, kad riņķa figūra ir skaidrāka par trīsstūra figūru. Dota situācija neatbilst testa uzdevumiem deitranopijas traucējumu diagnostikā, kad trīsstūra figūrai būtu jābūt redzamai.



Attēls 3.5. Spožuma kontrasts kross korelācijas rezultātiem. A un B: Kontrasta vērtības Išihas nr13 bez S vāļišu signāla, pie dienas gaismas (A) un pie luminiscentas lampas (B) apgaismojumiem. C: Išihas nr.13 ar S vāļišu signālu pie dienas gaismas. D: Rabkina nr.17 ar atņemto S vāļišu signālu pie dienas gaismas.

Pēc ieskata iegūtajos rezultātos var secināt, kā abiem testiem ir tendence uzrādīt lielāko kontrastu protanopijas figūru gadījumos. Išihas testam noteiktas kontrasta vērtības uzrāda daudz vieglāk interpretējamus rezultātus kas pie L un M proporcijām atbilst testa uzdevumiem. Rabkina testa gadījumā rezultāts ir grūtāk interpretējams un pie M vāļišu signāla izmaiņām neatbilst testa uzdevumiem.

Apgaismojuma izmaiņās rāda pārmaiņas noteiktajās kontrasta vērtībās (attēls 3.5A,B), kas hipotētiski iespaido testa izpildījuma spējas. Nenoliedzami, apgaismojuma izvēle iespaido arī testa hromatiskā satura kolorimetriskas vērtības.

3.5.2. Testu krāsu koordinātes

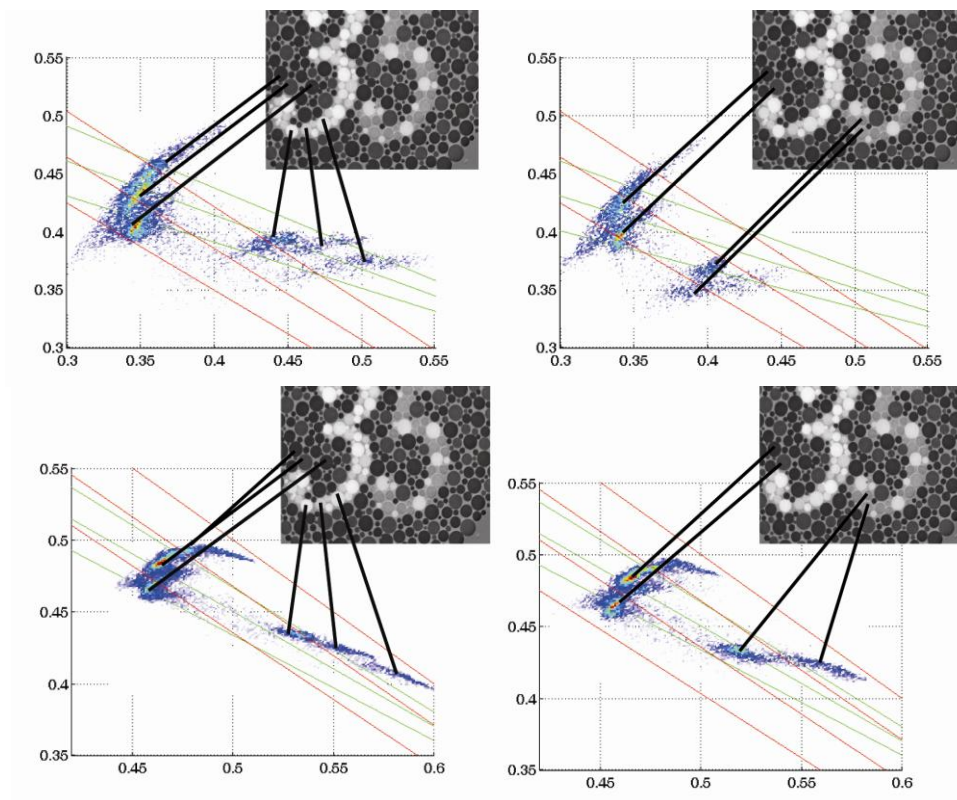
Lai iegūtu koordinātes CIE krāsu diagrammā, krāsu saskaņošanas funkcijas ir nepieciešamas. Mūsu nolūkiem tika izmantotas CIE 1964 krāsu saskaņošanas funkcijas 10 grādu novērotājam, jo mērījumi veikti plaša redzes leņķī [59, 60, 69].

Pseidoizohromatiskajās tabulās apslēpto figūru un fona krāsu koordinātes ir izvietotas gar dihromātu konfūzijas līknēm. Multispektrālā analīze palīdz savākt spektrālos datus katrā attēla punktā, kas atļauj aprēķinot CIE x , y koordināšu distribūciju visā attēlā. Tika izveidota divdimensiju histogramma no visām pieejamām attēlā CIE x , y koordinātēm, kas parādīta Attēlā 3.6. Lai vieglāk interpretēt datus sadalījumi tika aprēķināti katrai figūrai atsevišķi.

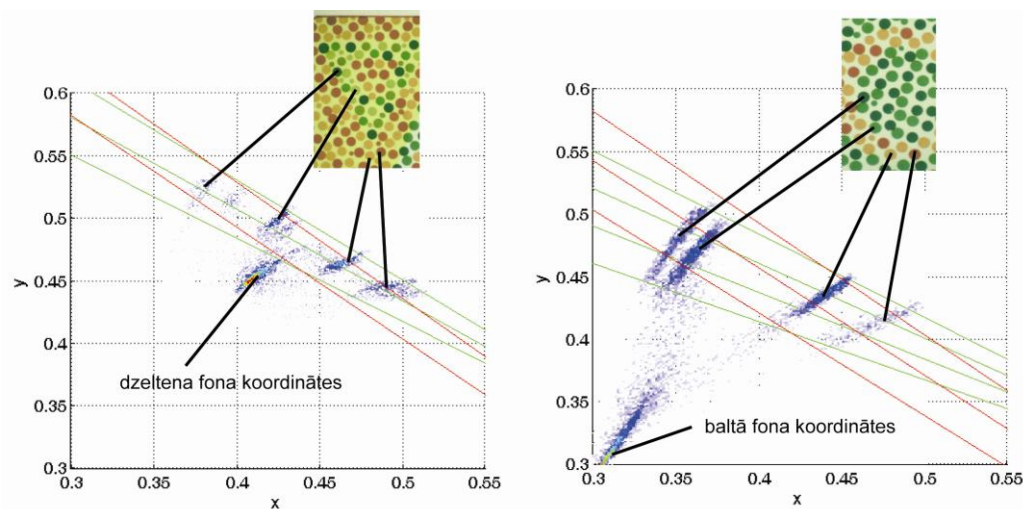
Atšķirībā no kolorimetriskās vai punkta spektrālā metodes, visa attēla spektra pieejamība ļauj novērot krāsu izvietojumu ar visām tām piemītošām izkļedēm (Attēls 3.7). Punktus kreisajā pusē diagrammās 5.attēls atspoguļo krāsas, ko izmanto fona. Visi kopā tie rada kaut ko līdzīgs mākonim, nevis punktam, ko parasti var definēt ar kolorimetrisko aprīkojumu. Apgaismojuma ietekme uz atstarošanas spektru un attiecīgi uz krāsu izskatu ir zināmas. Attēla 3.7.apakšējā rindā ir parādītas krāsu koordinātes pie luminiscenta apgaismojuma.

Protranopa un deitranopa konfūzijas līknēm ir definēti sākuma punkti CIE x,y , krāsu diagrammā. Krāsas, kas atrodas uz šīm līnijām ir neatšķiramās personām ar attiecīgiem krāsu redzes deficītiem. Konfūzijas līnijas var izvietoties pietiekoši augstu vai zemu krāsu diagrammā, bet to optimālākais izvietojums ir ap pelēko punktu (0.33;0.33). Izmantojot dažādus apgaismojumus kolorimetriskās vērtības pārbīdās parasti uz diagrammas dzelteno toņu pusi (uz augšu pa labi).

Konfūzijas līknes šajā diagrammas daļa veido mazo leņķi, kas nelabvēlīgi iespaido krāsu atšķiršanu. Rezultātā protanopam un deitranopam rezervētas krāsu koordinātes saplūst un padara diagnosticēšanas uzdevumu neiespējamu. Šo parādību var redzes attēlā 3.7. kur ir parādītas koordināšu nobīdes Išiharas tabulai nr.13. No šiem datiem varam secināt, ka pie dienas gaismas Išiharas tests uzrādīt labus krāsu redzes traucējumu diagnosticēšanas spējas, ko ir grūti teikt par luminiscento apgaismojumu.



Attēls 3.7. Krāsu koordināšu izkliede CIE x,y diagrammā Išihas testam nr.13. A, B: Dienas gaismas apgaismojums. C, D: Luminiscento lampu apgaismojums. Sarkanās līnijas ir deitranopa konfūzijas līknes ar sākuma koordinātēm : $x=0.7465$; $y=0.2535$. Zaļās līnijas ir protanopa konfūzijas līknes ar sākuma koordinātēm: $x=1.40$; $y=-0.40$ [77].



Attēls 3.8. Krāsu koordināšu izkliede CIE x,y diagrammā Rabkina testam nr.17 pie dienas gaismas. Sarkanās līnijas ir deitranopa konfūzijas līknes ar sākuma koordinātēm : $x=0.7465$; $y=0.2535$. Zaļās līnijas ir protanopa konfūzijas līknes ar sākuma koordinātēm: $x=1.40$; $y=-0.40$ [77].

Rabkina testā nr.17 trīsstūra figūras koordinātes izvietojas pietiekoši augstu, kur koordinātes sakrīt ar abām konfūzijas līknēm. Pateicoties šim faktam deitranopijas traucējumu gadījumā figūra būs tik pat labi neredzama kā pie protanopijas traucējumiem. Riņķa figūras gadījumā situācija ir labāka un tests ar lielāku varbūtību būs neredzams protanopijas traucējumu

gadījumā un redzams pie deitranopijas traucējumiem. Šie novērojumi sakrīt ar kross korelācijas analīzes rezultātiem.

3.6. Diskusija

Mūsu izveidotā pieeja krāsu redzes testu analīzē izmanto multispektrālu attēlu uzņemšanu kopā ar padziļinātu matemātisko analīzi. Tādā veidā iespējama spektrālā informācija par iegūta attēla pikseļiem, atļauj veikt telpiskās matemātiskas operācijas. Kļūst iespējama tāda analīzes metode kā kross korelācija un krāsu koordināšu izkliedes noteikšana. Kross korelācijas procedūra, vai arī citas līdzīgas operācijas, palīdz raksturot testu izpildījuma efektivitāti bez klīnisko pētījumus vajadzības, kam ir liela resursu un laika ekonomijas nozīme. Piedāvāto metodi ir iespējams izmantot iekļaujot dažādu apgaismojumu iespaidu uz testu izpildījumu un tajos izvietotās kolorimetriskas informācijas izmantošanu. Mūsu pieeja var tikt salīdzināta arī ir dihromātu redzes simulācijām [9, 10]. Taču mūsu pētījuma mērķis ir atrast rīkus testu izpildījuma raksturošanai balstoties uz atradnēm par krāsu redzi.

Iegūtie rezultāti liecina, ka Išiharas tests nr.13 ir piemērots krāsu redzes pārbaudei pie dienasgaismas apgaismojuma. Daudzi citi pētnieki atbalsta Išiharas testa augsto klīnisko efektivitāti un kolorimetrisko vērtību atbilstību testa uzdevumiem [94,96,99]. Mēs domājam, ka krāsu koordināšu dispersija Išiharas testā var būt saistīta ar tā vecumu (1965) un jaunākiem testiem būtu novēroti šaurāki sadalījumi bet, kā liecina mūsu analīze krāsu izkliedei nav būtiska iespaids uz testa izpildījumu, salīdzinot ar Rabkina testu, kam noteiktas krāsu izkliedes ir mazākas. Tomēr turpmāki klīniskie un modelēšanas pētījumi būtu nepieciešami, lai secinātu faktus par krāsu izkliedes iespaidu uz testu izpildījumu.

Līdz ar divdimensionālu spektrālo datu pieejamību testu pētījumi var tikt veikti uztveres plaknē. Metodes var iekļaut modernās krāsu telpas (vāļišu ierosinājuma telpa), kā arī ne tikai spektrālos, bet cilvēka redzes sistēmas temporālos un telpiskos aspektus: krāsu adaptāciju, krāsu kontrastu un krāsu indukciju no testos izmantotiem foniem [105, 106].

3.7. Secinājumi

1. Izstrādāta objektīvā metode krāsu redzes testu izpildījuma noteikšanai.
2. Ir noskaidrots kā Išiharas nr.13 sniedz labāku izpildījumu dienas gaismas apstākļos par Rabkina testa tabulu nr.17.
3. Piedāvātā analīze atļauj ietvert apgaismojuma spektrālo sastāvu, kas padara to par vērtīgu rīku eksistējošo testu analīzei un jauno testu izstrādei.

4. PAPILDKRĀSU NOTEIKŠANA

Tika izstrādāta metode pēcefekta radītas papildkrāsa noteikšanai. Otrajā eksperimenta daļā veikti papildkrāsu mērījumi personām ar krāsu redzes traucējumiem. Pēcefekta piesātinājuma mehānismu noteikšanai tika veikti eksperimenti ar oponentās modulācijas telpā (DKL) izvēlētām krāsām.

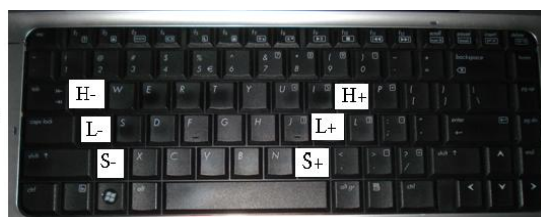
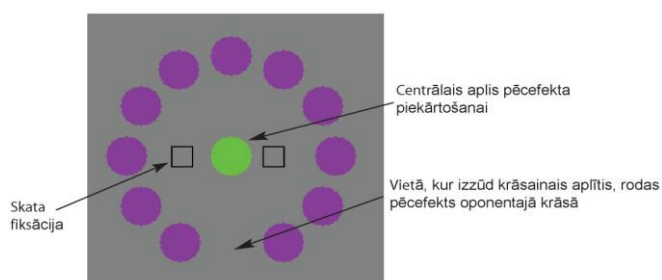
4.1. Pēcefekta noteikšanas metodikas izstrāde un papildkrāsu noteikšana

4.1.1. Eksperimenta dalībnieki

Eksperimentā piedalījās 5 dalībnieki, 2 vīrieši un 3 sievietes. Dalībnieku vidējais vecums bija $24,2 \pm 2,3$ gadi. Dalībnieki eksperimentā piedalījās brīvprātīgi. Visi eksperimenta dalībnieki bija bez krāsu redzes anomālijām un defektiem. Netika veikta specifiska dalībnieku atlase.

4.1.2. Metodika un stimuls krāsu pēcefekta radīšanai

Krāsu pēcefekta dalībnieku novērtēšanai tika izveidots stimuls, kas balstās uz redzes ilūzijas „*Lilac chaser*” jeb „*Pac-Man illusion*” principa. Stimuls izveidots un tiek demonstrēts *Microsoft Visual Basic 6.0* vidē. Stimuls sastāv no 12 aplīšiem, kas izvietoti pa riņķi, veidojot kombināciju kā pulksteņa ciparnīca (attēls 4.1). Stimula fons izvēlēts pelēks, RGB vērtības (128, 128, 128). Eksperimenta laikā vienlaicīgi ir redzami 11 no 12 aplīšiem. Viens aplītis visu laiku izzūd un tā vietā redzams pelēkais fons. Pazūdošais aplītis cirkulē pa riņķi. Skata fiksācijai paredzēti divi kvadrāti, kurus fiksē pārmaiņus. Stimula leņķiskie izmēri: aplītis- $0,83^\circ$, no fiksācijas punkta līdz stimula malai- $1,66^\circ$, no ārējā aplīša līdz centra aplīim (no ārējām malām)- $3,32^\circ$.



4.1. attēls. Eksperimenta stimuls krāsu pēcefekta radīšanai (pa kreisi).Tastatūras pogas pēcefekta krāsas pieskaņošanai (pa labi).

Visi 12 aplīši ir vienādā krāsā. Krāsa tiek mainīta HSL krāsu sistēmā, mainot krāsas toni (*Hue*) ar vienādu soli. Kopā ir 30 soļi ar dažādiem krāsas toņiem. Piesātinājums iestatīts kā maksimālā vērtība un netiek mainīts. Spožums katram solim izvēlēts tāds, lai katra soļa krāsas stimula luminance būtu vienāda, tātad, lai stimuli būtu izoluminanti. Luminances vērtības pieskaņotas mērot stimulus ar kolorimetru *Konica Minolta CS-100A*.

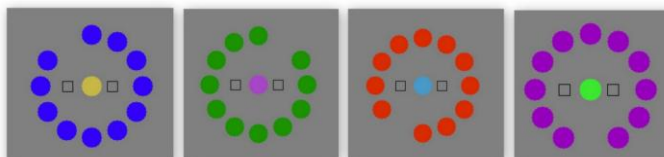
Krāsu pēcefekta novērtēšanai tiek lietots vēl viens aplītis stimulu centrā ar iespēju mainīt tā krāsu. Aplītim ir iespēja mainīt krāsas toni, spožumu un piesātinājumu. Centrālā aplīša krāsa

tiek mainīta tā, lai tā maksimāli atbilstu pēcefektam gan pēc krāsas toņa, gan spožuma, gan piesātinājuma. Šīs vērtības tiek mainītas HLS (Hue Lightness Saturation) sistēmā ar datora tastatūras pogām; krāsas tonis tika mainīts ar pogām 'Q' un 'O', spožumam atbilsta pogas 'A' un 'K', un piesātinājums tiek mainīts ar pogām 'Z' un 'M' (skatīt attēlu 4.1).

Tā kā krāsas kodēšana datora grafikas kartē notiek RGB sistēmā, nepieciešams pārrēķins no HLS sistēmas uz RGB krāsu sistēmu. Šis pārrēķins tiek īstenots ar Microsoft Visual Basic moduļa colorhlstorgb palīdzību. Pēc katras tastatūras taustiņa nospiešanas tiek pārrēķinātas HLS vienības uz RGB kanālu vērtībām. Pārrēķinātās RGB vērtības tiek sūtītas uz datora grafikas karti un tiek izmainīts centrālā aplīša krāsas tonis, piesātinājums vai spožums, atkarībā no tā, kura poga tika nospiesta. Tika veikta arī datora monitora spektrālā raksturošana, lai iegūtas RGB vērtības attēlot kolorimetriskās vērtībās.

4.1.3. Eksperimenta gaita

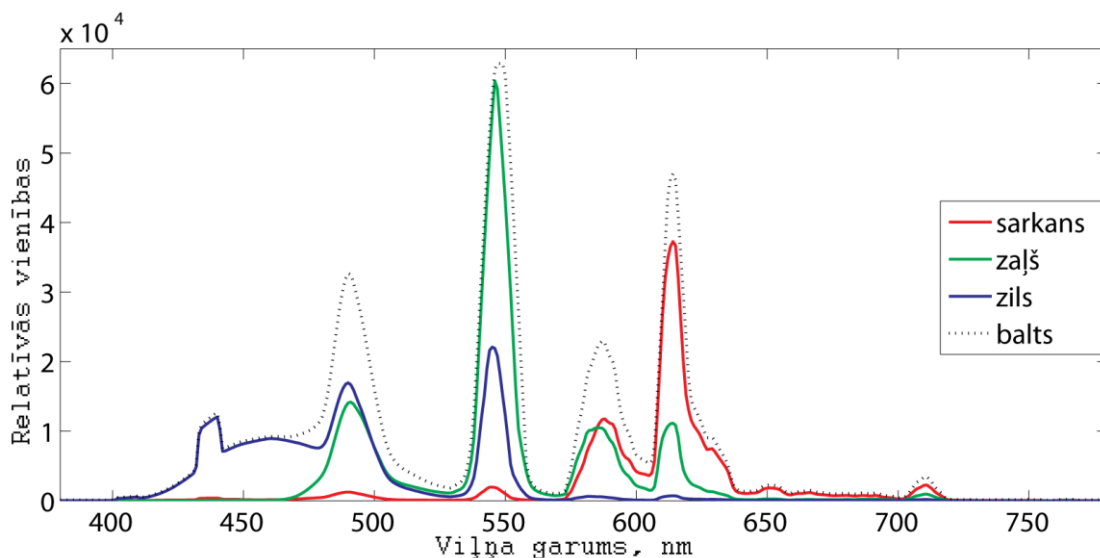
Eksperimenta dalībnieks sēž pie galda, monitors noregulēts tā, lai tas būtu perpendikulāri redzes asij. Attālums līdz monitoram ir 50 cm. Pirms eksperimenta dalībniekam tika nodemonstrēts kā ar pogu palīdzību iespējams mainīt krāsu un viņš tiek instruēts kā ērtāk pieskaņot krāsu pēcefektam. Dalībniekam jātur rokas uz tastatūras, lai nenovēršot skatu no monitora būtu iespējams operēt ar pogām. Sākumā skats tiek fiksēts uz vienu no kvadrātiem, tad pārņests uz otru. Stabili fiksējot skatu ļoti ātri parādās pēcefekts. Tad tiek piekārtots pēcefekta krāsas tonis, kas vistuvāk atbilst radītajam pēcefektam. Kad aptuvenais tonis ir atrasts, tiek pielāgots stimula spožums un piesātinājums. Ja liekas, ka ir savādāks krāsas tonis, tad piekorigē to, kā arī pārējās vērtības līdz atrasta maksimāli līdzīgākā krāsa, kas atbilst pēcefektam. Kad krāsas saskaņotas, iegūtie rezultāti tiek pierakstīti tabulā. Nākamā stimula krāsa tiek izvēlēta tā, lai tā HLS krāsu telpā neatrastos blakus iepriekšējai. Daži stimulu un piekārtoto pēcefektu paraugi redzami 4.2. attēlā.



4.2. attēls. Stimulu paraugi un tiem piekārtotie pēcefekti. Papildkrāsas ir aptuvenas un var neatbilst īstajām papildkrāsām pēc izdrukas.

4.1.4. Monitora raksturošana

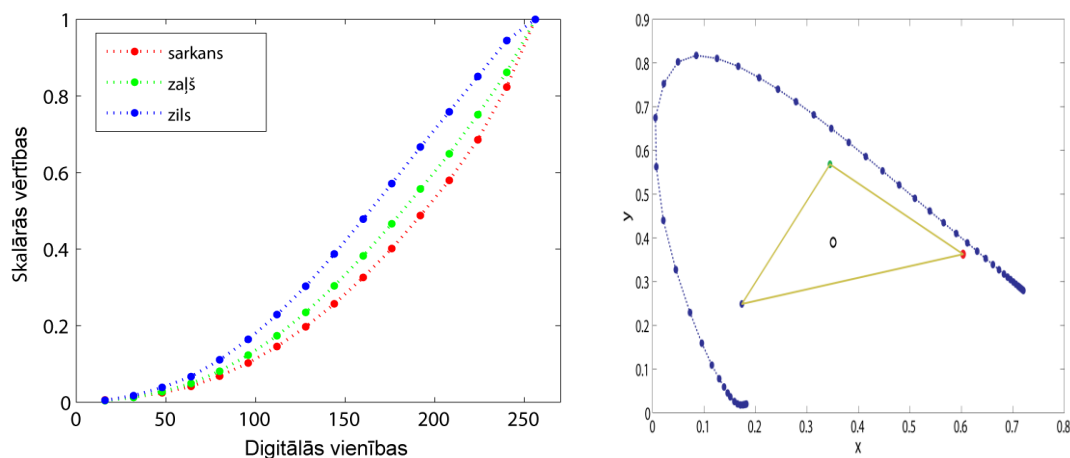
Eksperimentā tika izmantots portatīvais dators *HP PAVILION DV6555* ar LCD monitoru. Monitora emitētā gaisma tika mērīta ar spektrometru *USB4000 (Ocean Optics)*. Mērījumi tika veikti katram no RGB kanāliem pie digitālajām vienībām 16 līdz 255 ar soli 16, kā pie baltās krāsas tā arī pelēkās. Katra kanāla emitētais spektrs maksimālajai vērtībai parādīts attēlā 4.3.



Attēls 4.3. Monitora emitētās gaismas spektrs maksimālajām digitālajām vērtībām.

Attēlā 4.3. redzama monitora krāsu gamma, CIE xy krāsu koordinātēs. Trīsstūra virsotnes veido maksimālās kanālu vērtības R, G un B. Centrālais melnais aplis parāda monitora baltā punkta atrašanos CIE xy krāsu koordinātēs ($x=0,35$; $y=0,39$).

Tā kā spektra mērījumi tika veikti ar soli 16 digitālās vienības, iegūtie dati tik interpolēti, lai aizpildītu skalāro vērtību tabulu visām vērtībām. Skalāro vērtību maiņa monitoram ar dažādām digitālajām vienībām attēlota grafikā 4.4. [26, 69]

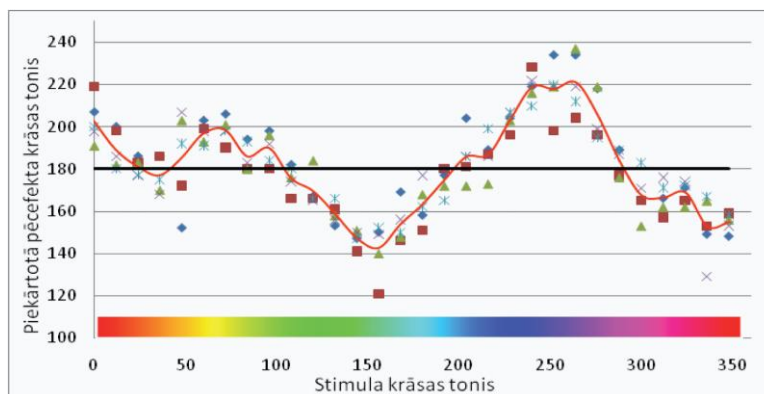


Attēls 4.4. Monitora gamma funkcija un krāsu gamuts CIE x,y diagrammā.

Ar pilniem aplīšiem ir aprēķinātās skalārās vērtības mērījumiem, kuras interpolējot iegūst pilnu skalāro vērtību tabulu (vērtībām 0- 255). Tālāk šīs vērtības tiek iekļautas pārrēķinā no RGB uz XYZ. Datora monitorā ir aditīva rakstura krāsu sajaukšana no trim kanāliem. Tad kopējo starojumu nosaka katra kanāla starojums. Gaismas sajaukuma XYZ vērtības no trim RGB vērtībām aprēķina pēc izveidotas tabulas.

4.1.5. Rezultāti

Visi eksperimenta dalībnieki pieskaņoja pēcefekta HSL vērtības. Attēlā 4.5. redzama eksperimentāli piekārtotā krāsu pēcefekta krāsas tonis (hue) atkarībā no stimula krāsas toņa. Uz x ass ir stimula, kas rada krāsu pēcefektu krāsas tonis. Uz vertikālās ass ir piekārtotās krāsas tonis. Katra eksperimenta dalībnieka rezultāti attēloti ar dažādu marķieri. Sarkanā nepārtrauktā līnija parāda visas grupas vidējo vērtību. Melnā nepārtrauktā līnija, pie y vērtības 180, demonstrē teorētiskās oponentās krāsas atrašanās vietu pēc toņu polārām koordinātēm. Tātad, ja pēcefekta radītā krāsa precīzi atbilstu krāsas toņa *hue* koordinātēs pretējai krāsai, tad visi mērījumi atrastos uz šīs taisnes.

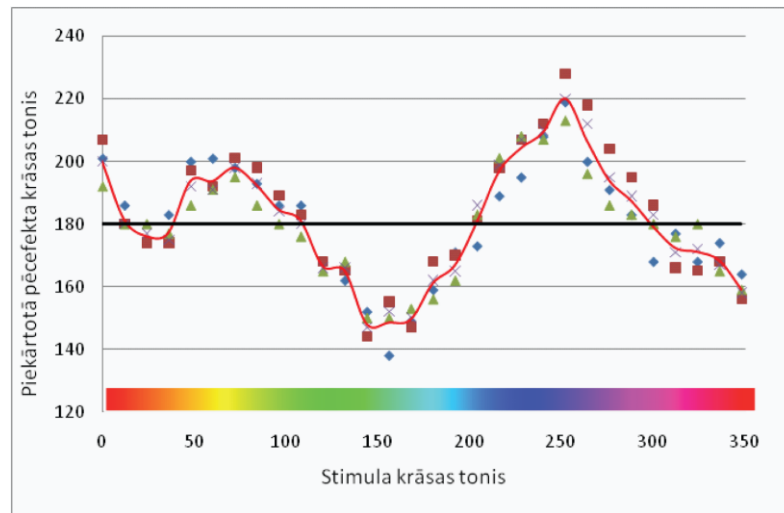


Attēls 4.5. Piekārtotā krāsu pēcefekta tonis atkarībā no stimula krāsas toņa. Dažādie simboli attēlo 5 dažādu eksperimenta dalībnieku atbildes. Sarkanā līnija parāda visas grupas vidējo vērtību.

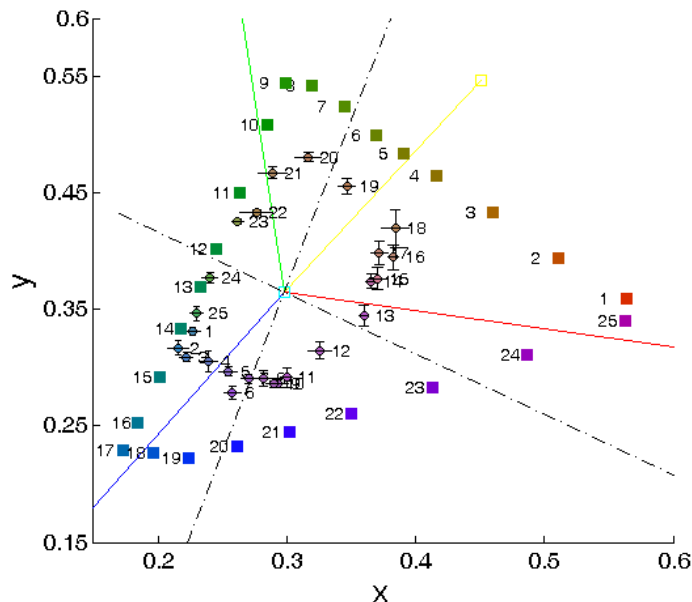
Kā redzams 4.5. attēlā, ir atsevišķas vietas grafikā, kur līkne krusto melno līniju, kā arī apgabali, kas atrodas relatīvi tuvu šai taisnei. Vislielākās nobīdes vērojamas rajonos pie 150...160 (tonis starp zaļo un ciānu) un 240...270 (zili violets) krāsas toņa vērtības, kā arī pie 340...360 (sarkans). Vistuvāk „pretējai krāsai” pēcefekts piekārtots oranžā, zaļā, jūras zilā un magneta krāsas toņu rajonā. Lenķiskās nobīdes no pretējās krāsas krāsu aplī sasniedz līdz pat 40 grādiem.

No grafika redzams, ka arī izkliedes starp mērījumiem nav lielas. Starp visiem eksperimenta dalībnieku rezultātiem pastāv spēcīga korelācija, vidējais korelācijas koeficients $k=0,84 \pm 0,03$.

Lai varētu analizēt mērījuma atkārtojamību, vienam no eksperimenta dalībniekiem mērījums tika atkārtots 4 reizes. Vidējais korelācijas koeficients starp atsevišķiem mērījumiem ir $0,94 \pm 0,03$. Tātad starp mērījumiem pastāv spēcīga pozitīva korelācija. Par spēcīgu korelāciju uzskata datus grupām, kam korelācijas koeficients ir lielāks par 0,8. Korelācijas koeficients ir 1, ja dati ir pilnīgi vienādi. Attēlā 4.6. atkārtotie mērījumi parādīti ar dažādiem marķieriem. Sarkanā nepārtrauktā līnija parāda mērījumu vidējo vērtību. Līknes raksturs ir tāds pats kā attēlā 4.5 visai dalībnieku grupai.



Attēls 4.6 . Piekārtotā krāsu pēcefekta tonis atkarībā no stimula krāsas toņa. Dažādie simboli attēlo viena eksperimenta dalībnieka 4 mērījumus. Sarkanā līnija parāda vidējo vērtību.



Attēls 4.7. Testa krāsu (kvadrāti) un piekārtoto papildkrāsu (aplīši) koordinātes CIE x,y krāsu diagrammā. Melnās līnijas apzīmē kardinālo krāsu asis un krāsainās līnijas apzīmē unikālo krāsu atrāšanas virzienus. Kļūdu robežas katram piekārtotajai papildkrāsai apzīmē standartkļūdu.

Piekārtoto papildkrāsu koordinātes ir parādītas attēlā 4.7. Neskatoties uz to, ka testa krāsas veido trīsstūra formu, kam par pamatu ir izvēlētais maksimālais piesātinājums, pēcefekta krāsas (jeb papildkrāsas) izveido formu kas atgādina četrstūri ar noapaļotām malām. Visām papildkrāsām ir zemāks piesātinājums salīdzinot ar testa krāsām. Katrai no krāsām atrastā papildkrāsa veidojas ar nobīdi no pretējās krāsas. Vistaisnāk ir izvietotais pēcefekts stimulam ar krāsu nr.19, 24, kā arī krāsām, kas atrodas šīm krāsām pretējā pusē nr.6 un nr.13. Mūsu eksperimentā noteiktās nemainīgās asis sakrīt ar literatūrā minētās asīm *Wilson et al* darbā, kas tika veikts pirms 65 gadiem kad tehniskās iespējas bija diezgan ierobežotas un piesātinājuma izmaiņas toreiz netika noteiktas [8].

4.2. Papildkrāsu noteikšana krāsu redzes traucējumu gadījumā

4.2.1. Eksperimenta dalībnieki

Eksperimentā piedalījās 3 cilvēki (iniciāli/vecums) ar krāsu redzes traucējumiem - EL/22, JR/23, JE/62 – un viens kontrol dalībnieks bez krāsu redzes traucējumiem – N. Dalībnieku atlase tika veikta izmantojot *Ishihara* krāsu plates un *Farnsworth D-15* testu.

Veicot *Ishihara* krāsu testu, divi no dalībniekiem (EL un JE) klasificēti kā protanomālie trihromāti, savukārt viens dalībnieks (JR) kā deiteranomālais trihromāts (testu rezultātus skatīt pielikumā).

Dalībnieku EL, JE un JR *Farnsworth D-15* rezultāti apstiprina *Ishihara* testa rezultātus. Turpmāk darbā dalībnieki pēc noteiktā krāsu redzes traucējuma tiek apzīmēti sekojoši:

ELp- protanomālais trihromāts; JEp- protanomālais trihromāts; JRd-deiteranomālais trihromāts; N- trihromāts.

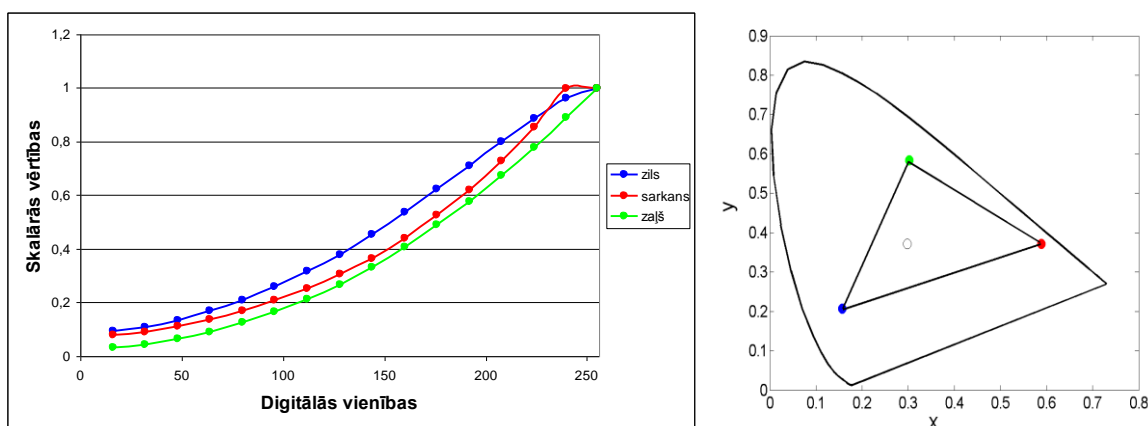
4.2.2. Datu analīze

Eksperimentā iegūtās pēcefektu vērtības tiek pierakstītas HLS veidā, kas ir HSL krāsu telpas transformētas vērtības. Izmantojot programmu *Color picker*, tiek noteiktas HSL krāsu telpas koordinātes un RGB kanālu vērtības. Programma nolasa datus no laukuma, kurā atrodas peles kursora, un norāda attiecīgās koordinātes HSV telpā un kanālu RGB vērtības. Iegūtās RGB vērtības tiek izmantotas, lai veiktu pārrēķinus uz *CIE XYZ* 1931 krāsu telpu.

4.2.3. Monitora raksturošana

Stimulus tika rādīts uz portatīvā datora *Dell Inspiron 1525* ar *LCD* monitoru. Monitora raksturošana notikusi pēc iepriekš aprakstītas metodes (skat. nodaļu 4.1.) Monitora emitētās gaismas mērījumi tika veikti katram no RGB kanāliem pie digitālajām vienībām no 16 līdz 255, ar soli 16 un pie baltās un melnās krāsas. Lai attēlotu sarkanā, zaļā un zilā kanāla spektru, no iegūtajiem spektra mērījumiem tika atņemts melnās krāsas spektrs. Monitora emitētās gaismas mērīšanai izmantots spektrometrs *USB4000 (Ocean Optics)*.

Lai eksperimentā iegūtos datus no digitālo vērtību RGB kanāliem varētu attēlot *CIE xy* diagrammā, tiek veikta skalāro vērtību aprēķināšana. Skalāro vērtību maiņa monitoram pie dažādām digitālajām vienībām ir redzama 2.4.attēlā.



4.8. attēls. Monitora gamma funkcija un krāsu gamuts *CIE xy*, krāsu diagrammā (pa labi).

4.8. attēlā ar pilniem aplīšiem ir aprēķinātās skalārās vērtības spektra mērījumiem ar soli 16 digitālās vienības. Gamma funkcija parāda pilnu skalāro vērtību tabulu digitālajām vienībām no 0 līdz 255. Šīs vērtības tiek iekļautas pārrēķinos, lai pārietu no RGB uz XYZ vērtībām.

4.2.4. Rezultāti

Eksperimenta atkārtojamība noteikta normālam trihromātam (N) izpildot eksperimentu 4 reizes un aprēķinot standartklūdu.

Mērījumu vidējā standartklūda $\pm 3,9$ izmantota, lai aprēķinātu relatīvo standartklūdu. Vidējā relatīvā standartklūda ir 2%, kas norāda uz augstu mērījuma precizitāti.

4.2.4.1 Stimula un pēcefekta krāsu novietojums CIE x,y krāsu telpā

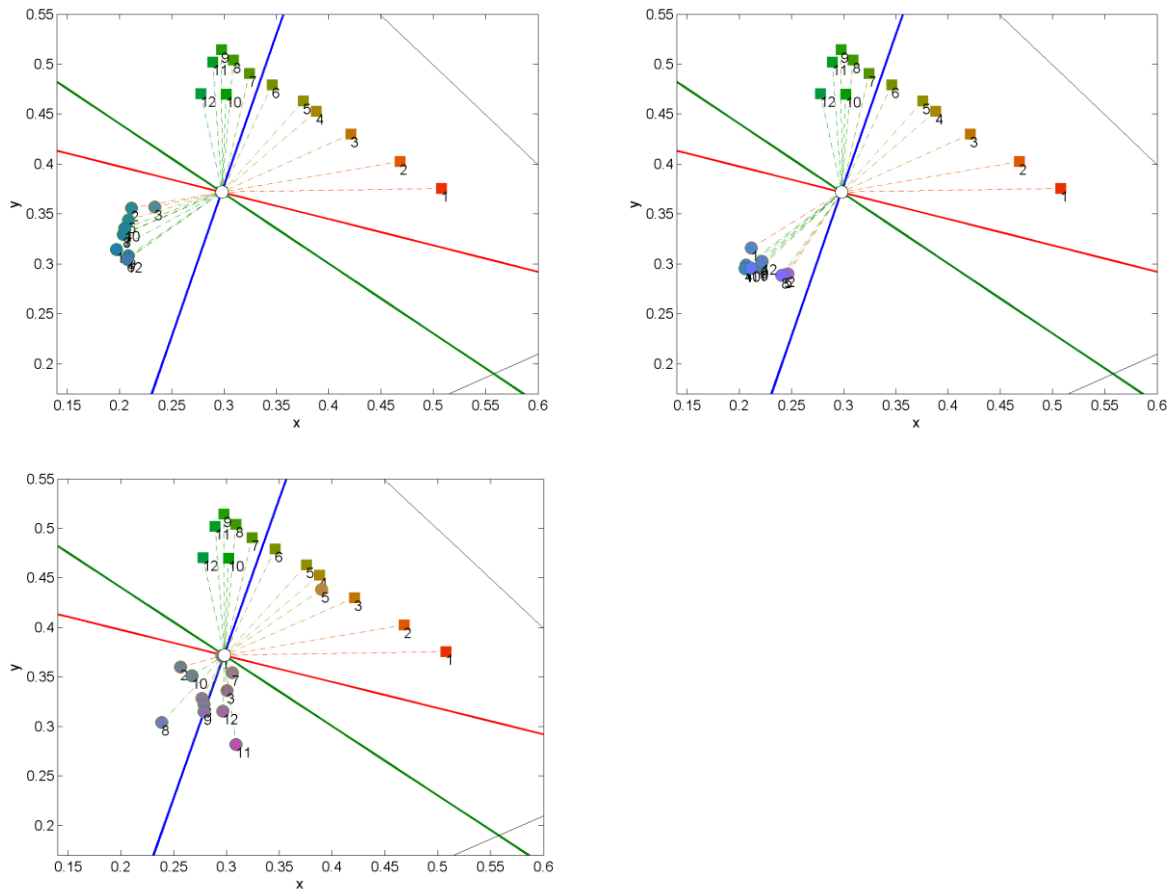
Dalībnieku piekārtotie pēcefekti dažādu krāsu stimuliem attēloti CIE xy krāsu telpā. Asis x un y raksturo krāsu koordinātes, centrālais punkts ($x=0,30$; $y=0,37$) atbilst RGB pelēkajai vērtībai (128,128,128). Stimuls un attiecīgais pēcefekts tiek savienots ar līniju, kas iet caur centrālo punktu. Stimuls attēlots ar kvadrātu, savukārt pēcefekts ar aplīti. Krāsu pildījums atbilst stimula un pēcefekta krāsai. Krāsa līnijām, kas savieno stimulu ar pēcefektu, izvēlēta pēc stimula krāsas. Katram stimulam atbilst tādas pašas numerācijas pēcefekts.

Katrā CIE x,y krāsu diagrammā attēlotas krāsu konfūzijas līnijas. Zilā līnija atbilst *tritan*, zaļā *deiter*, bet sarkanā *protan* konfūzijas līnijai. Konfūziju līnijas vilktas no attiecīgā sākumpunkta (*Protan* (0,7465; 0,2535), *Deuter* (1,4; -0,4), *Tritan* (0,1748;0)) [77] caur centrālo punktu.

Lai iegūtie rezultāti būtu uzskatāmi, katra dalībnieka atbildes sadalītas trīs daļās (stimuli no 1-12,13-21 un 22-30).

Stimuli intervālā no 1-12

Aplūkojot dalībnieku ELp un JEp atbildes, ir redzams, ka stimuliem, kas atrodas gar *protan* konfūzijas līniju, pēcefekts koncentrējas noteiktā telpas apgabalā. Vērojama izteikta pēcefektu noliece (skat. 4.9. attēlā).



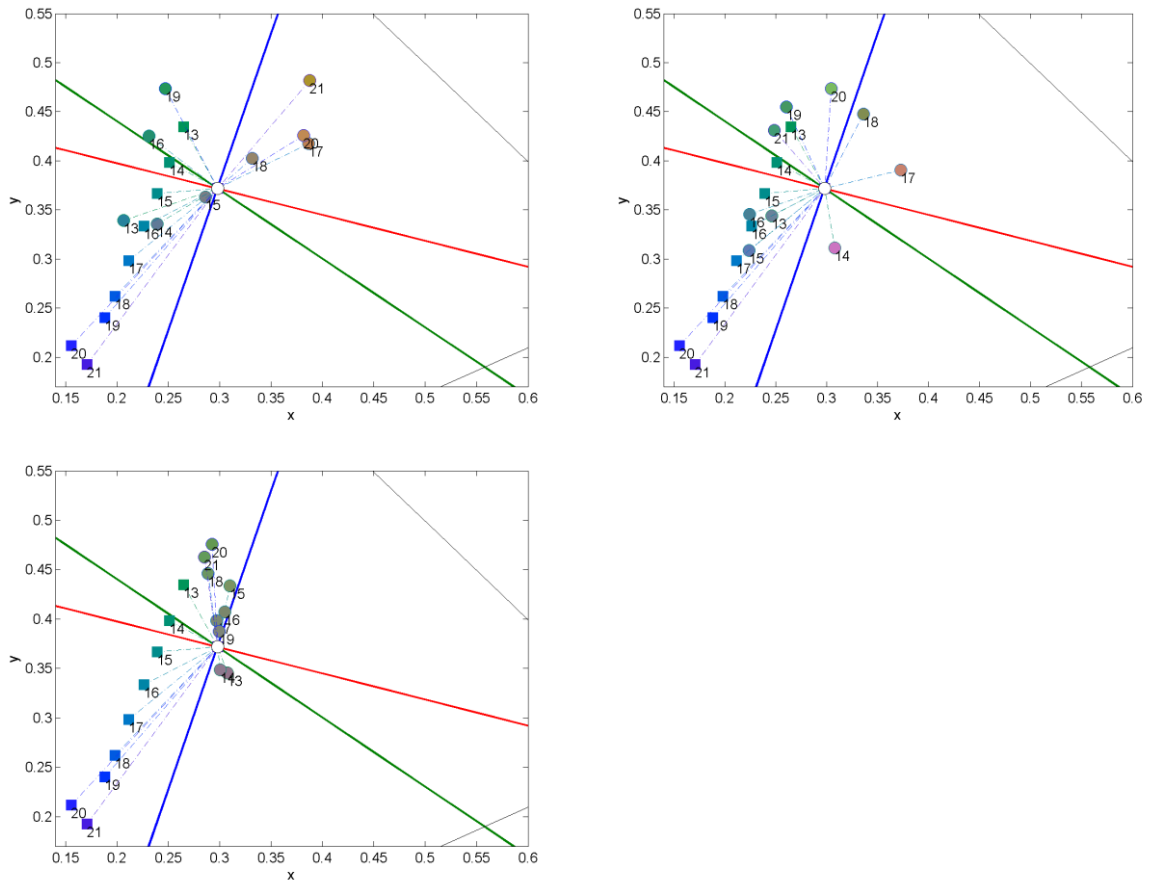
4.9.attēls. (A) Dalībnieka ELp piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 1-12 CIE x,y diagrammā. (B) Dalībnieka JEp piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 1-12 CIE x,y diagrammā. (C) Dalībnieka JRd piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 1-12 CIE x,y diagrammā.

Savukārt dalībniekam JRd pēcefektu vērtības ir vairāk izkliedētas, salīdzinot ar protanomālajiem dalībniekiem. Īpatnējs ir 5. stimula pēcefekts, jo tas attēlojas blakus stimulam. Bet 1. stimuls neizsauc pēcefektu, tas sakrīt ar centrālo punktu. Savukārt 11. un 12. stimuls veido vismazāko nolieci (skat. 4.9. attēlā).

Stimuli intervālā no 13-21

Šajā grupā stimuli, kuru lineārie pēcefekti atrodas gar *protan* konfūzijas līniju, neizsauc oponentās krāsas pēcefektu dalībniekiem ar krāsu redzes traucējumiem. Dalībnieku piekārtotie pēcefekti pie stimulu vērtībām 13 un 14 neizsauc krāsu oponenti.

Tiek apskatīts stimula 14, kas atrodas uz deutan konfūzijas līnijas, pēcefekts. Dalībnieks ELp pēcefektu noliec uz zilās krāsas pusi (skat. 4.9. attēlā). Dalībnieka JEp pēcefekta noliece ir mazāka un atrodas magnet krāsas apgabalā (skat.4.10. attēlā). Tāpat vērojama izteikta 13, 15 un 16 stimula noliece uz zilās krāsas pusi.

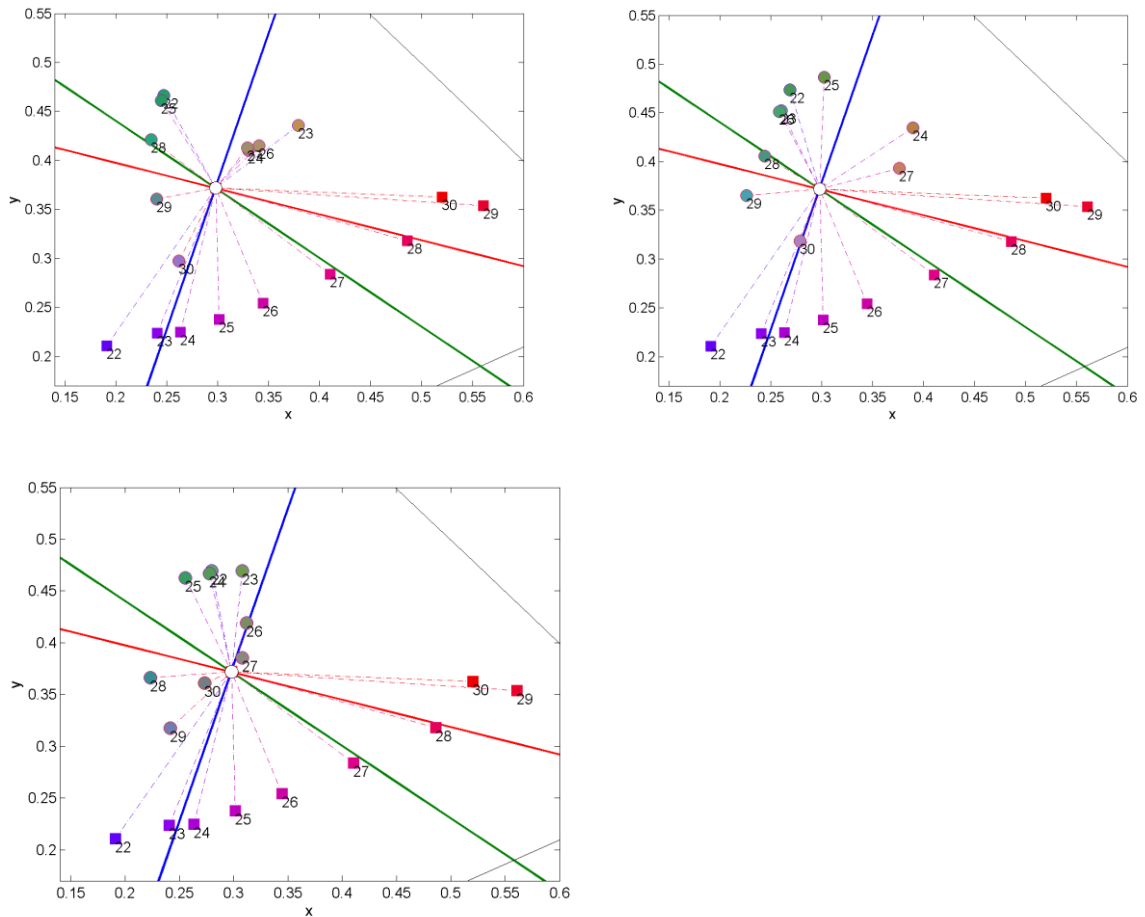


4.10.attēls. (A) Dalībnieka ELP piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 13-21 CIE x,y diagrammā. (B) Dalībnieka JEp piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 13-21 CIE x,y diagrammā. (C) Dalībnieka JRd piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 13-21 CIE x,y diagrammā.

Dalībnieka JRd pēcefekti koncentrējas ap centrālo punktu. Stimula 14 pēcefekts veido nelielu nolieci, un atrodas tuvu centrālajam punktam, pārējie pēcefekti noliecas uz zaļās krāsas pusi (skat. 4.10. attēlā).

Stimuli intervālā no 22-30

Stimuls 27, kas atrodas uz deutran konfūzijas līnijas, dalībniekam ELP rada pēcefekta nolieci uz dzeltēni zaļās krāsas pusi. Savukārt stimuls 28, kas atrodas uz protan konfūzijas līknes, veido salīdzinoši nelielu pēcefekta nolieci uz zaļās krāsas pusi. Sekojošo stimulu (29 un 30) pēcefekti veido nolieces uz zilās krāsas pusi (skat. 4.11. attēlā).



4.11. attēls. (A) Dalībnieka ELp piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 22-30 CIE x,y diagrammā. (B) Dalībnieka JEp piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 22-30 CIE x,y diagrammā. (C) Dalībnieka JRd piekārtotie pēcefekti stimula vērtībām no 22-30 CIE x,y diagrammā.

Dalībnieka JEp pēcefekts 27 noliecas uz sarkani zaļās krāsas pusi, bet pēcefekts 28 veido nelielu nolieci uz zaļās krāsas pusi (skat. 4.12. attēlā).

Dalībniekam JRd pēcefekts 27, veido nelielu nolieci uz zaļi-dzeltenās krāsas pusi un atrodas tuvu centrālajam punktam. Pēcefekts 28 veido nelielu nolieci uz zilās krāsas pusi (skat. 4.13. attēlā).

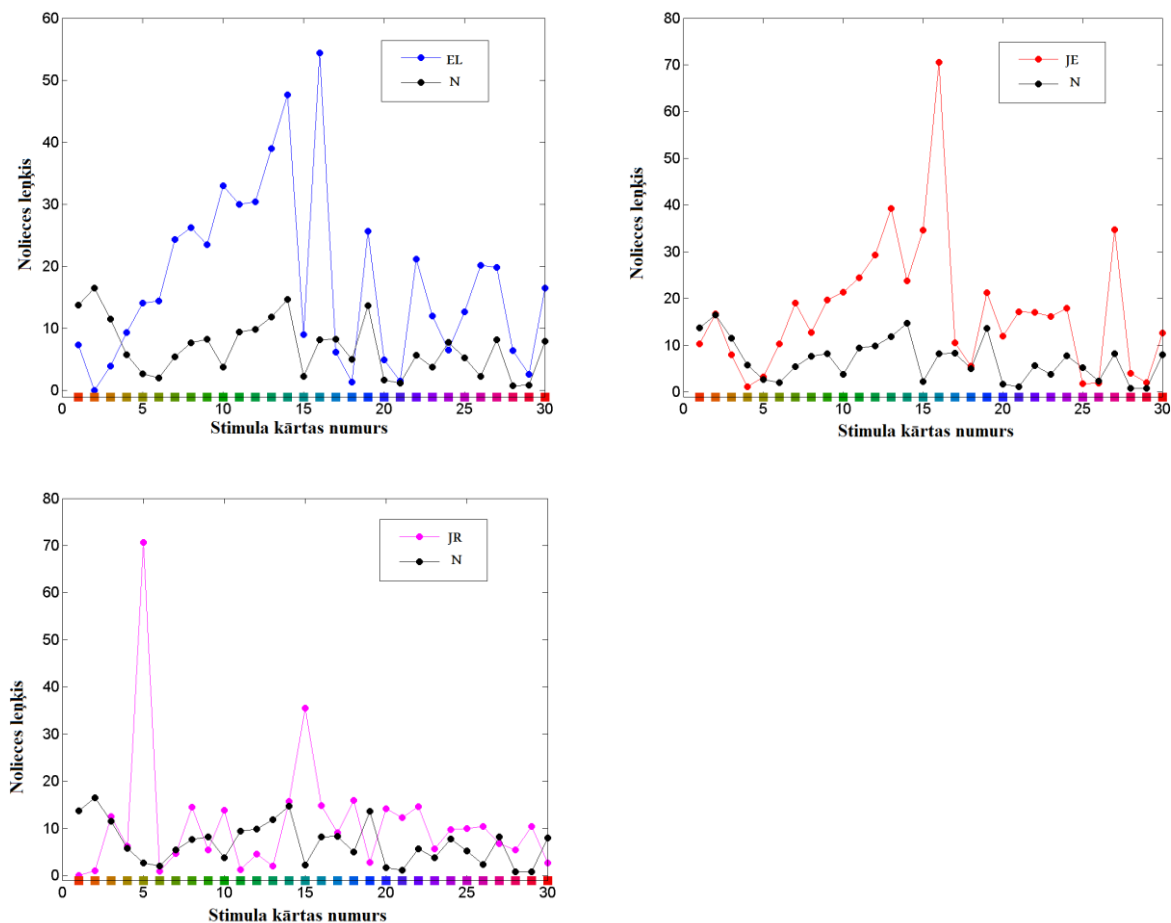
4.2.4.2. Pēcefekta nolieces leņķis CIE x,y krāsu telpā

Lai raksturotu pēcefekta radītās krāsas, izmanto nolieces leņķi. Tas raksturo pēcefekta nobīdi no oponentās krāsas. Ja pēcefekta vērtība, kas vilkta caur centrālo punktu CIE x,y telpā, atrodas lineāri pretī stimula vērtībai (180° no stimula vērtības), tad noliece ir 0° .

Pēcefekta noliece no oponentās krāsas novērota arī dalībniekam bez krāsu redzes traucējumiem. Lai izvairītos no pārpratumiem, katrā grafikā atliktas arī dalībnieka N pēcefekta leņķiskās nolieces vērtības.

Nolieces leņķis attēlots kā absolūtā vērtība, tas ir, nolieces virziens netiek raksturots.

Dalībniekiem ar sarkanās krāsu redzes traucējumiem (ELp, JEp) vislielākā pēcefekta leņķiskā noliece vērojama pie 16 stimula (zili-zaļā krāsa). Ir redzams, ka leņķis pie stimulu zaļajām vērtībām, ir ar tendenci pieaugt. Zili sarkanie stimuli izsauc mainīgu leņķisko nolieci (skat. 4.12. attēlā.)



4.12.attēls. Pēcefekta nolieces leņķis CIE x,y krāsu telpā dalībniekiem ar krāsu redzes traucējumiem (EL, JR, JE) un ar normālu trihromatisko krāsu redzi (N).

Dalībniekam JRd izteiktas leņķiskās nolieces vērojamas pie dzeltenī zaļa – 5. stimula - un zili zaļa – 15. stimula (skat. 4.12. attēlā).

4.2.5.Diskusija

Kā rāda rezultāti protanomālijas gadījumā ir redzama stipra pēcefekta krāsu nobīde salīdzinājumā ar normālu krāsu redzi. Abiem protanomāliem eksperimenta dalībniekiem vislielākās pēcefekta nobīdes ir novērojamas dzeltenī-zaļai, zaļai un zaļi-zilai krāsām. Sarkanajiem toņiem efekts nav izteikts, jeb atrodas tuvu 180 grādiem (otrajā pusē neitrālajam punktam). Zilām, violetām un rozā krāsām abi dalībnieki ar protanomāliju uzrada nevienmērīgu

(raustītu) pēcefekta leņķa nobīdi. Ir krāsas, pie kurām nobīde ir līdzīga normālai krāsu redzei un uzreiz pie nākošās krāsas, nobīde stipri atšķiras

Dalībniekam ar deitranomāliju ir novērojama pavisam savādāka aina. šajā gadījumā nobīdes lielākai daļai krāsu nav lielas izņemot stimulus ar krāsu nr.5 (dzeltena) un nr.15 (zaļi-zila), kas ir grūti izskaidrojams pamatojoties uz pigmentu jūtību (M vāļišu iztrūkums).

Spriežot pēc dihromātu uztveres simulācijām *Brettel et al* [9], kad simulētajos attēlos zaļie un sarkanie toņi tiek aizstāti ar dzelteniem un ziliem, pētījuma rezultāti parāda līdzīgu ainu. Zaļām un zaļi-zilām testa krāsām anomālijām, tiek piemeklētas krāsas no diapazona, kuru teorētiski redz cilvēki ar krāsu anomālijām vai deficītiem. Dažos gadījumos, testa krāsu pēcefektiem ir piemeklēti vai nu pelēkie toņi, vai pati krāsa līdzīgi testam. Viens negaidīts secinājums no mūsu datiem parāda, ka ne vienmēr testa krāsām, kas atrodas uz konfūzijas līknēm veidojas pēcefekti ar spēcīgu nobīdes leņķi.

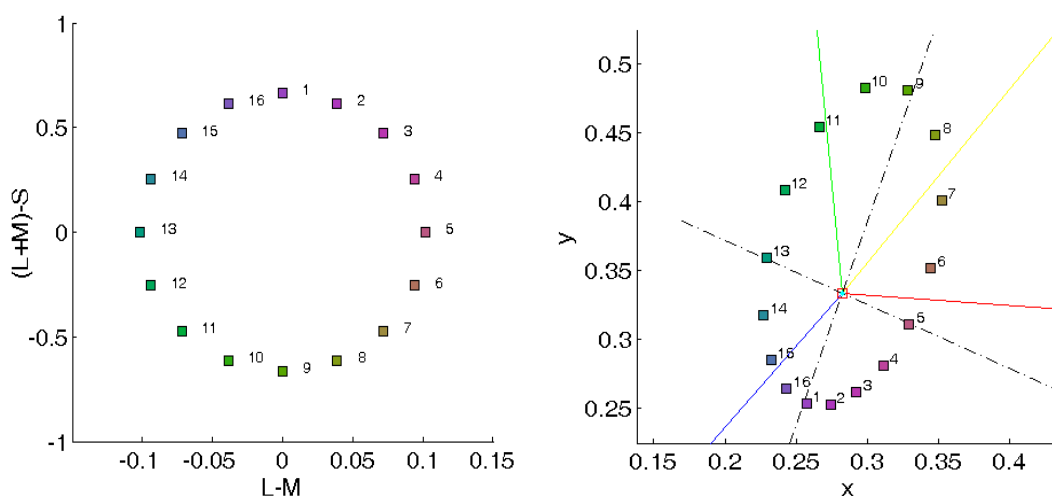
Pētījuma rezultāti atbilst priekšstatiem par dihromātu krāsu uztveri, ko apliecina pēcefektu izvietošanās zilo un dzelteni toņu virzienos anomālas krāsu redzes dalībniekiem. Izstrādātā un pētījumiem izmantota metode, var tikt pielāgota krāsu redzes deficītu diagnostikai.

4.3. Pēcefekta kontrasta mehānismi

Lai izdarītu secinājumus par pēcefektu pēc oponento mehānismu priekšstata, tika veikti papildus mērījumi ar vāļišu mehānismu telpā izvēlētām krāsām.

4.3.1. Stimuls, dalībnieki un metode

Lai spriestu par mehānismiem papildkrāsu veidošanā ar pēcefektiem tika veikti papildus mērījumi ar stimuliem, kuru krāsas tika izvēlētas no fizioloģiskās krāsu telpas (DKL). Attēlā 4.13. ir parādītas krāsas DKL telpā, kur uz x ass ir L-M vāļišu signāli un y ass apzīmē S un L+M vāļišu savstarpējo procesu. Krāsas DKL telpā tika izvēlētas ar normalizācijas parametriem 0.15 pa x asi un 0.75 pa y asi, lai iekļautos monitora gamutā. Attēlā 4.13 (pa labi) ir stimulu krāsas CIE x,y, diagrammā. Neskatoties uz to kā krāsa veido elipsi, tādas ir bieži lietojamas arī citu autoru darbos [107].



Attēls 4.13. Stimulu krāsas DKL vāļišu procesu telpā (pa kreisi) un CIE x, y diagrammā (pa labi) Melnā raustītās līnijas apzīmē DKL telpas kardinālās assis, kas attēlā pa kreisi atbilst vertikālai un horizontālai asij, kas iet cauri stimuliem 1, 9 un 5, 13.

Lai iegūt precīzas krāsas tika veikta monitora raksturošana un automatizēts aprēķins no digitālām RGB vērtībām uz kolorimetriskiem datiem [66]. Stimulu spožums tika izvēlēts 25 cd/m².

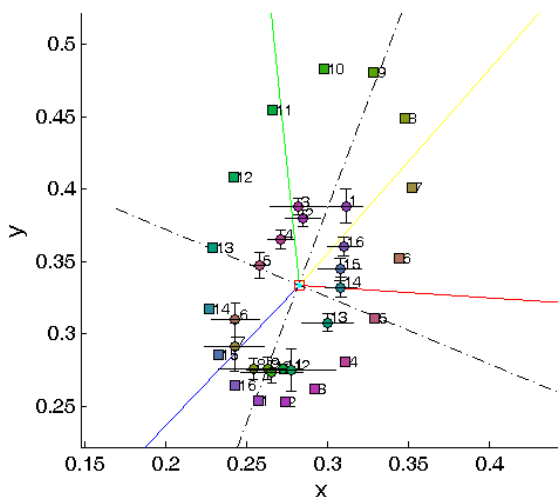
Eksperimentā piedalījās 6 personas ar normālu krāsu redzi, vecumā no 20 līdz 28 gadiem. No tiem 4 ir vīrieši un 2 sievietes dzimtas pārstāvji.

Eksperimenta uzdevums un metodika bija tādas pašas, kā iepriekš minētājās sadaļās (skat. nodaļu 4.1. un 4.2.). Ar klaviatūras pogu palīdzību, pētāmās personas piemeklēja radīta pēcefekta krāsu.

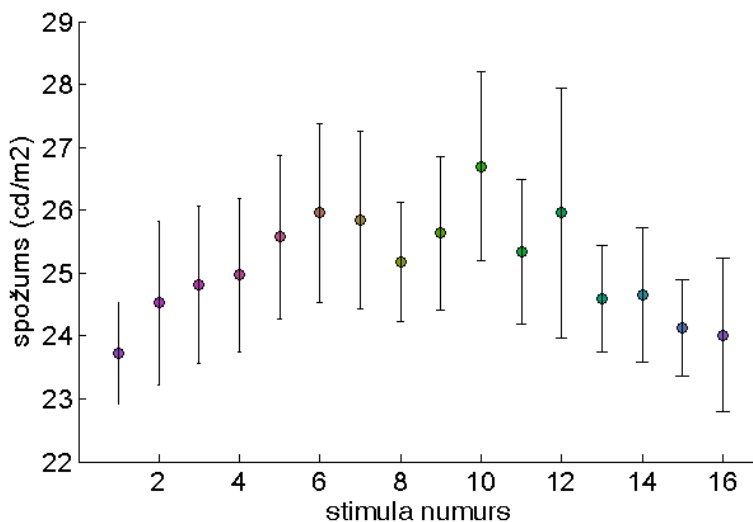
4.3.2. Rezultāti

Visu sešu personu piemeklētās papildkrāsas un parādītas attēlā 4.14. Atšķirībā no iepriekšējiem grafikiem (attēls 4.14), kur kļūdas apzīmē standartkļūdu, šoreiz izvēlējamies attēlot standarta novirzi, kas ir lielāks skaitlis. Par iemeslu tam ir liels eksperimenta atkārtotības reižu skaits, kas rezultējas pavisam mazās standartkļūdu vērtībās. Standarta novirzes parāda iegūto datu izkliedi, kas mūsaprāt, ir svarīgs rādītājs.

Pildot eksperimentu pētāmās personas parasti piemeklē arī papildkrāsu spožumu. Pateicoties tam, ka izvēlēto stimulu piesātinājums un spožums ir kontrolēti ir iespējams konstatēt, kā mainās piekārtoto papildkrāsu spožums. Attēlā 4.15. parādīts visu eksperimenta personu noteiktais spožums. Krāsas zilajā un violetajā spektra daļā rāda pēcefektu ar zemāku spožumu, nekā testa spožums. Oranžās, dzeltenas un zaļās testu krāsas rāda pēcefektu ar lielāku spožumu. Kopumā spožuma izmaiņas ir niecīgas un spriežot pēc vidējām vērtībām izmaiņas pa 1 cd/m^2 (Attēls 4.15.)



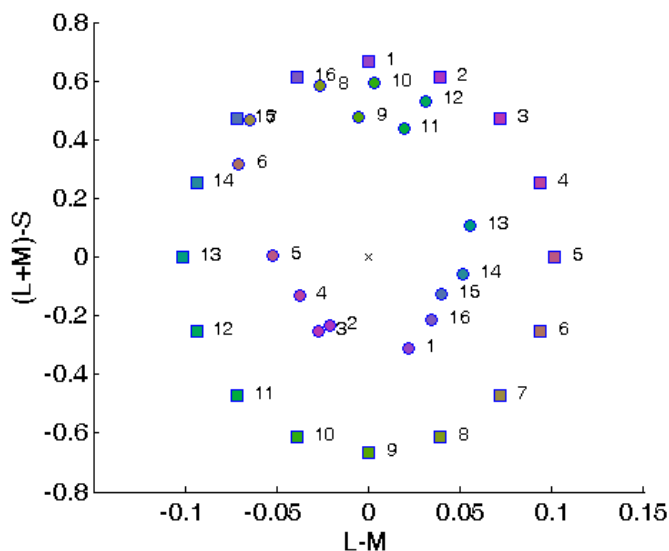
Attēls 4.14. Visu dalībnieku vidējās vērtības CIE x, y diagrammā. Kļūdu robežas apzīmē standart novirzi.



Attēls. 4.15. Spožuma izmaiņas papildkrāsā. Vidējais no visiem eksperimenta dalībniekiem. Uz x ass ir stimula krāsas un y ass piemeklētās papildkrāsas spožums.

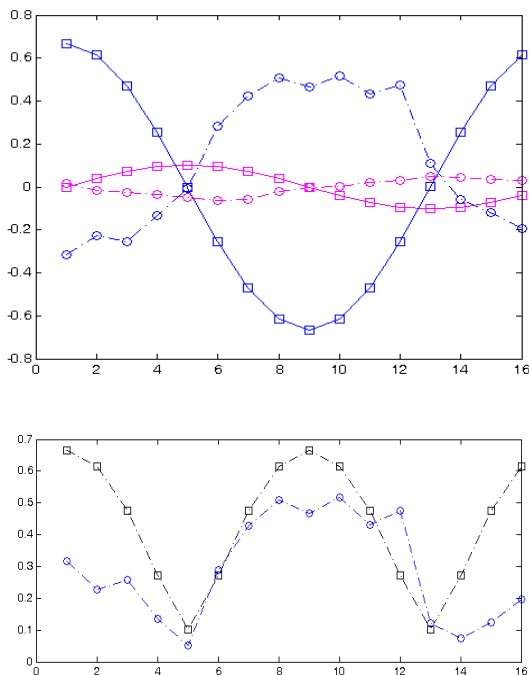
Iegūtos datus, tapāt kā stimula krāsas ir vērts atspoguļot arī vāļišu procesu telpā (DKL). Viens no labumiem ko var sniegt tāda attēlošana ir iespēja izrēķināt summāro un individuālo vāļišu kontrastus. Testa stumula krāsas DKL telpā ir izvietotas aplī, kas ļauj analizēt iegūto datu nelinearitāti. Kā arī šī telpa sniedz informāciju par krāsu informācijas apstrādes procesiem.

Attēlā 4.16. iegūtās papildkrāsu koordinātes izveido formu līdzīgu elipsei ar nobīdītu uz augšu centru. Kā redzams, stimuli nr.6,7,8 veido pēcefektus ar vislielāko piesātinājumu. Tai pašā laikā stimuli, kas ir tuvu kardinālajai zilajai asij veido pēcefektus ar vismazāko piesātinājumu.



Attēls 4.16. Testa krāsas (kvadrāti) un piemeklētās papildkrāsas (apzīmētas ar riņķiem) DKL telpā.

DKL datu attēlošana ļauj aprēķināt vāļišu kontrastu pa mehānismu plaknēm (L-M un S-(L+M)). Parasti kontrasts ir lielāks S-(L+M) mehānismā. Iegūtiem datiem tika aprēķinātas kontrasta vērtības katrā no mehānismiem (attēls 4.17. augšā) un arī summārais kontrasts (attēls 4.17 apakšā).



Attēls 4.17. Kontrasts katrā no kardinālo asu mehānismiem. (Augšā) Zilās līnijas parāda kontrasta vērtības zili-dzeltenā mehānismā. Rozā līnijas atbilst kontrastam sarkani-zaļajā

mehānismā (Apakšā) summārais krāsu mehānismu kontrasts. Līknes ar kvadrātiem apzīmē testa stimulu kontrastu un līknes ar aplīšiem parāda iegūto papildkrāsu kontrastu.

4.3.3.Diskusija

Iegūtie dati atbilst pētījuma IIIA rezultātiem, bet sniedz vērtīgu informāciju par pēcefekta mehānismiem. Parādītas pēcefektu papildkrāsas arī iepriekšējiem datiem no *Wilson et al* , 1955 [8]. Pēcefektu izveidota līkne DKL telpā saskan ar krāsu kontrasta eksperimentiem [108]. Līdzīgi, kā *Switkes* eksperimenta rezultāti rāda, kā ir nepieciešami dažāda piesātinājumi krāsainie stimuli, lai rādīt vienādi piesātinātu pēcefektu. Arī mūsu gadījumā piesātinājums ir lielāks krāsām tuvu 135 grādiem DKL telpā.

4.4.Secinājumi

1. Noteiktie pēcefekti sakrīt ar papildkrāsu pētījumiem kas veikti ar savādākām metodēm (Wilson, 1955) [8].
2. Pēcefekti personām ar krāsu redzes traucējumiem uzrāda atšķirīgus rezultātus. Metodika var tikt attīstīta krāsu redzes deficītu diagnostikai.
3. Noskaidroti pēcefekta piesātinājuma mehānismi, kas izpaužas ar nelineāro kompresiju zilo krāsu veidotiem pēcefektiem. Noteiktās nelinearitātes sakrīt ar citiem krāsu kontrasta pētījumiem fizioloģiskajā krāsu telpā (Switkes, 2008) [108].

5. KRĀSU AIZPILDĪŠANA STARP KONTŪRAM DAŽĀDĀM FORMĀM

Lai izvērtētu formas ietekmi uz pēcefekta veidošanos tika veikti kontūru aizpildīšanas eksperimenti.

5.1. Eksperimenta dalībnieki

Eksperimentā piedalījās 4 dalībnieki: 2 vīrieši un 2 sievietes. Dalībnieku vidējais vecums bija 28 gadi. Dalībnieki eksperimentā piedalījās brīvprātīgi. Visi eksperimenta dalībnieki bija bez krāsu redzes anomālijām.

5.2. Metodika un stimuli

Stimula izvēle tika diktēta ar eksperimenta vajadzībām. Labākos stimulu piemērus izdevās atrast *Van Lier* darbos, kuros ir arī aprakstīts aizpildīšanas efekts [18]. Lai nodrošināt pēcefekta krāsas maiņu atkarībā no stimula orientācijas, bija jāizvēlas stimuls, kuru var pagriezt un pārklājot vienu stimulu ar otro netiek aizklāta lielāka stimula daļa. Kā rada arī *Van Lier et al* pieredze vislabāk izmantot zvaigznei līdzīgu stimulu (attēls 5.1.). Stimulus ar četriem stūriem ir viegli pārklāt un arī pagriežot pa 45 grādiem, nenotiek to pārklāšanas. Eksperimenta nolūkiem tika izvēlēti divi tipu stimuli: stimuls ar asiem stariem un stimuls ar noapaļotām malām. (attēls 5.2.)

5.3.1. Eksperimenta uzbūve

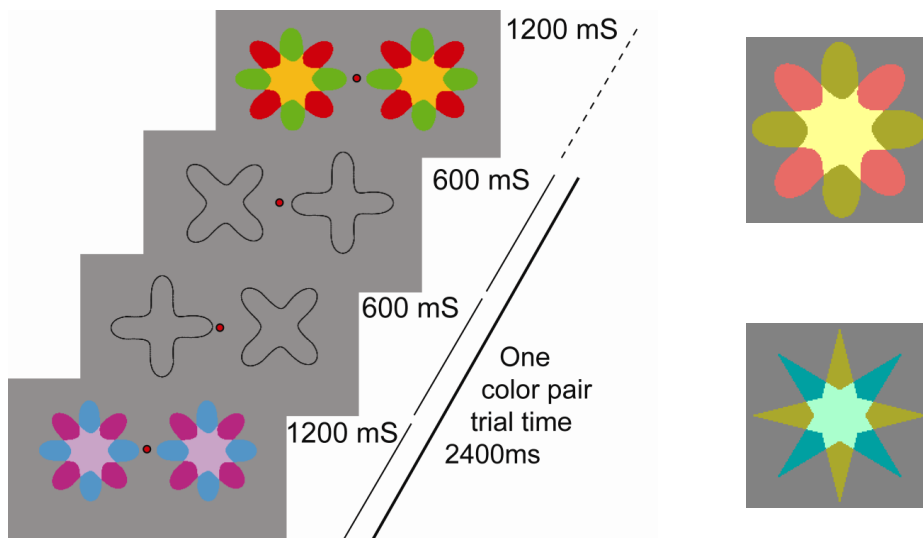
Eksperimenta stimuls sastāv no četrām zvaigznēm. Divas no figūrām ir atbilst krāsai K1 un divas citas figūras atbilst krāsai K2. Figūru pāri izvietoti uz abām pusēm no fiksācijas punkta. Figūra ar krāsu K1 ir orientēta taisnajā leņķī (stari izvietojas uz 0 un 90 grādiem) un figūra ar krāsu K2 ir izvietota slīpajā leņķī (45 un 135 grādi). Gan pa labi, gan pa kreisi figūras ar K1 un K2 ir pārklātas.

Eksperimenta laikā uz 1200 ms vienlaicīgi parādās visas četras figūras. Pēc, ka uz 600 ms kreisajā pusē parādās figūras F1 melnās kontūras (90 grādi), labajā pusē figūras F2 melnās kontūras (45 grādi). Nākošajās 600 ms kontūras labajā un kreisajā pusē mainās vietām. Veicot eksperimentu rodas sajūta, ka krāsu aizpildījumi figūrām ar K1 un K2 maina puses. Vienas figūras leņķiskais izmērs ir 1.9 grādi, un tās attālums no centra līdz ārējai figūras malai ir 2.1°. Stimuli tika demonstrēti programmā, kas izveidota *Microsoft Visual Basic 6.0* vidē.

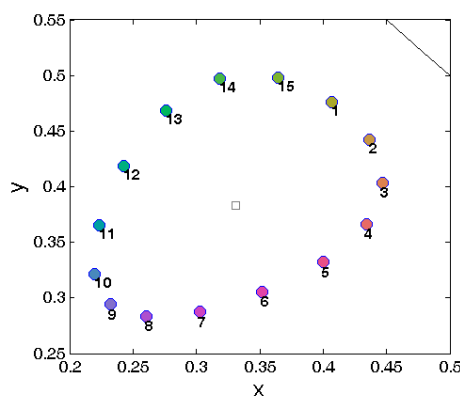
Eksperiments sastāv no sērijas, kurā krāsas K1 un K2 tiek mainītas pēc sekojoša principa, stimuls ar krāsu K1 paliek nemainīgs visas sērijas laikā. Krāsa K2 tiek mainīta no pirmās līdz piecpadsmītai un ir noteikti aizpildīšanas efektu lielumi. Kad eksperimenta dalībnieks ir sniedzis vērtējumus visām K2 stimuliem pie fiksētā K1, tiek nomainīts K1 un eksperiments turpinās tālāk. Vienā reizē tika pārbaudītas 15 reiz 15 krāsu pāru kombinācijas. Eksperimenta dalībnieki ir atkārtējuši eksperimentu 5 reizes.

Eksperimenta dalībnieks sēž pie galda, monitors noregulēts tā, lai tās būtu perpendikulārs redzes asij. Attālums no acs līdz monitoram ir 50 cm. Dalībniekam tika nodemonstrēts, kā ar pogu palīdzību iespējams mainīt stimulu krāsu (K1, K2) un novērtēt rādīta aizpildījuma stiprumu skalā no 1 līdz 10.

Stimula pelēka fona spožums atbilst vērtībai 19 cd/m^2 , kas RGB vienības ir (130,130,130), ar CIE x,y, koordinātēm $x=0.33$, $y=0.37$. Visas K1 krāsas tika izvēlētas CIELAB krāsu telpā no riņķa ar rādiusu 40 vienības un stimula krāsu koordinātes ir parādītas attēlā 5.2.



5.1. attēls. Eksperimenta stimuls krāsu pēcefekta stiprumam. Divi stimulu veidi izmantoti eksperimentā (pa labi).

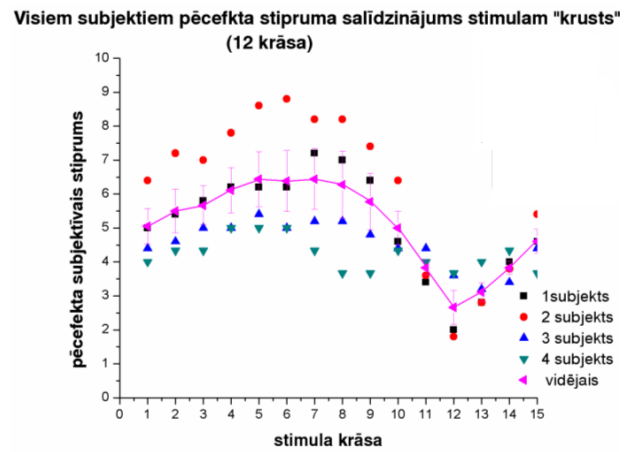
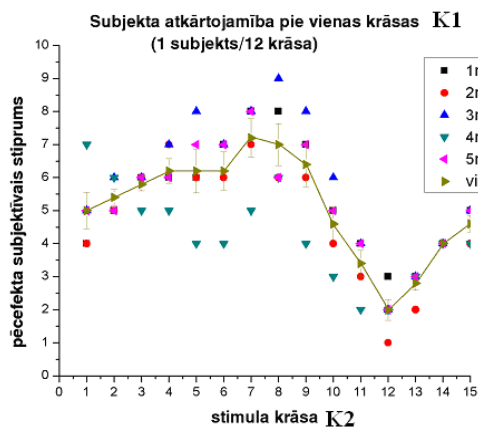


5.2. attēls. Eksperimentam izvēlētās stimulu krāsas CIE xy krāsu diagrammā.

5.4. Rezultāti

Lai analizētu mērījumu atkārtojamību, vienam eksperimenta dalībniekam mērījums tika atkārtots 5 reizes.

Attēlā 5.3 (pa kreisi), parādīti rezultāti 1 dalībniekam 5 reizes atkārtojot mērījumus pie $K1=12$. Atkārtotie mērījumi parādīti ar dažādiem marķieriem. Nepārtrauktā līnija parāda mērījumu vidējo vērtību.

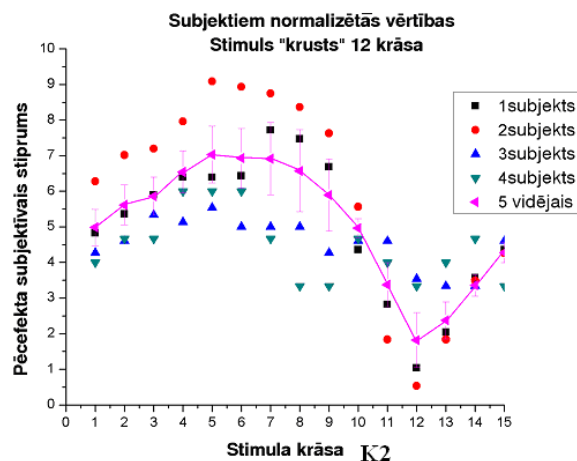


5.3. attēls. (A)Piecu mērījumu rezultāti vienam eksperimenta dalībniekam. $K1 = 12$. Nepārtrauktā līnija parāda vidējo vērtību. **(B)**Visiem dalībniekiem novērtētas pēcefekta vērtības vienai stimula krāsai. $K1 = 12$ Dažādie simboli attēlo 4 dažādu eksperimenta dalībnieku atbildes. Violetā nepārtrauktā līnija parāda vidējo vērtību.

Visiem dalībniekiem pieskaņotas pēcefekta vērtības vienai stimula krāsai. Attēlā 5.3 (pa labi) ir redzams eksperimentāli noteiktais pēcefekta stiprums vienai krāsai $K1$ atkarībā no stimula krāsas toņa kombinācijas mainot krāsas $K2$ vērtības. Uz horizontālas (x) ass - stimula krāsas $K2$ attēlojums. Uz vertikālās ass (y) ir novērtētais pēcefekta stiprums. Katra eksperimenta dalībnieka rezultāti attēloti ar dažādu marķieri.

Lai apskatītu pēcefekta novērtētās atbildes savstarpējo sakarību starp visiem dalībniekiem, tiek ņemtas normalizētas vērtības. Attēla 5.4 ir redzamas visiem dalībniekiem novērtētās pēcefekta vērtības vienai stimula krāsai. Uz (x) ass – $K2$ stimula krāsas, uz (y) ass katra dalībnieka vērtējums dotajam $K1$ krāsas stimulam. Katra eksperimenta dalībnieka rezultāti attēloti ar dažādu marķieri. Violetā nepārtrauktā līnija parāda mērījumu vidējo vērtību.

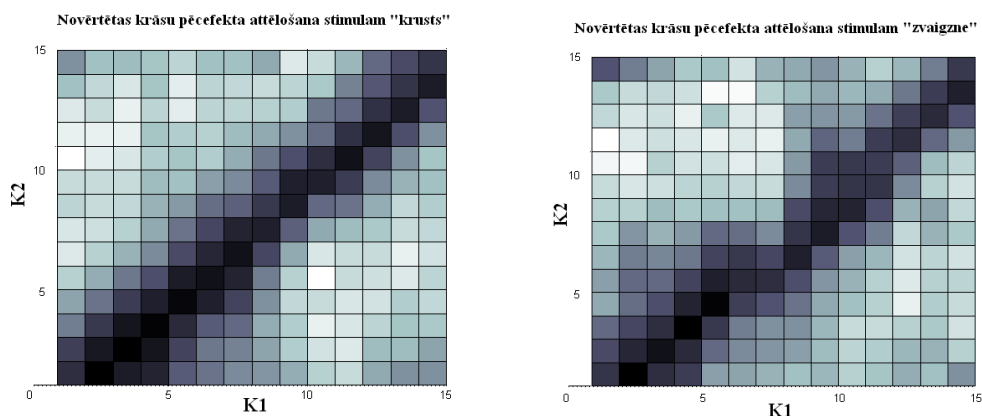
Normalizācija tika veikta sekojošā veidā: katram dalībniekam katrā no sērijām maksimālajai atbildei tika piekārtota vērtība 10.



5.4 attēls. Dalībniekiem normalizētās pēcefekta stipruma vērtības. Katra eksperimenta dalībnieka rezultāti attēloti ar dažādu marķieri. $K1 = 12$. Nepārtrauktā līnija parāda mērījumu vidējo vērtību. Uz horizontālas (x) ass - stimula krāsas attēlojums. Uz vertikālās ass (y) ir attēlots novērtētais pēcefekta stiprums.

5.4.1. Divdimensionālā datu attēlošana

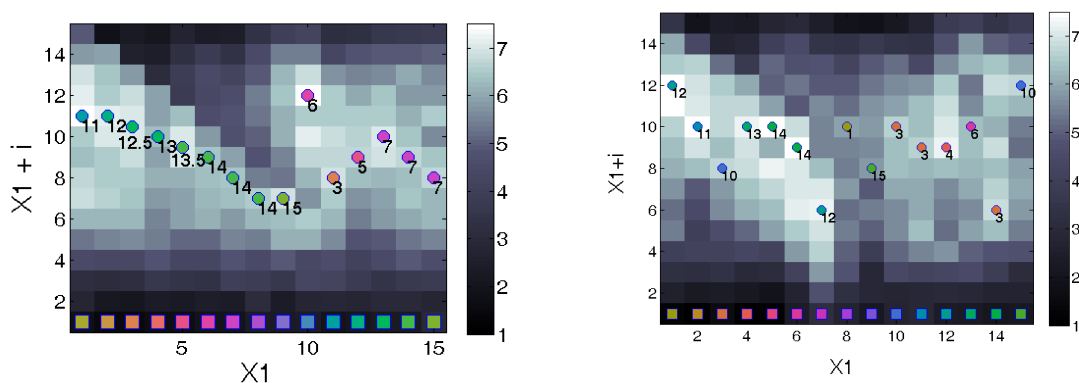
Attēlā 5.5 tiek redzamas, pie katras krāsu kombinācijas noteiktais pēcefekta stiprums, visiem dalībniekiem. Tas tiek iegūtas, summējot visiem eksperimenta dalībniekiem normalizētās vidējās vērtības. K1 un K2 ir piecpadsmit krāsas, kas tiek kombinētas eksperimentā, kopā sastadot 15x15, jeb 225 krāsu pārus. Tos ir iespējams attēlot divās dimensijās kā virsmu, kurā gaišās vietas atbilst spēcīgākam pēcefekta novērtējumam un tumšākas apraksta vājākus novērtējumus.



5.5. attēls. Katra krāsu pāra pēcefekta rādītais stiprums summētais pa visiem dalībniekiem pie stimula „Krusts”. Katra krāsu pāra rādītais pēcefekta stiprums summētais pa visiem dalībniekiem pie stimula „Zvaigzne”

Attēlā 5.6. tiek parādītas stimulam „zvaigzne” un „krusts” normalizētās, pārveidotās pēcefekta vērtības.

Pārveidotās stimulu vērtības, tiek iegūtas, veicot atbilžu nobīdi, kur K1 ir pirmā stimula krāsa, K2 ir otra stimula krāsa (kopā tie veido krāsu kombināciju), i mainās no 0 līdz 14. Pārveidojot vertikālo skalu no krāsu stimula uz, t.s. Δ krāsu stimulu, rezultātā, izveidojas vairāk izteiktākas, t.s. „mākoņu” spēcīgās pēcefekta vietas. Attēlā 5.6. uz (x) ass – 1. stimula krāsas attēlojums (K1), uz (y) ass- Δ stimula krāsa (K1+i) – nākošais krāsas numurs no pirmās stimula krāsas (K1).



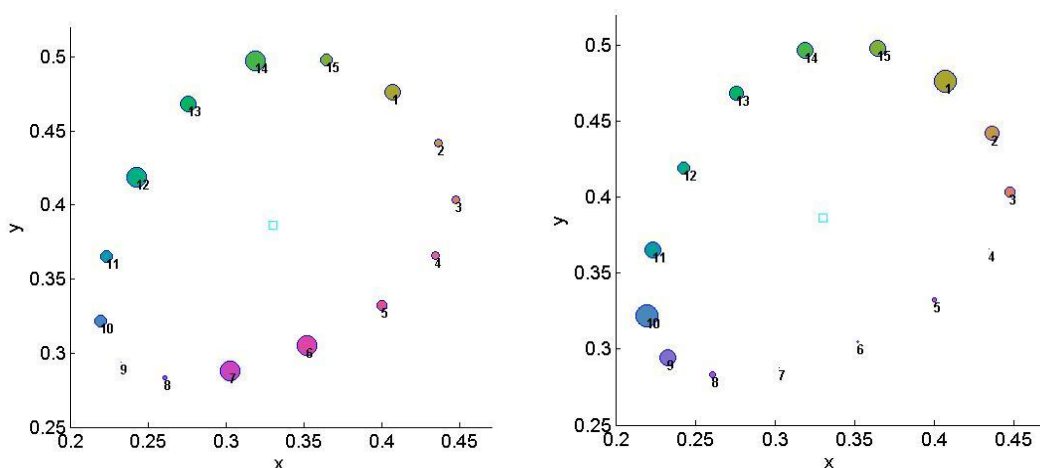
Attēls 5.6. Visiem dalībniekiem pārveidotās vērtības stimulam ”zvaigzne”, uz x ass stimula krāsa (K2), uz y ass Δ stimula krāsa (K1+i). Visiem dalībniekiem pārveidotās vērtības stimulam ”krusts”, uz x ass stimula krāsa (K2), uz y ass Δ stimula krāsa (K1+i).

5.4.2. Rezultāti CIE xy krāsu koordinātēs

Attēlā 5.7. ir attēlots kopējais summētais dažādu stimula krāsu novērtētais pēcefekta lielums PS_K stimulam „zvaigzne” CIE xy krāsu telpas koordinātēs. Tas ir iegūts sasummējot visas normalizētās atbildes (PS) novērtētas katrai vērtībai K_1 , mainot pēc otrās krāsas K_2 .

$$PS_K = \sum_{i=1}^{15} PS_{K_i} \quad (\text{Vienādojums 15})$$

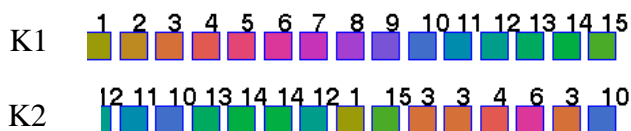
Kvadrāts centrā parāda monitora baltā punkta atrašanos CIE x,y krāsu diagrammā. Riņķīšu lielums parāda krāsas, kurām pēc vienādojuma 15 ir lielākas vērtības.



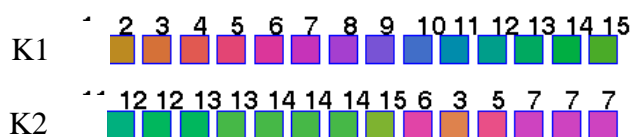
5.7. attēls. Stimulu krāsu pēcefekta lielums (PS) stimulam „zvaigzne”. Stimulu krāsu pēcefekta lielums (PS) stimulam „Krusts”.

5.4.3. Pēcefekta maksimālo lielumu salīdzinājums starp stimuliem

Attēlos 5.8. un 5.9. parādītas katram stimulam attiecīgais krāsu pāris, kas veido maksimāli novērtētu pēcefekta lielumu. Abu attēlu augšējā rindā parādīta 1. stimula krāsa (K_1). Apakšējā rindā tiek uzrādītas 2.stimula krāsa (K_2) kombinētā ar K_1 , kas dod vislielāko pēcefekta stiprumu.



5.8.attēls. Stimuls “Zvaigzne,,”. Krāsas, kas veido maksimālas atbildes.



5.9. attēls. Stimuls “Krusts”. Krāsas, kas veido maksimālas atbildes.

5.5.Diskusija

Salīdzinājumā ar iepriekšējo pētījumu, dotajā eksperimentā ir izmantots sarežģītāks stimuluss, kas veido aizpildījuma fenomenu. Aizpildījums ir saistīts ar garozas procesiem un eksperimentā izmantots stimula laiks (1200 ms) ir nepietiekams lai veicināt pigmenta izbalināšanos tīklenē [18]. *Capilla* darbos ir parādīta fizioloģisko krāsu telpu atbilstība apstrādes posmiem [109]. Oponento procesu mehānismu telpa atbilst LCK krāsu informācijas apstrādes līmenim. Galīgo cilvēka krāsu sajūtu parasti mēra ar krāsu mērogošana (*hue scaling*) paņēmieni, un pētījuma rezultāts ir zināms kā 'unikālās' un fokālās krāsas [107, 16]. Bet hromatiskās informācijas apstrādes mehānismu identificēšana ir apgrūtināta, neskatoties uz V1 zonas neironu hromatiskas jutības elektrofizioloģiskiem pētījumiem, kam par pamatu ir neizteikta V1 neironu hromatiskas jutības diferenciacija [110]. Pirms dažiem gadiem V4 zonā tika identificētas *glob* šūnas, kuras tika izvirzītas kā jutīgas uz unikālām krāsām [111]. Neskatoties uz šādu veiksmi, *Stoughton et al* [111] darbi tika pakļauti kritikai no citu krāsu redzes pētnieku puses, par nekompetento krāsu izvēli [112]. Sava eksperimentā mēs centījāmies izmantot stimulu, kas atbilstu receptīvajiem laukiem V4 zonā n arī būtu piemērots aizpildījuma novērošanai. Stiprāko aizpildījumu dati apaļajam stimulam ir saistīti ar zaļo (nr.14) un violeto krāsām (nr.7). Mūsu iepriekšējā eksperimentā (nodaļa 4.3.) pēcefekta radītām papildkrāsām ir tendence noliekties arī šo krāsu virzienā. Aizpildījuma eksperimentā ir noteikti krāsu pāri, kas veido stiprumu aizpildījuma efektu, nebūšot papildkrāsas.

Galvenais secinājums, kas izriet no dotā pētījuma ir: aizpildījuma stiprums atšķiras stimuliem ar apaļiem un asiem stūriem, kas rāda, ka stimula formu kodējošiem elementiem redzes garozā ir atšķirīgas hromatiskas īpašības.

5.6.Secinājumi

1. Kontūru aizpildījuma eksperimentos objekta forma iespaido uz aizpildījuma stiprumu.
2. Parādīts, ka eksistē noteiktas krāsu kombinācijas, kas veido stipru aizpildījumu arī ar tādām krāsām, kas nav papildkrāsas.

Apaļas formas stimuliem ir atrasti divi virzieni, kas sakrīt ar pēcefekta pētījumos izteiktiem virzieniem, kas neatbilst unikālo toņu vai pamata asu virzieniem (nod. 4.3.).

AIZSTĀVAMĀS TĒZES

1. Tekstūru atpazīšanas treniņos ir parādīts, ka uzdevuma izpildīšanas sliekšnis uzlabojas aptuveni divas reizes. Mūsu piedāvātā metode kopā ar šķidro kristālu brillēm (P1) ir izmantojama ambliopās acs redzes funkciju uzlabošanā. Noteikts, ka apkārtnes iespaids uz tekstūru atpazīšanu izpaužas galvenokārt kolineāri orientēto stimulu gadījumā (P2).
2. Izstrādāta objektīva metode krāsu redzes testu atbilstībai diagnostiskiem nolūkiem. Tā ļauj novērtēt apgaismojuma iespaidu uz testa rezultātiem un ir izmantojama esošo krāsu testu pārbaudei un jaunu testu izveidei (kt11).
3. Izveidota metode krāsu pēcefekta noteikšanai (kt7). Metodi ir iespējams izmantot krāsu redzes deficītu un anomāliju diagnostikai.
4. Parādīts, ka eksperimentos ar kontūru aizpildījumu objekta forma iespaido aizpildījuma parametrus. Noteiktas tādas krāsu kombinācijas, kas veido stipru aizpildījumu arī ar krāsām, kas nav papildkrāsas (P3).

Literatūras saraksts

1. Polat, U., Mizobe, K., Pettet, M.W., Kasamatsu, T., Norcia, A.M. (1998). Collinear stimuli regulate visual responses depending on cell's contrast threshold. *Nature*, VOL 391, 580-584.
2. Li, Z. (1999). Primary visual cortex as a saliency network for pre-attentive segmentation. *In: 3rd Annual Vision Research Conference Pre-attentive and Attentive Mechanisms in Vision*, Florida, USA, May 7-8
3. Tucker, T.R., Fitzpatrick, D. (2004) Contribution of vertical and horizontal circuits to the response properties of neurons in primary visual cortex. Chalupa, L. M., Werner, J. S. *The visual neurosciences*. Vol. 2. Cambridge, Massachusetts, London, England: A Bradford Book The MIT Press
4. Wright, W.K. *Pediatric ophthalmology and strabismus*, Mosby, 1955, pp.45-57
5. Rushton, W.A.H., Henry, G.H. Bleaching and regeneration of cone pigments in man. *Vision Res*, 8(6), June 1968, Pages 617-631
6. Loomis, J. M, "The photopigment bleaching hypothesis of complementary afterimages: A psychophysical test, " *Vision Res*. 12, 1587-1594 (1972)
7. Shevell SK, St Clair R, Hong SW. Misbinding of color to form in afterimages. *Vis Neurosci* 2008; 25(3):355-60.
8. Wilson, M. H., Brocklebank, R. W. (1955). Complementary Hues of After-Images," *J. Opt. Soc. Am.* 45, 293-299.
9. Brettel, H., Viénot, F., Mollon, J.D. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *J. Opt. Soc. Am. A* 14, 2647-2655.
10. Capilla, P., Díez-Ajenjo, M.A., Luque, M.J., Malo, J. (2004). Corresponding-pair procedure: a new approach to simulation of dichromatic color perception. *J. Opt. Soc. Am. A* 21, 176-186
11. Derrington, A.M, Krauskopf, J., Lennie, P (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *J. Physiol.*, 357, pp. 241-265.
12. Krauskopf, J., Williams, D.R., Heeley, D.W.(1982). Cardinal directions of color space. *Vision Res* 22(9), 1123-31.
13. Pridmore, R.W. (1999). Bezold-Brucke hue shift as functions of luminance level, luminance ratio, interstimulus interval and adapting white for aperture and object colors. *Vision Research*, 39, 3873-3891.
14. Wuerger SM, Atkinson P, Cropper S.(2005). The cone inputs to the unique-hue mechanisms. *Vision Res*. Nov; 45(25-26):3210-23.
15. Philipona, D. L., O'Regan, J. K. (2006). Color naming, unique hues, and hue cancellation predicted from singularities in reflection properties *Visual Neuroscience*, 23:331-339
16. Miyahara, E. (2003). Focal colors and unique hues. *Percept Mot Skills*. 97(3 Pt 2): 1038-1042.

17. Komatsu, H. (2006). The neural mechanisms of perceptual filling-in. *Nature Reviews Neuroscience* 7, 220-231. Doi: 10.1038/nrn1869.
18. Van Lier, R., Vergeer, M., Anstis, S. (2009). Filling-in afterimage colors between the lines. *Current Biology*, 19(8), R323-R324.
19. Felleman, DJ, Van Essen, DC .(1991). Distributed hierarchical processing in primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex* 1:1-47.
20. Underleider LG, Mishkin M. (1982). Two cortical visual systems. *Analysis of Visual Behavior*, eds Ingle MA, Goodale MI, Masfield RJW (MIT Press, Cambridge, MA), pp 549–586.
21. David, S.V., Hayden, B.Y., Gallant, J.L.(2006). Spectral Receptive Field Properties Explain Shape Selectivity in Area V4. *Neurophysiol.* 96:, pp. 3492–3505.
22. Pasupaty, A., Connor, C.(2001). Shape Representation in Area V4: Position-Specific Tuning for Boundary Conformation. *Neurophysiol.* Vol 86, 2001, pp.2505-2519.
23. Cadieu, C., Kouh, M, Pasupathy, A., Connor, C.E. (2007). Maximilian Riesenhuber, and Poggio Tomaso. A Model of V4 Shape Selectivity and Invariance. *Neurophysiol* Vol 98: pp. 1733–1750,
24. Calloway, E. *Cell types and local circuits in primary visual cortex of the macaque monkey*. L.M.Chalupa, J.S. Werner. *The visual neurosciences*. Vol. 2. A Bradford Book MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, Engand, 2004. lpp.681-694.
25. Calkin, D.J. *Linking retinal circuits to color opponency*. Chalupa, L. M., Werner, J. S. *The Visual Neuroscience*. United States of America: Masachusetts Institute of Technology, 2004, pp. 989- 1003.
26. Berns, R. S.(2000) *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. Third edition. John Wiley & Sons.
27. Zigmond, M. J., Bloom, F. E., Landis, S. C., Roberts, J. L., Squire, L. R.(1999).*Fundamental Neuroscience*. United States of America: Academic Press, 1999,pp. 821- 835.
28. Hart, W.M. *Adler's physiology on the eye. Clinical application. 9th Edition*. St.Louis, Mosby Year Book, lpp.728-755.
29. Mullen, K.T., Dumoulin, S. O., and Hess, R. F.(2008). Color responses of the human lateral geniculate nucleus: selective amplification of S-cone signals between the lateral geniculate nucleno and primary visual cortex measured with high-field fMRI. *European Journal of Neuroscience*, Vol. 28, pp. 1911- 1923.
30. Hubel, D. H., Wiesel, T. N. *Brain and Visual Perception.The Story of a 25- Year Collaboration*. New York: Oxford University Press, 2005, pp.196-232.
31. Van Essen, D.C., Anderson, C.H. *Information Processing Strategies and Pathways in the Primate Visual System*. In: *An Introduction to Neural and Electronic Networks*, 2nd ed. Zornetzer et al., Academic Press, 1995, pp. 45-7

32. Callaway, E.M.(1998). Local circuits in primary visual cortex of the macaque monkey. *Annu. Rev. Neurosci.*, 21, lpp.47–74.
33. Livingstone MS, Hubel DH. Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement and depth. *J Neurosci.* 1987; 11: 3416–68.
34. McMahan, M.J., Lankheet, M., Lennie, P., Williams, D.(2000). Fine Structure of Parvocellular Receptive Fields in the Primate Fovea Revealed by Laser Interferometry. *The Journal of Neuroscience*, 20, 5, lpp.2043–2053.
35. Hubel, D. H. (1963). *The visual cortex of the brain*. Scientific American, 209(5), 54-62.
36. Kaplan, E.(1991). The receptive field structure of the ganglion cells in cat and monkey. In: *The neural basis of visual function. Vision and Visual Dysfunction. Vol. 4* A.G.Leventhal. The MacMillan Press Ltd. Manchester.lpp.10-40.
37. Rodieck, RW (1965). Quantitative analysis of cat retinal ganglion cell response to visual stimuli. *Vision Res*: 583-601
38. Cai, D., Deangelis, G., Freeman, R. (1997). Spatiotemporal Receptive Field Organization in the Lateral Geniculate Nucleus of Cats and Kittens. In:*The American Physiological Society*, 0022-3077.
39. Webb, B.S., Tinsley, C.J., Barraclough, N.E., Easton, A., Parker, A., Derrington, A.M.(2002). Feedback from V1 and inhibition from beyond the classical receptive field modulates the responses of neurones in the primate lateral geniculate nucleus. *Visual Neuroscience*, 19, lpp.583-592.
40. Serre, T., Riesenhuber, M.(2004). Realistic Model of Simple and Complex cell Tuning in the HMAX Model, and Invariant Object Recognition in Cortex. *AI Memo*, 017, CBCL Memo 239.
41. Hubel, D.H.(1981). Evolution of ideas on the primary visual cortex, 1955-1978: A biased historical account. Nobel lecture, 8 December, Harvard Medical School, Department of Neurobiology, Boston, Massachusetts, U.S.A.
42. Ito, M., Komatsu, H.(2004). Representation of Angles Embedded within Contour Stimuli in Area V2 of Macaque Monkeys. *J. Neurosci.*, March 31, 2004 • 24(13):3313–3324.
43. Hegde, J., Van Essen, D.C.(2003). Strategies of shape representation in macaque visual area V2. *Visual Neuroscience*, 20, 313–328.
44. Hegde, J., Van Essen, D.C.(2004). Temporal Dynamics of Shape Analysis in Macaque Visual Area V2. *J Neurophysiol* 92: 3030–3042.
45. Pasupathy, A. Connor, C. E.(1999). Responses to contour features in macaque area V4. *J. Neurophysiol.* 82: 2490-2502.
46. Pasupathy, A., Connor, C.E. (2001). Shape representation in area V4: Position-specific tuning for boundary conformation. *J. Neurophysiol.* 86: 2505-2519.
47. Pasupathy, A., Connor, C.E. (2002). Population coding of shape in area V4. *Nat. Neurosci.* 5: 1332-1338, News and Views, 1252-1254.

48. Cadieu, C., Kouh, M., Pasupathy, A., Connor, C. E., Reisenhuber, M., Poggio, T.(2007). A model of V4 shape selectivity and invariance. *J. Neurophysiol.* 98(3):1733-1750.
49. Connor C.E.(2004) Shape Dimensions and Object Primitives. The Visual Neurisciences. Vol.2.Chalupa, L. M., & Werner, J. S. Cambridge (MA), London: A Bradford Book (the MIT Press). lpp. 1080 – 1089.
50. Tanaka K.(2004). Inferotemporal Response Properties. The Visual Neurisciences. Vol.2.Chalupa, L. M., & Werner, J. S. Cambridge (MA), London: A Bradford Book (the MIT Press). lpp. 1080 – 1089.
51. Kiani R, Esteky H, Mirpour K, Tanaka K.(2007). Object category structure in response patterns of neuronal population in monkey inferior temporal cortex. *J Neurophysiol* 97: 4296–4309, doi:10.1152/jn.00024.2007.
52. Tanaka, K. (2003).Columns for Complex Visual Object Features in the Inferotemporal Cortex: Clustering of Cells with Similar but Slightly Different Stimulus Selectivities. *Cerebral Cortex*, Vol. 13, No. 1, 90-99.
53. Heinrich, S.P., Andrés, M., Bach, M.(2007) Attention and visual texture segregation, *Journal of vision* – Vol.7 (6), pp. 1-10.
54. Palmer, S.E. *Vision science, Photons to phenomenology*, - London, A Bradford Book, The MIT Press, 1999, p. 810.
55. Kashi, R., Papathomas, T.V., Julesz, B.(2002). Psychophysics and modelling of texture segregation. pp.465-486.Models of the visual system. G.K.Hung, K.J.Cuiffreda. Kluwer academic, New York .
56. Breitmeyer, B.G., Ogmen, H. (2007). Visual masking, *Scholarpedia* – Vol.2(7), pp.3330,
57. Davson, H. *Physiology of the Eye*. Fourth edition. 1980. pp.187-195, 327-381.
58. Knoblauch, K., Shevell, S.K.(2004). *Color appearance*. Chalupa, L. M., Werner, J. S. The Visual Neuroscience. Vol. 2. A Bradford Book MIT Press. Cambridge, Massachusetts, London, Engand, pp.892- 907
59. Shevell, S. K.(2003) *The Science of color*. Second edition. Elsevier, p. 350.
60. Hunt, R. W. G.(1991). *Measuring colour*. Second edition, Great Britain: Ellis Horwood Limited, p. 313.
61. Forrester, J. V., Dick, A. D., McMenamain, P., Lee, W. R.(1996). *The Eye Basic Sciences in Practice*. London: W. B. Saunders Company Ltd, pp. 200- 219.
62. Stockman, A., Sharpe, L.T., Merbs, S. and Nathans, J. (2000) Spectral sensitivities of human cone visual pigments determined *in vivo* and *in vitro*. In: K. Palczewski (Ed), Vertebrate phototransduction and the visual cycle, Part B. *Methods in Enzymology*, Vol. 316, pp. 626-650. Vol. 316. Academic Press, New York.
63. Smith, V.C., Pokorny, J.(1996) The design and use of a cone chromaticity space. *Color Research and Application*, 21: 375-383.

64. Boynton, R.M.(1986). A system of photometry and colorimetry based on cone excitations. *Color Research and Application*, 11, pp. 244-252.
65. MacLeod, D.I.A., and Boynton, R.M. (1979).Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *J. Opt. Soc. Am.*69, 1183–1186.
66. Golz, J., and MacLeod, D.I.A. (2003).Colorimetry for CRT displays. *J. Opt. Soc. Am. A* 20, 769–781.
67. Brainard, D. H. (1996). Cone contrast and opponent modulation color spaces. *Human Color Vision*, P. K.Kaiser, and R. M. Boynton, eds., Optical Society of America, Washington, D.C., 1996, pp. 563–579.
68. Derrington, A.M, Krauskopf,J., Lennie,P (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *J. Physiol.*, 357, pp. 241-265.
69. Brainard, D. H. & Stockman, A. (2010). Colorimetry. In the OSA Handbook of Optics (3rd edition, M. Bass, ed). McGraw-Hill, New York, pp. 10.1-10.56
70. Hurvich LM, Jameson D (1957) An opponent-process theory of color vision. *Psychol Rev* 64: 384-404.
71. Sakurai M., Mullen, K.T. (2006). Cone weights for two cone- opponent systems in peripheral vision and asymmetries of cone contrast sensitivity. *Vision Research*, Vol. 46, pp. 4346- 4354
72. Pridmore, R.W. (1999). Unique and binary hues as functions of luminance and illuminant color temperature, and relations with invariant hues. *Vision Research*, 39, 3892-3908.
73. Pridmore, R.W. (1999). Bezold-Brucke hue shift as functions of luminance level, luminance ratio, interstimulus interval and adapting white for aperture and object colors. *Vision Research*, 39, 3873-3891.
74. Wuerger SM, Atkinson P, Cropper S.(2005).The cone inputs to the unique-hue mechanisms.*Vision Res.* Nov; 45(25-26):3210-23.
75. D. L., Philipona, J. K. O'Regan.(2006). Color naming, unique hues, and hue cancellation predicted from singularities in reflection properties *Visual Neuroscience*, 23:331-339
76. Schwarz, S. H.(2004). *Visual Perception: A Clinical Orientation. Third Edition*. United States of America: The McGraw-Hill, 471.pp.
77. Birch, J.(2001) [Diagnosis of defective color vision. Second edition], Butterworth-Heinemann, Edinburg.
78. Pelli, D.G., Farell, B. (2010). *Psychophysical methods*. In M. Bass, C. DeCusatis. J. Enoch, V. Lakshmitlarayanan. G. U, C. MacDonald, V.Ma hajan & E. V. Stryland (Eds.), Handbook 01 Optics. Third Edition, Volume III: Vision and Vision Optics (w. 3. 1-3. 12). New York: McGraw Hill.
79. Karni, A., Sagi, D. (1991). Where practice makes perfect in texture discrimination: Evidence for primary visual cortex, *Neurobiology* – Vol.(88), pp.4966-4970.

80. Scialfa, C.T., Hamaluk E. (2001). Aging, Texture Segmentation, and Exposure Duration: Evidence for a Deficit In Preattentive Processing. *Experimental Aging Research*, 27, 123-135
81. Cuifredda KJ, Levi DM, Selenow A. Amblyopia: Basic and clinical aspects. Boston: Butterworth-Heinemann; 1991.
82. BenEzra O, Herzog R, Cohen E, Karshai I, BenEzra D. Liquid crystal glasses: feasibility and safety of a new modality for treating amblyopia. *Arch Ophthalmol*. 2007; 125 (4):580-1.
83. White, K.D., Petry, H.M., Riggs, A.L., Miller, J.(1978). Binocular interactions during establishment of McCollough effects. *Vision Research*, 18 (9), Pages 1201-1215
84. Sheth, B., Shimojo, S. (2008) Adapting to an aftereffect. *Journal of Vision*, 29, 1-10.
85. Baker, D.H., Meese, T.S., Mansouri, B., Hess, R.F. (2007). Binocular Summation of Contrast Remains Intact in Strabismic Amblyopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 48, No. 11 5332-5338.
86. Chang-Bing Huang Zhong-Lin Lu Yifeng Zhou.(2009). Mechanisms underlying perceptual learning of contrast detection in adults with anisometropic amblyopia. *Journal of Vision vol. 9 no. 11 article 24, pp.1-24.*
87. Fomins S, Ozolinsh M, Karitans V. Temporal stimuli and texture segmentation. *Perception*. 2007; 36: 44.
88. http://www.displaytech.com/photonics_shutters.html. Displaytech photonic shutters.
89. Barrett, B.T., Bradley, A., McGraw, P.V. (2004). Understanding the Neural Basis of Amblyopia, *The Neuroscientist* – Vol.10(2), 2004, pp.106 – 117,
90. Vedamurthy I, Suttle CM, Alexander J, Asper LJ. Interocular interactions during acuity measurement in children and adults, and in adults with amblyopia. *Vision Research*. 2007; 47:179–188.
91. Kiorpes L, Kiper DC, O’Keefe LP, Cavanaugh JR, Movshon JA. Neuronal Correlates of Amblyopia in the Visual Cortex of Macaque Monkeys with Experimental Strabismus and Anisometropia. *The Journal of Neuroscience*. 1998; 18(16):6411–6424.
92. Moschos, M.M., Margetis, I., Tsapakis, S., Panagakis, G., Chatzistephanou, I.K., Iliakis, E.(2010). Multifocal visual evoked potentials in amblyopia due to anisometropia. *Clinical Ophthalmology*:4 849–853.
93. Cole, B.L.(2007). Assessment of inherited colour vision defects in clinical practice. *Clinical and experimental optometry* 90, 3157-175.
94. Cole, B.L., Lian K. Y., Lakkis G. (2006) "The ne Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test," *Clin Exp Optometry* 89(2), 73-80.
95. Birch, J., McKeever, L.M. (2007). "Survey of the accuracy of new pseudoisochromatic plates," *Ophthalmic and Physiological Optics* 13(1), 35 – 40.

96. Lee, D. Y., Honson, M. (2003). Chromatic variation of Ishihara diagnostic plates. *Color research and application. Supplement* 28(4), 267-276.
97. Bailey, J.E., Neitz, M., Tait, D. M., Neitz, J. (2004). Evaluation of an updated HRR color vision test. *Vis Neuroscience* 21, 431–436.
98. Neitz, M., Neitz J. (2001). A new mass screening test for color –vision deficiencies in children. *Color research and application. Tests and techniques. Supplement* 26, 239-249.
99. Dain, S.J.(2004). Clinical color vision tests. *Clinical and experimental optometry* 87(4), 276-293.
100. Dain, S.J., Gray S., Tran L. (1998). Colorimetric analysis and performance assessment of the Hahn new pseudoisochromatic colour vision test," *Color research and application. Supplement* 23(2), 69-77.
101. Rabkin E B.(2005). Polychromatic plates for color sense examination. 11th Edition. Medicine, Moscow.
102. Ishihara, S. (1965). Ishihara`s test for colour blindness. Concise Edition], Isshinkai, Tokyo, Japan.
103. Stockman, A., Sharpe, L. T. (2000). Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Res* 40, 1711-1737.
104. Mancuso, K., Mauck, M.C., Kuchenbecker, J.A., Neitz, M., & Neitz, J. (2010). A multi-stage color model revisited: Implications for a gene therapy cure for red-green colorblindness. In R.E. Anderson, J.G. Hollyfield, & M.M. LaVail (Eds.), *Advances in Experimental Medicine and Biology* (631-638). New York, USA: Springer New York.
105. Johnson, G.M., Fairchild, M.D. (2003). Visual psychophysics and color appearance. *CRC Digital Color Imaging Handbook*, 115-171.
106. Stockman, A., Brainard H.D. (2010). Color vision mechanisms. In the *OSA Handbook of Optics* (3rd edition, M. Bass, ed). McGraw-Hill, New York, pp. 11.1-11.104.
107. De Valois, R.L., De Valois, K.K., Switkes, E., Mahon, L. (1997). Hue Scaling of Isoluminant and Cone-specific Lights. *Vision Research*, N 7, Vol. 37, pp 885-897.
108. Switkes, E. (2008). Contrast salience across three-dimensional chromoluminance space" *Vision Research* 48, 1812-1819.
109. Capilla, P., Malo, J., Luque, M.J., Artigas, J.M. (1998). Colour representation spaces at different physiological levels: a comparative analysis. *Journal of Optics*. Vol. 29, pp.324-338.
110. Gegenfurtner, K.R. (2003) Cortical mechanisms of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 563-572.
111. Stoughton, C.M., Conway, B.V. (2008). Neural basis for unique hues. *Current Biology*, 18 (16), R698.

Publikāciju saraksts

1. **Fomins S., Ozolinsh M., Krumina G., Karitans V.** Ferroelectric liquidcrystal glasses for amblyopia research. *Integrated Ferroelectric*, Volume 103, 2008, pp.10 – 17.
2. **Zariņa L., Fomins S.** Collinear suppression in texture segmentation for temporally modulated stimuli. *Latvian Journal of Physics and Technical Science*, Vol. 47(3), 31-36 (2010).
3. **Fomins S., Rileyeva-Piskura N.** Strength judgment of fillin-in color illusion. *Latvian Journal of Physics and Technical Science*, Vol. 47(3), 44-50 (2010).
4. **Ozolinsh M, Andersson G., Krumina G., Fomins S.** Spectral and temporal characteristics of liquid crystal goggles for vision research. *Integrated Ferroelectrics*, Volume 103, 2008, pp.1–9.
5. **Fomins S., Reinfelde M., Larichev A., Iroshnikov N., Gerbreders A., Ozolinsh M.** „Photoinduced AsSeS thin film phase plates as adaptive optics mirrors for eye aberration correction”. *SPIE*, Vol. 7142, 71421C (2008).
6. **Ozolinsh M., Fomin S., Colomb M.** „Optotypes for human color contrast sensitivity tests” . *Proc. OSAV'2004, Optical Sensing and Artificial Vision*, ITMO, Saint Petersburg, Russia, pp. 351-356 (2004).
7. **Ozolinsh M, Ikaunieks G., and Fomins S.** Colour Vision Experimental Studies in Teaching of Optometry. *Proc. „Education and Training in Optics and Photonics.” Pole Optique et Photonique*, Marseille, 2005, pp. 295-297.

Tēzes starptautiskās konferencēs

1. **Fomins S., Ozolinsh M., and Parkkinen J.** „Search experiments with the blurred color stimuli“, *Perception*, 35, p.87 (2006).
2. **Ozolinsh M., Colomb M., Parkkinen J., Ikaunieks G., Fomins S., Karitans V., Krumina, G.** “Scattering-induced luminance and colour contrast decrease in visual perception”, *Perception*, 35, p.136 (2006).
3. **Fomins S.** “Masking study of instant stimuli texture segmentation”. *Perception*, 37, p.80 (2007).
4. **Ikaunieks G., Ozolinsh M., Fomins S.** Light-scattering effect on colour-pattern VEP response. *Perception*, 36, p.39 (2007).
5. **Ozolinsh M., Colomb M., Ikaunieks G., Fomins S., Morange P.** Visual acuity at low illuminance and contrast in fog. *Perception*, 38, pp. 454-471 (2009).
6. **Fomins S, Zariņa L.** Segmentation of instant isoluminant chromatic textures. *Perception*, 38 (2009), p. 54.
7. **Atvars U., Fomins S.** Chaser illusion and opponent color aftereffects. *Perception*, 38 (2009), p.135.
8. **Ozolinsh M., Fomins S.** Multispectral analysis of the color deficiency tests and modelling of cones influence on test perception. *Perception*, 38 (2009), p. 37.
9. **Fomins S, Ozolinsh M, Atvars U.** *Multispectral analysis of the color deficiency tests and modelling of interpretation by trichromat color systems. Development in Optics and Communications (DOC'09, Rīga, 25.-27.aprīlis)*
10. **Fomins S, Ozolinsh M.** *Multispectral analysis of colour defeciciency tests and modelling of cone influence on perception of colour. FMNT'09 (Rīga, 1.-4.aprīlis).*
11. **Martín, I., Fomins, S. & Ozolinsh, M.** *Multispectral analysis of colour deficiency tests and modelling of cones influence on test perception. ICVS'09 (Portugāle, Braga, 24.-28. jūlijs), 20th simposium of International Color Vision Society, Abstract Booklet, p. 145.*
12. **Ozolinsh M., Fomins S., Colomb M.** Quantitative evaluation of Ishihara and Rabkin colour deficiency tests using multispectral colour analysis. AVA 14th Christmas Meeting 2009, University of Bristol, December 18, 2009. **AVA meeting**, p.29.
13. **Lauva D., Ozolinsh M., Fomins S.** Modelling of RGB colour contribution to visual acuity in conditions of fog evoked decrease of luminance and contrast. *Perception*, 38 (2009), p.35.
14. **Fomins S., Rileyeva-Piskura N.** Strength judgment of filling-in color aftereffect illusion for different shapes. *Perception*, 39, p.86 (2010).
15. **Ozolinsh M, Ikaunieks G., Fomins S.** Dynamics of Eye Aberration Detected by High-Speed Hartmann-Shack Aberrometer. *Proc. Eur. Opt. Soc. Annual.*, Paris, 2006, pp. 92-93.
16. **Ozolinsh M, Ikaunieks G., Fomins S., Colomb M., Parkkinen J.** Perception of Colour Contrast Stimuli in the Presence of Scattering. *Annual Meeting of Applied Vision Association – 2006 “Vision in Perception and Cognition”, Bradford University, England, Abstracts*, p. 5.

17. **Ozolinsh M, M. Colomb, J. Parkkinen, Ikaunieks G., Fomins S, V. Karitans, and G. Krumina.** Different Colour Contrast Stimuli Perception in Fog. *Vision in Vehicles, VIV-11, Dublin, Ireland, July 27-29, 2006, Proceedings, VIV-11*, p. 12.
18. **S.Fomins, N.Rileyeva-Piskura.** Chromatic aftereffect strength for different shapes. *AOMD`06 (2010) Book of abstracts*, Riga, p.29.
19. **Zariņa L., Fomins S.** Collinear supression in texture segmentation for temporally modulated stimuli. *AOMD`06 (2010) Book of abstracts*, Riga, p.32.
20. **Fomins S., Ozolinsh M., Krumina G., Karitans V.** Ferroelectric Lyquid Crystal Glasses for Ambliopia Training. *FMNT(2008) Book of Abstracts*, p. 132.

Pateicības

Autors ir pateicīgs Eiropas Sociālajam Fondam par atbalstu darba izstrādē. Liels paldies darba vādītājam Marim Ozoliņam par atbalstu, piedāvātajam idejām un palīdzību to realizāciju. Gribu pateikties Optometrijas un redzes zinātnes nodaļai par piedāvāto iespēju izstrādāt promocijas darbu.

Ipašs paldies kolēģiem Gatim Ikauniekam un Varim Karitānam. Gribu pateikties arī Optometrijas nodaļas kolektīvam, studentiem un Cietvielu Fizikas Institūta darbiniekiem.

