



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba
kopsavilkums**

Mehrdad Naderi

**ELEKTROENCEFALOGRĀFIJAS
METODES PIELIETOJUMS
VOLUMETRISKĀS
TRĪSDIMENSIONĀLĀS VIZUĀLĀS
UZTVERES IZPĒTEI**

Rīga 2024



UNIVERSITY OF LATVIA

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Mehrdad Naderi

ELEKTROENCEFALOGRĀFIJAS METODES PIELIETOJUMS VOLUMETRISKĀS TRĪSDIMENSIONĀLĀS VIZUĀLĀS UZTVERES IZPĒTEI

Promocijas darba kopsavilkums
dabaszinātņu doktora grāda iegūšanai
Apakšnozare: Medicīnas fizika

Rīga, 2024

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā laika posmā no 2020. gada līdz 2024. gadam.

Darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām un literatūras saraksta. Darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir 40 attēli, viena tabula, 131 atsauce, apjoms – 79 lapas.

Darba forma: disertācija dabaszinātņu, medicīniskās fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. phys.* **Gunta Krūmiņa**, profesore, Latvijas Universitāte.

Darba recenzenti:

- 1) *Dr. habil. phys.* **Māris Ozoliņš**, profesors, Latvijas Universitāte;
- 2) *Dr. phys.* **Aleksejs Kataševs**, profesors, Rīgas Tehniskā universitāte;
- 3) *Dr.* **Kairi Kreegipuu**, profesore, Tartu Universitāte.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2024. gada 11. oktobrī Latvijas Universitātes Dabaszinātņu nozares promocijas padomes atklātā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulv. 19.

Padomes priekšsēdētājs

Dr. habil. phys. **Jānis Spigulis**:

Promocijas padomes sekretāre

Sintija Siliņa:

© Latvijas Universitāte, 2024

© Mehrdad Naderi, 2024

ISBN 978-9934-36-266-8

ISBN (PDF) 978-9934-36-267-5

ANOTĀCIJA

Disertācija uzrakstīta angļu valodā, tajā ir 40 attēli, viena tabula un 131 atsauce uz literatūras avotiem, apjoms - 79 lapas. Disertācijas mērķis ir izpētīt elektroencefalogrāfijas (EEG) metodes pielietojumu volumetriskās trīsdimensionālās (3D) vizuālās uztveres izvērtēšanā. Pētījumā salīdzināts jaunais volumetriskais daudzplakņu displejs ar tradicionāliem plakanajiem ekrāniem, tādiem kā anaglifū 3D sistēma. EEG efektīvi veica smadzeņu aktivitātes mērījumus 3D uztveres uzdevumu izpildes laikā. Novērota atšķirīga smadzeņu reakcija uz atšķirīga dziļuma attēliem. Volumetriskajā displejā ar notikumu ietekmi asociētā potenciāla (*Event-related Potential - ERP*) P3 komponents uzrādīja būtiskas atšķirības salīdzinājumā ar anaglifū displeju. Jaudas spektrālā blīvuma (*power spectral density - PSD*) analīze parādīja augstāku smadzeņu aktivitāti anaglifā salīdzinājumā ar volumetrisko displeju un uzrādīja pusložu asimetriju. Turklāt 2D volumetriskā uztverē P3 komponents bija augstāks nekā 3D uztverē. Savukārt dziļuma uztvere volumetriskajā displejā bija vieglāka vāja apgaismojuma apstākļos.

Noslēgumā secināts, ka EEG ir vērtīga iekārta smadzeņu aktivitātes izpētei, veicot 3D vizuālos uzdevumus ar dažādām attēlveidošanas tehnoloģijām. Šis pētījums sniedz ieguldījumu izpratnē par to, kā cilvēka vizuālā sistēma uztver dziļumu un kā to var objektīvi novērtēt. Pēdējos pētījumos izvērtēta dažādu attēlveidošanas tehnoloģiju ietekme uz cilvēka uztveri.

Atslēgvārdi: elektroencefalogrāfija, volumetriskais daudzplakņu displejs, vizuālā meklēšana, dziļuma uztvere, izsauktie potenciāli, jaudas spektrālais blīvums

SATURS

| | |
|---|----|
| ANOTĀCIJA | 3 |
| SATURS | 4 |
| 1. IEVADS | 6 |
| 1.1. Motivācija | 6 |
| 1.2. Disertācijas struktūra | 6 |
| 1.2.1. Mērķis | 6 |
| 1.2.2. Uzdevumi | 6 |
| 1.2.3. Hipotēze | 7 |
| 1.3. Darba novitāte | 7 |
| 2. LITERATŪRAS PĀRSKATS | 8 |
| 2.1. Ievads | 8 |
| 2.2. EEG pētījumi par redzes sistēmu | 8 |
| 2.3. Volumetriskais daudzplakņu displejs | 9 |
| 3. METODES | 10 |
| 3.1. Dalībnieki | 10 |
| 3.2. Displeji | 10 |
| 3.3. Pētījuma dizains un uzdevums | 11 |
| 3.4. EEG datu pieraksts un analīze | 12 |
| 4. REZULTĀTI | 13 |
| 4.1. Smadzeņu aktivitāte: volumetriskais <i>versus</i> stereoskopisko attēlu ... | 13 |
| 4.1.1. Uzdevumu izpildes dati | 13 |
| 4.1.2. Elektrofizioloģiskie dati | 14 |
| 4.2. Smadzeņu aktivitāte: krustotās un nekrustotās disparitātes attēli .. | 16 |
| 4.2.1. Uzdevumu izpildes dati | 16 |
| 4.2.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP) | 17 |
| 4.2.3. Jaudas spektrālais blīvums (power spectral density – PSD) .. | 19 |
| 4.3. Smadzeņu aktivitāte: attēls ar telpisko pazīmi <i>versus</i> attēlu bez telpiskās pazīmes | 20 |
| 4.3.1. Uzdevumu izpildes dati | 20 |
| 4.3.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP) | 20 |
| 4.3.3. Viļņu formas | 22 |
| 4.3.4. Jaudas spektrālais blīvums (power spectral density – PSD) ... | 23 |

| | |
|--|----|
| 4.4. Dažādu apgaismojuma apstākļu ietekme uz volumetriskā attēla uztveri | 23 |
| 4.4.1. Uzdevumu izpildes dati | 23 |
| 4.4.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP) | 24 |
| 5. DISKUSIJA | 26 |
| 5.1. Smadzeņu aktivitāte: stereoskopiskā <i>versus</i> volumetrisko aktivitāti . | 26 |
| 5.2. Smadzeņu aktivitāte: krustotā disparitāte <i>versus</i> nekrustoto disparitāti | 26 |
| 5.3 Smadzeņu aktivitāte: attēli bez telpiskās pazīmes <i>versus</i> attēliem ar telpisko pazīmi uz volumetriskā daudzplakņu displeja | 27 |
| 5.4. Apgaismojuma ietekme uz volumetriskā attēla uztveri | 27 |
| 6. SECINĀJUMI | 28 |
| 7. AIZSTĀVAMĀS TĒZES | 29 |
| 8. PUBLIKĀCIJU UN KONFERENČU SARAKSTS | 30 |
| Publikācijas | 30 |
| Konferences | 30 |
| 9. IZMANTOTIE LITERATŪRAS AVOTI | 32 |

1. IEVADS

1.1. Motivācija

Smadzenes ir sarežģīts neironu tīkls, kas darbojas, lai apstrādātu informāciju. Smadzeņu-datora mijiedarbību (*Brain-Computer Interfaces - BCI*) var izmantot, lai pētītu šos savienojumus un izprastu mentālos stāvokļus. *BCI* kļūst arvien populārāka, zinātniekiem cenšoties uzzināt vairāk par to, kā darbojas smadzenes. Trīsdimensiju (3D) displeji piedāvā jaunu veidu, kā uztvert informāciju, radot dziļuma un tilpuma sajūtu, ko var izmantot, lai uzlabotu skatīšanās pieredzi un atvieglotu informācijas vizualizāciju [1].

Būtiskākais jautājums ir, vai jaunā displeja radītais dziļuma efekts rada kaut nelielus redzes traucējumus jeb simptomus, kas rodas akomodācijas-vergence konflikta dēļ [2]. Tādējādi trīsdimensiju vizualizācijas sistēmu ergonomikas novērtēšana ir kļuvusi būtiska dziļuma uztveres aspektā [3] [4].

3D displeju mijiedarbību ar mūsu redzes sistēmu var novērtēt, izmantojot subjektīvas vai objektīvas metodes, katrai no tām ir savas priekšrocības un trūkumi. Starp objektīvajām metodēm elektroencefalogrāfija (EEG) izceļas kā spēcīga neuroattēlošanas tehnika. EEG ir iecienīta tās lieliskās laika izšķirtspējas, neinvazīvuma un salīdzinoši zemo uzstādīšanas izmaksu dēļ, padarot to par visbiežāk izmantoto metodi smadzeņu signālu uztveršanai pētījumos, kas saistīti ar 3D displeju mijiedarbību [5].

1.2. Disertācijas struktūra

1.2.1. Mērķis

Disertācijas mērķis ir izstrādāt elektroencefalogrāfijas lietojumprogrammu, kas varētu monitorēt smadzeņu aktivitāti, indivīdiem uztverot trīsdimensiju attēlu, kas tiek attēlots uz volumetriskā daudzplakņu displeja.

1.2.2. Uzdevumi

- 1) novērtēt smadzeņu aktivitāti, aplūkojot 3D attēlus uz volumetriskā daudzplakņu displeja;
- 2) noteikt un salīdzināt ar notikumu asociēto potenciālu (*event-related potentials - ERP*) komponentu, kā arī jaudas spektrālo blīvumu (*power spectral density - PSD*) lielumus, aplūkojot ar dažādām attēlu atveides tehnoloģijām radītos reālos un simulētos 3D attēlus;
- 3) novērtēt ārējo apstākļu - apgaismojuma, kā arī uzdevuma atkārtēšanas - ietekmi uz smadzeņu garozas aktivitāti;
- 4) izvērtēt EEG pielietojumu dziļuma uztveres objektīvam novērtējumam.

1.2.3. Hipotēze

Disertācijā izvirzīta hipotēze, ka dažādas 3D attēlu vizualizācijas sistēmas, piemēram, volumetriskais multiplakņu displejs un 2D displejs ar simulēti radīto 3D attēlu, izmantojot anaglifa metodi, varētu ietekmēt izsaukto potenciālu (ERP) amplitūdu un latenci. Papildus tam tika pieļauts, ka smadzeņu aktivitāte varētu būt lielāka simulētā 3D attēla situācijā, pielietojot anaglifa attēlošanas metodi, nekā 3D attēlu uztverē, kad 3D attēls tiek veidots uz volumetriskā displeja. Turklāt tika izvirzīta hipotēze, ka vides apgaismojumam nav būtiskas ietekmes uz vizuālā uzdevuma izpildi tilpuma displejā.

1.3. Darba novitāte

Disertācija piedāvā jaunu metodi dziļuma uztveres novērtēšanai, risinot objektīvu metožu trūkumu šajā jomā. Pašreizējās pieejas galvenokārt balstās uz subjektīviem novērtējumiem, kas ir pakļauti aizspriedumiem un minējumiem. Turklāt subjektīvās metodes bieži vien fokusējas tikai uz binokulāro disparitāti kā dziļuma uztveres norādēm, neņemot vērā citas dziļuma norādes, ko izmanto cilvēka redzes sistēma. Reģistrējot un analizējot smadzeņu aktivitātes datus, kad cilvēks uztver 3D attēlus, kas satur vairākas dziļuma norādes, piedāvātā metode ir vērsta uz objektīvu dziļuma uztveres novērtēšanu, pietuvinot to reālās pasaules pieredzei. Lai gan jaunajai metodei var būt arī trūkumi, tā ir daudzsoļa, lai novērtētu dziļuma uztveri un atklātu pamatprocesus, kas saistīti ar dažādiem dziļuma uztveres veidiem, piemēram, globāliem un lokāliem norādījumiem.

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

2.1. Ievads

Ir liels izaicinājums izprast mehānismus, kas ir cilvēka smadzeņu darbības pamatā, izstrādājot vizuālās uztveres algoritmus un modeļus. Neinvazīvu smadzeņu darbības reģistrēšanas metožu attīstīšana sniedz daudz iespēju atklāt dažādus cilvēka smadzeņu darbības uztveres aspektus izzinās un atmiņas jomā. Turklāt, veicot smadzeņu darbības mērījumus un analīzi, viegli ir iespējams objektīvi novērtēt jaunās izstrādātās attēlatveidošanas ierīces un instrumentus, kas mijiedarbojas ar cilvēka redzi. Lai izprastu minētās mijiedarbības pamatprincipu, mums jāzina cilvēka redzes sistēmas funkcijas un izstrādātās ierīces struktūra. Šajā disertācijā galvenā uzmanība pievērsta dziļuma uztveres pētīšanas iespējām, pielietojot EEG metodi, ja 3D attēls tiek veidots uz volumetriskā daudzplakņu displeja.

2.2. EEG pētījumi par redzes sistēmu

Vairāki pētījumi vizuālās meklēšanas jomā ir izstrādāti tā, lai vērtētu EEG metodes pielietojumu signālu reģistrēšanai un analīzei. Šajā darbā īsi apskatītas dažas būtiskākās pieejas un iepriekš paveiktais.

Alex Dan & Miriam Reiner pētījumā secināts, ka kognitīvā slodze, apstrādājot notikumus 3D virtuālajā pasaulē, ir mazāka, nekā apstrādājot notikumus, kas projicēti uz 2D displejiem. Viņi pētīja kognitīvās slodzes indeksu (*cognitive load index - CLI*) – pieres daivas teta viļņu un paura daivas alfa viļņu vidējās jaudas attiecību [6].

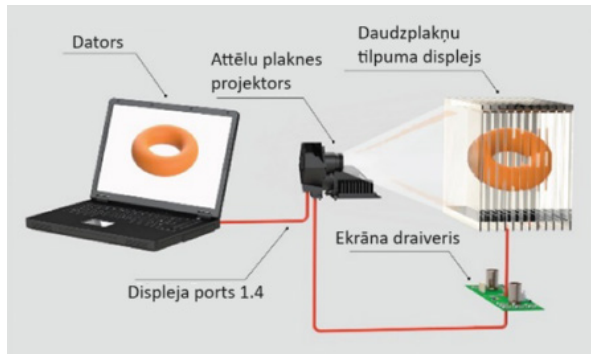
Fazlyyyakhmatov et al. pētīja EEG aktivitāti, kamēr cilvēki binokulāri uztvēra 2D attēlu dziļuma pazīmi. Viņi atklāja, ka, uztverot stereoattēlus ar nepareizu dziļuma uztveri, samazinājās alfa viļņu aktivitāte kreisajā paura reģionā un abu smadzeņu pušu pieres daivas zonās. Tomēr aktivitāte beta-1, beta-2 un delta viļņu frekvenču joslās būtiski nemainījās [7].

Joto et al. pētīja objektu krāsu stimulu ietekmi uz cilvēka smadzeņu aktivitāti uztveres un uzmanības procesā. Viņi secināja, ka sarkanā gaisma aktivizēja centrālo nervu sistēmu spēcīgāk nekā zilā vai zaļā gaisma [8]. Turklāt citā pētījumā ziņots, ka dzeltenās nokrāsas dispersijas diapazons ir lielāks nekā sarkanās nokrāsas, savukārt sarkanās krāsas dispersijas diapazons ir lielāks nekā zilās nokrāsas, bet zaļās nokrāsas dispersijas diapazons ir mazāks [9].

2.3. Volumetriskais daudzplakņu displejs

Daudzplakņu 3D displeja darbības pamatprincips: 3D attēlu uztvere pamatojas uz redzes noturību, kas apvieno vairākus 2D attēlus, kuri tiek projicēti uz vairākām plaknēm vienlaicīgi, tādējādi radot telpisku un reālu attēlu – objektu [10]. Šī pieeja ļauj dažādiem slāņiem attēlot dažāda dziļuma attēlus, izmantojot gan statisko, gan kustības paralaksi, lai šajā tehnoloģijā veidotu 3D attēlu. Volumetriskiem daudzplakņu displejiem ir vairākas priekšrocības, tostarp skatītājiem ir iespēja tos vērot no dažādiem leņķiem bez stereobrillēm, tā ievērojami samazinot konfliktus (attiecībā uz to, kā viņi redz attēlu).

Multiplanārais optiskais elements (MOE) sastāv no 20 ar gaisu atdalītām dziļuma plātnēm ar gaismu izkliedējošiem slāņiem, kas sinhronizēti ar ātras darbības projektoru. Darbojoties kā elektroniski maināmam cietviela projekcijas apjomam, MOE veicina tilpuma skata rekonstrukciju, iegūstot 3D skata 2D šķēlumus [11], kā parādīts 1. attēlā.



1. att. Volumetriskā daudzplakņu displeja struktūra [11].

3. METODES

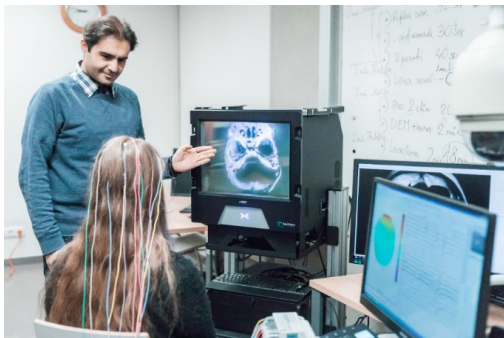
Izstrādājot šo disertāciju, tika veikti vairāki pētījumi, lai analizētu EEG pielietojumu dziļuma uztveres novērtēšanai, aplūkojot 3D attēlus, kas attēloti uz volumetriskā daudzplakņu displeja, kā arī simulēto 3D attēlu uztveri uz plakanā jeb tradicionālā 2D displeja.

3.1. Dalībnieki

Pētījuma dalībnieki tika atlasīti neatkarīgi no etniskās piederības. Pētījumā piedalījās 81 indivīds, no kuriem 27 bija vīrieši un 54 sievietes, vidējais vecums – 25 ± 5 gadi. Dalībnieki brīvprātīgi pieteicās pētījumam un pirms eksperimenta uzsākšanas parakstīja informētās piekrišanas dokumentu. Ikvienam dalībniekam tika veikta redzes pārbaude, lai pārliecinātos par binokulārās redzes atbilstību normai.

3.2. Displeji

Redzes stimuli tika prezentēti uz divu dažādu veidu displejiem. Pirmais displejs bija cietvielu volumetriskais daudzplakņu displejs (*LightSpace Technologies*, modelis: X1907, 19 collu diagonāle, 60 Hz frekvence) (skat. 2. att.).



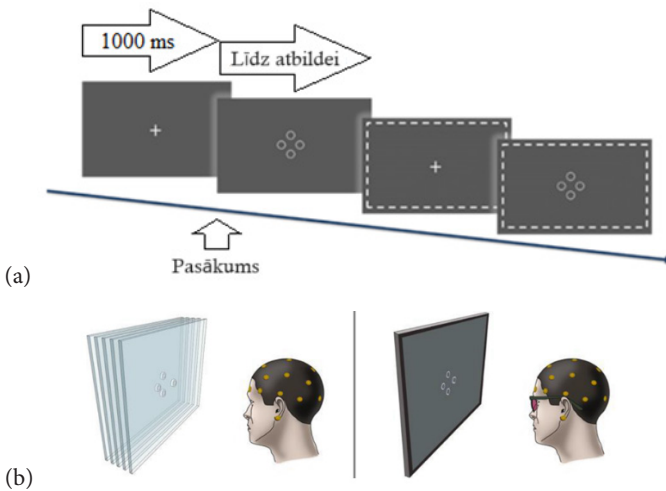
2. att. 3D attēla prezentēšanai tika izmantots volumetriskais daudzplakņu displejs.

Otrā veida displejs bija plakanekrāna monitors (*Dell P2417H*, 24 collu diagonāle), ar kura palīdzību tika veidoti simulētie 3D attēli, pielietojot anaglifa metodi. LED ekrāna frekvence bija 60 Hz.

3.3. Pētījuma dizains un uzdevums

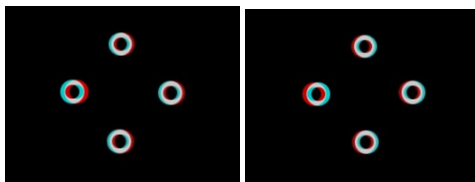
Pētījuma dizains un uzdevuma kopējā struktūra visos pētījuma etapos bija līdzīga, tikai ar nelielām atšķirībām. Pētījums “Apgaismojuma ietekme uz volumetriskā 3D attēla dziļuma uztveri” tika veikts divos dažādos apgaismojuma apstākļos: skotopiskā apgaismojumā ar apgaismojumu 1,2 luksi un fotopiskā apgaismojumā ar apgaismojumu 1146 luksi.

Katrā pētījuma daļā bija 160 mēģinājumi. 50% gadījumu tika rādīti 3D attēli, un 50% gadījumu - 2D attēli, rādīšana notika randomizētā secībā. Katra sesija sākās ar fiksācijas krustu, kas tika attēlots ekrāna vidū 1 sekundi. Pēc tam $1,0^\circ$ redzes lauka ekscentricitātē no displeja centra tika parādīti četri gredzeni (ārējais diametrs - $0,5^\circ$, līnijas platums - $0,1^\circ$). 3D attēlu rādīšanas laikā viens gredzens tika novietots uz vienas plaknes tuvāk skatītājam, kā parādīts 3. attēlā (a) un (b). Dalībniekiem bija jāziņo par tā relatīvo atrašanās vietu, izvēloties vienu no četrām atbildēm (augšup, pa labi, lejup un pa kreisi). Dalībnieki sēdēja pretī displejam 90 cm attālumā (skat. 3.(b) att.).



3. att. Pētījuma sesijas attēlu atveides plāns (a). Pētījumā pielietoto ekrānu un dalībnieka izvietojums un stimula shematisks attēls volumetriskā daudzplakņu displejā un plakanā paneļa displejā (b).

Plakanā ekrāna gadījumā krustotās un nekrustotās disparitātes redzes stimuliem dimensiju parametri bija tādi paši kā volumetriskā 3D attēla elementiem. Mērījumu veikšanas laikā dalībnieki lietoja sarkani-zili-zaļos filtrus (sarkanais filtrs vienmēr bija priekšā labajai acij). 4. attēlā parādīts redzes stimuls, kas veidots ar anaglifa metodi krustotās un nekrustotās disparitātes gadījumiem.



4. att. Krustotās (labajā pusē) un nekrustotās (kreisajā pusē) disparitātes redzes stimuluss (sarkanais filtrs labās acs priekšā).

3.4. EEG datu pieraksts un analīze

Uz pētījuma dalībnieka galvas tika izvietots 21 aktīvs elektrodus, balstoties uz starptautisko 10-20 sistēmu, un par references lielumu tika izvēlēts visu aktīvo elektrodu vidējais rādītājs (*skat. 5. att.*).

EEG datu analīzei izmantots atvērtais kods EEGLAB 2022.1.0, kas tika savienots ar programmu MATLAB R2020a (*MathWorks Inc., Natick, MA, USA*).



5. att. Ekrāna un pētījuma dalībnieka vides iekārtojums un elektrodu novietojums.

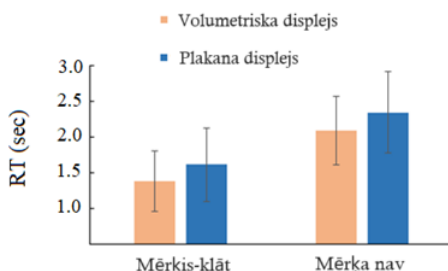
4. REZULTĀTI

4.1. Smadzeņu aktivitāte: volumetriskais *versus* stereoskopisko attēlu

4.1.1. Uzdevumu izpildes dati

Vidējais pareizais atbilžu sniegums uz mērķa stimuliem bija 0,98 (SD = 0,04), ja tika aplūkoti simulētie 3D attēli, un 0,98 (SD = 0,04), ja tika aplūkoti reāli 3D attēli uz daudzplakņu displeja. Attiecīgi pareizo atbilžu skaits samazinājās līdz 0,81 (SD = 0,06) gan simulētiem jeb stereoskopiskiem attēliem, gan reāliem jeb volumetriskiem attēliem (0,81 SD = 0,10), ja redzes stimulam nebija telpiskās pazīmes (nulle disparitāte), tas nozīmē, ka cilvēki vairāk kļūdījās un viņiem šķita, ka redz telpisku attēlu, lai gan patiesībā aplūkoja divdimensiju attēlu. Divpušu ANOVA uzrādīja būtisku atšķirību starp abiem stāvokļiem - trīsdimensiju un divdimensiju ($F(1, 19) = 77,5, p < 0,001, \eta^2_G = 0,664$). Savukārt netika novērota stimula atveides (volumetriskais vai plakana displejs) ($F(1, 19) = 0,005, p = 0,95, \eta^2_G < 0,001$) un mijiedarbības ($F(1, 19) = 0,07, p = 0,79, \eta^2_G < 0,001$) ietekme uz atbilžu sniegumu.

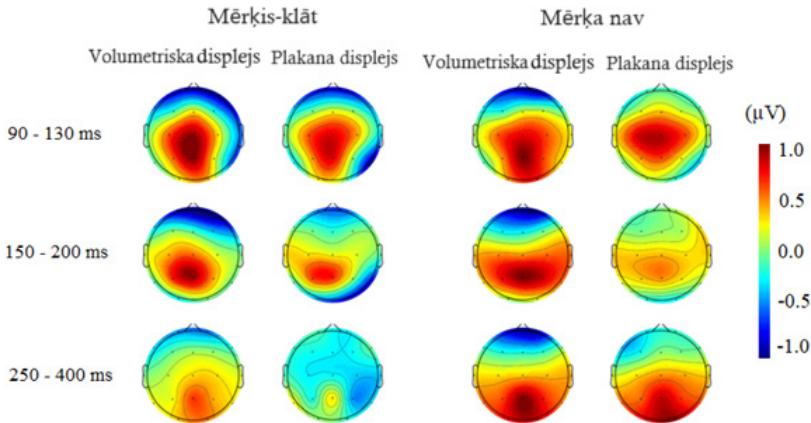
Tika analizēts arī reakcijas laiks (*reaction time* - RT). Vidējais laiks bija ievērojami īsāks, kad telpiskie redzes stimuli (reālie un simulētie) tika parādīti uz volumetriskā daudzplakņu displeja, nekā tad, ja tika demonstrēti uz plakanā displeja (*skat. 6. att.*). Statistiski nozīmīgs efekts ir attēlatveides sistēmām ($F(1, 19) = 17,5, p < 0,001, \eta^2_G = 0,037$) un stimulu nosacījumiem (krustotā vai nekrustotā disparitāte) ($F(1, 19) = 58,7, p = 0,001, \eta^2_G = 0,348$). Tomēr būtiska mijiedarbība netika novērota ($F(1, 19) = 0,12, p = 0,73, \eta^2_G < 0,001$).



6. att. Vidējais smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks, prezentējot reālu telpisku attēlu uz volumetriskā displeja un simulētu attēlu uz plakanā displeja, attiecīgi ar telpisko komponenti vai bez tās.

4.1.2. Elektrofizioloģiskie dati

7. attēlā redzamas ERP amplitūdas izmaiņas trīs laika diapazonos (apkopojums par visu dalībnieku vidējām vērtībām), veicot telpisko pazīmju meklēšanas uzdevumus pie volumetriskā daudzplakņu displeja un pie plakanā paneļa displeja.



7. att. ERP topogrāfiskās kartes, kas atspoguļo smadzeņu darbību trīs laika posmos, vidējās vērtības visos posmos.

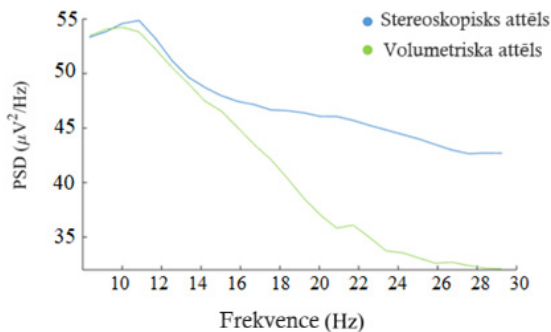
ANOVA analīze uzrādīja būtisku atšķirību starp rezultātiem, kas iegūti no stimuliem, kuri satur telpisko komponenti vai nesatur telpisko komponenti ($F(1, 19) = 8,7, p = 0,03, \eta^2_G = 0,034$), un elektrodu novietojuma ($F(2,0, 38,2) = 10,4, p < 0,01, \eta^2_G = 0,060$) ietekmi uz ERP vidējām amplitūdām laika posmā 90–130 ms pēc redzes stimula parādīšanās uz displeja. Netika uzrādīta būtiska statistiska atšķirība starp rezultātiem, ja tika pielietotas dažādas attēla atveides sistēmas (volumetriskās un plakanā displeja) ($F(1, 19) = 0,04, p = 0,84, \eta^2_G < 0,001$), un netika pierādīta arī mijiedarbība starp faktoriem. *Post hoc Bonferroni* koriģētie pāru *t*-testi neatklāja nekādas būtiskas atšķirības, salīdzinot smadzeņu aktivitāti starp divām puslodēm ne elektrodiem pakauša rajonā ($p = 1,0$), ne elektrodiem paura reģionā ($p = 0,95$).

Laika posmā 150–200 ms pēc stimulu parādīšanās būtiskas galvenās ietekmes uz ERP vidējām amplitūdām tika konstatētas šādiem faktoriem: attēla atveides sistēmai ($F(1, 19) = 35,4, p < 0,01, \eta^2_G = 0,065$) un elektrodiem ($F(4, 76) = 44,2, p < 0,01, \eta^2_G = 0,243$). Stimula veidam (satur telpisko komponenti vai nesatur telpisko komponenti) būtiska ietekme atklāta ($F(1, 19) = 0,2, p = 0,66, \eta^2_G = 0,001$), kā arī netika pierādīta mijiedarbība starp faktoriem. *Post hoc t*-testi parādīja, ka smadzeņu aktivitāte būtiski atšķiras, salīdzinot vidējās amplitūdas

O2 elektrodiem ($p < 0,01$) un P4 elektrodiem ($p = 0,01$), bet ne pārējiem trim elektrodiem ($p = 1,0$), ja attēli tiek attēloti uz volumetriskā vai plakanā displeja. Salīdzinot ERP amplitūdas starp divām puslodēm atsevišķi katram attēla atveides veidam, tika atklāta izteikta asimetrija smadzeņu aktivitātēs elektrodiem, kas novietoti paura reģionā, skatoties attēlus uz plakanā displeja ($p < 0,01$). Savukārt smadzeņu aktivitāte abu pusložu elektrodos bija līdzīga un netika novērota būtiska atšķirība, kad attēli tika prezentēti uz volumetriskā displeja ($p = 1,0$).

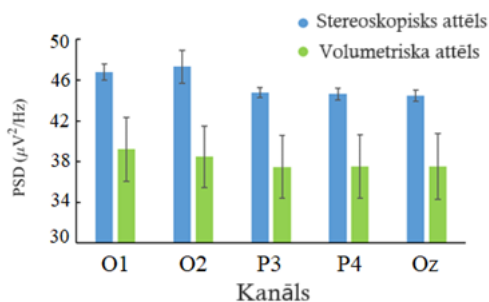
Visbeidzot, tika konstatēta nozīmīga atšķirība tādu attēlu uztveres smadzeņu aktivitātē, kuri saturēja vai nesaturēja telpisko komponenti ($F(1, 19) = 39,5$, $p < 0,01$, $\eta^2_G = 0,265$), un elektrodiem ($F(2,5, 48,1) = 12,7$, $p < 0,01$, $\eta^2_G = 0,076$) smadzeņu darbības laika posmā 250–400 ms pēc redzes stimula parādīšanas uz ekrāna. Attiecīgi arī novērota statistiski būtiska atšķirība starp dažādiem attēla atveides veidiem un telpiskā attēla pazīmi (ir vai nav telpisks attēls) ($F(1, 19) = 4,6$, $p = 0,05$, $\eta^2_G = 0,028$). *Post hoc* analīze atklāja, ka smadzeņu darbības aktivitāte abu attēlu atveides sistēmās un tad, ja attēls saturēja telpisko komponenti, statistiski būtiski atšķīrās ($p < 0,01$), taču, ja attēls nesaturēja telpisko komponenti jeb ja tam bija nulles disparitāte, tad starp abu attēlu atveides sistēmām netika novērota atšķirība smadzeņu aktivitātē ($p = 1,0$). Konkrēti, uztverot attēlu ar telpisko komponenti, smadzeņu aktivitātē tika novērots vairāk negatīvo vērtību paura daivas zonā.

Papildus ERP komponentu vērtēšanai tika analizētas arī izmaiņas viļņu frekvenču joslās. 8. attēlā redzams vidējo vērtību neirālās oscilācijas jaudas spektrālā blīvuma attēlojums EEG kanālos paura un pakauša daivā. Kā redzams 8. attēlā, jaudas spektrālais blīvums smadzeņu aktivitātē, ko rada uz plakanā displeja rādītā simulētie 3D attēli (turpmāk – stereoskopiskie) un ko rada uz volumetriskā daudzplakņu displeja rādītā reālie 3D volumetriskie attēli (turpmāk – volumetriskie), bija līdzīgs pie zemām frekvencēm (alfa viļņos). Savukārt jaudas spektrālā blīvuma atšķirība sāk pakāpeniski palielināties, pieaugot frekvencei, jeb beta viļņu diapazonā.



8. att. Vidējais jaudas spektrālais blīvums EEG kanāliem paura un pakauša daivā.

Attēlu atveides sistēmu radītie jaudas spektrālo blīvumu salīdzinājumi tika veikti, pielietojot t-testu. Salīdzinot alfa viļņu jaudu spektrālos blīvumus un analizējot katru elektrodu un abu attēlu atveides sistēmu gadījumus ($p > 0,08$), netika atklātas būtiskas atšķirības šajā parametrā. Savukārt beta viļņu jaudas spektrālais blīvums bija ievērojami lielāks visiem elektrodiem ($p < 0,05$), izņemot Fp2, F3, F4, P4 un Pz, kur atšķirības nesasniedza statistisku nozīmīgumu ($p = 0,05$). Apskatot 9. attēlu, redzams, ka attēlotais vidējais beta viļņu jaudas spektrālais blīvums EEG kanālos paura un pakauša daivā stereoskopiskā attēla gadījumā ir lielāks nekā volumetriskā attēla gadījumā.



9. att. Beta viļņu jaudas spektrālais blīvums EEG kanālos paura un pakauša daivā.

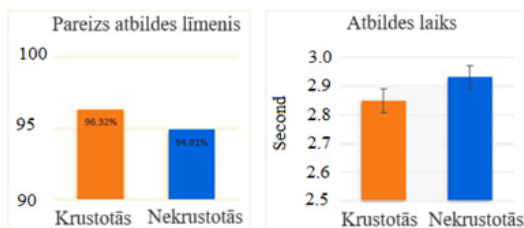
4.2. Smadzeņu aktivitāte: krustotās un nekrustotās disparitātes attēli

Pielietojot anaglifa principu 3D attēla izveidē, tika sagatavoti krustotās un nekrustotās disparitātes attēli, lai izpētītu dziļuma uztveri un iespēju novērtēt smadzeņu aktivitāti, pielietojot EEG metodi.

4.2.1. Uzdevumu izpildes dati

Pētījumā tika izvērtēti uzdevumu izpildes rezultāti, un, kā redzams 10. attēlā, visiem pētījuma dalībniekiem bija augsts sniegums – maz kļūdu, sniedzot atbildes par pareizi atpazītiem telpiskiem attēliem gan krustotās, gan nekrustotās disparitātes gadījumos. Pareizo atbilžu rādītājs bija 96,32% krustotās disparitātes gadījumā un nedaudz zemāks nekrustotās disparitātes gadījumā – 94,91%. Tomēr, izmantojot Vilkoksona testu ($W = 1, p = 1,0$), statistiskā analīze neuzrādīja būtiskas atšķirības starp abiem disparitātes veidiem.

Izvērtējot smadzeņu aktivitātes reakcijas laiku, tika novērtēts vidējais laiks - krustotās dispartitātes gadījumā aprēķinātais vidējais laiks bija $2,85 \pm 0,05$ sekundes un nekrustotās dispartitātes gadījumā - $2,93 \pm 0,04$ sekundes. Iegūtie rezultāti uzrāda nedaudz ātrāku smadzeņu aktivitātes reakcijas laiku krustotās dispartitātes gadījumā salīdzinājumā ar nekrustotās dispartitātes gadījumu. Tomēr, tāpat kā pareizo atbilžu analīze, arī smadzeņu aktivitātes reakcijas laika analīze neuzrādīja statistiski būtisku atšķirību pildot telpiskās uztveres testu pie plakanā ekrāna ar krustotās un nekrustotās dispartitātes stimuliem. Testa analīzē tika pielietots Vilkoksona tests ($W = 0, p = 1,0$).



10. att. Visu pētījuma dalībnieku vidējais pareizo atbilžu sniegums (pa kreisi) un vidējais smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks (pa labi), veicot mērījumus ar krustotās un nekrustotās dispartitātes stimuliem uz plakanā displeja.

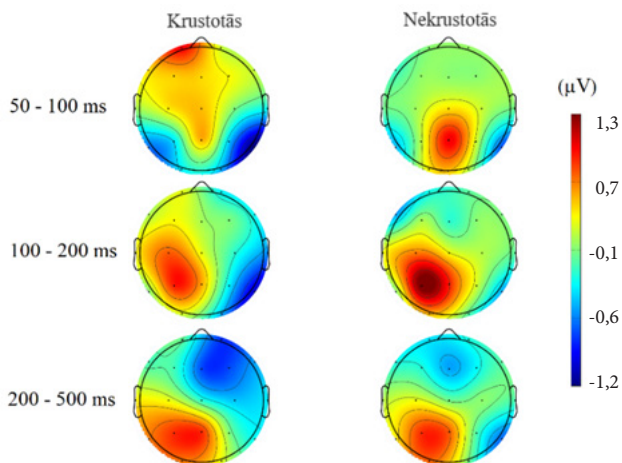
4.2.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP)

EEG rezultāti gan ar krustotās, gan nekrustotās dispartitātes stimuliem tika analizēti trīs laika posmos no brīža, kad tiek parādīts stimuls uz ekrāna - 50-100 ms, 100-200 ms un 200-500 ms, kā arī tika vērtētas ERP komponentes - N1, P2 un P3. Primārie smadzeņu aktivitātes signāli tika konstatēti paura un pakauša daivas zonās dažādu dispartitāšu uztveres laikā.

Pirmajā laika posmā (50-100 ms) starp krustoto un nekrustoto dispartitāti uztvertiem attēliem netika novērota atšķirīga smadzeņu aktivitāte. Abu dispartitāšu gadījumos smadzeņu aktivitāte galvenokārt tika konstatēta smadzeņu aizmugurējā daļā.

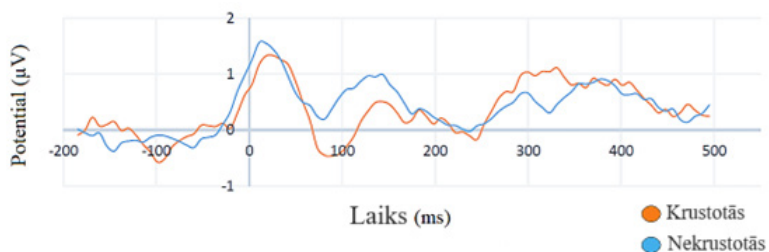
Otrajā laika posmā (100-200 ms) smadzeņu aktivitāte abiem dispartitātes veidiem bija līdzīga un galvenokārt lokalizējās paura daivas zonā. Tomēr nedaudz augstāks aktivitātes līmenis tika novērots nekrustotās dispartitātes gadījumā.

Trešajā laika posmā (200-500 ms) aktivitāte galvenokārt koncentrējās smadzeņu pakauša daļā un nedaudz augstāks aktivitātes līmenis tika novērots krustotās dispartitātes gadījumā (*skat. 11. att.*).



11. att. ERP topogrāfiskie grafiki trijos laika posmos - krustotās un nekrustotās disparitātes gadījumos, demonstrējot stimulus uz plakanā displeja.

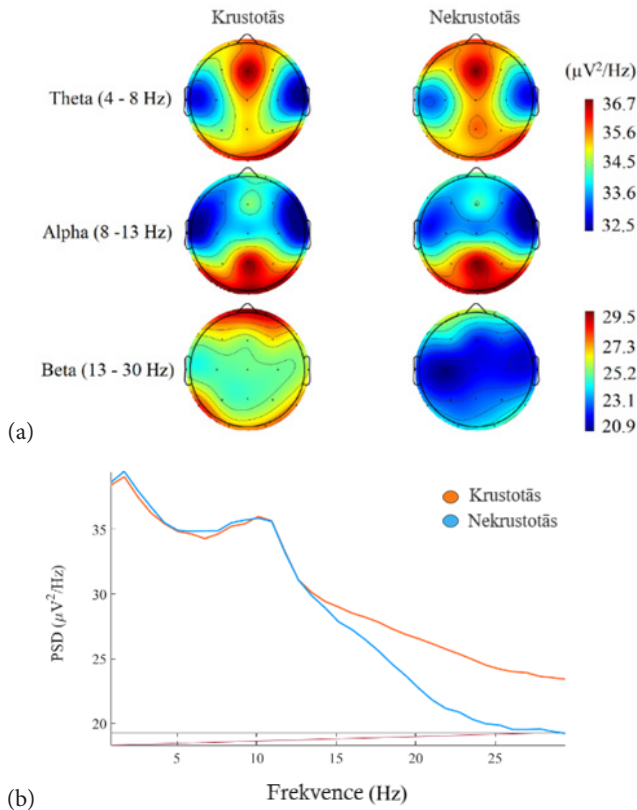
Vidējā amplitūda paura daivas elektrodiem (P3, P4, Pz) un pakauša daivas elektrodiem (O1, O2) gan krustotās, gan nekrustotās disparitātes gadījumos tika analizēta, izmantojot Vilkoksona testu. 12. attēlā redzama augstāka amplitūda krustotās disparitātes gadījumā ERP N1 komponentē 50-100 ms pēc stimula parādīšanas, taču statistiski nozīmīga atšķirība netika novērota ($W = 13, p = 0,04$). Savukārt P2 komponente uzrādīja statistiski augstāku amplitūdu nekrustotās disparitātes gadījumā laika posmā 100-200 ms pēc stimula parādīšanas ($W = 32, p < 0,05$). Krustotās un nekrustotās disparitātes gadījumos izsaukto potenciālu P3 komponente amplitūdas laika posmā 200-500 ms pēc stimula prezentēšanas bija relatīvi līdzīgas, un netika konstatēta statistiski nozīmīga atšķirība ($p = 0,08$).



12. att. Piecu elektrodu (P3, P4, Pz, O1 un O2) vidējā ERP viļņu forma krustotās un nekrustotās disparitātes gadījumos.

4.2.3. Jaudas spektrālais blīvums (power spectral density – PSD)

Alfa (8–13 Hz), beta (13–30 Hz) un teta (4–8 Hz) viļņu analīzei tika izmantots Vilkoksona tests. Teta viļņu aktivitāte abu disparitāšu gadījumos galvenokārt koncentrējās smadzeņu pieres daivā, īpaši Fz elektroda zonā. Novērota neliela aktivitātes palielināšanās nekrustotās disparitātes gadījumā; tomēr būtiska atšķirība netika konstatēta ($W = 8, p = 1$). Alfa viļņu aktivitāte bija novērojama smadzeņu paura un pakauša daivā. Statistiski netika konstatēta atšķirība ($W = 13, p = 1$). Tomēr neliels aktivitātes samazinājums tika novērots nekrustotās disparitātes gadījumā. Beta viļņi uzrādīja lielāku aktivitāti krustotās disparitātes gadījumā salīdzinājumā ar nekrustotās disparitātes gadījumu. Statistiski būtiska smadzeņu aktivitāte tika novērota pieres daivā ($p < 0,05$). Topogrāfiskās kartes un viļņa formas attēli redzami 13. (a) un (b) attēlā.



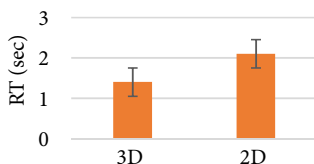
13. att. Visu dalībnieku visu elektrodu vidējā jaudas spektrālā blīvuma topogrāfiskās kartes (a) un viļņa formas diagramma (b) krustotās un nekrustotās disparitātes gadījumos.

4.3. Smadzeņu aktivitāte: attēls ar telpisko pazīmi *versus* attēlu bez telpiskās pazīmes

4.3.1. Uzdevumu izpildes dati

Uzdevumu izpildes rezultāti parādīja, ka visu dalībnieku vidējais pareizo atbilžu rādītājs volumetriskiem stimuliem bija 0,98 (SD = 0,04). Savukārt, atpazīstot attēlus bez telpiskās pazīmes jeb nulles disparitāti uz volumetriskā displeja, dalībnieki pieļāva vairāk kļūdu. Pareizo atbilžu rādītājs samazinājās līdz 0,82 (SD = 0,06).

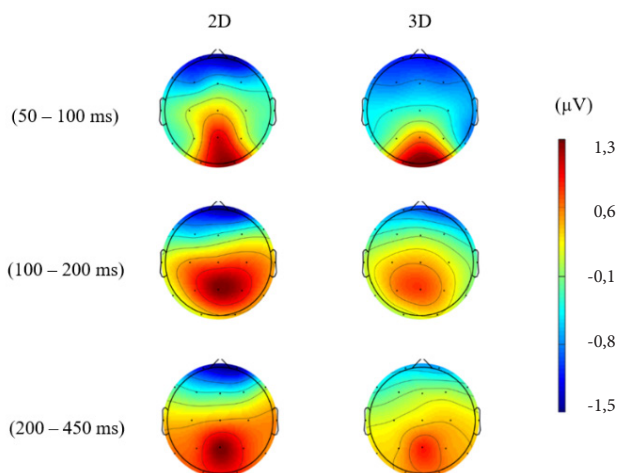
Papildus pareizo atbilžu rādītājiem tika analizēts arī smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks, lai novērtētu vizuālās meklēšanas rezultātus. 14. attēlā redzamā statistiskā analīze parāda, ka stimula veidam nebija statistiski nozīmīgas ietekmes.



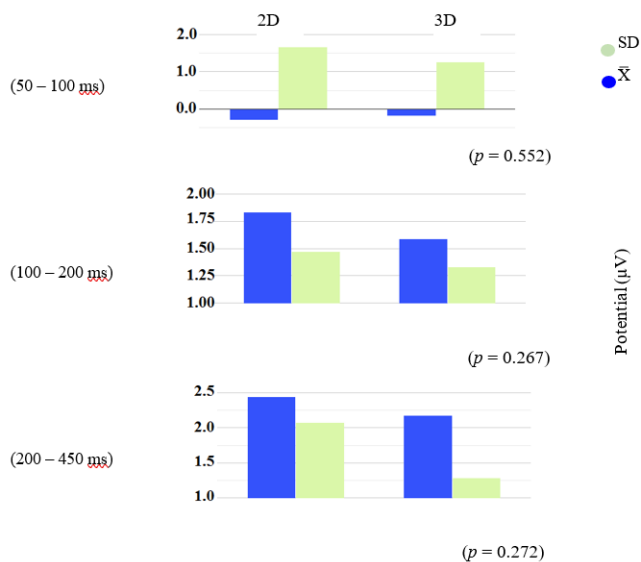
14. att. Vidējais smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks, veicot uzdevumu ar redzes stimuliem, kuriem bija telpiskā pazīme vai tās nebija. Kļūdu apzīmējums attēlo standarta novirzi.

4.3.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP)

Smadzeņu aktivitātes signāli tika analizēti trīs laika posmos, kas atbilst ERP N1, P2 un P3 komponentēm. Kā paredzēts, vispārēji tika novērota paaugstināta aktivitāte pakauša un paura daivās. 15. attēlā redzamas ERP amplitūdu izmaiņas trīs laika posmos, vidējās vērtības apkopojums visiem dalībniekiem topogrāfisko karšu veidā. Turklāt 16. attēlā redzami šie paši laika posmi diagrammas formātā, kas ietver informāciju par standarta novirzi un p vērtību. Kā redzams topogrāfiskajās kartēs, reaģējot uz vizuālajiem uzdevumiem, kas nesatur telpisko pazīmi, salīdzinājumā ar uzdevumu, kur stimulā satur telpisko pazīmi, smadzeņu aktivitātes signālu amplitūda ir nedaudz augstāka, tomēr statistiskā analīze neuzrādīja būtiskas atšķirības starp šiem diviem vizuālo stimulu veidiem. P vērtības laika posmiem 50–100 ms, 100–200 ms un 200–450 ms bija attiecīgi 0,522, 0,267 un 0,272.



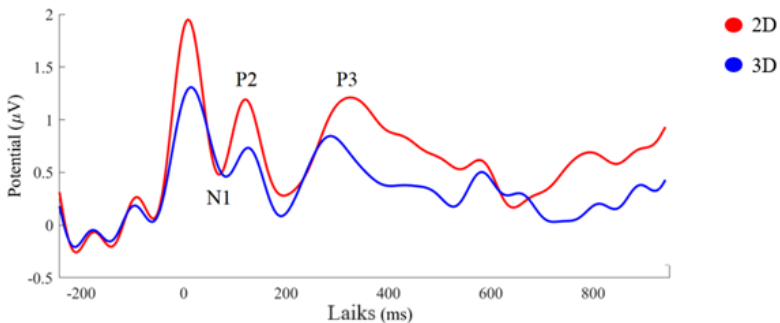
15. att. ERP topogrāfiskās kartes, kas atspoguļo smadzeņu darbību trīs laika posmos, vidējās vērtības visiem dalībniekiem, veicot uzdevumu, kas nesatur telpisko pazīmi (2D attēls) un kas satur telpisko pazīmi (3D attēls), attiecīgi uzdevumu veicot pie volumetriskā daudzplakņu displeja.



16. att. Piecu elektrodu P3, P4, O1, O2 un Pz vidējā un standarta novirze visiem dalībniekiem. P vērtība neatspoguļo statistiski nozīmīgas atšķirības katrā laika logā.

4.3.3. Viļņu formas

Ņemot vērā, ka ERP komponentes ir dominējošie viļņi pakauša un paura daivu apvidū, statistiskā analīze tika veikta pieciem elektrodiem - O1, O2, P3, P4 un Pz. 17. attēls parāda viļņu formas rezultātu īpašības. N1 komponentei par pamatu statistiskajai analīzei tika ņemts katras viļņu formas minimums. Savukārt P2 un P3 komponentu analīzei tika izmantota maksimālā vērtība, jo tās ir ar pozitīvo amplitūdas nobīdi. Rezultāti parādīja, ka visiem dalībniekiem un katrā elektroda novietojumā trīs laika posmos nebija būtiskas atšķirības starp diviem attēlu veidiem - attēlu ar telpisko komponenti un attēlu bez telpiskās pazīmes.



17. att. Piecu elektrodu O1, O2, P3, P4 un Pz viļņu forma divos vizuālo uzdevumu apstākļos (ar telpisko pazīmi vai bez tās) laika posmā -200-1000 ms visiem subjektiem.

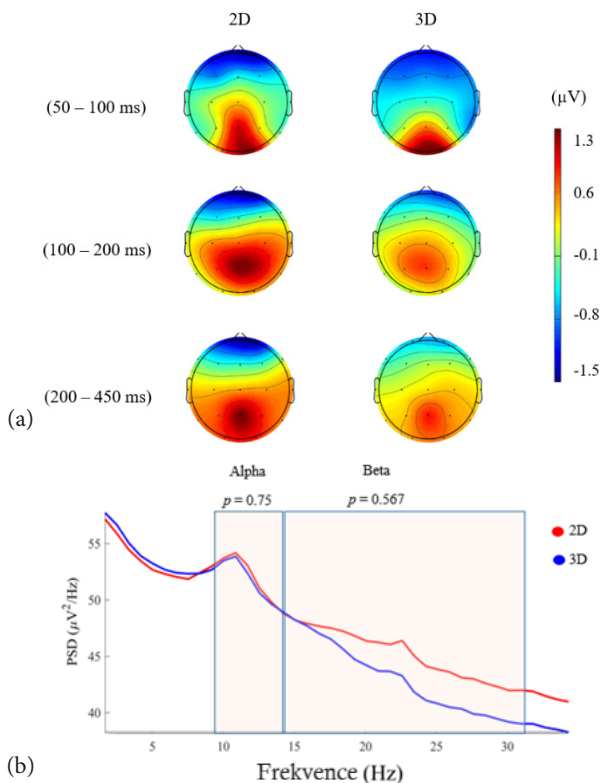
ERP komponentu latenču analīze neuzrādīja statistiski nozīmīgas atšķirības starp abiem redzes stāvokļiem (bez (2D) vai ar (3D) telpisko pazīmi), izņemot Pz elektrodu un 200-450 ms laika posmu, kas atbilst P3 komponentei. Vidējie latenču rezultāti ir apkopoti 1. tabulā.

1. tabula. Piecu elektrodu N1, P2 un P3 komponentu vidējā latence divos stāvokļos (ar telpisko pazīmi vai bez tās).

| Elektrodi | 50-100 ms | | | 100-200 ms | | | 200-450 ms | | |
|-----------|-----------|---------|------------------|------------|----------|------------------|------------|----------|------------------|
| | 2D | 3D | <i>p</i> vērtība | 2D | 3D | <i>p</i> vērtība | 2D | 3D | <i>p</i> vērtība |
| P3 | 76 ± 18 | 77 ± 16 | 0,217 | 156 ± 26 | 153 ± 24 | 0,701 | 299 ± 71 | 309 ± 73 | 0,677 |
| P4 | 84 ± 13 | 85 ± 12 | 0,796 | 144 ± 22 | 138 ± 22 | 0,421 | 311 ± 84 | 322 ± 74 | 0,711 |
| O1 | 87 ± 14 | 86 ± 18 | 0,848 | 141 ± 27 | 142 ± 27 | 0,920 | 320 ± 70 | 336 ± 65 | 0,524 |
| O2 | 88 ± 11 | 83 ± 17 | 0,284 | 132 ± 22 | 142 ± 23 | 0,189 | 340 ± 55 | 338 ± 70 | 0,943 |
| Pz | 79 ± 17 | 74 ± 18 | 0,338 | 150 ± 27 | 140 ± 27 | 0,287 | 329 ± 68 | 279 ± 59 | 0,048 |

4.3.4. Jaudas spektrālais blīvums (power spectral density – PSD)

Nepārtraukto viļņu analīze parādīja nedaudz augstāku aktivitāti alfa un beta viļņu frekvenču joslās. Tomēr atšķirība nebija statistiski nozīmīga. Alfa un beta viļņu topogrāfiskās kartes un viļņu formas atspoguļotas 18. (a) un (b) attēlā.



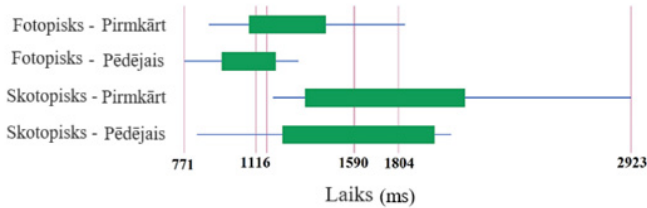
18. att. Jaudas spektrālā blīvuma analīze topogrāfiskās kartes veidā, visu dalībnieku vidējo vērtību analīze (a). Alfa un beta jaudas spektrālā analīzes viļņu forma (b). Beta vilnis uzrādīja augstāku aktivitāti 2D attēliem bez telpiskās pazīmes salīdzinājumā ar 3D jeb attēliem ar telpisko pazīmi.

4.4. Dažādu apgaismojuma apstākļu ietekme uz volumetriskā attēla uztveri

4.4.1. Uzdevumu izpildes dati

Vizuālās meklēšanas rezultātu novērtēšanai tika analizēts smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks (*response time* – RT). Lai analizētu pirmo un pēdējo eksperimentu fotopiskajos un skotopiskajos apstākļos, tika izmantots divfaktoru

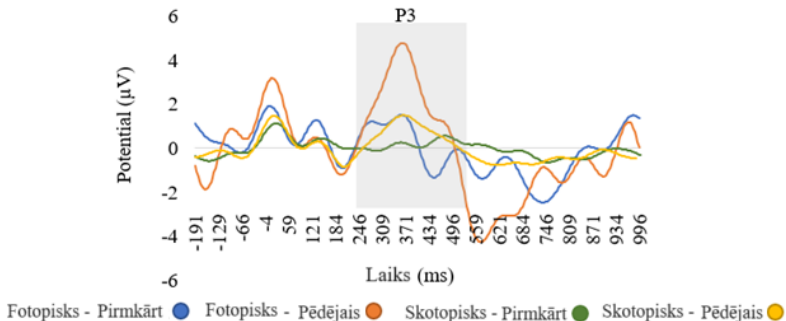
ANOVA tests. Divfaktoru ANOVA tests atklāja, ka nav statistiski nozīmīgas saistības starp apgaismojuma apstākļu un mērījumu veikšanas secības ietekmi ($F(1, 26) = 0,016, p = 0,9, \eta^2_p = 0,0006$). Turklāt netika konstatēta statistiska atšķirība starp pirmo un pēdējo eksperimentu ($F(1, 26) = 1,264, p = 0,27, \eta^2_p = 0,05$). Tomēr starp fotopiskajiem un skotopiskajiem apstākļiem tika konstatēta būtiska atšķirība ($F(1, 26) = 10,25, p = 0,003, \eta^2_p = 0,28$). 19. attēlā redzams katras grupas vidējais rādītājs, kur konstatējams, ka skotopiskos jeb maza apgaismojuma apstākļos smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks paildzinās.



19. att. Dalībnieku vidējo smadzeņu aktivitātes reakcijas laiku apkopojums dažādos apgaismojumos un vērtējot mērījumu iegūšanas secības ietekmi.

4.4.2. Izsauktie potenciāli (event-related potentials – ERP)

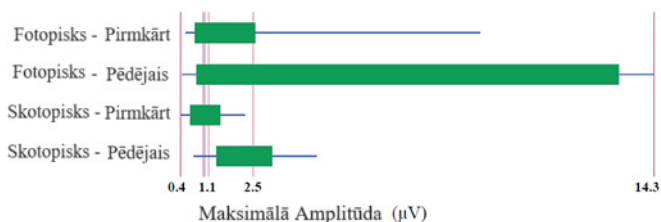
Tika veikta EEG signāla analīze, lai iegūtu ERP P3 komponentes maksimālo amplitūdu un latenci. ERP analīzes rezultāti ir parādīti 20. attēlā, kurā redzams ERP viļņu formu vidējais rādītājs pakauša un paura daivas reģionā (O1, O2, P3, P4 un Pz). Kā paredzēts, tika konstatēts, ka P3 vilnis ir dominējošais vilnis šajos reģionos.



20. att. Piecu pakauša un paura daivas elektrodu (O1, O2, P3, P4 un Pz) vidējais rādītājs visiem dalībniekiem. Viļņu formā izcelts P3 maksimums.

Veicot viļņu formas P3 komponentes analīzi ar divfaktoru ANOVA testu, dati parādīja, ka nav statistiski nozīmīgas mijiedarbības starp apgaismojuma apstākļu un eksperimentu secības ietekmi ($F(1, 36) = 1,571, p = 0,22, \eta^2_p = 0,042$).

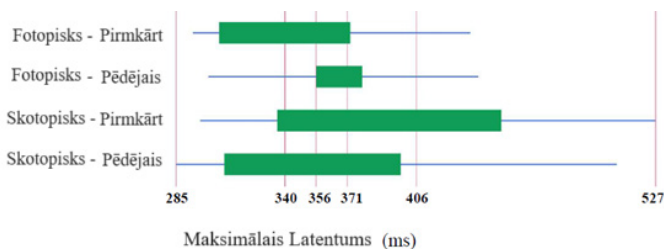
Tomēr starp pirmo un pēdējo eksperimentu tika konstatēta statistiski nozīmīga atšķirība ($F(1, 36) = 4,42, p = 0,04, \eta_p^2 = 0,11$). Turklāt starp fotopiskajiem un skotopiskajiem apstākļiem bija būtiska atšķirība ($F(1, 36) = 6,23, p = 0,02, \eta_p^2 = 0,15$). 21. attēlā redzama katra nosacījuma maksimālā amplitūda.



21. att. Dalībnieku viļņu P3 komponentes vidējā maksimālā piecu pakauša un paura daivas elektrodu (O1, O2, P3, P4 un Pz) amplitūda dažādos apgaismojuma apstākļos un vērtējot mērījumu iegūšanas secības ietekmi.

Turklāt, analizējot P3 komponentes maksimālā piķa latenci, divfaktoru ANOVA tests neuzrādīja statistiski nozīmīgu mijiedarbību starp apgaismojuma apstākļiem un eksperimentu veikšanas secību ($F(1, 36) = 2,585, p = 0,12, \eta_p^2 = 0,07$). Tāpat netika konstatēta statistiski nozīmīga atšķirība starp pirmo un pēdējo eksperimentu rezultātiem ($F(1, 36) = 1,17, p = 0,28, \eta_p^2 = 0,03$) un starp fotopiskajiem un skotopiskajiem apstākļiem ($F(1, 36) = 1,310, p = 0,25, \eta_p^2 = 0,03$).

Tomēr, veicot analīzi starp pirmo un pēdējo eksperimentu atbilstošā apgaismojuma ietvaros, pāra t -tests norādīja uz statistiski nozīmīgu atšķirību starp pirmo ($M = 404, SD = 75$) un pēdējo ($M = 359, SD = 62$) mērījumu skotopiskajos apstākļos ($t(14) = 3,3, p = 0,007$). Savukārt pāra t -testa rezultāti fotopiskajos apstākļos liecina, ka starp pirmo ($M = 347, SD = 51$) un pēdējo ($M = 368, SD = 41$) mērījumu ir statistiski nenozīmīga un maza atšķirība ($t(14) = 1, p = 0,367$). 22. attēlā redzama P3 komponentes latence dažādos apgaismojuma apstākļos un uzdevuma veikšanas secība.



22. att. Piecu pakauša un paura daivas elektrodu (O1, O2, P3, P4 un Pz) P3 komponentes maksimālā piķa latence dažādos apgaismojuma apstākļos un vērtējot mērījumu iegūšanas secības ietekmi.

5. DISKUSIJA

5.1. Smadzeņu aktivitāte: stereoskopiskā *versus* volumetrisko aktivitāti

Rezultātus var interpretēt saistībā ar kognitīvo piepūli, kas nepieciešama attēlu klasifikācijai trīsdimensiju vizuālajā meklēšanā. Konfliktējošas vizuālās informācijas integrēšana un interpretēšana var radīt lielākas kognitīvās prasības, kas ilgtermiņā potenciāli var ātrāk izraisīt redzes vai mentālo nogurumu [12] [13], tādējādi negatīvi ietekmējot redzes uzmanību un lietotāja sniegumu.

Iegūtie pētījuma secinājumi jāinterpretē piesardzīgi, jo īpaši, ņemot vērā iespējamo ilgtermiņa ietekmi. Rezultāti tika iegūti salīdzinoši īsās uzdevuma sesijās, no kurām katra ilga aptuveni 10 minūtes. Ņemot vērā, ka jaunās trīsdimensiju vizualizācijas sistēmas paredzēts izmantot profesionāliem mērķiem, iespējams, ikdienā [14] [15], turpmākajos pētījumos būtu jāiekļauj ilgākas eksperimentālas procedūras ar sarežģītākām vizuālajām ainām.

Vēl viens šī pētījuma ierobežojums bija saistīts ar eksperimenta dizainu, kas ietvēra fundamentāli atšķirīgas vizualizācijas tehnoloģijas, un tika veikta salīdzinošā novērtēšana. Šāda pieeja pēc būtības iekļauj displeju tehnisko parametru mainīgumu. Lai gan tika pieliktas pūles, lai dalībniekiem nodrošinātu līdzīgus skatīšanās apstākļus, saskaņojot meklēšanas elementu relatīvo proporciju un pielāgojot ekrāna spilgtuma līmeņus starp plakano displeju un volumetrisko daudzplakņu displeju, ir svarīgi atzīmēt, ka displejiem tomēr bija atšķirīga ekrāna izšķirtspēja, un krāsu filtru brilles tika izmantotas tikai tad, kad attēli tika skatīti uz plakanā displeja, kas varēja samazināt uztveramā attēla spožumu un kontrastu. Neraugoties uz šiem ierobežojumiem, šī brīža rezultāti veido noderīgu pamatu turpmākai trīsdimensiju vizuālajai izpētei.

5.2. Smadzeņu aktivitāte: krustotā disparitāte *versus* nekrustoto disparitāti

Ņemot vērā, ka krustoto un nekrustoto disparitāti neirālajā sistēmā smadzenēs apstrādā dažādi smadzeņu garozas neironi [16] [17], krustotā disparitāte parasti automātiski piesaista cilvēka uzmanību, jo to veido tie objekti, kas atrodas mums tuvāk. Tomēr to pašu nevar teikt par nekrustoto disparitāti. Tas rada jautājumu, vai šī atšķirība atspoguļojas un būtu novērtējama smadzeņu aktivitātes darbībā.

Pētījumā tika konstatētas dažas atšķirības smadzeņu aktivitātē P2 un P3 komponentēs, kā arī teta un beta viļņu gadījumos. Šīs atšķirības var būt saistītas ar lielāku uzmanības pieprasījumu attiecībā uz nekrustoto disparitāti un labāku sniegumu attiecībā uz krustoto disparitāti [18] [19] [20].

Pētījumam ir arī daži ierobežojumi, piemēram, neliela izlase un gamma viļņu analīzes trūkums. Kopumā pētījums sniedz ieskatu par to, kā smadzenes apstrādā dažāda veida dziļuma uztveres signālus, taču, lai pilnībā izprastu šos procesus, ir nepieciešami turpmāki pētījumi.

5.3 Smadzeņu aktivitāte: attēli bez telpiskās pazīmes versus attēliem ar telpisko pazīmi uz volumetriskā daudzplakņu displeja

Īsāks smadzeņu aktivitātes reakcijas laiks uz 3D stimuliem (attēli ar telpisko pazīmi) liecina par vieglāku uztveri [21] [22]. Smadzeņu aktivitātes analīze parādīja, ka agrīnā aktivitāte (50–100 ms) pakauša un paura daivas reģionos bija līdzīga abiem stimuliem (bez telpiskās (2D) pazīmes vai ar telpisko (3D) pazīmi), kas liecina par līdzīgu agrīno signālu apstrādi [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30]. P2 komponente (100–200 ms) uzrādīja nedaudz augstāku aktivitāti 2D stimuliem, tas, iespējams, ir saistīts ar atmiņas prasībām stimulu atšķiršanā [31] [32]. P3 komponente (250–1000 ms) uzrādīja nedaudz lielāku amplitūdu un ilgāku latenci 2D stimuliem, tas liecina par lielākām grūtībām atšķirt 2D stimulus jeb izsvērt, ka objekts nav telpisks, proti, nolieguma atbilde vienmēr tiek sniegta ilgāk [33]. Alfa un beta viļņu aktivitāte (visā novērošanas periodā) bija nedaudz augstāka 2D stimuliem, tas atspoguļo papildu apstrādes prasības.

Kopumā pētījums liecina, ka 2D stimulus uz volumetriskā displeja varētu būt grūtāk atšķirt nekā 3D stimulus, kaut gan 3D uztvere ir ātrāka un prasa īsāku apstrādi.

5.4. Apgaismojuma ietekme uz volumetriskā attēla uztveri

Rezultāti parādīja, ka spilgtā apgaismojumā cilvēki uzdevumu veica ātrāk, taču ātrums neatšķīrās starp pirmo un pēdējo uzdevuma veikšanas reizi dažādos apgaismojuma apstākļos (fotopiskie un skotopiskie apstākļi). Tas liecina, ka viņi, iespējams, ir iemācījušies uzdevumu un laika gaitā uzlabojuši sniegumu [34]. P3 komponente bija lielāka pēdējā uzdevumā salīdzinājumā ar pirmo uzdevumu, īpaši spilgtā apgaismojumā. Tas liecina, ka cilvēki pievērsa lielāku uzmanību, apgūstot uzdevumu. Tomēr P3 komponentes latences laiks būtiski nemainījās, izņemot vāja apgaismojuma apstākļos, kur laika gaitā latence kļuva īsāka. Tas liecina, ka displeja lietošana vājā apgaismojumā varētu palīdzēt cilvēkiem labāk apgūt uzdevumu [35] [36] [37].

Kopumā pētījums liecina, ka apgaismojums un ilgstoša lietošana var ietekmēt smadzeņu darbību, lietojot volumetriskos displejus, taču novērtēt to ietekmi ir sarežģīti un tā atkarīga no konkrētā uzdevuma un apgaismojuma apstākļiem.

6. SECINĀJUMI

Disertācijā pētīts, kā dažādas 3D vizualizācijas metodes ietekmē smadzeņu aktivitāti un lietotāja pieredzi. Pētījumā konstatēts, ka 3D attēla veids (volumetriskais *versus* stereoskopisko) un attēla īpašības (attēls bez telpiskās pazīmes (2D) *versus* attēlu ar telpisko pazīmi (3D)); fotopiskie apstākļi *versus* skotopiskiem apstākļiem) var būtiski ietekmēt lietotāja sniegumu un smadzeņu darbību. Konstatēts, ka salīdzinājumā ar stereoskopisko attēlu uztveri volumetriskie attēli ierosina ātrāku smadzeņu darbību un prasa mazāku kognitīvo piepūli. Pētījums arī parāda, ka EEG varētu būt daudzsološs instruments objektīvai 3D attēlu uztveres izpētei. Kopumā disertācija sniedz vērtīgas atziņas nākotnes 3D vizualizācijas sistēmu projektēšanai un palīdz uzlabot izpratni par 3D uztveri.

7. AIZSTĀVAMĀS TĒZES

EEG datu pielietojums dziļuma uztveres objektīvai izpētei ir izstrādāts, izmantojot vairākas analītiskās pieejas.

1. Agrīno un vēlo posmu notikumu izraisīto potenciālu (*Event-Related Potentials - ERP*) amplitūdas un latentuma analīze ir ticami faktori dziļuma uztveres objektīvai pārbaudei, jo P3 komponenta latentuma palielināšanās liecina par lielāku grūtības pakāpi dziļuma uztverē neatkarīgi no tā, vai tas ir 3D anaglifs vai 2D tilpuma attēlojums. Līdzīgi augstāka P3 komponenta amplitūda liecina par lielākām grūtībām dziļuma uztverē. Turklāt frekvenču joslu analīze (īpaši alfa un beta joslas) ir uzticama metode dziļuma uztveres objektīvam novērtējumam, jo lielāka jauda šajās joslās ir saistīta ar palielinātām grūtībām dziļuma uztverē (P1, P2, P3, P4, C1, C2, C3, C8, C11).
2. Ārējā apgaismojuma apstākļi var ietekmēt dziļuma uztveri, tādēļ EEG un tilpuma displeja objektīvai dziļuma uztveres novērtēšanai jāveic dimdētā telpā, lai izvairītos papildu noslogot kortikālo aktivitāti (P2, C3).
3. EEG jutība izmaiņu konstatēšanā kortikālajā aktivitātē dziļuma uztveres laikā padara to par uzticamu rīku dziļuma uztveres objektīvai novērtēšanai (P1, P2, P3, P4, visas konferences).

8. PUBLIKĀCIJU UN KONFERENČU SARAKSTS

Publikācijas

- P1. Brain activity underlying visual search in depth when viewing volumetric multiplanar images / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, Reinis Alksnis, Gunta Krumina. (Article). References: pp. 7-8 // Scientific Reports Vol. 13, N 1 (2023), Article Number: 7672, pp. 1-9 (Q2).
- P2. The Impact of Different Lighting Conditions on the Neural Processes Underlying Relative Depth Perception in 3D Visualization Using Volumetric Multiplanar Display / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, Gunta Krumina // 19th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics (NBC 2023); June 12-14, 2023, Liepaja, Latvia: Proceedings. (IFMBE Proceedings; Vol. 89). Cham: Springer, 2023, pp. 172-180.
- P3. Comparative assessment of brain activity during depth perception of stereoscopic and volumetric images / Tatjana Pladere, Mehrdad Naderi, Roberts Zabels, Kriss Osmanis, Gunta Krumina // (Proceedings of SPIE; Vol. 11481). 2020. Article number 1148108, pp. 1-7 (Q4).
- P4. EEG based assessment of user performance for a volumetric multiplanar display / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, Gunta Krūmiņa (Proceedings of SPIE; Vol. 11350). 2020. Article number 113500C, pp. 1-7 (Q4).

Konferences

- K1. 82th International Scientific Conference of the University of Latvia, Riga, Latvia, 2024: Quantitative EEG Analysis of Cortical Dynamics during Volumetric 3D Image Perception / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, Reinis Alksins, and Gunta Krumina.
- K2. 4th International Symposium on Visual Physiology, Environment, and Perception (VisPEP 2024), March 15-17, 2024, Warsaw, Poland: Exploring Visual Ergonomics in Volumetric Multiplanar Displays: An EEG Study / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, Reinis Alksins, and Gunta Krumina.
- K3. 19th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics, NBC 2023, June 12-14, 2023, Liepaja, Latvia: The Impact of Different Lighting Conditions on the Neural Processes Underlying Relative Depth Perception in 3D Visualization Using Volumetric Multiplanar Display / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, and Gunta Krumina.
- K4. International student conference 2023, Riga Stradiņš University, March 27-28, Riga Latvia: Visual Neural Facilitation in a Long-Term Visual Search

- Task on a Volumetric Multiplanar Display: An ERP Study / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, and Gunta Krumina.
- K5. 14th International Conference of Lithuanian Neuroscience Association, 25 November 2022, Vilnius, Lithuania: EEG Study of Mental Fatigue Regarding Long-term Usage of Volumetric Multiplanar Display / Mehrdad Naderi, Albina Abdullayeva, Tatjana Pladere, Reinis Alksnis, and Gunta Krumina.
- K6. 18th International Young Scientist Conference “Developments in Optics and Communications 2022”, April 21-22, 2022, Riga, Latvia: EEG assessment of disparity-driven brain activity / Albina Abdullayeva, Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, and Gunta Krumina
- K7. 80th International Scientific Conference of the University of Latvia, Riga, Latvia (2022): EEG Signals During the Perception of Physical and Simulated 3D Images / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, Roberts Zabels, and Gunta Krumina.
- K8. 13th International Conference of Lithuanian Neuroscience Association, 26 November 2021, Vilnius, Lithuania: Human brain reacts differently to real three dimension (3D) and stereoscopic 3D: An EEG study / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, Mara Delesa-Velina, Roberts Zabels, Linda Krauze, Ibrahim Musayev, and Gunta Krumina.
- K9. 43rd European Conference on Visual Perception (ECVP), 2021 (online): Sensory components of event-related potentials react differently to the perception of volumetric 3-dimensional and 2-dimensional images / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, Ibrahim Mysayev, and Gunta Krumina.
- K10. 17th International Young Scientist Conference “Developments in Optics and Communications 2021”, April 15-16, 2021, Riga, Latvia: Neural indicators of cognitive load when working with the volumetric multi-plane display / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, and Gunta Krumina.
- K11. Neuromatch 3.0, October 27-30, 2020, Pennsylvania, USA (online): EEG signals during relative depth judgments: Effect of image display techniques / Mehrdad Naderi, Tatjana Pladere, and Gunta Krumina.

9. IZMANTOTIE LITERATŪRAS AVOTI

- [1] M. Urvoy, M. Barkowsky, P. Le Callet, M. Barkowsky, and P. Le Callet, “How Visual Fatigue and Discomfort Impact 3D-TV Quality of Experience: A Comprehensive Review of Technological, Psychophysical, and Psychological Factors,” *Springer*, vol. 68, no. 11–12, pp. 641–655, 2013.
- [2] J. Kim, D. Kane, and M. S. Banks, “The Rate of Change of Vergence-Accommodation Conflict Affects Visual Discomfort,” *Vision Res.*, vol. 105, pp. 159–165, 2014.
- [3] Q. Huynh-Thu, M. Barkowsky, and P. Le Callet, “The Importance of Visual Attention in Improving the 3D-TV Viewing Experience: Overview and New Perspectives,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 57, no. 2, pp. 421–431, 2011.
- [4] M. Poulakos, S. Roethlin, G. Schwaninger, A. Smolic, and A. Gross, “Alternating Attention in Continuous Stereoscopic Depth,” *Proc. ACM Symp. Appl. Percept.*, vol. 1, pp. 59–66, 2014.
- [5] T. Manshouri, and N. Kayikcioglu, “A Comprehensive Analysis of 2D & 3D Video Watching of EEG Signals by Increasing PLSR and SVM Classification Results,” *Comput. J.*, vol. 63, no. 3, pp. 425–434, 2020.
- [6] A. Dan, and M. Reiner, “EEG-Based Cognitive Load of Processing Events in 3D Virtual Worlds is Lower than Processing Events in 2D Displays,” *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 122, pp. 75–84, 2017.
- [7] M. Fazlyyyakhmatov, N. Zvezdochkina, and V. Antipov, “The EEG Activity during Binocular Depth Perception of 2D Images,” *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2018, pp. 1–7, 2018.
- [8] A. Yoto, T. Katsuura, K. Iwanaga, and Y. Shimomura, “Effects of Object Color Stimuli on Human Brain Activities in Perception and Attention Referred to EEG alpha Band Response,” *J. Physiol. Anthropol.*, vol. 26, no. 3, pp. 373–379, 2007.
- [9] Z. Chen, J. Shi, Y. Tai, and L. Yun, “Stereoscopic Depth Perception Varies with Hues,” *Opt. Eng.*, vol. 51, no. 9, pp. 097401–1, 2012.
- [10] N. S. Holliman, N. A. Dodgson, G. E. Favalora, and L. Pockett, “Three-Dimension Displays: A Review and Applications Analysis,” vol. 57, pp. 362–371, 2011.
- [11] R. Zabels *et al.*, “AR Displays: Next-Generation Technologies to Solve the Vergence–Accommodation Conflict,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, 2019.
- [12] A. Murata, A. Uetake, and Y. Takasawa, “Evaluation of Mental Fatigue Using Feature Parameter Extracted from Event-Related Potential,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 35, no. 8, pp. 761–770, 2005.
- [13] C. Chen, K. Li, Q. Wu, H. Wang, Z. Qian, and G. Sudlow, “EEG-Based Detection and Evaluation of Fatigue Caused by Watching 3D TV,” *Displays*, vol. 34, no. 2, pp. 81–88, 2013.
- [14] M. H. Babini, V. V. Kulish, and H. Namazi, “Physiological State and Learning Ability of Students in Normal and Virtual Reality Conditions: Complexity-Based Analysis,” *J. Med. Internet Res.*, vol. 22, no. 6, pp. 1–9, 2020.
- [15] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, and N. Leister, “Depth Cues in Human Visual Perception and Their Realization in 3D Displays,” in *Three-Dimensional*

Imaging, Visualization, and Display 2010 and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IV, B. Javidi, J.-Y. Son, J. T. Thomas, and D. D. Desjardins, Eds., SPIE, 2010.

- [16] G. C. Cumming, and B. G. Deangelis, "The Physiology of Stereopsis," *Neuroscience*, vol. 24, pp. 203–238, 2001.
- [17] G. F. Poggio, "The Analysis of Stereopsis," *Annu. Rev. Neurosci.*, issue 1, vol. 7, no. 1, pp. 379–412, 1984.
- [18] S. J. Luck, *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*, Illustrate. MIT Press, 2014, 2005.
- [19] K. H. Kim, J. H. Kim, J. Yoon, and K. Y. Jung, "Influence of Task Difficulty on the Features of Event-Related Potential during Visual Oddball Task," *Neurosci. Lett.*, vol. 445, no. 2, pp. 179–183, Nov. 2008.
- [20] G. McCarthy, and E. Donchin, "A Metric for Thought: A Comparison of P300 Latency and Reaction Time," *Science*, vol. 211, no. 4477, pp. 77–80, 1981.
- [21] B. Rogers, "Toward a New Theory of Stereopsis: A Critique of Vishwanath (2014)," *Psychol. Rev.*, vol. 126, no. 1, pp. 162–169, 2019.
- [22] T. Pladere, G. Jankovska, V. Konosonoka, K. Panke, and G. Krumina, "Impact of Viewing Distance on Relative Depth Judgements for Stimuli in Physical Space," in *Light in Nature VII*, K. Creath, V. Lakshminarayanan, and J. A. Shaw, Eds., SPIE, 2019.
- [23] W. Skrandies, "The Processing of Stereoscopic Information in Human Visual Cortex: Psychophysical and Electrophysiological Evidence," *Clin. EEG Neurosci.*, vol. 32, no. 3, pp. 152–159, 2001.
- [24] M. W. Rutschmann, Roland Marcus 1 CA; Greenlee, "BOLD Response in Dorsal Areas Varies with Relative Disparity Level," *Neuro Rep.*, vol. 15, no. 4, pp. 615–619, 2004.
- [25] F. P. S. Fischmeister, and H. Bauer, "Neural Correlates of Monocular and Binocular Depth Cues Based on Natural Images: A LORETA Analysis," *Vision Res.*, vol. 46, no. 20, pp. 3373–3380, 2006.
- [26] F. S. Avarvand *et al.*, "Objective Quality Assessment of Stereoscopic Images with Vertical Disparity Using EEG," *J. Neural Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1–22, 2017.
- [27] Z. J. Oliver, F. Cristino, M. V. Roberts, A. J. Pegna, and E. Ch. Leek, "Stereo Viewing Modulates Three-Dimensional Shape Processing during Object Recognition: A High-Density ERP Study," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 44, no. 4, pp. 518–534, 2018.
- [28] A. Akay, and G. Çelebi, "A Brain Electrophysiological Correlate of Depth Perception," *Neurosciences*, vol. 14, no. 2, pp. 139–142, 2009.
- [29] T. Kasai, and T. Morotomi, "Event-Related Brain Potentials during Selective Attention to Depth and Form in Global Stereopsis," *Vision Res.*, vol. 41, no. 10–11, pp. 1379–1388, 2001.
- [30] F. Marini, K. A. Breeding, and J. C. Snow, "Distinct Visuo-Motor Brain Dynamics for Real-World Objects versus Planar Images," *Neuroimage*, vol. 195, pp. 232–242, Jul. 2019.

- [31] S. Omoto *et al.*, “P1 and P2 Components of Human Visual Evoked Potentials are Modulated by Depth Perception of 3-Dimensional Images,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 121, no. 3, pp. 386–391, Mar. 2010.
- [32] R. Freunberger, W. Klimesch, and M. Doppelmayr, “Visual P2 Component is Related to theta Phase-Locking,” *Neurosci Lett.*, vol. 426, pp. 181–186, 2007.
- [33] J. Frey, A. Appriou, F. Lotte, and M. Hachet, “Classifying EEG Signals during Stereoscopic Visualization to Estimate Visual Comfort,” *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2016, p. 2758103, 2016.
- [34] T. Möckel, C. Beste, and E. Wascher, “The Effects of Time on Task in Response Selection - An ERP Study of Mental Fatigue,” *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–9, 2015.
- [35] N. E. Noldy, R. M. Stelmack, and K. B. Campbell, “Event-Related Potentials and Recognition Memory For Pictures and Words: The Effects of Intentional and Incidental Learning,” *Psychophysiology*, vol. 27, no. 4, pp. 417–428, 1990.
- [36] M. Fabiani, D. Karis, and E. Donchin, “Effects of Mnemonic Strategy Manipulation in a Von Restorff Paradigm,” *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 75, no. 1–2, pp. 22–35, Feb. 1990.
- [37] M. Fabiani, D. Karis, and E. Donchin, “P300 and Recall in an Incidental Memory Paradigm,” *Psychophysiology*, vol. 23, no. 3, pp. 298–308, 1986.