

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
OPTOMETRIJAS UN REDZES ZINĀTNES NODAĻA

**DZIĻUMA UZTVERE DARBĀ AR VOLUMETRISKO
EKRĀNU ATKARĪBĀ NO SKATĪŠANĀS ATTĀLUMA**

BAKALaura DARBS

Autors: **Gunita Jankovska**

Studenta apliecības Nr. gj16006

Darba vadītājs: doktorante, Prof. mag. Tatjana Pladere

RĪGA 2019

ANOTĀCIJA

Bakalaura darbs ir uzrakstīts latviešu valodā uz 37 lapaspusēm. Tas satur 12 attēlus, 3 tabulas un 41 atsauci uz literatūras avotiem.

Darba mērķis – noskaidrot, kā skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam ietekmē relatīvā dziļuma uztveri. Pētījumā 20 dalībnieki veica relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevumu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna dažādos skatīšanās attālumos (0,5 m – 2,5 m). Redzes stimulu veidoja četri apli, kur viens no tiem tika projicēts tuvāk dalībniekam. Dalībnieka uzdevums bija noteikt tuvāko apli. Rezultāti parādīja, ka, pieaugot skatīšanās attālumam, uzdevuma izpildes pareizība samazinās un laiks pieaug. Skatīšanās attāluma būtiska ietekme uz uzdevuma izpildi tika pierādīta pārsvarā tuvākos attālumos.

Atslēgvārdi: dziļuma uztvere, skatīšanās attālums, stimula atrašanās vieta, volumetriskais ekrāns.

ABSTRACT

Bachelor thesis is written in Latvian on 37 pages. It contains 12 figures, 3 tables and 41 references.

The aim of the study was to detect how the viewing distance till the volumetric display affected relative depth perception. In this study, 20 participants accomplished relative depth detection task on multi-planar volumetric display at different viewing distances (0.5 m – 2.5 m). Visual stimulus consisted of four circles, and one of them was projected closer to the participant. The participant's task was to detect the closest circle. The results showed that the task correctness decreased and execution time grew with the increase of viewing distance. The significant impact of viewing distance on task performance was proven mainly at closer distances.

Keywords: depth perception, viewing distance, stimuli location, volumetric display.

SATURS

IEVADS	1
1. LITERATŪRAS PĀRSKATS	2
1.1. Dziļuma uztvere	2
1.2. Binokulārā disparitāte	4
1.3. Vizuālās informācijas apstrāde	7
1.4. Trīsdimensionālu attēlu atveidošanas iekārtas	10
1.5. Volumetriskais ekrāns	12
2. PĒTĪJUMA DAĻA	15
2.1. Metodes apraksts	15
2.1.1. Dalībnieki	15
2.1.2. Iekārta	15
2.1.3. Pētījuma dizains	16
2.1.4. Pētījuma apstākļi un norise	19
2.2. Rezultāti un to analīze	21
2.2.1. Skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam	21
2.2.2. Stimula atrašanās vieta	25
2.3. Diskusija	29
SECINĀJUMI	32
NOBEIGUMS	33
PATEICĪBA	34
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	35

IEVADS

Mūsdienās dažādas attēlošanas iekārtas tiek izmantotas arvien vairāk nozarēs un arī cilvēku ikdienā ir arvien biežāk sastopamas. Pareiza attēla uztveršana ir nozīmīga dažādās profesionālajās jomās, tādēļ ir svarīgi, lai izmantotā iekārta attēlu atspoguļotu pēc iespējas precīzāk un kvalitatīvāk. Jaunu tehnoloģiju attīstības laikā ir svarīgi noskaidrot, kādu attēla kvalitāti ir iespējams ar to sasniegt un kādos apstākļos to var nodrošināt.

Viena no mūsdienu attēlošanas tehnoloģijām ir volumetriskais ekrāns, kas ir inovatīva trīsdimensionālā (3D) attēlošanas iekārta, kas 3D attēlu rada reālā 3D telpā. Radīto attēlu var aplūkot vairāki cilvēki vienlaicīgi no dažādiem skatpunktiem, neizmantojot papildus ierīces, piemēram, polarizējošas brilles, tā nodrošināt dabiskākus skatīšanās apstākļus. Tiek plānots, ka daudzplakņu volumetriskais ekrāns varētu tikt izmantots tādās nozarēs kā, piemēram, medicīnā un drošības pārbaudē, tādēļ ir svarīgi noskaidrot, kādos skatīšanās attālumos tiek nodrošināta pēc iespējas precīzāka dziļuma uztvere, papildus nosakot arī uz ekrāna projicētā stimula atrašanās vietas ietekmi uz dziļuma uztveri.

Balstoties uz literatūras avotiem, bakalaura darbā tika izvirzīta hipotēze, ka darbā ar volumetrisko ekrānu, palielinoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam, spēja uztvert relatīvo dziļumu samazināsies.

Šī bakalaura darba mērķis ir noskaidrot, kā relatīvo dziļuma uztveri ietekmē dažādi skatīšanās attālumi darbā ar volumetrisko ekrānu. Šajā darbā iegūtie rezultāti sniegtu atbildi, kādā attālumā līdz ekrānam strādāt profesiju pārstāvjiem, kuri plāno izmantot daudzplakņu volumetrisko ekrānu kā 3D attēlošanas iekārtu savu uzdevumu veikšanai.

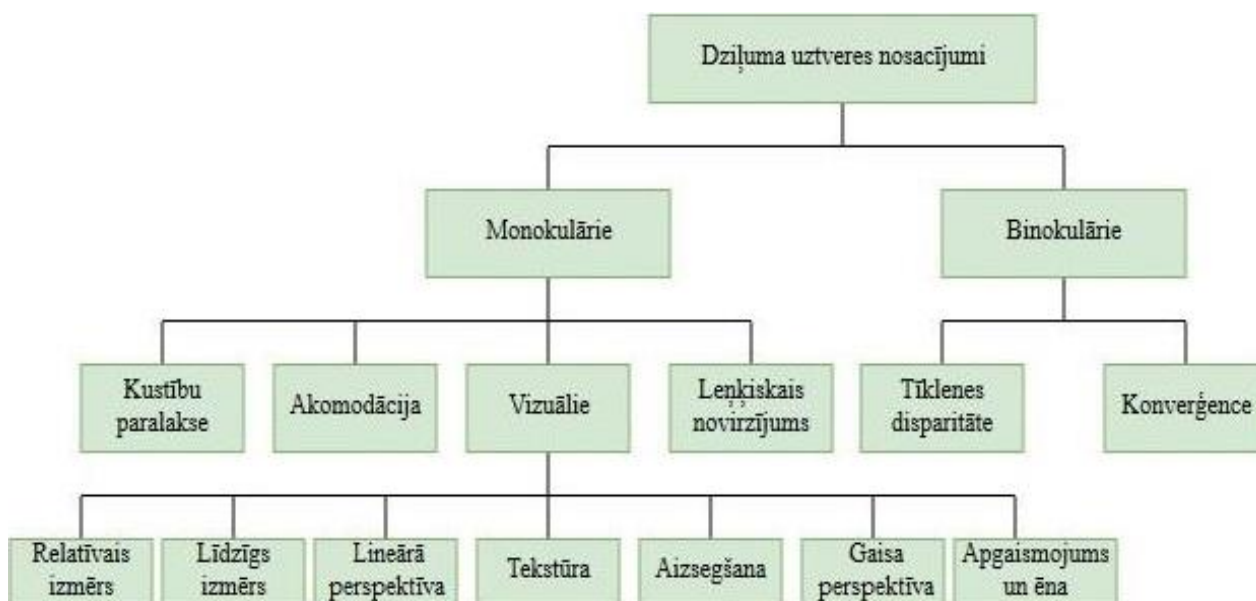
Lai sasniegtu bakalaura darbā izvirzīto mērķi, tika izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

1. noteikt, kā skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam ietekmē relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma pareizību;
2. noteikt, kā skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam ietekmē relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma izpildes laiku;
3. noskaidrot, kā mērķa stimula atrašanās vieta ietekmē relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma sniegumu.

1. LITERATŪRAS PĀRSKATS

1.1. Dziļuma uztvere

Cilvēks uztver apkārtējo vidi kāda tā ir – telpisku, lai gan attēls, kas veidojas uz tīklenes, ir plakans jeb divdimensionāls. Pastāv vairāki dziļuma nosacījumi (skat. 1.1. att.), kas nodrošina iespēju apkārtesošo uztvert telpiski. Tos var iedalīt monokulāros un binokulāros, tomēr jāņem vērā, ka monokulārie nosacījumi tiek apstrādāti redzes sistēmā, skatoties gan monokulāri, gan binokulāri (Schwartz, 2010).



1.1. att. Dziļuma nosacījumu klasifikācija (Schwartz, 2010).

Pie monokulāriem dziļuma uztveres nosacījumiem pieder:

- kustību paralakse – tā ir novērojama situācijās, kad cilvēks, kas atrodas kustībā, fiksējot skatienu uz kādu priekšmetu, novēro apkārtesošo objektu kustību. Ja skatiens tiek fiksēts uz tuvāku objektu, tad objekti aiz tā kustēsies tajā pašā virzienā, kurā cilvēks, taču, ja skatiens būs fiksēts uz objektu, kas atrodas tālāk, tuvākie objekti kustēsies pretējā virzienā (Schwartz, 2010);
- akomodācija – tā nodrošina skaidru attēlu pie dažādiem skatīšanās attālumiem, mainoties lēcas izliekumam. Akomodācijas procesos iesaistās arī acs zīlīte, kas maina diametru, nodrošinot skaidrāku attēlu uz tīklenes (Reichelt et al., 2010);

- leņķiskais novirzījums – gadījumos, kad cilvēks skatās uz objektu, kas atrodas zemāk par viņa acu līmeni, veidojas leņķiskais novirzījums zem horizonta, un informāciju par iespējamo dziļumu nesniedz, piemēram, vizuālie dziļuma nosacījumi, tad šis leņķis ļauj novērtēt attālumu līdz objektam (*Ooi et al.*, 2001);
- vizuālie – tie ir novērojami dabiskos skatīšanās apstākļos (*Snowden et al.*, 2006), divdimensionālos atainojumos, piemēram, gleznās, radot tās telpiskas (*Schwartz*, 2010), un arī tiek nodrošināti ekrānos.

Binokulārie dziļuma nosacījumi:

- konverģence – nosaka leņķisko atšķirību, kas pastāv starp abām acīm, kad tās fokusējas uz vienu un to pašu punktu. Ir novērojama sakarība, ka, jo tuvāk atrodas fiksētais punkts, jo vairāk nepieciešams konverģēt (*Geng*, 2013);
- binokulārā disparitāte – raksturo atšķirīgi iegūtos attēlus uz abu acu tīklenēm, skatoties uz vienu un to pašu punktu (*Geng*, 2013; *Goldstane*, 2010).

Binokulārā disparitāte ir viens no nozīmīgākajiem dziļuma uztveres nosacījumiem tuvākos skatīšanas attālumos (*Bolshakov & Sgibnev*, 2018). Ir novērots, ka tādu binokulāro nosacījumu kā akomodācijas un konverģences un binokulārās disparitātes ietekme uz dziļuma uztveri samazinās, palielinoties skatīšanās attālumam, kamēr, piemēram, tāda monokulārā dziļuma nosacījuma kā tekstūras ietekme samazinās tikai attālumos, kuri pārsniedz 100 m (*Geng*, 2013).

Cilvēkam, skatoties monokulāri, nav tik precīza vizuālā attāluma novērtēšana, kā tā ir, skatoties binokulāri. To eksperimentāli pierādīja *Allison et al.* (2009). Pētījumā tika noteikts, kāds ir dziļuma izšķiršanas sliekšnis dalībniekiem, skatoties monokulāri un binokulāri trīs skatīšanās attālumos (4,5 m, 9 m un 18 m). Rezultātā, skatoties monokulāri, dziļuma izšķiršanas sliekšnis bija būtiski augstāks, salīdzinot ar iegūto skatoties binokulāri. Turklāt monokulāros skatīšanās nosacījumos datu izkliede bija novērojama pie tālākā skatīšanās attāluma. Tādējādi kopumā *Allison et al.* (2009) secināja, ka precīzāka dziļuma novērtēšana var tikt sasniegta, skatoties binokulāri.

Skatoties binokulāri, būtiski dziļuma novērtēšanu ietekmē arī apgaismojums. Gadījumā, ja dziļuma novērtēšanas uzdevums ir veikts tumsā, tad binokulāri novērtētais attālums līdz objektam ir neprecīzāks, nekā tad, ja tas tiek veikts gaismā. (*Allison et al.*, 2009).

Lai gan binokulārai disparitātei ir liela nozīme dziļuma uztverē tuvākos skatīšanās attālumos, ir būtiski atcerēties, ka pastāv arī citi nosacījumi, kuru ieguldījums ir vērā ņemams. Piemēram, *Viguiet et al.* (2001) pētījumā tika izvērtēts, kā vergence ietekmē attāluma novērtējumu līdz objektiem. Darba eksperiments tika veikts tumsā sešos attālumos (0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m un 1,2 m), kur katrā no attālumiem dalībniekam vajadzēja norādīt attālumu līdz diodei. Pētījumā

tika noteikts, ka attālumu novērtējums bija atbilstošs patiesajam attālumam, ja attālums līdz diodei bija zem 0,5 m, taču tālākos attālumos novērtētais attālums neatbilda patiesajai diodes atrašanās vietai, novērtējot to par tālāk esošu nekā patiesībā. Eksperimenta laikā tika ierakstītas dalībnieku acu kustības un vēlāk aprēķināts atbilstošais vergēnces leņķis. Tika novērots, ka attālumos, kuros bija izteikti liels vergēnces leņķis, starp patieso un novērtēto attālumu pastāvēja lineāra sakarība, tomēr tika piebilsts, ka arī akomodācijas darbība varētu ietekmēt iegūtos rezultātus.

Ir labi zināms, ka starp akomodāciju un konverģenci pastāv saistība, jo, kad viens no šiem nosacījumiem izpildās, tad tiek stimulēts arī otrs. Abu šo nosacījumu ieguldījums dziļuma uztverē samazinās, palielinoties attālumam (*Cutting & Vishton, 1995*). Apskatot akomodācijas un konverģences nozīmi vizuālā attāluma novērtēšanai zemā apgaismojumā, tika noteikts, ka konverģencei ir ievērojami lielāka ietekme (*Owens & Leibowitz, 1980*).

Dziļuma uztveri nodrošina daudzveidīgi dziļuma nosacījumi, kuru ieguldījums var mainīties atkarībā no skatīšanās attāluma un apkārtesošā apgaismojuma līmeņa. Turklāt dziļuma uztveri būtiski ietekmē tas, vai attēls tiek skatīts monokulāri vai binokulāri. Tuvajos skatīšanās attālumos, binokulāri skatoties, tiek nodrošināta precīza dziļuma uztvere, galvenokārt, pateicoties binokulārajai disparitātei.

1.2. Binokulārā disparitāte

Fokusējot skatienu uz objektu, tā attēls uz acs tīklenes projicējas uz tīklenes korespondējošo punktu (*Goldstone, 2010; Steinman et al., 2000*). Korespondējošo punktu atrašanās vieta uz abu acu tīklenēm sakrīt. Visu korespondējošo punktu kopumu sauc par horoptera (*Goldstone, 2010*).

Punkti, kas neatrodas uz horoptera, tiek saukti par nekorespondējošajiem punktiem un to projekcijas uz abu acu tīklenēm nesakrīt (*Goldstone, 2010*). Dziļuma uztvere rodas, atrodoties nekorespondējošiem punktiem uz tīklenes. Šie punkti tiek stimulēti gadījumos, kad pirms vai pēc fokusētā objekta, kas tiek projicēts uz abu acu tīklenēm kā korespondējošajiem punktiem, atrodas vēl kāds cits objekts (*Steinman et al., 2000*).

Disparitāte ir leņķiskais attālums starp nekorespondējošā un korespondējošā punkta atrašanās vietu uz tīklenes, savukārt binokulārā disparitāte raksturo disparitāti, kas pastāv starp abām acīm. Binokulāro disparitāti var iedalīt absolūtā un relatīvā atkarībā no tā, pret ko tiek salīdzināts fiksējošais objekts (*Steinman et al., 2000*).

Attālumu starp novērotāja ciklopisko aci un fiksējošo objektu raksturo absolūtā disparitāte, savukārt relatīvā disparitāte sniedz informāciju par divu objektu savstarpējo attālumu (*Steinman et*

al., 2000). Fiksējošā objekta absolūtā disparitāte ir nulle, taču objektam, kas atrodas pirms vai pēc fiksējošā objekta, absolūtā disparitāte atšķiras no nulles, jo tā projekcija nav korespondējošajā punktā. Relatīvā disparitāte raksturo abu objektu absolūto disparitāšu atšķirību. (Goldstone, 2010). Relatīvo binokulāro disparitāti var ietekmēt objektu savstarpējais attālums, tomēr galvenokārt ietekmē skatīšanās attālums (Lappin, 2014).

Disparitātes robežu, kad redzes sistēma spēj nodrošināt divu attēlu sapludināšanu, radot vienu telpisku attēlu, nevis izraisot attēla dubultošanu, raksturo Panuma fuzionālā zona. Ja punkti uz tīklenes projicējas Panuma zonas rajonā, tad, lai arī tie ir nedaudz nobīdīti jeb nekorespondējoši, tiek novērots viens telpisks attēls. Panuma zonas lielums ir atšķirīgs vertikālā un horizontālā virzienā, kur lielāks zonas izmērs ir horizontālā virzienā. Zonas atšķirība abos virzienos var būt no trim līdz sešām reizēm (Steinman et al., 2000).

Atkarībā no tā, vai disparitāte uz tīklenes ir horizontālā vai vertikālā virzienā, izšķir horizontālo un vertikālo disparitāti. Dziļumu stereoredzes gadījumā nodrošina horizontālā binokulārā disparitāte (Steinman et al., 2000). Foveolas apgabalā cilvēks spēj uztvert 2'' – 3'' lielu horizontālo disparitāti (Covey & Porter, 1979).

Stereoredzei ir liela nozīme dziļuma uztverē, ko nodrošina tāds binokulārais nosacījums kā horizontālā binokulārā disparitāte, kas vizuālajai sistēmai ļauj novērtēt, kāds ir objekta novietojums attiecībā pret horopteru. Stereoredze ir novērojama gadījumos, kad punkti atrodas Panuma zonā (Steinman et al., 2000).

Atkarībā no tā, vai Panuma zonā esošais fiksējošais objekts atrodas pirms vai pēc otra objekta, tiek izšķirta nekrustotā jeb negatīvā un krustotā jeb pozitīvā disparitāte. Nekrustotās disparitātes gadījumā otra objekta projekcija atrodas nazālajā pusē, bet krustotās disparitātes gadījumā otra objekta projekcija atrodas temporālajā pusē pret fokusētā objekta projekciju uz tīklenes (Schwartz, 2010; Steinman et al., 2000).

Mazāko dziļuma atšķirību, ko cilvēks spēj izšķirt, raksturo stereoasums jeb dziļuma izšķiršanas sliekšnis. Aptuveni 95 % no populācijas stereoasums ir 40'' vai labāks (Steinman et al., 2000), tomēr labākais eksperimentāli noteiktais stereoasums optimālos apstākļos spēj sasniegt 2'' (Coutant & Westheimer, 1993).

Klīniskajā praksē var tikt izmantoti dažāda veida stereoasuma noteikšanas testi, kas atšķiras, piemēram, pēc disparitātes, izmantotajiem stimuliem un nodrošinātajiem nosacījumiem (Read, 2014). Stereoasuma noteikšana ļauj noskaidrot, vai cilvēkam ir stereoredze, kas var raksturot redzes binokularitāti. Visbiežāk klīniskajā praksē tiek izmantoti stereotesti ar 40'' lielu disparitāti,

lai novērtētu, vai cilvēka stereoredze atbilst normai, nevis lai noteiktu indivīda stereoasuma sliekšni (*Steinman et al.*, 2000).

Stereoasumu var ietekmēt stimula atrašanās vieta uz tīklenes jeb ekscentricitāte. Ir novērots, ka stereoasums ir zemāks, ja stimuluss atrodas redzes lauka perifērijā. *Mochizuki et al.* (2012) pētījumā tika novērots, ka 10°, 20° un 30° ekscentricitāte ietekmē stereoasumu. Iegūtie rezultāti parādīja, ka ekscentricitātes palielināšanās ietekmēja stereoasumu, kur pie 10° ekscentricitātes vidējais stereoasums bija aptuveni 2,6 reizes lielāks nekā pie 30° ekscentricitātes.

Aslankurt et al. (2013) pētījumā tika novērota tendence, ka labāks stereoasums bija pētījuma dalībniekiem, kam starpzīlīšu attālums bija lielāks, salīdzinot ar dalībniekiem, kuriem bija mazāks starpzīlīšu attālums. Līdzīga sakarība ir minēta arī *Steinman et al.* (2000). Pretēji rezultāti tika novēroti *Shafiee et al.* (2014) pētījumā, kur labāks stereoasums tika noteikts dalībniekiem ar mazāku starpzīlīšu attālumu. Savukārt *Mai & Schlueter* (2010) pētījumā netika novērota saistība starp starpzīlīšu attālumu un spēju uztvert dziļumu.

Woo & Sillanpaa (1979) pētījumā salīdzināja krustotās un nekrustotās stereoredzes sliekšņus, kur tika novērots, ka vidējais stereoredzes sliekšnis pie krustotās disparitātes (5,6 ") bija aptuveni 2,6 reizes zemāks nekā pie nekrustotās disparitātes (14,5 "), kas liecina, ka, nodrošinot krustotu disparitāti, ir vieglāk uztvert dziļumu pie mazākas disparitātes. Eksperiments tika veikts piecos attālos (no 1 m līdz 5 m), lai panāktu binokulārās disparitātes samazināšanos. No iegūtajiem rezultātiem var novērot, ka gan krustotās, gan nekrustotās disparitātes gadījumā, palielinoties skatīšanās attālumam, samazinās vidējais pareizi sniegto atbilžu skaits. Pie nekrustotās disparitātes vidējais pareizo atbilžu skaits bija zemāks, salīdzinot ar krustoto disparitāti.

Savukārt *Iwata et al.* (2016) pētījumā tika apskatīta ne tikai skatīšanās attāluma (2,5 m; 5 m; 7,5 m), bet arī stimulu leņķiskā izmēra ietekme (0,1°; 0,2°; 0,5°; 0,9°) uz stereoredzi. Darba rezultātos tika apliecināts, ka stimulu izmērs spēj ietekmēt stereoredzes asumu. Piemēram, 2,5 m skatīšanās attālumā stereoasums bija būtiski zemāks stimuliem, kuru izmērs bija mazāks par 0,5°, salīdzinot ar lielāka izmēra stimuliem.

Lai gan vizuālo informāciju, ko uztveram ikdienā, telpisku rada ne tikai binokulārā disparitāte, bet arī tādi nosacījumi kā ēnas, aizklāšana u.c., ir pierādīts, ka binokulārā disparitāte kā vienīgais dziļuma nosacījums spēj radīt dziļuma uztveri. *Julesz* (1971) izveidoja divas stereogrammas, kuras veidoja jauktā secībā izkārtoti melni un balti punkti. Abas stereogrammas atšķīrās ar to, ka vienai no tām bija nobīdīts stereogrammas punktu kvadrāts par vienu vienību, un tas nodrošināja disparitāti. Apskatot abas stereogrammas stereoskopā, novērotājam bija redzams punktu kvadrāts, kas bija izvirzījies uz āru (*Goldstone*, 2010).

Apskatot izkliedēto punktu stereogrammu, uz abu acu tīklenēm radīto attēlu pārklāšanos procesu var iedalīt divos līmeņos, kur viens no tiem raksturo lokālo, bet otrs – globālo stereoredzi. Lokālās stereoredzes gadījumā smadzenes no neliela apgabala abu tīkleņu attēliem savieno līdzīgos punktus, katram no tiem piešķirot atbilstošu disparitāti. Balstoties uz lielāka apgabala abu tīkleņu attēlu disparitāti, tiek radīta kopējā objekta dziļuma uztvere, ko nodrošina globālā stereoredze. Stereogrammu, kuru saskatīšanai nepieciešama gan lokālā, gan globālā stereoredze, nepieciešams ilgāks laiks lielāka apstrādes procesa dēļ. (*Steinman et al.*, 2000).

Ne vienmēr ir nepieciešama globālā stereoredze, lai attēls tiktu uztverts stereoskopisks. Reizēm pietiek tikai ar lokālo stereoredzi, kā tas ir līniju stereogrammu gadījumā. Lokālās stereoredzes gadījumā stereogrammās var būt arī tādi monokulārie nosacījumi kā, piemēram, kustību paralakse, akomodācija, leņķiskais novirzījums un vizuālie nosacījumi (*Schwartz*, 2010), kas var radīt dziļuma uztveri cilvēkiem, kam nav stereoredze (*Steinman et al.*, 2000).

Attēlu atrašanās vietas nelielā atšķirība, kas rodas uz abu acu tīklenēm, tiek raksturota kā binokulārā disparitāte. Binokulārā disparitāte, kas rodas horizontālā virzienā uz tīklenes, nodrošina stereoredzi. Zinot binokulārās disparitātes principu uz tīklenes, rodas jautājums, kā smadzenes spēj apstrādāt iegūto informāciju tā, ka cilvēks redzēto uztver kā vienu un telpisku attēlu, nevis divus plakanus attēlus.

1.3. Vizuālās informācijas apstrāde

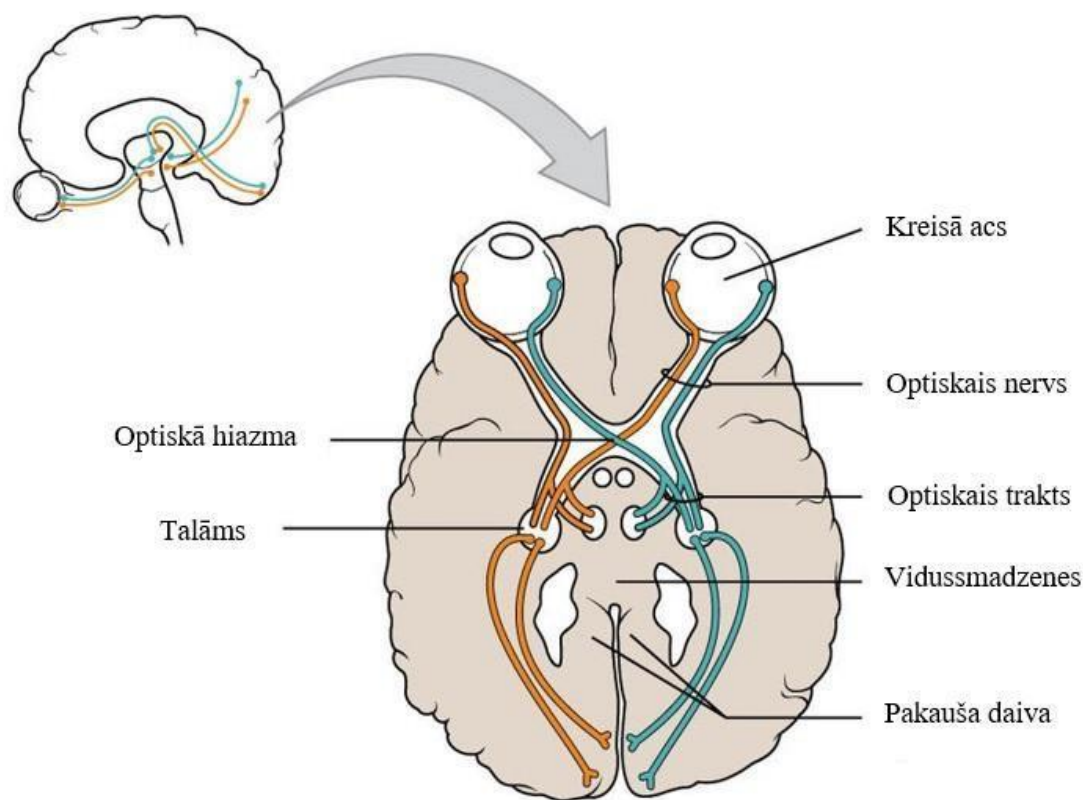
Gaismas jeb elektromagnētiskā viļņa starojuma uztveršana notiek fotoreceptoros, kas ir vienas no tīklenes šūnām. Fotoreceptorus iedala nūjiņās un vālītēs, kur fotopiskos (gaismas) apstākļos strādā vālītes, skotopiskos (tumsas) – nūjiņas, bet mezopiskos (krēslas) – gan nūjiņas, gan vālītes. Ir novērots, ka vālīšu blīvums uz tīklenes, attālinoties no foveolas, samazinās ātrāk vertikālajā nekā horizontālajā mediānā (*Curcio et al.*, 1990). Iespējams, arī tādēļ, palielinoties ekscentricitātei, vizuālo uzdevumu sniegums ir novērojams labāks horizontālajā, nevis vertikālajā virzienā (*Kristjansson & Sigurdardottiro*, 2008).

Tālāk elektriskais impulss tiek pārvadīts no fotoreceptoriem uz bipolārajām šūnām un no bipolārajām uz ganglionārajām šūnām. Impulsus horizontālā virzienā no fotoreceptoriem sakopo horizontālās šūnas, un informāciju no bipolārajām šūnām apvieno amakrīnās šūnas (*Schwartz*, 2010; *Snowden et al.*, 2006).

Apvienojoties ganglionāro šūnu aksoniem, veidojas II galvas smadzeņu nervs jeb optiskais nervs, kas tālāk nes informāciju no acs ābola uz smadzenēm. Optiskā nerva šķiedras, kas nes

informāciju par katras acs nazālo daļu, krustojas hiazmā, kā rezultātā izveidojas optiskais trakts, kur kreisais optiskais trakts nes informāciju par abu acu tīkleņu kreisās puses informāciju, bet labais optiskais trakts - par abu acu tīkleņu labo pusi. Optiskie trakti tālāk informāciju nes uz talāma kodolu, precīzāk – ārējā ceļgalveida ķermeni (ĀCK), kur šūnas saglabā tīklenes topogrāfisko organizāciju. ĀCK notiek ganglionāro šūnu pārslēgšanās uz ĀCK šūnām, kuru aksoni pa optisko starojumu informāciju tālāk nes uz primāro vizuālo garozu jeb 17. Brodmana lauku, kas atrodas pakauša daivā (Schwartz, 2010; Snowden *et al.*, 2006).

Primārajā redzes garozā (V1) nonāk informācija no tīklenes. V1 līdzīgi kā ĀCK tiek saglabāta tīklenes topogrāfiskā organizācija. Blakus V1 atrodas sekundārā redzes garoza (V2), kuru veido vairākas smadzeņu garozas zonas, kas integrē vizuālo informāciju ar citām maņām. (Schwartz, 2010; Snowden *et al.*, 2006). Schematiski attēlotu vizuālās informācijas apstrādes ceļu skatīt 1.2. attēlā.



1.2. att. Vizuālās informācijas apstrādes ceļš ¹.

¹ Baluch, P., Gonzales, A. (2015). How do we see? ASU-Ask a biologist Pieejams: <https://askabiologist.asu.edu/explore/how-do-we-see>

V1 atrodas četru veidu šūnas, kas ir jutīgas uz tīklines disparitāti. Stimulējošās (*tuned excitatory*), kuras stimulē uzbudinājums, un inhibējošās (*tuned inhibitory*), kuras aktivē kavēšana, šūnas reaģē uz binokulārās disparitātes lielumu. Gadījumā, ja disparitāte ir neliela, tad tiek stimulētas stimulējošās šūnas, bet inhibējošās šūnas šajā gadījumā tiek stimulētas vismazāk. Inhibējošās šūnas tiek aktivētas pie lielas disparitātes. V1 atrodas vēl divi šūnu veidi (tālās un tuvās šūnas), kas ir jutīgi uz tīklines disparitāti un reaģē atkarībā no tā, vai ir novērojama krustotā vai nekruztotā disparitāte. Krustotās disparitātes gadījumā visvairāk aktivējas tuvās šūnas, savukārt nekruztotās disparitātes gadījumā – tālās (*Snowden et al., 2006*).

Nosakot cilvēka smadzeņu darbības aktivitāti tādās smadzeņu zonās kā V1, V2, V3, V3A ar funkcionālās magnētiskās rezonanses izmeklējumu palīdzību, tika noteikts, ka V3A, kas tāpat kā V3 ir asociatīvā redzes garozas zona, smadzeņu aktivitāte bija visizteiktākā, kad dalībniekam tika rādītas izkliedētu punktu stereogrammas, bet viszemākā aktivitāte uz stimulu bija novērojama V1 zonā. Tādēļ tiek uzskatīts, ka V1 zonā esošie neironi atbild par absolūto disparitāti (*Backus et al., 2001*), bet relatīvās disparitātes apstrāde notiek ārpus šīs zonas (*Cumming & Parker, 1999*).

Ar magnētiskās rezonanses palīdzību, tika novērota smadzeņu aktivitāte, dalībniekiem rādot jauku punktu stereogrammas. Tika novērots, ka, palielinoties stimula disparitātei (no 0 līdz aptuveni 15 loka minūtēm jeb virs stereoasuma sliekšņa), palielinās smadzeņu aktivitāte tādās smadzeņu rajonos kā V1, V2, V3, V3A un V5, bet gadījumos, kad disparitāte starp stereogrammas plaknēm pietuvojas augšējam dziļuma sliekšnim (virš aptuveni 30 loka minūtēm), aktivitāte smadzenēs samazinājās. Smadzeņu darbību ietekmēja ne tikai disparitāte starp stimuliem, bet arī tas, kur atrodas stimulants attiecībā pret horoptera. Stimulus, kas bija tālāk no horoptera, bet ar lielāku disparitāti starp stimuliem, neizraisīja aktivitāti smadzenēs, tomēr stimulus, kas atradās uz horoptera, bet ar mazāku disparitāti starp stimuliem, izraisīja smadzeņu darbības aktivitāti (*Backus et al., 2001*).

Primārajā redzes garozā (V1) notiek vizuālās informācijas apstrāde. Šajā smadzeņu rajonā tiek apstrādāta informācija par binokulāro disparitāti. Eksperimentāli ir pierādīts, ka ir smadzeņu rajoni, kuros novērojama lielāka intensitāte aplūkojot stereoskopisku attēlu, piemēram, cilvēka veidotu stereogrammu. Stereogrammas un citus dziļuma uztveri raisošus stimulus tehniski var pasniegt dažādās attēlošanas ierīcēs.

1.4. Trīsdimensionālu attēlu atveidošanas iekārtas

Attēlos uz 3D ekrāniem ir iespējams nodrošināt lielāku dziļuma nosacījumu skaitu, salīdzinot ar parastajām divdimensionālajām (2D) ierīcēm, piemēram, plazmas ekrāniem. Lai izveidotos dziļuma sajūta, ir svarīgi, lai tiktu nodrošināti tādi dziļuma nosacījumi kā akomodācija, konverģence, kustību paralakse un binokulārā disparitāte, tomēr ne visās 3D attēlošanas iekārtās šie nosacījumi izpildās (*Geng, 2013*).

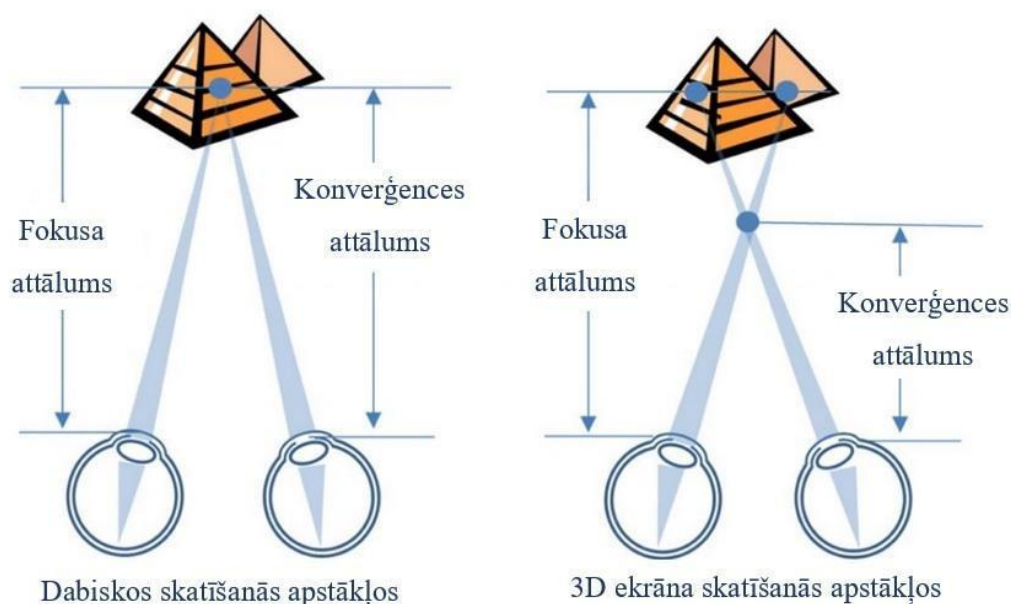
3D ekrānus var iedalīt divās grupās:

- binokulārie stereoskopiskie ekrāni, kas tiek lietoti kopā ar palīgierīcēm, piemēram, filtru brillēm;
- autostereoskopiskie 3D ekrāni (multiskatu 3D ekrāni, volumetriskie 3D ekrāni, digitālie hologrāfiskie ekrāni) (*Geng, 2013*).

Binokulārie stereoskopiskie ekrāni tiek lietoti kopā ar speciālām brillēm, kas nodrošina nedaudz atšķirīgu attēlu demonstrāciju abām acīm. Anaglifa metode ir viena no iespējamām, kā nodrošināt dziļuma efektu attēlam uz ekrāna. Šīs metodes gadījumā tiek lietotas filtru brilles, kur vienas acs priekšā ir sarkans filtrs, bet otras – zaļš vai ciāna krāsas filtrs. Kā rezultātā katra acs uztver mazliet atšķirīgu attēlu, bet smadzenēs tie tiek apvienoti vienā attēlā (*Geng, 2013*).

Stereoskopiska attēla radīšana ar anaglifa tipa metodi ir ekonomiski izdevīga, jo nepieciešams ekrāns, attēls un filtru brilles. Tomēr filtru izmantošana šajā metodē izraisa attēla kvalitātes pazemināšanos (*Ideses & Yaroslavsky, 2005*), kā arī šajā metodē iztrūkst informācija par attēla krāsu (*Yang & Wu, 2014*).

Darbā ar stereoskopiskajiem ekrāniem nākas saskarties arī ar akomodācijas – konverģences konfliktu, kas rodas tādēļ, ka acs fokusējas uz ekrāna plakni, bet acis konverģē uz iegūtā attēla plakni (skat. 1.3. att.) (*Geng, 2013*). Akomodācijas – konverģences konflikts var izraisīt redzes nogurumu un diskomfortu (*Hoffman et al., 2008*).



1.3. attēls. Akomodācijas un konverģences konflikts ar stereoskopiskiem ekrāniem (*Geng, 2013*).

Pie autostereoskopiskajiem ekrāniem pieder multi-skatu ekrāni, kas nodrošina iespēju novērotājam apskatīt attēlu no dažādiem skata punktiem, arī vienlaicīgi aplūkot attēlu vairākiem novērotājiem bez palīgierīcēm. Kā papildus dziļuma nosacījums multi-skatu ekrāniem ir kustību paralakse, lai gan tiek nodrošināta tikai horizontālā kustību paralakse. Darbā ar šo ekrānu ir novērojams ierobežots komforta dziļums (dziļuma saspiešana) un ierobežota izšķirtspēja (*Reichelt et al., 2010*).

Vēl pie autostereoskopiskajiem ekrāniem pieder volumetriskie ekrāni. Šo ekrānu gadījumā 3D attēlu iespējams atveidot reālā 3D telpā (*Geng, 2013*), kā arī darbā ar šo ekrānu netiek novērots akomodācijas – konverģences konflikts (*Reichelt et al., 2010*).

Hologrāfiskie ekrāni spēj nodrošināt 3D attēla attēlojumu, kas atgādina reālu 3D atveidojumu. To darbības pamatā ir koherentu staru izstarošana telpā atbilstoši attēlu veidojošajiem gaismas viļņiem (*Reichelt et al., 2010*).

Hologrāfiskā ekrāna reālistiskā attēlojuma dēļ tas tiek uzskatīts par labāko 3D attēlu attēlošanas ekrānu (*Reichelt et al., 2010*), tomēr ir grūti nodrošināt tehnisko izpildījumu, jo hologrāfijas radīšanai ir nepieciešams apstrādāt milzīgu datu apjomu (*Geng, 2013*). Kā ierobežojumi hologrāfiskajiem ekrāniem atkarībā no to īstenošanās principa var būt: nepilnīgi nodrošināta kustību paralakse, nepieciešama ātruma izsekošanas iekārta vai limitēts 3D tilpums (*Reichelt et al., 2010*).

Tādus dziļuma nosacījumus kā binokulārā disparitāte, akomodācija un konverģence, kustību paralakse, kas ir būtiski precīzas dziļuma uztveres veidošanā, nodrošina volumetriskais ekrāns un datoru radītas hologrammas (*Geng, 2013*). Darbā ar volumetrisko un hologrāfisko ekrānu netiek novērots akomodācijas – konverģences konflikts (*Reichelt et al., 2010*).

Telpisku attēlu attēlošanai var tik izmantoti 3D ekrāni, lai nodrošinātu pilnvērtīgāku un reālāku 3D attēlu. Šos ekrānus var iedalīt pēc tā, vai tie ir stereoskopiski vai autostereoskopiski, kur stereoskopisko ekrānu gadījumā ir nepieciešams izmantot papildierīces, piemēram, filtru brilles. Stereoskopisko ekrānu gadījumā ir novērojams arī akomodācijas – konverģences konflikts, kas ilgstoša darba rezultātā var izraisīt diskomfortu. Atšķirībā no stereoskopiskiem ekrāniem, volumetriskie un hologrāfiskie ekrāni spēj nodrošināt kvalitatīvāku vizualizāciju, neizraisot akomodācijas – konverģences konfliktu.

1.5. Volumetriskais ekrāns

Volumetriskais ekrāns attēlu rada, gaismu izstarojot vai izkļiedējot fiziskā 3D telpā (*Bolshakov & Sgibnev, 2018*). Volumetriskā ekrāna veidojošais 3D attēls sastāv no telpiskā attēla veidojošiem punktiem jeb vokseļiem (*Geng, 2013*).

Volumetriskos ekrānus var iedalīt divās grupās atkarībā no ekrāna optiskā elementa veida – ar plaknēm, kuru atrašanās vieta netiek mainīta kopējā konstrukcijā, un rotējošo elementu, kur projekcijas ekrāns tiek rotēts reālā 3D telpā ar tādu ātrumu, ka gaismu, kas tiek izstarota vai atstarota attiecīgajā atrašanās vietā, redz kā 3D attēlu (*Favalora, 2005*) ar attēla kontūrām (*Reichelt et al., 2010*).

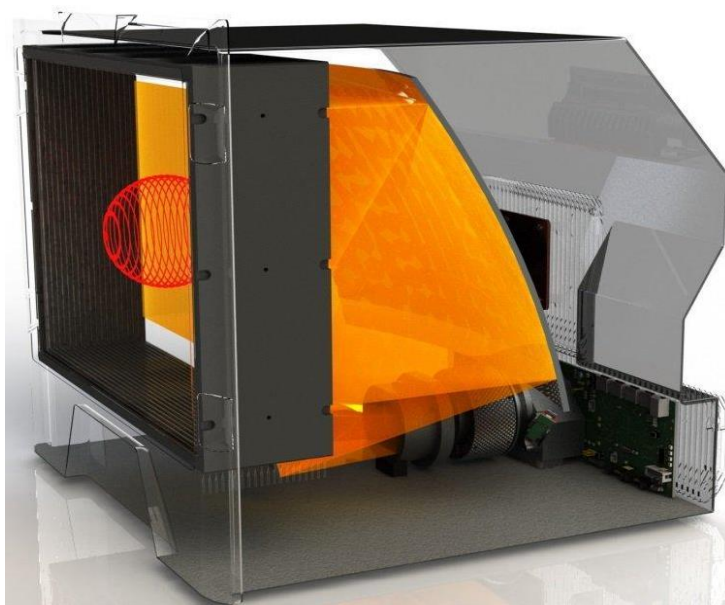
Grossman & Balakrishnan (2006) pētījumā salīdzināja dziļuma novērtēšanas uzdevuma sniegumu starp volumetrisko ekrānu ar rotējošo elementu un stereoskopisku ekrānu. Uzdevums uz abiem ekrāniem bija vienāds – noteikt sfēras atrašanās vietu. Lai to varētu novērtēt, zem sfēras bija deviņas līnijas, kas kalpoja kā atzīmes. Eksperimentā iegūtie rezultāti norādīja, ka sfēras atrašanās vieta tika noteikta precīzāk ar volumetrisko ekrānu nekā ar stereoskopisko ekrānu.

Ar volumetrisko ekrānu ar rotējošo elementu ir veikts eksperiments, kā skatīšanās attālums ietekmē uzdevuma izpildi, kur dalībnieka uzdevums bija noteikt, vai projicētais attēls ir simetrisks. Eksperimentā tika apskatīti tādi skatīšanās attālumi kā 1 m, 2 m un dalībnieka brīvi izvēlēts skatīšanās attālums, kuru lielākā daļa dalībnieku izvēlējās aptuveni 1 m rādiusu apkārt ekrānam. Tika novērots, ka visprecīzāk uzdevumu dalībnieki izpildīja pie viņu brīvi izvēlēta skatīšanās

attāluma, tomēr pie skatīšanās attālumiem 1 m un 2 m netika pierādīta būtiska atšķirība (Pizlo, 2006).

Pastāv arī statistiskie volumetriskie ekrāni, uz kuriem var attēlot 3D attēlu. Rotējošais volumetriskais ekrāns no statistiskā volumetriskā ekrāna atšķiras ar to, ka izstarotā gaisma veido 3D attēlu un optiskā elementa daļas paliek nekustīgas (Favalora, 2005).

Pie statistiskajiem volumetriskajiem ekrāniem tiek pieskaitīts daudzplakņu volumetriskais ekrāns. Daudzplakņu volumetriskā ekrāna (skat. 1.4. att.) optisko elementu veido vairākas elektroniski pārslēdzamas plaknes ar šķidro kristālu. Optiskā elementa uzbūves un darbības dēļ attēlam, kas tiek projicēts uz volumetriskā ekrāna, ir samazināts spilgtums, ko rada īsais ekspozīcijas laiks un plakņu daudzums, kas jāšķērso gaismai. (Geng, 2013).



1.4. attēls. Daudzplakņu volumetriskais ekrāns².

Volumetriskā ekrāna tehniskais izaicinājums ir liels datu apstrādes daudzums. Tāpat ir nepieciešams nodrošināt, lai vienlaikus būtu augsta atjaunošanās frekvence, lai novērotājs nemanītu plakņu pārslēgšanos vai lai plakņu pārslēgšanās neizraisītu flikera efektu, kas varētu ietekmēt projicētā attēla uztveri un novērotāja komfortu (Geng, 2013).

Uz volumetrisko ekrānu projicētā attēla uztveri var ietekmēt ne tikai tehniskās īpašības, bet arī eksperimenta apstākļi, kur, piemēram, ekscentricitāte var ietekmēt spēju novērtēt relatīvo dziļumu. Konošonoka (2018) pētīja dalībnieku sniegumu atkarībā no ekscentricitātes, izvēloties

² Lightspace 3D. (2018). Pieejams: <https://twitter.com/Lightspace3D/status/956584147312668673>

trīs ekscentricitātes – $1,9^\circ$, $3,8^\circ$ un $7,6^\circ$. Tika novērots, ka relatīvā dziļuma sniegums pasliktinājās, ja stimuli tika rādīti ar lielāko ekscentricitāti. Pētījumā tika arī pētīts, kā uzdevuma sniegumu ietekmē tas, kurā dziļuma segmentā tiek rādīts stimul. Tika novērots, ka, projicējot stimulu $1,9^\circ$ ekscentricitātē 45 cm skatīšanās attālumā no novērotāja līdz ekrānam, relatīvo dziļuma uztveri būtiski neietekmē tas, cik tālu no volumetriskā ekrāna priekšējās virsmas atrodas plaknes, uz kurām tiek projicēts stimul. Pētījumā tika izmantots daudzplakņu 3D ekrāns, kura optisko elementu veidoja 20 plaknes ar šķidro kristālu.

Volumetriskais ekrāns ir 3D attēlošanas iekārta, kuras optisko elementu veido vairākas plaknes. Pateicoties volumetriskā ekrāna uzbūvei, 3D attēls uz optiskā elementa plaknēm tiek projicēts ar dažādu fizisko novietojumu. Šo ekrānu priekšrocība ir tā, ka attēls tiek projicēts reālā 3D telpā un darbā ar tiem nav novērojams akomodācijas – konverģences konflikts. Daudzplakņu volumetriskā ekrāna dziļuma uztveri var ietekmēt stimulu ekscentricitāte, tomēr nav veikti plaši pētījumi, kas noskaidrotu, kā skatīšanās attālums un stimula novietojums uz ekrāna horizontālā un vertikālā virzienā ietekmē dziļuma uztveri.

2. PĒTĪJUMA DAĻA

2.1. Metodes apraksts

Lai noskaidrotu, kā skatīšanās attālums un stimula atrašanās vieta ietekmē dziļuma uztveri darbā ar daudzplakņu volumetrisko ekrānu, tika veikts psihofizikāls eksperiments, kurā skatīšanās attālums variēja no 0,5 m līdz 2,5 m ar 0,25 m lielu soli un stimulsi varēja atrasties četrās ekrāna vietās. Ar datorprogrammu tika iegūti dati par atbildes pareizību un uzdevuma izpildes laiku.

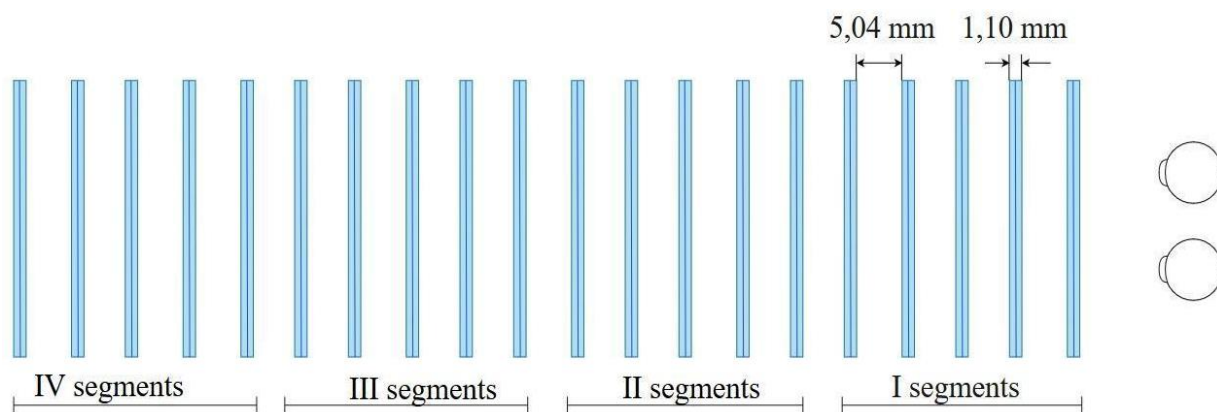
2.1.1. Dalībnieki

Pētījumā brīvprātīgi piedalījās 20 dalībnieki, kuri bija vecumā no 20 līdz 25 gadiem (vidējais vecums \pm standartnovirze: 21 ± 1 gadi). 13 no visiem pētījuma dalībniekiem bija emetropi, bet 7 dalībnieki, kuriem bija nepieciešama redzes korekcija, kā korekcijas līdzekli pētījuma laikā izmantot kontaktlēcas. Visiem dalībniekiem binokulārais redzes asums tālumā un tuvumā bija vismaz $Visus = 1,0$ (decimālajās vienībās), netraucēta binokulārā redze un stereoredze.

2.1.2. Iekārta

Pētījumā tika izmantots *LightSpace Technologies* daudzplakņu volumetriskais ekrāns (*Geng*, 2013; *Sullivan*, 2003) (x1405 modelis). To veido daudzplakņu optiskais elements, ātrgaitas projektors, optiskā elementa dzinējs un datu buferis. Tomēr jāpiebilst, ka, lai uz daudzplakņu volumetriskā ekrāna attēlotu 3D attēlu, ir nepieciešams dators ar programmatūru, kas nosaka ko un uz kādām plaknēm nepieciešams projicēt uz volumetriskā ekrāna optiskā elementa.

Daudzplakņu optiskais elements sastāv no 20 plaknēm ar šķidro kristālu (skat. 2.1. att.), kur katras plaknes vidū atrodas šķidrā kristāla slānis, uz kuru tiek projicēts stimulsi. Attālums starp divām plaknēm optiskā elementa ietvaros ir nemainīgs, un kopējais daudzplakņu optiskā elementa izmērs sasniedz aptuveni 11,78 cm.

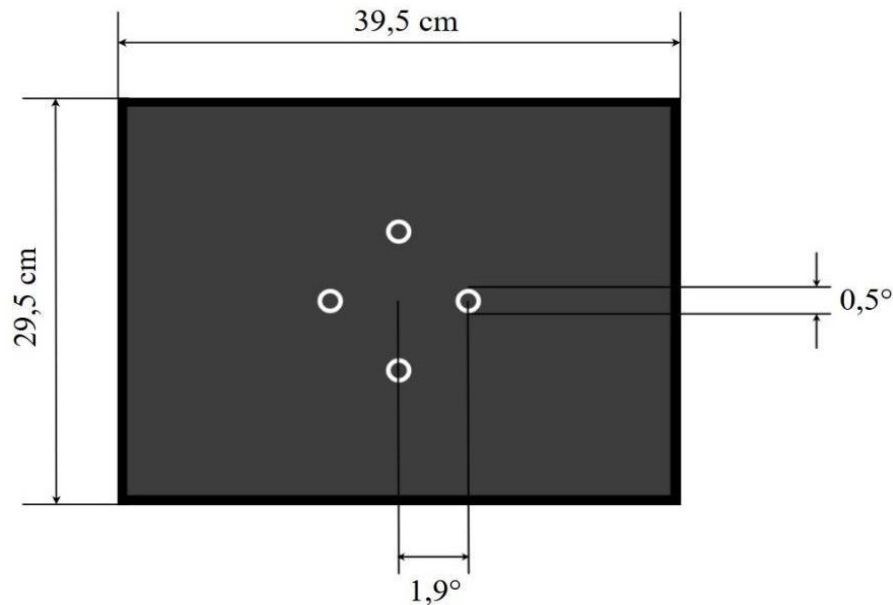


2.1. attēls. Volumetriskā ekrāna plaknes.

Stimula atveidošanai plaknes savā starpā tiek elektroniski pārslēgtas, ko regulē optiskā elementa dzinējs ar 60 Hz augstu frekvenci. Pateicoties augstajai pārslēgšanās frekvencei, novērotājs nemana plakņu pārslēgšanos (*Endukuru et al.*, 2016), kas projicēto attēlu ļauj uztvert kā vienlaicīgu un telpisku. Ātrgaitas projektors atrodas aiz optiskā elementa un vienlaicīgi spēj izgaismot tikai plakni, kas ir elektroniski stimulēta, kamēr pārējās plaknes ir caurspīdīgas un ļauj gaismai plūst cauri.

2.1.3. Pētījuma dizains

Uz volumetriskā ekrāna tumšā fona tika projicēts redzes stimuls (skat. 2.2. att.), kuru veidoja četri gaiši apli (apļa ārējais diametrs bija $0,5^\circ$, iekšējais – $0,4^\circ$). Redzes stimula izmērs tika izvēlēts, ņemot vērā pētījumā izvēlēto skatīšanās attālumu ietekmi uz stereosumu (*Iwata et al.*, 2016). Katrā pētījuma mēģinājumā viens no apliem tika projicēts par vienu plakni tuvāk novērotājam.



2.2. attēls. Redzes stimula izmērs un ekscentricitāte.

Pirms pētījuma veikšanas tika matemātiski aprēķināts, lai visos skatīšanās attālumos redzes stimula izmērs uz tīklenes būtu vienāds un iekļautos volumetriskā ekrāna izmēros, izmantojot sakarību:

$$x = s \times tg(0,25 \times \frac{\pi}{180}), \quad (1)$$

kur x – attālums no ekrāna centra līdz apla centram, s – skatīšanās attālums jeb attālums no volumetriskā ekrāna priekšējās plaknes līdz dalībnieka acīm.

Zinot, cik liela nozīme dziļuma uztverē ir binokulārajai disparitātei, tika veikti aprēķini, lai noskaidrotu, cik teorētiski liela relatīvā binokulārā disparitāte tiks nodrošināta stimulam uz volumetriskā ekrāna dažādos skatīšanās attālumos. Pirms pētījuma veikšanas tika aprēķināta stimulu relatīvā binokulārā disparitāte pie izvēlētajiem skatīšanās attālumiem, ja stimuli tiek projicēti ar vienu plakņu atšķirību I segmenta ietvaros, izmantojot formulu:

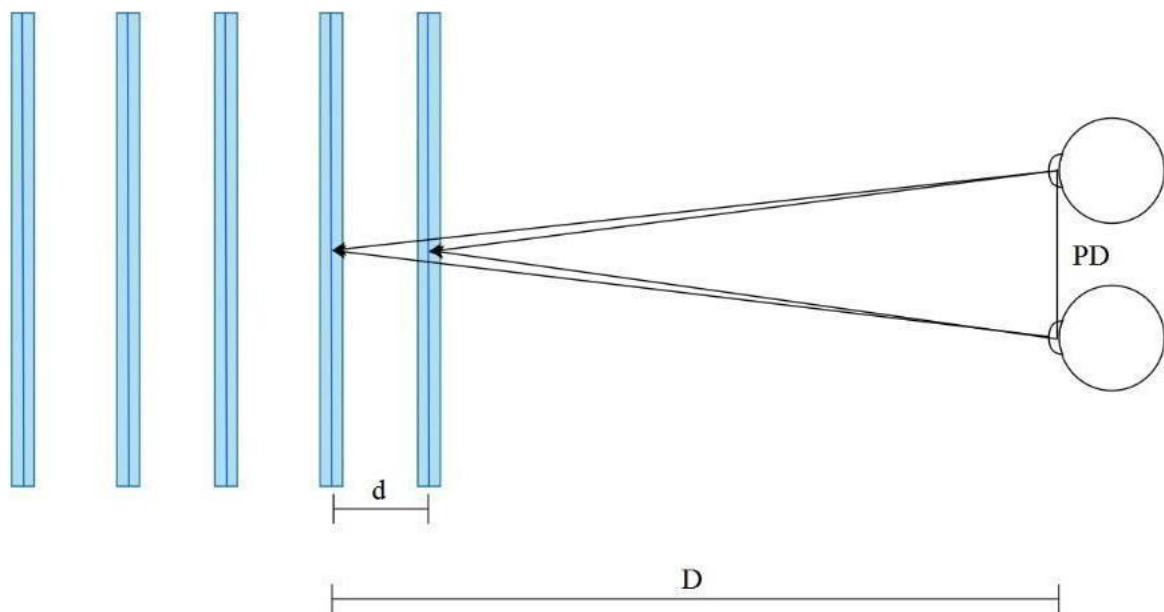
$$n = \frac{PD \times d}{D^2}, \quad (2)$$

kur n – binokulārā disparitāte radiānos (binokulārās disparitātes pārvēršanai grādos iegūtais lielums tika pareizināts ar 57,3 un pēc tam ar 3600, lai iegūto binokulāro disparitāti izteiktu leņķiskajās sekundēs),

PD – starpzīlīšu attālums (aprēķinos tika pieņemts kā 0,06 m),

d – vienas plaknes atšķirība, kas tika aprēķināta kā divas puses no plaknes biezuma un attālums starp divām plaknēm ($2 \times 0,0011 + 0,00504 = 0,00614$ m),

D – attālums metros no plaknes vidus līdz dalībnieka acīm, kā piemēru skatīt 2.3. attēlu (Steinman et al., 2000).



2.3. attēls. Lielumi relatīvās binokulārās disparitātes aprēķināšanai.

Pētījumā izvēlēta segmenta ietvaros trīs no apliem katrā mēģinājumā varēja tikt projicēti uz sekojošām dalībniekam tuvākajām optiskā elementa plaknēm – 2., 3., 4. un 5., kamēr viens no apliem uz 1., 2., 3. vai 4. plakni, respektīvi vienu plakni tuvāk. Vidējā relatīvā binokulārā disparitāte tika aprēķināta, apskatot visus iespējamus stimula projicēšanas gadījumus (kopā četrus) (skat. 2.1. tab.). Relatīvās binokulārās disparitātes diapazonu tuvākos skatīšanās attālumos par 1,25 m vairāk ietekmēja tas, uz kurām plaknēm tika projicēts redzes stimuls, kad datu izkliede bija lielāka par 1". Proti, relatīvās binokulārās disparitātes datu izkliede samazinājās, pieaugot skatīšanās attālumam, kur pie 0,5 m relatīvā disparitāte ir $285,7'' \pm 8,8''$, bet, attālumam pieaugot līdz 2,5 m, ir novērojams straujš relatīvās disparitātes kritums līdz $12,0'' \pm 0,1''$. Vidējie relatīvās binokulārās disparitātes aprēķini, plānojot pētījuma apstākļus, uzrādīja, ka lielākos skatīšanās attālumos binokulārā disparitāte maz mainās.

Vidējā relatīvā binokulārā disparitāte dažādos skatīšanās attālumos

Skatīšanās attālums līdz volumetriskā ekrāna priekšējai plaknei (m)	Vidējā relatīvā binokulārā disparitāte (") ± SD
0,50	285,7 ± 8,8
0,75	129,6 ± 2,7
1,00	73,6 ± 1,1
1,25	47,4 ± 0,6
1,50	33,1 ± 0,4
1,75	24,4 ± 0,2
2,00	18,7 ± 0,2
2,25	14,8 ± 0,1
2,50	12,0 ± 0,1

2.1.4. Pētījuma apstākļi un norise

Pētījuma procedūra tika apstiprināta Latvijas Universitātes Eksperimentālās un klīniskās medicīnas institūta Zinātniskās izpētes ētikas komisijā un pētījums tika veikts, ievērojot Helsinku deklarāciju. Pirms eksperimenta katram dalībniekam tika pārbaudīta stereoredze tuvumā un tālumā, izmantojot Titmusa un Osterberga testu, un redzes asums tālumā un tuvumā, attiecīgi izmantojot tāluma un tuvuma redzes asuma noteikšanas tabulas. Šo testu veikšana ļāva atlasīt tādus dalībniekus, kas spētu izpildīt pētījuma uzdevumu. Titmusa un Osterberga testi tika veikti, lai noskaidrotu, vai dalībniekam stereoredze atbilst normai un dalībnieka stereoredze spēs nodrošināt uz ekrāna projicētā stimula dziļuma uztveri visos skatīšanās attālumos. Redzes asuma testi ļāva spriest par dalībnieka redzes asuma kvalitāti tālumā un tuvumā.

Pēc testu veikšanas telpas apgaismojums tika samazināts un tālākā pētījuma daļa noritēja mezopiskos apstākļos (1 lx). Dalībnieka redzes sistēmai ļāva adaptēties vismaz 5 minūtes jaunajos gaismas apstākļos. Tumsas adaptācijas laikā notiek pakāpeniska pāreja no vālitēm uz nūjiņām, kurās notiek pigmenta rodopsīna reģenerācija (*Lamb & Pugh, 2004*) un kuras ir gaismas jutīgākas (*Schwartz, 2010*), ļaujot labāk saskatīt projicēto stimulu uz ekrāna fona. Paralēli pustumsas adaptācijai dalībniekam tika izstāstīta eksperimenta būtība un gaita, piebilstot, ka uzdevums ir jāveic pēc iespējas pareizāk un ātrāk, jo pareizība un uzdevuma izpildes laiks tiks ņemti vērā rezultātu analīzē.

Pētījumā dalībniekam relatīva dziļuma noteikšanas uzdevums bija jāveic 9 dažādos skatīšanās attālumos, kas bija diapazonā no 0,50 m līdz 2,50 m ar soli 0,25 m (skatīšanās attālumi bija sekojoši: 0,50 m; 0,75 m; 1,00 m; 1,25 m; 1,50 m; 1,75 m; 2,00 m; 2,25 m; 2,50 m) un kas tika

2.2. Rezultāti un to analīze

Rezultātu analīzei tika izmantoti datorprogrammas automātiski saglabātie dati pie katra skatīšanās attāluma par dalībnieka sniegto atbilžu pareizību, uzdevuma izpildes laiku un par tuvāk dalībniekam projicētā apla (mērķa) atrašanās vietas pozīciju (kopā tās bija četras – no ekrāna centra pa labi, pa kreisi, uz augšu un uz leju) uz volumetriskā ekrāna. Datu analīze tika veikta visiem 20 pētījuma dalībniekiem. Iegūtie dati tika apkopoti un analizēti programmās *MS Excel 2016* un datu analīzes programmā *RStudio 3.5.1*.

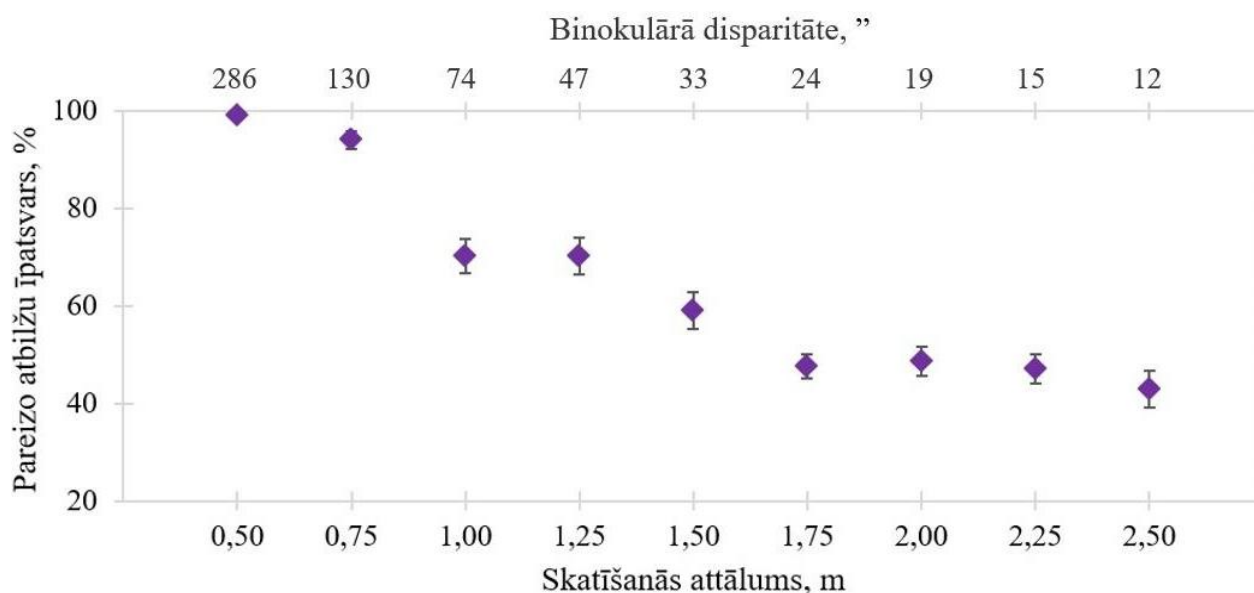
1.apakšnodaļā ir aprakstīti rezultāti un veikta analīze par skatīšanās attāluma ietekmi, savukārt 2.apakšnodaļā - par stimula novietojuma horizontālā un vertikālā virziena ietekmi uz relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevumu. Lai novērtētu abu faktoru ietekmi uz uzdevuma izpildi, tika apskatīti tādi raksturlielumi kā pareizo atbilžu īpatsvars jeb pareizība un uzdevuma izpildes laiks.

2.2.1. Skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam

Pareizo atbilžu īpatsvars

Pareizo atbilžu īpatsvars raksturo pareizību, ar kādu dalībnieks spēja novērtēt, kurā no četriem virzieniem tiek projicēts tuvākais aplis deviņos skatīšanās attālumos, kas šajā pētījumā tika apskatīti diapazonā no 0,50 m līdz 2,50 m, ar soli 0,25 m. Šis raksturlielums var norādīt gan uz volumetriskā ekrāna spēju relatīvā dziļuma nodrošināšanā, gan cilvēka dziļuma uztveres īpatnībām dažādos skatīšanās attālumos.

Visu dalībnieku vidējie rezultāti norādīja, ka visaugstākais pareizo atbilžu īpatsvars ($99\% \pm 2\%$) tika sasniegts tuvākajā skatīšanās attālumā (0,50 m). Palielinoties skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam ekrānam, samazinājās uzdevumu izpildes pareizība, kur pie tālākā skatīšanās attāluma (2,50 m) pareizo atbilžu īpatsvars nokritās līdz $43\% \pm 16\%$ (skat. 2.5. att.).



2.5. attēls. Vidējais pareizo atbilžu īpatsvars atkarībā no skatīšanās attāluma un teorētiski aprēķinātās vidējās relatīvās binokulārās disparitātes. Vertikālie stabīņi norāda ± 1 standartkļūdas robežas.

Lai novērtētu skatīšanās attāluma ietekmi uz pareizo atbilžu īpatsvaru, tika izmantota vienfaktoru atkāroto mērījumu dispersijas analīze *ANOVA* atkarīgām grupām (*ezANOVA* tests), kur kā iekšējais faktors tika norādīts skatīšanās attālums. Sfericitātes novērtēšanai tika izmantots *Mauchly* tests, kur tika pieņemts, ka H_0 : sfericitāte ir spēkā (nav nozīmīgas atšķirības starp dispersijām); H_1 : sfericitāte nav spēkā (ir nozīmīgas atšķirības starp dispersijām un ir nepieciešams lietot brīvības pakāpju korekciju). Izmantotais sfericitātes tests izpildījās ($p > 0,05$) un H_0 izvirzītā hipotēze nebija jānoraida. Tas nozīmē, ka starp skatīšanās attālumiem dispersijas ir vienādas, neradot nepieciešamību izmantot sfericitātes korekciju. Tika novērots, ka skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam ekrānam ($F_{8,152} = 59, p < 0,001$) ir pierādāma statistiski būtiska nozīme uz pareizo atbilžu īpatsvaru. Veicot *Pairwise Post-hoc* t-testu ar *Bonferroni* korekciju, tika novērots, ka nav pierādāma statistiski būtiska atšķirība uzdevuma izpildes pareizībā starp vairākiem skatīšanās attālumiem (skat. 2.2. tab.).

2.2. tabula

Varbūtība, ka nepastāv statistiski būtiska atšķirība uzdevuma izpildes pareizībā, salīdzinot skatīšanās attālumus pa pāriem. Iekrāsotās tabulas šūnas norāda, ka nepastāv statistiski būtiska atšķirība (95 % ticamības līmenī).

Skatīšanās attālums, m	0,75	0,649							
	1,00	< 0,001	< 0,001						
	1,25	< 0,001	< 0,001	1,000					
	1,50	< 0,001	< 0,001	0,283	0,792				
	1,75	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,309			
	2,00	< 0,001	< 0,001	0,003	0,013	1,000	1,000		
	2,25	< 0,001	< 0,001	0,002	0,002	0,350	1,000	1,000	
	2,50	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	0,023	1,000	1,000	1,000
		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25

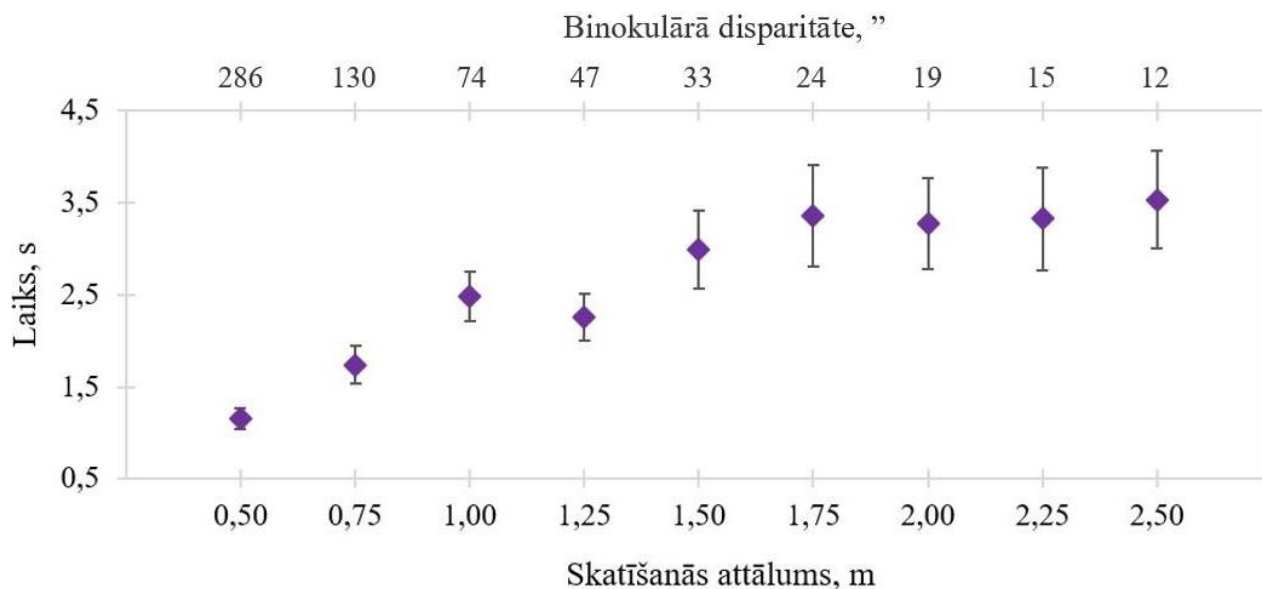
Skatīšanās attālums, m

No iegūtajiem rezultātiem var novērot tendenci, ka, palielinoties skatīšanās attālumam, samazinās pareizo atbilžu īpatsvars. Kā arī var novērot, ka tālākos skatīšanās attālumos nav statistiski būtiskas atšķirības pareizo atbilžu īpatsvarā.

Uzdevuma izpildes laiks

Uzdevuma izpildes laiks raksturo, cik ilgs laiks bija nepieciešams pētījuma dalībniekam, lai noteiktu tuvāk projicēto apli. Īsāks uzdevuma izpildes laiks varētu norādīt, ka dalībniekam bija vieglāk noteikt stimula atrašanās vietu.

Tika novērots, ka, skatīšanās attālumam pieaugot no 0,50 m līdz 2,50 m, uzdevumu izpildes laiks pieauga vidēji no $1,2 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$ līdz $3,5 \text{ s} \pm 2,4 \text{ s}$ (skat. 2.6. att.). Var novērot arī tendenci, ka, pieaugot skatīšanās attālumam, palielinājās datu izkliede.



2.6. attēls. Vidējais uzdevuma izpildes laiks atkarībā no skatīšanās attāluma un teorētiski aprēķinātās vidējās relatīvās binokulārās disparitātes. Vertikālie stabiņi norāda ± 1 standartklūdas robežas.

Lai novērtētu skatīšanās attāluma ietekmi uz uzdevuma izpildes laiku, tika izmantota vienfaktora atkāroto mērījumu dispersijas analīze *ANOVA* (*ezANOVA* tests). Sfericitātes novērtēšanai tika izmantots *Mauchly* tests, kas neapstiprinājās ($p < 0,001$), tādēļ tika pielietots sfericitātes korekcijas *Greenhouse-Geisser* tests. Tika novērots, ka skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam ekrānam ($F_{2,6, 49,9} = 12, p < 0,001$) ir pierādāma statistiski būtiska ietekme uz uzdevuma izpildes laiku. *Pairwise Post-hoc* t-tests ar *Bonferroni* korekciju uzrādīja, ka nav pierādāmas statistiski būtiskas atšķirības tuvākos un tālākos skatīšanās attāļumos, pa pāriem salīdzinot visus skatīšanās attāļumus (skat. 2.3. tab.).

2.3. tabula

Varbūtība, ka nepastāv statistiski būtiska atšķirība uzdevuma izpildes laikā, salīdzinot skatīšanās attālumus pa pāriem. Iekrāsotās tabulas šūnas norāda, ka nepastāv statistiski būtiska atšķirība (95 % ticamības līmenī).

Skatīšanās attālums, m	0,75	0,399							
	1,00	< 0,001	0,009						
	1,25	< 0,001	0,018	1,000					
	1,50	0,001	0,011	1,000	0,346				
	1,75	0,007	0,051	1,000	0,173	1,000			
	2,00	0,004	0,024	0,275	0,342	1,000	1,000		
	2,25	0,014	0,048	0,659	0,412	1,000	1,000	1,000	
	2,50	0,002	0,007	0,411	0,022	1,000	1,000	1,000	1,000
		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25

Skatīšanās attālums, m

Pēc iegūtajiem rezultātiem var novērot tendenci, ka, palielinoties skatīšanās attālumam, uzdevuma izpildes laiks pieaug. Pārsvārā skatīšanās attālumos, kas bija lielāki par 1,00 m, netika pierādītas statistiski būtiskas atšķirības uzdevuma izpildes laikā.

2.2.2. Stimula atrašanās vieta

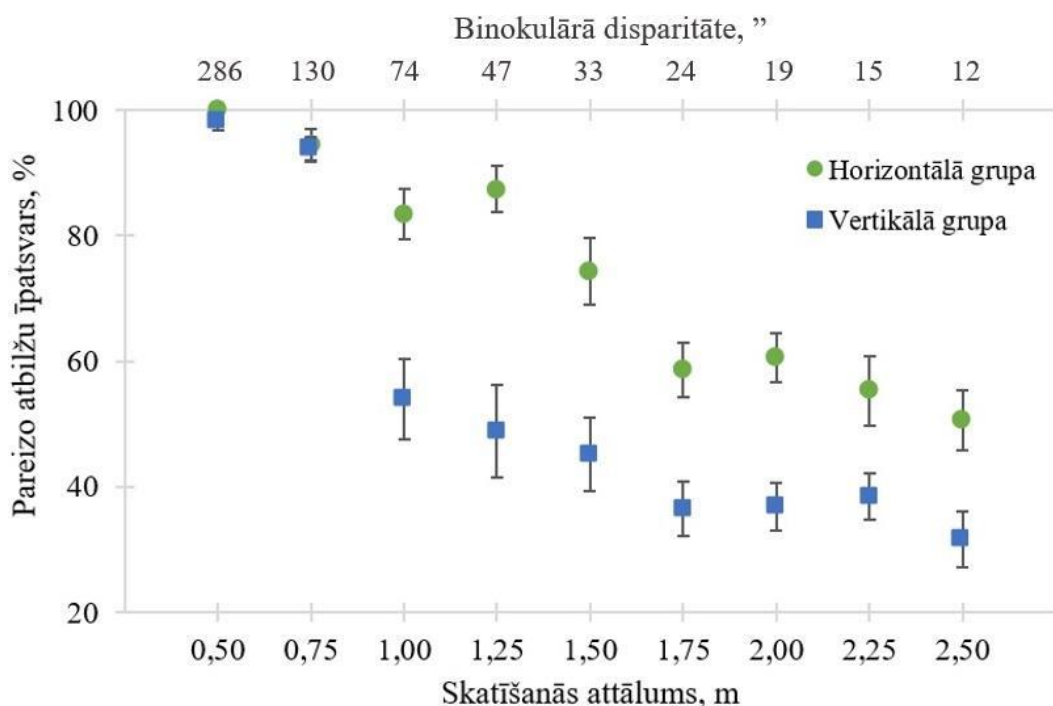
Sākotnēji tika veikti divi atsevišķi *Pairwise Post-hoc* t-testi ar *Bonferroni* korekciju, lai salīdzinātu, kā mērķa atrašanās vieta ietekmē tādu raksturlielumus kā pareizo atbilžu īpatsvaru un uzdevuma izpildes laiku. Kā testa hipotēzes tika izvirzītas: H_0 : disparitātes starp salīdzinātajiem pāriem ir vienādas; H_1 : disparitātes starp salīdzinātajiem pāriem nav vienādas. Šīs analīzes veikšana, pa pāriem salīdzinot disparitātes, ļāva novērtēt, vai mērķa atrašanās vietai ir pierādāma statistiski būtiska ietekme attiecībā pret abiem raksturlielumiem (pareizo atbilžu īpatsvaru un uzdevuma izpildes laiku) atsevišķi. Tika novērots, ka nav pierādāmas statistiski būtiskas atšķirības pareizo atbilžu īpatsvaram gadījumos, kad mērķis no ekrāna centra atradās pa labi vai pa kreisi ($p = 1$) un kad mērķis atradās no ekrāna centra uz augšu vai uz leju ($p = 0,52$), tomēr tika pierādīta būtiska atšķirība gadījumos, kad mērķis no ekrāna centra atradās pa labi vai uz augšu ($p < 0,001$), pa labi vai uz leju ($p < 0,001$), pa kreisi vai uz augšu ($p < 0,001$) un, ja mērķis atradās pa kreisi vai uz leju ($p < 0,001$). Netika pierādītas arī statistiski būtiskas atšķirības uzdevumu izpildes laikā, kad

mērķis atradās pa labi vai pa kreisi ($p = 0,98$) vai uz augšu vai uz leju ($p = 1$), savukārt tika pierādīta būtiska atšķirība gadījumos, kad mērķis no ekrāna centra atradās pa labi vai uz augšu ($p < 0,001$), pa labi vai uz leju ($p < 0,001$), kā arī, ja mērķis atradās pa kreisi vai uz augšu ($p < 0,01$), pa kreisi vai uz leju ($p = 0,01$). Var secināt, ka nav pierādāmas statistiski būtiskas atšķirības gan pareizībā, gan uzdevuma izpildes laikā, ja mērķis atradās pa kreisi vai pa labi no ekrāna centra vai uz augšu vai uz leju, lai gan pēc primārās datu apstrādes (vidējie aprēķini par visiem dalībniekiem) visos skatīšanās attālumos labāki rezultāti gan pareizībā, gan uzdevuma izpildes laikā tika uzrādīti, ja mērķis atradās pa labi, apskatot mērķus, kas atradās horizontālā virzienā, bet vertikālajā virzienā, ja mērķis atradās uz augšu no ekrāna centra. Tālākā datu apstrādē tika apskatītas divas mērķa atrašanās vietas grupas – horizontālā un vertikālā, kur horizontālā raksturo gadījumus, kad tuvāk projicētais aplis atradās pa labi vai pa kreisi no ekrāna centra, un vertikālā, kad aplis atradās uz augšu vai uz leju no volumetriskā ekrāna centra.

Pareizo atbilžu īpatsvars

Iegūtie rezultāti par pareizo atbilžu īpatsvaru raksturo, cik precīzi dalībnieki spēja noteikt tuvākā apļa atrašanās vietu atkarībā no tā, vai tas atradās horizontālajā vai vertikālajā mērķa grupā. Pareizo atbilžu īpatsvara atšķirības starp abām grupām varētu norādīt uz asimetriju dziļuma uztverē starp horizontālo un vertikālo meridiānu.

Visu dalībnieku vidējais pareizo atbilžu īpatsvars gan pie tuvākā (0,50 m), gan pie tālākā (2,50 m) skatīšanās attāluma bija augstāks, ja tuvākais aplis atradās horizontālajā stimula grupā, salīdzinot ar vertikālo grupu. Vidējais pareizo atbilžu īpatsvars horizontālajai stimula grupai, pieaugot skatīšanās attālumam no 0,50 m līdz 2,50 m, samazinājās no $100 \% \pm 0 \%$ līdz $51 \% \pm 22 \%$, turpretī vertikālajai grupai pareizo atbilžu īpatsvars samazinājās no $98 \% \pm 6 \%$ līdz $32 \% \pm 19 \%$ (skat. 2.7. att.).



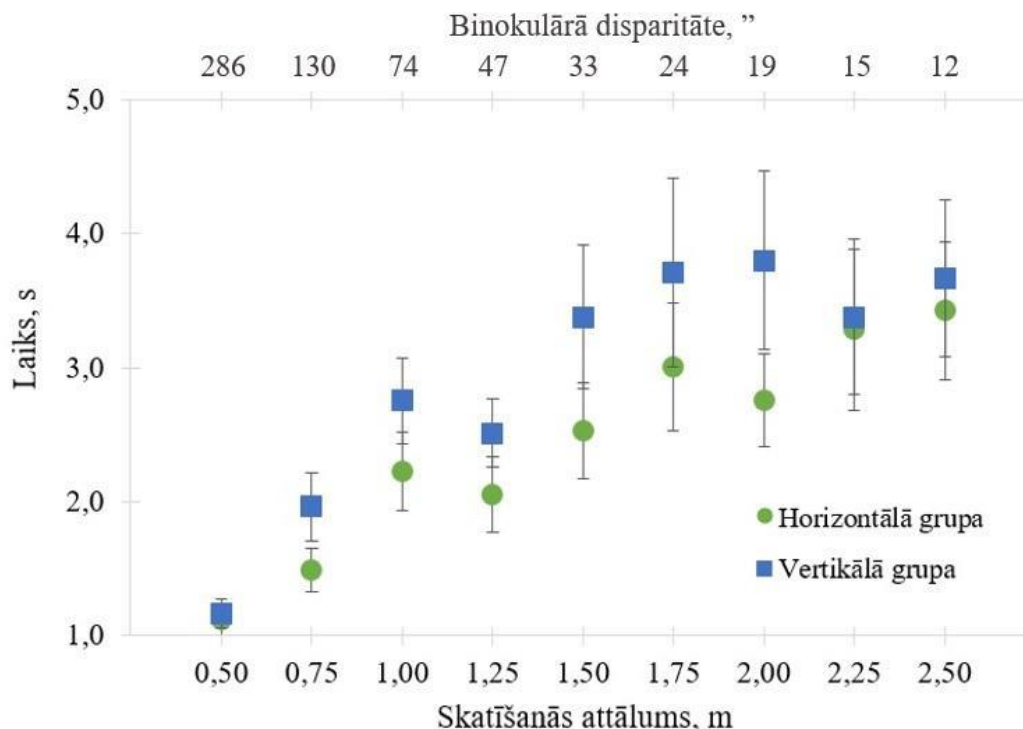
2.7. attēls. Vidējais pareizo atbilžu īpatsvars horizontālajai un vertikālajai stimulu grupai atkarībā no skatīšanās attāluma un teorētiski aprēķinātās vidējās relatīvās binokulārās disparitātes. Vertikālie stabiņi norāda ± 1 standartkļūdas robežas.

Lai novērtētu mērķa ietekmi uz pareizību dažādos skatīšanās attālumos, tika izmantota divfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīze *ANOVA* atkarīgām grupām (*ezANOVA* tests), kur kā iekšējie faktori tika norādīti mērķa atrašanās vieta un skatīšanās attālums. Sfericitātes novērtēšanai tika izmantots *Mauchly* tests. Izmantotais sfericitātes tests neizpildījās abu faktoru – stimula atrašanās vietas un skatīšanās attāluma – mijiedarbībai ($p < 0,001$), kas pierādīja, ka starp abu faktoru mijiedarbību dispersijas nav vienādas, radot nepieciešamību izmantot sfericitātes korekciju, kas tika piemērota, izmantojot sfericitātes korekcijas *Greenhouse-Geisser* testu. Tika pierādīts, ka statistiski būtiska nozīme uz pareizo atbilžu īpatsvaru ir mērķa atrašanās vietas grupai ($F_{1,19} = 40, p < 0,001$) un abu faktoru mijiedarbībai ($F_{3,9, 74,8} = 5, p < 0,001$). Abu faktoru – mērķa atrašanās vietas un skatīšanās attāluma – mijiedarbība raksturo to, ka gan skatīšanās attālums, gan mērķa atrašanās vieta ietekmēja relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma pareizību.

Uzdevuma izpildes laiks

Rezultāti par uzdevuma izpildes laiku varētu raksturot laiku, kas bija nepieciešams, lai dalībnieks spētu izvēlēties atbilstošo mērķa apli, kad tas atradās horizontālajā vai vertikālajā grupā. Īsāks uzdevuma izpildes laiks varētu raksturot situācijas, kad dalībniekam bija vieglāk un ātrāk pamanīt tuvāk projicēto apli.

Vidējais uzdevuma izpildes laiks, ja tuvākais aplis atradās horizontālajā mērķu grupā pieauga no $1,1 \text{ s} \pm 0,6 \text{ s}$ līdz $3,4 \text{ s} \pm 2,3 \text{ s}$, bet vertikālajā – no $1,2 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$ līdz $3,7 \pm 2,6 \text{ s}$, pieaugot skatīšanās attālumam no 0,50 m līdz 2,50 m. Visos skatīšanās attālumos bija novērojams, ka uzdevuma izpildes laiks bija īsāks, ja mērķis atradās horizontālajā stimulu grupā (skat. 2.8. att.), tādēļ tika veikta tālāka datu apstrāde.



2.8. attēls. Vidējais uzdevuma izpildes laiks stimuliem horizontālajā un vertikālajā grupā atkarībā no skatīšanās attāluma līdz volumetriskajam ekrānam un teorētiski aprēķinātās vidējās relatīvās binokulārās disparitātes. Vertikālie stabiņi norāda ± 1 standartklūdas robežas.

Lai novērtētu mērķa atrašanās vietas ietekmi uz uzdevuma izpildes laiku, tika izmantota divfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīze ANOVA (*ezANOVA* tests), kur kā iekšējie faktori tika izvēlēti uzdevuma izpildes laiks un skatīšanās attālums. Tika novērots, ka mērķa atrašanās vietai uz volumetriskā ekrāna ($F_{1,19} = 7, p < 0,05$) ir pierādāma statistiski būtiska nozīme uz uzdevuma izpildes laiku. Netika pierādīta statistiski būtiska ietekme uz uzdevuma izpildes laiku abu faktoru – mērķa atrašanās vietas un skatīšanās attāluma – mijiedarbību, kas liecina, ka uzdevuma izpildes laiks netika būtiski ietekmēts dažādos skatīšanās attālumos, kad mērķis atradās horizontālajā vai vertikālajā grupā.

No iegūtajiem datiem var novērot, ka mērķa atrašanās vieta ietekmēja gan relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma pareizību, gan uzdevuma izpildes laiku. Tika arī novērots, ka uzdevuma veikšanas pareizība, pieaugot skatīšanās attālumam, vairāk pazeminājās, kad mērķis atradās vertikālajā mērķu grupā.

2.3. Diskusija

Izvērtējot pētījuma dalībnieku relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma veikumu, šī pētījuma mērķis bija noskaidrot skatīšanās attāluma ietekmi uz relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevumu ar volumetrisko ekrānu. Lai izvērtētu uzdevuma sniegumu, tika izvēlēti tādi raksturlielumi kā pareizība un uzdevuma izpildes laiks.

Šajā bakalaura darbā tika novērota tendence, ka, palielinoties skatīšanās attālumam, samazinājās uzdevuma veikšanas pareizība, kā arī pieauga uzdevuma izpildes laiks. Skatīšanās attālumam tika pierādīta statistiski būtiska ietekme gan uz uzdevuma izpildes pareizību, gan uzdevuma izpildes laiku. Šo tendenci varētu skaidrot ar binokulāro nosacījumu ietekmes samazināšanos uz dziļuma uztveres spēju, palielinoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam (*Allison et al.*, 2009), jo stimul, kas tika izmantots eksperimentā, galvenokārt tika nodrošināts ar binokulārajiem dziļuma nosacījumiem.

Iwata et al. (2016) pētījumā tika novērots, ka, pieaugot skatīšanās attālumam (no 2,5 m līdz 7,5 m), bija iespējams sasniegt labāku stereoasumu, izmantojot stimulu ar tikpat lielu stimula leņķisko izmēru ($0,5^\circ$), kā šajā bakalaura darbā. *Iwata et al.* (2016) pētījuma iegūtie rezultāti ir pretēji šī bakalaura darba atradnēm, ko varētu skaidrot ar to, ka tika izmantotas atšķirīgas iekārtas un metodes, jo *Iwata et al.* (2016) pētījumā izmantoja ekrānu, kas stereoredzi nodrošināja ar cirkulāru polarizācijas metodi, kur pie lielāka skatīšanās attāluma stimula projekcijas ātrums bija lielāks, tā padarot stimulu vieglāk pamanāmu.

Šajā bakalaura darbā tika pierādīts, ka relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma sniegumu būtiski ietekmēja arī mērķa atrašanās vietas virziens, kas varēja būt horizontāls vai vertikāls. Augstāka pareizība bija novērojama, ja mērķis bija novietots horizontāli (pa labi vai pa kreisi no ekrāna centra), salīdzinot ar vertikālo virzienu (virs vai zem ekrāna centra), ko varētu izskaidrot ar pūļa efektu, ar ko dalībnieki varēja saskarties. Tā kā ekrāna izmērs nav vienlīdz liels horizontālā un vertikālā virzienā (horizontāli – 39,5 cm, vertikāli – 29,5 cm), tad vertikālajā virzienā dalībnieki varēja vairāk novērot pūļa efektu, jo visos skatīšanās attālumos stimula ārējā mala bija tuvāk ekrāna malai. Bija novērojams, ka pūļa efekts palielinājās, pieaugot skatīšanās attālumam līdz ekrānam,

jo, lai visos skatīšanās attālumos nodrošinātu vienādu stimula attēla izmēru uz tīklenes, tālākos attālumos stimula kopējais izmērs uz ekrāna palielinājās. Šī hipotēze varētu būt pārbaudāma turpmākos pētījumos, strādājot ar volumetrisko ekrānu īpaši tālākos attālumos, nodrošinot vienādu attālumu visos virzienos no stimula ārējās malas līdz ekrāna malai. Bija arī novērojams, ka stimula ārējai malai, pietuvojoties ekrāna malai, ir lielāka stimula ārējās līnijas izkliede, kas varēja radīt vairāk izplūduša stimula iespaidu un tādējādi ietekmējot relatīvā dziļuma uztveršanas spējas. Tomēr iegūtās atradnes, domājams, ir iespējams skaidrot ne tikai ar daudzplakņu volumetriskā ekrāna īpatnībām, bet arī ar cilvēka uztveres īpatnībām kā, piemēram, asimetriju redzes uztveres laukā.

Līdzīgi šī bakalaura darba atradnēm arī citos pētījumos (*Cameron et al.*, 2002; *Altpeter et al.*, 2000), kur pie vienādas ekscentricitātes, tika novērota redzes lauka asimetrija, horizontālajā virzienā uzdevumi tika izpildīti labāk nekā vertikālajā virzienā. Šī atradne no bakalaura darbā iegūtajiem rezultātiem tika novērota visos skatīšanās attālumos.

Apskatot atsevišķi četrus redzes lauka virzienus (pa labi, pa kreisi, uz augšu un uz leju), ir novērots, ka labākas pamanīšanas spējas stimulam ar dziļuma komponenti ir stimulam, kas atrodas pa labi un uz augšu (*Previc & Blume*, 1993). Līdzīga atradne bija novērojama arī *Levine & McAnany* (2005) pētījumā, kur, salīdzinot redzes uzdevuma izpildi augšējā un apakšējā redzes lauka puslodē, kad stimulam bija nodrošināts ar dziļuma komponenti, labāks sniegums bija augšējā redzes lauka puslodē. Lai gan šī bakalaura darba rezultātu analīze nepierādīja statistiski būtisku ietekmi uz uzdevuma izpildes pareizību un uzdevuma izpildes laiku visās četrās mērķa atrašanās vietās, visos skatīšanās attālumos tika novērots, ka attiecībā gan uz pareizību, gan uzdevuma izpildes laiku dalībnieku sniegums bija vislabākais, ja stimulam atradās pa labi (no horizontālās stimula grupas) un uz augšu (no vertikālās stimula grupas) no ekrāna centra.

Šī bakalaura darba iegūtās atradnes par horizontālās un vertikālās grupas atšķirību uzdevuma izpildes laikā varētu skaidrot ar atšķirīgajiem acu kustību laikiem abos virzienos. *Hong* (2015) pētījumā tika novērota tendence, ka acu kustības, veicot redzes stimulu izvēles uzdevumu, bija ilgākas vertikālajā virzienā. Šo sakarību, iespējams, varētu skaidrot ar to, ka ikdienā cilvēks, veicot dažādus ikdienas darbus, kā, piemēram, lasīšanu, izmanto horizontālās acu kustības. Lai iegūtu priekšstatu par acu kustībām darbā ar volumetrisko ekrānu dažādos virzienos, nākamajos darbos varētu izmantot acu kustību pierakstu iekārtu.

Šī bakalaura darba iegūtie rezultāti par relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma izpildi dažādos skatīšanās attālumos parādīja dalībnieku spēju uztvert uz daudzplakņu volumetriskā ekrāna projicētu 3D stimulu. Rezultāti par uzdevuma pareizību un uzdevuma izpildes laiku

pierādīja, ka dziļuma uztveri statistiski būtiski ietekmēja gan skatīšanās attālums līdz ekrānam, gan mērķa atrašanās vieta uz ekrāna. Kopumā redzes uzdevums tika veikts pareizi un ātri, ja dalībnieks bija tuvāk volumetriskajam ekrānam un mērķa stimulš atradās horizontālā virzienā jeb dalībnieku acu līmenī.

SECINĀJUMI

1. Pārsvārā skatīšanās attālumiem diapazonā no 0,50 m līdz 1,25 m tika pierādīta būtiska ietekme uz relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma izpildes pareizību. Uzdevuma izpildes pareizība samazinājās, pieaugot skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam ekrānam.
2. Lielākoties tuvākajiem skatīšanās attālumiem (no 0,50 m līdz 0,75 m) tika pierādīta būtiska ietekme uz relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma izpildes laiku. Laiks pieauga, palielinoties skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam ekrānam. Tomēr skatīšanās attālumos lielākos par 1 m būtiska ietekme netika pierādīta.
3. Stimula atrašanās vietai uz volumetriskā ekrāna tika pierādīta būtiska ietekme uz relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma pareizību, kā arī uzdevuma izpildes laiku, kur labāks uzdevuma veikums tika novērots, ja redzes stimulss atradās dalībnieka acu līmenī.

NOBEIGUMS

Daudzplakņu volumetrisko ekrānu ir plānots izmantot dažādu jomu profesionālo uzdevumu veikšanai. Šī bakalaura darba mērķis bija novērtēt, kā skatīšanās attālums līdz volumetriskajam ekrānam ietekmē dziļuma uztveri, ņemot vērā gan ekrāna, gan cilvēka redzes īpatnības.

Relatīvās dziļuma noteikšanas uzdevuma veikšana dažādos skatīšanās attālumos sniedza ieskatu, kā dalībnieki spēj uztvert uz ekrāna radītu 3D stimulu, kas galvenokārt tika nodrošināts ar binokulārajiem dziļuma nosacījumiem. Izvirzītā darba hipotēze, ka relatīvā dziļuma noteikšanas uzdevuma veikums pasliktināsies, pieaugot skatīšanās attālumam, apstiprinājās, jo pareizība samazinājās un uzdevuma izpildes laiks pieauga, palielinoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam. Ātrāk uzdevums tika veikts un visaugstākā pareizība tika sasniegta tuvākajos skatīšanās attālumos. Varēja novērot sakarību, ka lielākos skatīšanās attālumos ilgāks uzdevuma izpildes laiks nerezultējās ar augstāku pareizību, tādēļ ieteicamais darba attālums pie volumetriskā ekrāna ir diapazonā no 0,50 m līdz 1,00 m, lai precīza attēla uztveršana neprasītu daudz laika, kā arī attēla interpretācija būtu precīza, kas ir svarīgi dažādu jomu speciālistiem, kas nākotnē varētu izmantot šo 3D attēlošanas tehnoloģiju.

Iegūtie rezultāti apliecināja ne tikai skatīšanās attāluma ietekmi uz uzdevuma izpildījumu, bet arī mērķa apļa atrašanās vietas, kur labāki rezultāti tika sasniegti, ja mērķis atradās dalībnieka acu līmenī jeb horizontālajā mērķu grupā. Lai pārlicinātos par mērķa apļa atrašanās vietas ietekmi darbā ar volumetrisko ekrānu, turpmākajos darbos vajadzētu noteikt, vai iegūtos rezultātus varētu ietekmēt pūļa efekts volumetriskā ekrāna izmēra dēļ. Arī acu kustību pieraksts varētu sniegt detalizētāku priekšstatu, vai izvirzītā hipotēze par atšķirīgiem acu kustības virzienu laikiem horizontālā un vertikālā virzienā apstiprinās.

PATEICĪBA

Vēlos izteikt pateicību darba vadītājai doktorantei, Prof. mag. Tatjanai Pladerei par tēmas piedāvāšanu, ieguldījumu darba tapšanā un atbalstu.

Vēlos pateikties Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātes Optometrijas un redzes zinātnes nodaļas pētniecei Mārai Vēliņai par palīdzību mana bakalaura darba tapšanā.

Pateicos SIA “LightSpace Technologies”, Latvijas Universitātei (ESP projekts "3D volumetriskais ekrāns un redzes sistēmas funkcionalitāte") un SIA “Mikrotīkls” par ziedojumu projektam Nr.2184 “Redzes ergonomikas pētījumu vides attīstība”, ko administrē Latvijas Universitātes Fonds, par iespēju veikt pētījumu ar daudzplakņu volumetrisko ekrānu.

Paldies arī pētījuma dalībniekiem par viņu veltīto laiku.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- Allison, R. S., Gillam, B. J., & Vecellio, E. (2009). Binocular depth discrimination and estimation beyond interaction space. *Journal of Vision*, 9(1), 1-14.
- Altpeter, E., Mackeben, M., & Trauzettel-Klosinski, S. (2000). The importance of sustained attention for patients with maculopathies. *Vision Research*, 40, 1539-1547.
- Aslankurt, M., Aslan, L., Aksoy, A., Özdemir, M., & Dane, S. (2013). Laterality does not affect the depth perception, but interpupillary distance. *Journal of Ophthalmology*, 1-5.
- Backus, B. T., Fleet, D. J., Parker, A. J., & Heeger, D. J. (2001). Human cortical activity correlates with stereoscopic depth perception. *Journal of Neurophysiology*, 86(4), 2054-2068.
- Bolshakov, A., & Sgibnev, A. (2018). System analysis of formation and perception processes of three-dimensional images in volumetric displays. *Journal of Physics: Conference Series* (973), 1-10.
- Cameron, E. L., Tai, J. C., & Carrasco, M. (2002). Covert attention affects the psychometric function of contrast sensitivity. *Vision Research*, 42(8), 949-967.
- Coutant, B. E., & Westheimer, G. (1993). Population distribution of stereoscopic ability. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13(1), 3-7.
- Cowey, A., & Porter, J. (1979). Brain Damage and Global Stereopsis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 204(1157), 399-407.
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1999). Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. *The Journal of Neuroscience*, 19(13), 5602-5618.
- Curcio, C. A., Sloan, K. R., Kalina, R. E., & Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *The Journal of Comparative Neurology*, 292(4), 497-523.
- Cutting, J. E., & Vishton, P. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The interaction, relative potency, and contextual use of different information about depth. W. Epstein, & S. Rogers (Izd.), *Handbook of perception and cognition: Perception of space and motion* (69.-117. lpp). New York: Academic Press.
- Endukuru, K. C., Maruthy, K. N., & Deepthi, T. S. (2016). A study of critical flickering fusion frequency rate in media players. *International Journal of Physiology*, 4(1), 144-148.
- Favalora, G. E. (2005). Volumetric 3D displays and application infrastructure. *Computer*, 38(8), 37-44.
- Geng, J. (2013). Three-dimensional display technologies. *Advances in Optics and Photonics*, 5(4), 456-535.

- Goldstone, B. E. (2010). *Sensation and perception*. Australia: Wadsworth, Cengage Learning.
- Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2006). An evaluation of depth perception on volumetric displays. *UIST '06 Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (3.-12. lpp). New York: ACM.
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K., & Banks, M. S. (2008). Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3), 1-30.
- Hong, S. K. (2015). Comparison of vertical and horizontal eye movement times in the selection of visual targets by an eye input device. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 34(1), 19-27.
- Ideses, I., & Yaroslavsky, L. (2005). Three methods that improve the visual quality of colour anaglyphs. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(12), 755-562.
- Iwata, Y., Fujimura, F., Handa, T., Shoji, N., & Ishikawa, H. (2016). Effects of target size and test distance on stereoacuity. *Journal of Ophthalmology*, 1-5.
- Yang, D. K., & Wu, S. T. (2014). *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (2. izd.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Konošonoka, V. (2018). *Dziļuma uztvere uz volumetriskā ekrāna* (Bakalaura darbs). Latvijas Universitāte.
- Kristjansson, A., & Sigurdardottiro, H. M. (2008). On the benefits of transient attention across the visual field. *Perception*, 37, 747-764.
- Lamb, T. D., & Pugh, E. N. (2004). Dark adaptation and the retinoid cycle of vision. *Progress in Retinal and Eye Research*, 23(3), 307-380.
- Lappin, J. S. (2014). What is binocular disparity? *Frontiers in Psychology*, 5, 1-6.
- Levine, M. W., & McAnany, J. J. (2005). The relative capabilities of the upper and lower visual hemifields. *Vision Research*, 45(21), 2820-2830.
- Mai, M. N., & Schlueter, M. A. (2010). The relationship between pupillary distance and depth perception in humans. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(13), 4359.
- Mochizuki, H., Shoji, N., Ando, E., Otsuka, M., Takahashi, K., & Handa, T. (2012). The magnitude of stereopsis in peripheral visual fields. *The Kitasato Medical Journal*, 42(1), 1-5.
- Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature*, 414(6860), 197-200.

- Owens, A. D., & Leibowitz, H. W. (1980). Accommodation, convergence, and distance perception in low illumination. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 57(9), 540-550.
- Pizlo, Z. (2006). Study of the perception of three-dimensional spatial relations for a volumetric display. *Journal of Electronic Imaging*, 15(3), 1-8.
- Previc, F. H., & Blume, J. L. (1993). Visual search asymmetries in three-dimensional space. *Vision Research*, 33(18), 2697-2704.
- Read, J. C. (2014). Stereo vision and strabismus. *Eye*, 29(2), 214-224.
- Reichelt, S., Häussler, R., Fütterer, G., & Leister, N. (2010). Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays. *Proceedings of SPIE*, 7690, 1-12.
- Schwartz, S. H. (2010). *Visual perception: a clinical orientation* (4. izd.). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Snowden, R., Thompson, P., & Troscianko, T. (2006). *Basic vision: an introduction to visual perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Steinman, S. B., Steinman, B. A., & Garzia, R. P. (2000). *Foundations of binocular vision: a clinical perspective*. New York: The McGraw-Hill Companies.
- Sullivan, A. (2003). A solid-state multi-planar volumetric display. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 34(1), 1531-1533.
- Viguié, A., Clément, G., & Trotter, Y. (2001). Distance perception within near visual space. *Perception*, 30(1), 115-124.
- Woo, G. C., & Sillanpaa, V. (1979). Absolute stereoscopic thresholds as measured by crossed and uncrossed disparities. *Optometry and Vision Science*, 56(6), 350-355.

Bakalaura darbs “Dziļuma uztvere darbā ar volumetrisko ekrānu atkarībā no skatīšanās attāluma” izstrādāts LU Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Gunita Jankovska Stud.apl.Nr. gj16006

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītāja: doktorante, Prof. mag. Tatjana Pladere

Recenzents: lektore, Prof. mag. Anete Petrova

Darbs iesniegts Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā _____

Dekāna pilnvarotā persona: metodiķe Dzintra Holsta

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

_____. protokola Nr. _____

Komisijas sekretārs: _____