



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Tatjana Pladere

VIZUĀLĀS EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒJUMS UZ VOLUMETRISKĀ DAUDZPLAKŅU EKRĀNA

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas un astronomijas zinātnes nozarē
Apakšnozare: medicīniskā fizika

Rīga, 2021

Promocijas darbs izstrādāts
Latvijas Universitātes
Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātes
Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā
laika posmā no 2016. gada līdz 2020. gadam.

Darbs sastāv no ievada, literatūras apskata, pētījuma, nobeiguma, izmantotās literatūras saraksta, ir uzrakstīts datorsalikumā uz 97 lapaspusēm, satur 16 attēlus un 7 tabulas.

Darba forma: disertācija fizikas un astronomijas zinātnes nozarē.
Darba zinātniskais vadītājs: *Dr. phys.* Gunta Krūmiņa, profesore, Latvijas Universitāte.

Darba recenzenti:

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

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2021. gada 27. janvārī Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātnes nozares specializētās promocijas padomes atklātajā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas un astronomijas zinātnes nozares specializētās promocijas

padomes priekšsēdētājs *Dr. habil. phys.* Jānis Spīgulis:

padomes sekretāre Annija Stūrmane:

ANOTĀCIJA

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā uz 97 lapaspusēm. Tas satur 16 attēlus, 7 tabulas un 138 atsaucis uz literatūras avotiem. Pētījumā tiek izstrādāta metode vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, nosakot mērķa elementa redzamības ietekmi uz vizuālo meklēšanu un trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģiju.

Redzes uztveres izpēte cilvēkiem meklējot informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna norāda, ka, attēla fizikālo īpašību ietekmē samazinoties mērķa elementa redzamībai, pieaug nepieciešamība izskatīt trīsdimensionālu attēlu selektīvi, kas atspoguļojas attēlu izskatīšanas stratēģijā. Turklāt attēlu izskatīšanas stratēģiju ietekmē profesionālās meklēšanas pieredze radioloģijā. Attēla dziļuma uztveri nosaka mērķa-distraktora līdzība binokulārajā disparitātē, kura ir atkarīga no redzes sistēmas funkcionalitātes un volumetriskā daudzplakņu ekrāna optiskā elementa arhitektūras, ko ir svarīgi ņemt vērā kvalitatīvu trīsdimensionālu attēlu atveidē.

Atslēgvārdi: vizuālā meklēšana, attēlu izskatīšanas stratēģija, mērķa-distraktora līdzība, relatīvais dziļums, binokulārā disparitāte, radiologi

SATURS

1. VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS	5
1.1. Darba novitāte	7
1.2. Aizstāvamās tēzes.....	7
1.3. Autora publikāciju saraksts	8
1.4. Dalība starptautiska mēroga konferencēs	8
1.5. Dalība vietēja mēroga konferencēs.....	10
2. LITERATŪRAS APSKATS	11
3. PĒTĪJUMS.....	13
3.1. Metode.....	13
3.2. Rezultāti	16
3.2.1. Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšana	16
3.2.2. Mērķa elementa redzamības ietekme uz vizuālo meklēšanu.....	19
3.2.3. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģija	23
DISKUSIJA	26
NOBEIGUMS	29
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	30

1. VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Līdz ar darba vietu digitalizāciju un modificēšanu trīsdimensionālās vizualizācijas iekārtu tehnoloģiju attīstību un piedāvāto klāstu, svarīgi kļūst noteikt, vai lietotāji spēs jēgpilni un ilgstoši izmantot jaunās iekārtas. Tas, vai cilvēks mērķtiecīgi un efektīvi izmantos jaunu ekrānu, aplūkojot telpiski atveidoto informāciju, ir atkarīgs gan no atveidotā redzes stimulu fizikālajām īpašībām saistītām ar ekrāna tehnoloģiju, gan arī no cilvēka redzes uztveres specifikas.

Ja kādreiz trīsdimensionālā informācijas vizualizācija asociējās tikai ar izklaides jomu, tad mūsdienās arvien vairāk tiek runāts par trīsdimensionālās vizualizācijas sistēmu pielietojumu profesionālajās jomās. Tas ir saistīts ar pieejamās informācijas strauju apjoma pieaugumu, kā arī ar attēlu atveides tehnoloģiju attīstību. Attīstoties detalizētāku attēlu atveides tehnoloģijām, radiologiem ir ievērojami vairāk jāizskata informācijas apjomi daudzslāņu attēlu veidā, un veicot vizuālo meklēšanu viņiem nav iespējams ieraudzīt novērtējamā objekta kopainu ar saskaņotiem dziļuma nosacījumiem un efektīvi atrast informāciju, jo joprojām tiek izmantoti plakano ekrānu monitori (*Andriole et al.*, 2011). Spiesti meklēt informāciju slānī pēc slāņa, ilgstoša grūta uzdevuma pildīšana noved pie palielinātas kognitīvās slodzes (*Stuijzfand et al.*, 2016), kas var sekmēt noguruma iestāšanos (*Mizuno et al.*, 2011) un negatīvi ietekmēt arī redzes uzmanību (*Faber et al.*, 2012), kā rezultātā var pieļaut vairāk kļūdas (*Krupinski et al.*, 2012; *Gamble et al.*, 2018). Tiek uzskatīts, ka trīsdimensionālā informācijas vizualizācija varētu palīdzēt medicīnas profesionāliem ātrāk pieņemt lēmumu un efektīvāk meklēt informāciju (*Andriole et al.*, 2011), tomēr joprojām nav vienotas izpratnes par darba spējām un attēlu izskatīšanas stratēģijām, ja informācija ir attēlota telpiski, un kā attēlu fizikālās īpašības ietekmē tās (*Carrigan et al.*, 2019; *Williams & Drew*, 2019).

Trīsdimensionālās informācijas vizualizācijas tehnoloģijas, kuras tradicionāli dominē izklaides jomā, nav izmantojamas profesionāliem nolūkiem, jo lietotājs var izjust redzes diskomfortu, galvas vai acu sāpes pēc pusstundu ilgas attēlu aplūkošanas (*Nguyen et al.*, 2018). Ņemot vērā augsto pieprasījumu pēc trīsdimensionālās informācijas vizualizācijas iekārtām, šobrīd pasaulē tiek aktīvi izstrādāti dažādi ekrāni (*Geng*, 2013). Jaunā ekrāna lietotājam nevajadzētu rasties problēmām saskatīt objektu savstarpējo novietojumu un dziļumu līdzīgi, kā skatoties pa logu (*Geng*, 2013). Taču izradās, ka to ir samērā grūti nodrošināt tehniski.

Viens no daudzsološiem un konkurētspējīgiem produktiem pasaules līmenī ir SIA “*LightSpace Technologies*” Latvijā izstrādātais volumetriskais daudzplakņu ekrāns (*Osmanis et al.*, 2018). Tā kā šī ir inovācija attēlu atveides tehnoloģiju tirgū, tad līdz šim nebija pētīts, kā cilvēks meklē informāciju

volumetriskā daudzplakņu ekrāna attēlos un kā ekrāna attēla fizikālās īpašības ietekmē trīsdimensionālu attēlu uztveri.

Galvenais šķērslis šajā ceļā ir ekrāna vizuālās efektivitātes novērtēšanas metodes trūkums. Lielākā daļa klīnisko testu un pētniecisko metožu ir izstrādātas simulēto nevis īsto telpisko attēlu uztveres izvērtēšanai. Savukārt dziļuma uztveres izvērtēšanas metodes volumetriskajam rotējošam ekrānam (*Grossman & Balakrishnan*, 2006; *Hoffmann et al.*, 2006) nav jēgpilni pielietojamas volumetriskajam daudzplakņu ekrānam optisko elementu arhitektūru atšķirību dēļ. Turklāt piedāvātas metodes neļauj novērtēt procesu – kā cilvēks meklē informāciju trīsdimensionālos attēlos uz jauniem ekrāniem. Kopumā tas norāda uz nepieciešamību izstrādāt metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai, ko nākotnē varētu pielāgot dažādu volumetrisko ekrānu izvērtēšanai un papildināt atkarībā no jaunām vajadzībām un tehniskajām iespējām.

Iesaistoties jaunā ekrāna izstrādes un pilnveidošanas posmos, redzes speciālistiem rodas iespēja palīdzēt atrisināt problēmas, kas varētu tikt radītas ekrānu lietotājiem nākotnē, ja tās neatklās tagad un tām nepievērsīs uzmanību, kā arī paskaidrojot, kāda veida ekrānu tehniskie parametri un kāpēc netiks pieņemti no lietotāju puses, kas būs pretrunā ar cilvēka dabiskiem procesiem, un piedāvājot jauna veida risinājumus noteiktajām problēmām. Tā ir iespēja rūpēties par nākotnes ekrānu lietotājiem un proaktīvi risināt problēmas vēl pirms jaunie ekrāni ir nonākuši mūsu ikdienā, lai nākotnē lielāks lietotāju skaits varētu jēgpilni izmantot trīsdimensionālās vizualizācijas iekārtas komfortabli un bez darba snieguma kvalitātes samazinājuma.

Lai izstrādātu metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, darba mērķis bija noteikt, kā redzes stimuli ar atšķirīgiem fizikāliem parametriem un skatītāju profesionālās meklēšanas pieredze ietekmē vizuālās meklēšanas rezultātu un stratēģiju, skatoties trīsdimensionālus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Pirms tam bija jānosaka skatīšanās apstākļi, kuros volumetriskā daudzplakņu ekrāna attēls tiek uztverts kā trīsdimensionāls attēls. Lai sasniegtu mērķi, bija izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

1. noteikt, kā redzes stimula izkārtojums volumetriskā daudzplakņu ekrāna matricā ietekmē trīsdimensionālu attēlu uztveri;
2. noteikt, kādos skatīšanās attālumos jēgpilni atveidot attēlu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, lai tas tiktu uztverts kā trīsdimensionāls attēls;
3. novērtēt mērķa elementa redzamības ietekmi uz vizuālo meklēšanu un stratēģiju, cilvēkiem skatoties uz volumetrisko daudzplakņu ekrānu attēliem;
4. izpētīt atšķirības vizuālajā meklēšanā un stratēģijā cilvēkiem ar dažādu profesionālās meklēšanas pieredzi radioloģijā, skatoties attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

1.1. Darba novitāte

Tā kā līdz šim pasaulē nebija veikti līdzīga veida pētījumi volumetriskajam daudzplakņu ekrānam, pētījuma ietvaros ir izveidota jauna metode, ar kuras palīdzību var raksturot trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģiju atkarībā no mērķa elementa redzamības uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tādējādi pirmo reizi tika raksturotas cilvēka darba spējas un analizēta to saistība ar volumetriskā daudzplakņu ekrāna tehniskiem parametriem un attēlu fizikālajām īpašībām.

Izstrādātā metode tika aprobēta arī cilvēkiem ar profesionālās meklēšanas pieredzi, līdz ar to pirmo reizi tika noteiktas radiologu vizuālās meklēšanas īpatnības darbā ar jauno vizualizācijas iekārtu. Turklāt trīsdimensionālu attēlu uztveres izpētē pirmo reizi kvantitatīvi apraksta volumetriskā daudzplakņu ekrāna arhitektūras priekšrocības un trūkumus, aplūkojot tos no cilvēku redzes uztveres aspekta.

Rezultāti ir nozīmīgi tādēļ, ka iegūtās atradnes sekmē inovatīvu ekrānu attīstību pasaulē. Tie veicina labāku izpratni par cilvēka darba spējām, ergonomiku un prasībām pret jaunu trīsdimensionālās informācijas vizualizācijas iekārtu tehniskiem parametriem. Tādējādi ir nodrošināta iespēja pielietot izstrādāto vizuālās efektivitātes novērtēšanas metodi nākotnē gan nosakot nākamās paaudzes volumetrisko daudzplakņu ekrānu pilnveidojumu ietekmi uz lietotāju darba spējām, gan arī pētot citu veidu volumetrisko ekrānu attēlu uztveri.

1.2. Aizstāvamās tēzes

1. Izveidota metode, kas ļauj raksturot trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģiju atkarībā no mērķa elementa redzamības, veicot vizuālo meklēšanu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Eksperimentāli parādīts, ka, samazinoties mērķa elementa redzamībai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, pieaug nepieciešamība izskatīt telpiski attēlotu informāciju selektīvi, kas atspoguļojas attēlu izskatīšanas stratēģijā (Pladere et al., 2018, *Proc SPIE*, 10752, 1075235; Pladere et al., 2019, *Appl Sci*, 9(22), 4929).
2. Eksperimentāli parādīts, ka trīsdimensionālu attēlu uztvere ir saistīta ar redzes stimula izkārtojumu volumetriskā daudzplakņu ekrāna matricā attiecībā pret skatītāju. Redzes stimula izkārtojuma ietekmē samazinoties binokulārajai disparitātei un jutībai pret to redzes laukā, kļūst grūtāk izšķirt trīsdimensionālu attēlu relatīvo dziļumu. Projicēto attēlu slāņu disparitāšu diapazonu ierobežo volumetriskā daudzplakņu ekrāna optiskā elementa arhitektūra (Pladere et al., 2020, *Proc SPIE*, 11304, 113041F).

3. Lejupejošo procesu dominēšanas dēļ, radiologiem attēlu izskatīšanas stratēģija ir mazāk pakļauta augšupejošo procesu ietekmei, meklējot informāciju telpiskos nemedicīniskos attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, salīdzinot ar medicīnas studentiem (Pladere et al., 2019, *Appl Sci*, 9(22), 4929).

1.3. Autora publikāciju saraksts

1. Pladere, T., Delesa-Velina, M., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. (2020). "Assessment of spatial perception for a multi-layer volumetric display: the effect of exocentric and egocentric distance on relative depth judgements," *Proceedings of SPIE*, 11304, Article No. 113041F; doi: 10.1117/12.2560251.
2. Pladere, T., Delesa-Velina, M., Andriksone, V., Pitura, R., Panke, K., Krumina, G. (2019). "Visual search performance and strategy for three-dimensional visualization system: Impact of radiologist experience," *Applied Sciences*, 9(22), Article No. 4929; doi: 10.3390/app9224929.
3. Pladere, T., Velina, M., Andriksone, V., Pitura, R., Panke, K., Krumina, G. (2019). "Visual search in three-dimensional non-medical images: visual-motor performance of radiologists," *Proceedings of SPIE*, 11207, Article No. 1120708; doi: 10.1117/12.2526385.
4. Pladere, T., Jankovska, G., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. (2019). "Impact of viewing distance on relative depth judgements for stimuli in physical space," *Proceedings of SPIE*, 11099, Article No. 1109904; doi: 10.1117/12.2530438.
5. Pladere, T., Klava, K., Panke, K., Konosonoka, V., Seleznova, M., Krumina, G. (2018). "Capabilities and limitations of visual search: the effect of target discriminability," *Proceedings of SPIE*, 10752, Article No. 1075235; doi: 10.1117/12.2502369.
6. Pladere, T., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. (2018). "Looking in depth: visual distance perception of stimuli on volumetric multi-planar display," *OSA Technical Digest*, Article No. 3Tu5G.4; doi: 10.1364/3D.2018.3Tu5G.4.
7. Pladere, T., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. (2018). "Visual search efficiency depending on spatial layout of stimuli in volumetric image," *Proceedings of SPIE*, 10711, Article No. 1071121; doi: 10.1117/12.2318677.

1.4. Dalība starptautiska mēroga konferencēs

1. SPIE Photonics West (Sanfrancisko, ASV, 2020.gada 1.-6.februāris). "Assessment of spatial perception for a multi-layer volumetric display: the effect of exocentric and egocentric distance on relative depth

- judgements,” Pladere, T., Delesa-Velina, M., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
2. OSA Frontiers in Optics and Laser Science (Vašingtona, ASV, 2019.gada 15.-19.septembris). “Visual search performance depending on target-distractor difference on volumetric display and flat panel display,” Pladere, T., Velina, M., Konosonoka, V., Klava, K., Seleznova, M., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
 3. SPIE Optics + Photonics (Sandjego, ASV, 2019.gada 11.-15.augusts). “Impact of viewing distance on relative depth judgements for stimuli in physical space,” Pladere, T., Jankovska, G., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. – mutisks referāts.
 4. IV International Conference on Applications of Optics and Photonics (Lisabona, Portugāle, 2019.gada 31.maijs-4.jūnijs). “Visual search in three-dimensional non-medical images: visual-motor performance of radiologists,” Pladere, T., Velina, M., Pitura, R., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
 5. Developments in Optics and Communications (Rīga, Latvija, 2019.gada 11.-12.aprīlis). “Interactive three-dimensional visual search by radiologists and residents,” Andriksone, V., Pladere, T., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
 6. Developments in Optics and Communications (Rīga, Latvija, 2019.gada 11.-12.aprīlis). “Visual stimuli eccentricity affects depth perception for a volumetric display,” Konosonoka, V., Pladere, T., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
 7. Developments in Optics and Communications (Rīga, Latvija, 2019.gada 11.-12.aprīlis). “Relative depth estimation depending on spatial layout of stimuli on a volumetric display,” Jankovska, G., Pladere, T., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
 8. 2nd International Symposium on Visual Physiology, Environment and Perception (Viļņa, Lietuva, 2018.gada 30.novembris-1.decembris). “Age-related differences in visual search through volumetric images,” Pladere, T., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. – mutisks referāts.
 9. 2nd International Symposium on Visual Physiology, Environment and Perception (Viļņa, Lietuva, 2018.gada 30.novembris-1.decembris). “Effect of disparity and viewing distance on depth perception for a volumetric display,” Jankovska, G., Pladere, T., Konosonoka, V., Krumina, G. – stenda referāts.
 10. 2nd International Symposium on Visual Physiology, Environment and Perception (Viļņa, Lietuva, 2018.gada 30.novembris-1.decembris). “Visual search performance depending on a type of display,” Konosonoka, V., Pladere, T., Seleznova, M., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.

11. SPIE Optics + Photonics (Sandjago, ASV, 2018.gada 19.-23.augusts). "Capabilities and limitations of visual search: the effect of target discriminability," Pladere, T., Klava, K., Panke, K., Konosonoka, V., Seleznova, M., Krumina, G. – stenda referāts.
12. OSA Imaging & Applied Optics Congress (Orlando, ASV, 2018.gada 25.-28.jūnijs). "Looking in depth: visual distance perception of stimuli on volumetric multi-planar display," Pladere, T., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. – mutisks referāts.
13. SPIE Structured Light (Jokohama, Japāna, 2018.gada 24.-27.aprīlis). "Visual search efficiency depending on spatial layout of stimuli in volumetric image," Pladere, T., Konosonoka, V., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.
14. Developments in Optics and Communications (Rīga, Latvija, 2018.gada 12.-13.aprīlis). "Accuracy of visual depth perception depending on spatial layout of stimuli on volumetric display," Konosonoka, V., Pladere, T., Panke, K., Krumina, G. – stenda referāts.

1.5. Dalība vietēja mēroga konferencēs

1. Latvijas Universitātes 78.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2020.gada 14. un 16.februāris). "Redzes speciālistu loma 3D vizualizācijas tehnoloģiju pasaulē," Pladere, T., Panke, K., Krūmiņa, G. – mutisks referāts.
2. Latvijas Universitātes 78.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2020.gada 14. un 16.februāris). "Dažādu faktoru ietekme uz reakcijas laiku vizuālajā meklēšanā," Andriksone, V., Pladere, T., Krūmiņa, G. – mutisks referāts.
3. Latvijas Universitātes 77.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2019.gada 15. un 17.februāris). "Vizuālās meklēšanas stratēģija darbā ar dažāda veida ekrāniem," Konošonoka, V., Pladere, T., Selezņova, M., Panke, K., Krūmiņa, G. – stenda referāts.
4. Latvijas Universitātes 77.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2019.gada 15. un 17.februāris). "Dziļuma uztvere atkarībā no stimula atrašanās vietas uz volumetriskā ekrāna," Jankovska, G., Pladere, T., Konošonoka, V., Panke, K., Krūmiņa, G. – stenda referāts.
5. Latvijas Universitātes 77.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2019.gada 15. un 17.februāris). "3D vizuālās meklēšanas uzdevuma izpilde medicīnas speciālistiem," Andriksone, V., Pladere, T., Panke, K., Krūmiņa, G. – stenda referāts.
6. Latvijas Universitātes 76.zinātniskā konference (Rīga, Latvija, 2018.gada 16. un 18.februāris). "Vizuālā attāluma uztvere uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna," Konošonoka, V., Pladere, T., Panke, K., Krūmiņa, G. – stenda referāts.

2. LITERATŪRAS APSKATS

Pieprasījums pēc kvalitatīviem telpiskiem attēliem ir liels un augošs. Līdz ar jaunu trīsdimensionālās vizualizācijas iekārtu attīstību, rūpīga ekrānu ergonomiskuma izvērtēšana kļūst arvien svarīgāka, nosakot vizuālo efektivitāti, kura raksturo kā informācijas izskats un tajā esošo vizuālo elementu izmantošana ietekmē to, cik viegli lietotājs var atrast, saprast un izmantot informāciju. Ergonomiskos pētījumos iegūtie rezultāti sniedz priekšstatu par to, kā pareizi izmantot tehnoloģijas, lai paaugstinātu darba efektivitāti, kvalitatīvi piemērotu darba vidi cilvēka spējām, nepārslogotu redzes sistēmu, un kādi uzlabojumi ir nepieciešami izstrādājot jaunus ekrānus (*Jameson, 2012*).

Vizuālās meklēšanas uzdevumus izmanto pētījumos, lai raksturotu cilvēka darba spējas saistībā ar jauna informācijas vizualizācijas veida ietekmes pārbaudi, jo tiem ir raksturīga augstāka jutība pret attēla kvalitātes trūkumiem, kuri ir saistīti ar ekrānu, salīdzinot, piemēram, ar lasīšanas uzdevumiem (*Jameson, 2012*). Kopš Treismanes pazīmju apvienošanas teorijas un uzdevuma koncepcijas ieviešanas (*Treisman & Gelade, 1980*), vizuālās meklēšanas uzdevums ir kļuvis par populāru metodi, kuru izmanto nosakot sakarību starp fizikāliem stimuliem un attiecīgo redzes uztveres atbildi (*Wolfe, 2007*).

Meklējot mērķa elementu citu elementu (distraktoru) vidū, sākumā lielākoties tiek uztverta kopaina, un tikai pēc tam tiek apstrādāta informācija par atsevišķām detaļām (*Navon, 1977; Treisman & Gelade, 1980*). Proti, globālai redzes uztverei piemīt pirmatnība (*Navon, 1977*), tomēr tās ilgums un dominance uztverē ir atkarīgi no attēla fizikālajām īpašībām (*Enns & Kingstone, 1995*), tādām kā mērķa-distraktora līdzība (*Wolfe, 2007, Pomplun et al., 2013*). Redzes sistēma nespēj efektīvi apstrādāt pilnīgi visu informāciju no apkārtējās vides vienlaikus, un uzmanība palīdz pasargāt smadzenes no pārslodzes, ļaujot efektīvi izmantot ierobežoto redzes procesu kapacitāti (*Wolfe, 2007*). Tādēļ spēja pievērst uzmanību mērķa elementiem, neskatoties uz uzmanības novērsēju klātesamību, ietekmē dažādu aktivitāšu un darba efektivitāti kopumā.

Piemēram, radiologi rūpīgi izskata vairākus simptomus medicīniskus attēlus dienā, un liela daļa no viņu profesionāliem uzdevumiem var tikt definēti kā vizuālās meklēšanas uzdevumi (*Wolfe et al., 2016*). Radiologi meklē pat sīkas izmaiņas anatomisko struktūru izskatā vadoties pēc dažādām fizikālām īpašībām. Pareiza medicīnisko attēlu izskatīšana un interpretācija ir tieši saistīta ar vizuālās meklēšanas sniegumu, ko uzrāda radiologi (*Wolfe et al., 2016*). To ietekmē gan vispār zināmi faktori, kuri iespaido jebkuru meklēšanas procesu (*Wolfe, 2007*), gan profesionālās meklēšanas pieredze – pieredzējušiem radiologiem ir novērojama efektīvāka informācijas apstrāde globālās uztveres laikā (*Sheridan & Reingold, 2017*) un telpiskās atmiņas aktivizēšana (*Haller & Radue, 2005; Sunday et al., 2017*) salīdzinot ar citiem cilvēkiem. Ir zināms, ka vizuālās meklēšanas atšķirības izpaužas veidos, kā tiek izskatīti daudzslāņu attēli uz

plakano ekrānu monitoriem (Venjakob et al., 2012; Diaz et al., 2015), tomēr kā analizēt telpisku attēlu izskatīšanas stratēģijas atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām ir joprojām aktuāls jautājums (Williams & Drew, 2019).

Medicīniskās attēlošanas tehnoloģiju attīstības dēļ, medicīnas speciālisti arvien vairāk strādā ar daudz lielāku informācijas apjomu, un tradicionāli izmantojamie plakano ekrānu monitori ierobežo iespējas efektīvi meklēt informāciju un izpildīt darba uzdevumus (Andriole et al., 2011). Tiek uzskatīts, ka trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijām ir ievērojams potenciāls tikt jēgpilni pielietotām medicīnā, uzlabojot radiologu darba ergonomiku (Andriole et al., 2011; Nguyen et al., 2018), tomēr plaši izmantojamas stereoskopiskās vizualizācijas sistēmas neatbilst tam nolūkam. Volumetriskais ekrāns ir inovatīva vizualizācijas tehnoloģija (Geng, 2013; Osmanis et al., 2018), kura tiek izstrādāta, lai nākotnē dažādu profesiju pārstāvjiem atvieglotu darbu un samazinātu slodzi, jo telpisku attēlu aplūkošanu varētu veikt trīsdimensionālajā vidē nevis izskatot daudzus atsevišķus divdimensionālus attēlus. Viens no nozīmīgākajiem šķēršļiem šajā ceļā ir ekrāna lietotāju snieguma novērtēšanas metodes trūkums (Bolshakov & Sgibnev, 2018). Volumetrisko ekrānu ergonomiskuma izvērtēšanas sākumā pārsvarā interese bija vērsta uz to, lai noteiktu, vai cilvēks spēj uztvert ekrāna attēla dziļumu (Grossman & Balakrishnan, 2006) un attēlotu objektu formu (Hoffmann et al., 2006) kvalitatīvi uz volumetriskā rotējoša ekrāna. Taču piedāvātas metodes nav jēgpilni pielietojamas volumetriskajam daudzplakņu ekrānam optisko elementu arhitektūru atšķirību dēļ. Volumetriskajā daudzplakņu ekrānā dziļuma plakņu skaits ir mazs, un tādēļ prioritāri tika izvērtēts, kā attēla slāņu projicēšana uz dažām diskrētajām dziļumu plaknēm ietekmē dziļuma sajūtu un redzes komfortu (Hoffman et al., 2008). Tomēr neviena no šīm piedāvātajām metodēm neļauj novērtēt attēlu izskatīšanas procesu – kā cilvēks meklē informāciju daudzslāņu attēlos uz jauniem ekrāniem.

Jaunās vizualizācijas iekārtas ergonomiskā izvērtēšanā ir nepieciešams ņemt vērā dažādus faktoros, kas spēj ietekmēt lietotāju darbu. Kopumā vizuālās meklēšanas uzdevums ir ērts rīks, ar kura palīdzību var visaptveroši spriest par cilvēka darba spējām (Clark, 2014; Aizenman et al., 2015; Wolfe et al., 2016) un jauna informācijas vizualizācijas veida pielietojumu (Jameson, 2012; Nguyen et al., 2018). Atšķirībā no divdimensionālu attēlu aplūkošanas, redzes uzmanības pievēršanu un spēju efektīvi atrast informāciju trīsdimensionālos attēlos ietekmē relatīvā dziļuma uztvere (O'Toole & Walker, 1997; McSorley & Findlay, 2001). Savukārt spriedumi par relatīvo dziļumu ir saistīti gan ar trīsdimensionāla attēla atveides veidu, gan ar cilvēka spējām uztvert to atkarībā no vizuālo elementu izkārtojuma (Howard & Rogers, 2012) un dziļuma nosacījumu pieejamības (Cutting & Vishton, 1995). Bez stimulu fizikālajām īpašībām meklēšanas sniegumu un attēlu izskatīšanas stratēģiju var ietekmēt arī meklēšanas pieredze (Diaz et al., 2015; Wolfe et al., 2016), ko ir svarīgi ņemt vērā nosakot lietotāju darba spējas saistībā ar jaunā ekrāna izvērtēšanu.

3. PĒTĪJUMS

3.1. Metode

Pētījumā tika izmantots volumetriskais daudzplakņu ekrāns (SIA “*LightSpace Technologies*”, modelis: x1405). Ekrāna galvenās sastāvdaļas ir optiskais elements un ātrgaitas projektors (*Osmanis et al.*, 2018). Optisko elementu veido secīgi izvietotas divdesmit plaknes ar optiskiem slēdžiem, kuri ir elektroniski adresējami un ātri pārslēdzami starp gaismu izkliedējošo un caurspīdīgo stāvokli. Katrā īsā brīdī tikai viena no plaknēm atrodas gaismu izkliedējošā stāvoklī, kamēr visas pārējās plaknes laiž gaismu cauri. Ātrgaitas projektora un optiskā elementa darbība ir savstarpēji sinhronizēta. Plaknes biezums ir 1,10 mm. Savstarpējais attālums starp optisko slēdžu kārtām sastāda 5,04 mm. Plaknes garums un platums ir 395×295 mm. Ekrāna izšķirtspēja ir 1024×768 pikseli katrai plaknei. Volumetriskā attēla atjaunošanas frekvence ir 60 Hz. Visi pētījuma mērījumi tika veikti demonstrējot gaišus elementus uz tumšā ekrāna fona mezopiskos apstākļos.

Pētījumā brīvprātīgi piedalījās 107 dalībnieki (skat. 3.1. tab.). Dalībnieku iekļaušanas kritēriji bija sekojoši: labs redzes asums tuvumā ($Visus = 1,0$, decimālajās vienībās) ar vai bez optiskās korekcijas, netraucēta binokulārā redze, pietiekams stereoredzes asums tuvumā (60" vai labāks). Pētījums norisinājās saskaņā ar Helsinku deklarācijas saturu un bija apstiprināts Latvijas Universitātes Ētikas komisijā.

3.1. tabula

Pētījuma dalībnieku apraksts

pētījuma posms	Dalībnieki
Trīsdimensionālu attēlu uztvere atkarībā no redzes stimula izkārtojuma	20 dalībnieki vecumā no 21 līdz 29 gadiem.
Trīsdimensionālu attēlu uztvere dažādos skatīšanās attālumos no ekrāna	20 dalībnieki vecumā no 20 līdz 25 gadiem. Papildu kritērijs: labs redzes asums tālumā ($Visus = 1,0$) ar vai bez optiskās korekcijas, netraucēta binokulārā redze tālumā.
Mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšana vizuālajā meklēšanā	20 dalībnieki vecumā no 21 līdz 28 gadiem.
Metodes aprobēšana cilvēkiem ar profesionālās meklēšanas pieredzi	10 kvalificēti radiologi (darba stāžs no 6 līdz 33 gadiem, vid. 22 gadi), 13 rezidenti (darba stāžs no 1 līdz 4 gadiem, vid. 3 gadi) un 24 medicīnas studenti bez praktiskajām iemaņām radioloģijā.

Lai izvērtētu cilvēku darba spējas saistībā ar jauno vizualizācijas iekārtu, pētījumā izstrādāta vizuālās efektivitātes novērtēšanas metode. Atšķirībā no informācijas meklēšanas divdimensionālos attēlos, vizuālo meklēšanu var ietekmēt spēja spriest par objektu savstarpējo novietojumu dziļumā, kad mērķa elements ir jāatrod trīsdimensionālajā vidē uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. To, vai cilvēks spēj uztvert projicēto attēlu kā trīsdimensionālu attēlu ir atkarīgs gan no redzes uztveres specifikas, gan no konkrēta ekrāna optiskā elementa arhitektūras, jo tā nosaka projicētā attēla fizikālās īpašības.

Sākumā tika noteikti skatīšanās apstākļi, kuros uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna projicētais attēls ar ierobežotu dziļuma nosacījumu skaitu tika uztverts kā trīsdimensionāls attēls. Šim nolūkam tika noteikts, kā redzes stimula izkārtojums volumetriskā daudzplakņu ekrāna matricā (meklējamā elementu lauka ekscentritāte un dziļuma segments) ietekmē pareizo atbildi īpatsvaru un uzdevuma izpildīšanas laiku dziļuma pazīmes vizuālajā meklēšanā. Turklāt tika noteikts, kādos skatīšanās attālumos jēgpilni atveidot attēlu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Turpmāk iegūtie rezultāti par skatīšanās apstākļiem tika izmantoti, lai izveidotu trīsdimensionālu redzes stimulu vizuālās efektivitātes novērtēšanas metodei.

Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšanā redzes stimulš bija selektīvi attēlots dažādos ekrāna dziļuma segmentos un lauka ekscentritātēs. Visas optiskā elementa plaknes bija nosacīti iedalītas četros vienādos dziļuma segmentos skaitot no vistuvākās novērotājam (I, II, III un IV). Apli tika attēloti dažādās lauka ekscentritātēs ($1,9^\circ$, $3,8^\circ$ un $7,6^\circ$) četros virzienos attiecībā pret ekrāna plakņu centru – uz augšu, uz leju, pa labi un pa kreisi. Gan lauka ekscentritātes, gan dziļuma segmenta secība mainījās pēc nejaušības principa uzdevumos. Katrai no mainīgo kombinācijām bija veikti divdesmit mēģinājumi (konstanto stimulu metode).

Dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumā uz ekrāna parādījās četri apli ($0,5^\circ$ ārējais diametrs, $0,1^\circ$ līnijas platums), viens no kuriem bija projicēts par vienu plakni tuvāk dalībniekam nekā visi pārējie. Dalībnieka uzdevums bija pareizi un ātri noteikt, kurš no apliem parādīts tuvāk viņam, un sniegt atbildi par šī apla atrašanās virzienu attiecībā pret ekrāna centru (piespiedu izvēles procedūra ar četrām alternatīvām).

Lai izvērtētu attēlu uztveri dažādos skatīšanās attālumos no ekrāna, dalībnieki izpildīja dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumus deviņos skatīšanās attālumos (no 0,5 m līdz 2,5 m, ar soli 0,25 m, nosacīti nejaušā secībā). Redzes stimulš tika projicēts $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē pirmā segmenta ietvaros. Līdz ar skatīšanās attālumu mainījās arī rezultējošā binokulārā disparitāte (Howard & Rogers, 2012).

Nākamais solis metodes izstrādē bija mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšana vizuālajā meklēšanā un attēlu izskatīšanas stratēģijā atkarībā no attēla fizikālajām īpašībām. Mainot mērķa-distraktora līdzību vienas pazīmes ietvaros, meklējamo elementu skaitu uz volumetriskā daudzplakņu

ekrāna un redzes stimula projekciju dziļuma segmentos, tika noteikti attēla fizikālie parametri, pie kuriem tika novērotas nozīmīgas izmaiņas vizuālās meklēšanas sniegunā un trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģijā. Turpmāk šie fizikālie parametri tika izvēlēti vizuālās efektivitātes metodes aprobēšanai.

Redzes stimulsi ietvēra aplū, kuri tika projicēti dažādos attālumos no ekrāna plakņu centriem $4,75^\circ \times 4,75^\circ$ laukumā. Aplūiem bija vienāds ārējais diametrs – $0,5^\circ$. Mērķa elements atšķīrās no distraktoriem ar palielinātu līnijas platumu aplū centra virzienā, šo atšķīrību saucām par mērķa pazīmi. Lai noteiktu mērķa-distraktora līdzības ietekmi uz vizuālās meklēšanas sniegumu un attēlu izskatīšanas stratēģiju, atšķīrība elementu līnijas platumā tika mainīta meklēšanas uzdevumos – 10 %, 15 %, 20 % un 25 %. Elementu skaits bija 20, 30, 40 un 50 aplū uz desmit secīgām plaknēm, ar vienādu elementu skaitu uz katras plaknes. Redzes stimulsi tika projicēti priekšējā segmentā un mugurējā segmentā. Priekšējais segments ietvēra dalībniekam vistuvākās optiskā elementa plaknes, un mugurējais – vistālākās. Dalībnieki veica divdesmit uzdevumu mēģinājumus ar katru no mainīgo kombinācijām (konstanto stimulu metode). Dalībnieka uzdevums bija pareizi un ātri noteikt mērķa elementa relatīvu atrašanās vietu uz ekrāna (piespiedu izvēles procedūra ar četrām alternatīvām).

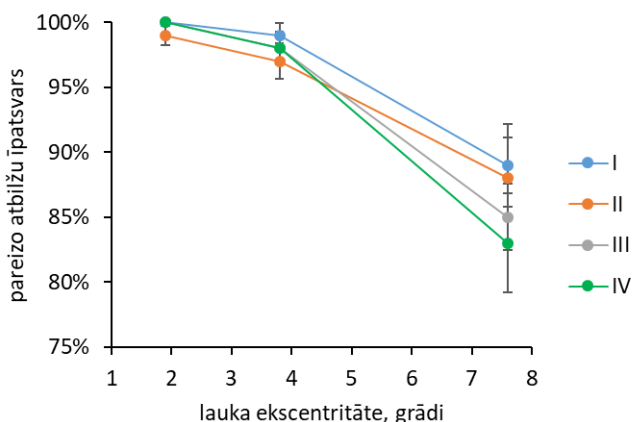
Vizuālās meklēšanas uzdevumā dalībnieks varēja veikt redzes informācijas izkārtējuma un apjoma izmaiņas uz ekrāna izmantojot datora tastatūras “uz augšu” un “uz leju” bultīņas (divi pārvietojumu virzieni), tādējādi pietuvinot un attālinot attēla slāņus dziļuma segmenta ietvaros. Kopumā rezultātu analīzei tika izmantoti dati par meklēšanas sniegumu (pareizo atbilžu īpatsvaru un meklēšanas laiku) un attēlu izskatīšanas stratēģiju (attēla slāņu pārvietojumu skaitu un pārvietojumu virziena maiņu skaitu).

Beigās izstrādāta metode ar izvēlētiem fizikālajiem parametriem (aprakstīti Rezultātu sadaļā) bija aprobēta cilvēkiem ar dažādu profesionālās meklēšanas pieredzi radioloģijā. Tas ļāva paplašināt zināšanas par ietekmējošajiem faktoriem saistībā ar vizuālās efektivitātes novērtēšanu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ņemot vērā medicīnas speciālistu laika ierobežojumu, meklēšanas uzdevumi tika veikti piecas reizes ar katru no mainīgo lielumu pāriem. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģijas analīze bija papildināta ar jaunu parametru – noņemtā attēla daļa. Iedvesmojoties no zinātniskās literatūras (Venjakob *et al.*, 2012), mēs definējām trīs pamata veidus. “Nav izmaiņu” nozīmē, ka dalībnieks izskatīja visu telpisko attēlu uz ekrāna bez attēla slāņu pārvietojumiem. “Attēla mazākā daļa” nozīmē, ka tikai pieci (vai mazāk) attēla slāņi bija “noņemti” no ekrāna (ar iespēju atgriezt šo informāciju atpakaļ uz ekrānu). “Attēla lielākā daļa” nozīmē, ka vairāk nekā pieci slāņi bija “noņemti” meklēšanas uzdevuma izpildīšanas laikā. Visu datu analīze tika veikta izmantojot programmu *R Statistical Software*.

3.2. Rezultāti

3.2.1. Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšana

Lai noteiktu, pie kāda redzes stimula izkārtojuma volumetriskā daudzplakņu ekrāna optiskā elementa matricā projicētais attēls tiek uztverts kā trīsdimensionāls attēls, sākumā tika izvērtēta dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevuma izpildīšanas pareizība. Gandrīz visos gadījumos cilvēki pareizi noteica meklējamo elementu ar atšķirīgu relatīvo dziļumu, kad apli bija demonstrēti 1,9° lauka ekscentritātē uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, kā redzams 3.1. attēlā, kurā ir apkopoti vidējie pareizo atbilžu īpatsvara rezultāti. Tikai dažas kļūdas bija pieļautas, kad redzes stimulā bija attēlots otrais segmentā. Tādējādi, kopumā bija sasniegts visaugstākais pareizo atbilžu īpatsvars, un tas būtiski nemainījās, kad redzes stimulā bija parādīts dažādos dziļuma segmentos.



3.1. att. Pareizo atbilžu īpatsvars dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumos atkarībā no redzes stimula izkārtojuma ekrāna optiskā elementa matricā (elementu lauka ekscentritātes un dziļuma pazīmes).

Salīdzinot ar vismazāko testētu lauka ekscentritāti, vidēji par 2 % samazinājās pareizo atbilžu īpatsvars, kad apli bija novietoti 3,8° lauka ekscentritātē. Palielinot lauka ekscentritāti līdz 7,6°, pareizo atbilžu īpatsvars redzami samazinājās, jau nosakot aplu savstarpējo novietojumu vistuvākajā dziļuma segmentā. Salīdzinot ar mazākām lauka ekscentritātēm (1,9° un 3,8°), bija novērojama augstākā rezultātu izkliede dalībnieku starpā, un pareizo atbilžu īpatsvars strauji samazinājās arī tālākajos dziļuma segmentos (III un IV).

Izmantojot varbūtības proporciju (*Likelihood ratio*) testu, statistiskajā analizē tika apliecināts, ka lauka ekscentritātei bija būtiska ietekme uz iegūtajiem rezultātiem [$\chi(2,2) = 351,5$, $p < 0,001$]. Lai detalizēti raksturotu lauka ekscentritātes ietekmi un dziļuma segmenta ietekmi uz pareizo atbilžu īpatsvaru,

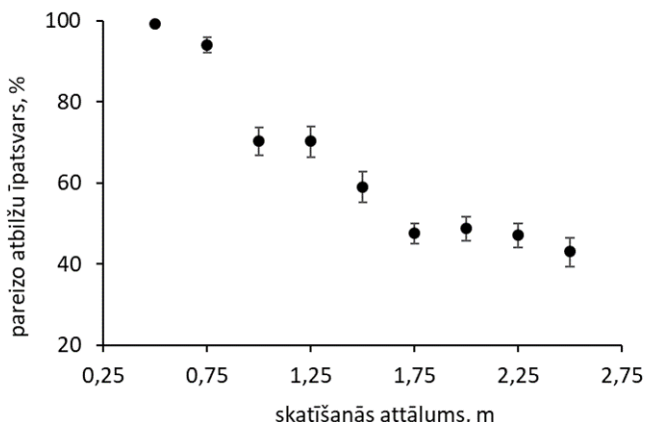
tika aprakstīta *z*-statistika (*z*-statistic) katram no mainīgajiem atsevišķi. Salīdzinot ar dziļuma pazīmes meklēšanu elementiem $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē, dalībnieki ievērojami retāk izpildīja meklēšanas uzdevumu pareizi, kad apli bija demonstrēti divreiz lielākā lauka ekscentritātē uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna ($z = -4,44$, $p < 0,001$). Salīdzinot sniegumu meklēšanas uzdevumos ar apliem $3,8^\circ$ lauka ekscentritātē, vidējais pareizo atbilžu īpatsvars bija ievērojami zemāks, kad lauka ekscentritāte pieauga līdz $7,6^\circ$ ($z = -10,89$, $p < 0,001$).

Izmantojot varbūtības proporciju testu, statistiskajā analizē bija parādīts, ka arī redzes stimula demonstrācijai dažādos ekrāna dziļuma segmentos bija izteiktā ietekme uz pareizo atbilžu īpatsvaru dziļuma pazīmes meklēšanā, kad meklējamie elementi bija $7,6^\circ$ lauka ekscentritātē [$\chi(2,3) = 22,3$, $p < 0,001$]. Statistiski būtisks samazinājums pareizo atbilžu īpatsvarā bija novērojams salīdzinot sniegumu, kad redzes stimulš tika radīts tālākajos dziļuma segmentos ($z = -2,56$, $p = 0,01$). Tomēr pareizo atbilžu īpatsvars būtiski nemainījās, salīdzinot sniegumu, kad stimulš bija demonstrēts I un II segmentā ($z = -1,11$, $p = 0,27$), kā arī II un III ($z = -0,84$, $p = 0,40$).

Turklāt tika apskatīts, cik ilgs laiks bija nepieciešams redzes uzdevuma izpildīšanai. Izmantojot varbūtības proporciju testu, būtiska ietekme tika noskaidrota ekrāna dziļuma segmentam [$\chi(2,2) = 302,2$, $p < 0,001$], tāpat kā lauka ekscentritātei [$\chi(2,2) = 43,5$, $p < 0,001$], tomēr abu šo faktoru mijiedarbība nebija atzīta par statistiski nozīmīgu [$\chi(2,6) = 9,70$, $p = 0,14$]. Dalībnieki patērēja visīsāko laiku, kad sprieda par samērā tuvu projicēto apli relatīvo dziļumu uz ekrāna. Vidēji, tas variēja no 663 ± 22 ms līdz 755 ± 35 ms, kad redzes stimulš bija projicēts dažādos ekrāna optiskā elementa dziļumos $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē. Uzdevuma izpildīšanas laiks tika analizēts izmantojot *t*-statistiku (*t*-statistic), lai raksturotu lauka ekscentritātes ietekmi un dziļuma segmenta ietekmi uz gūtiem rezultātiem. Datu analizē bija apliecināts statistiski nozīmīgs pieaugums vidējos laikos, palielinoties lauka ekscentritātei no $1,9^\circ$ līdz $3,8^\circ$ [$t(215) = 8,06$, $p < 0,001$], un no $3,8^\circ$ līdz $7,6^\circ$ [$t(215) = 16,63$, $p < 0,001$]. Salīdzinot uzdevuma izpildīšanas laiku, kad redzes stimulš bija projicēts dažādos dziļuma segmentos, tika noteikts, ka cilvēki patērēja līdzīgu laiku, meklējot elementu ar atšķirīgo dziļumu I un II segmentā [$t(215) = -0,85$, $p = 0,4$], kā arī II un III segmentā [$t(215) = -0,04$, $p = 0,97$]. Tomēr ievērojami ilgāku laiku aizņēma dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevuma izpildīšana, kad redzes stimulš bija projicēts IV segmentā, salīdzinot ar vidējiem laikiem, ko patērēja izskatot redzes stimulu III segmentā [$t(215) = 5,84$, $p < 0,001$].

Kopumā redzes stimula izkārtojuma ietekmes rezultātu analīze parādīja, ka attēls projicētais uz secīgām plaknēm dažādos dziļuma segmentos tiek uztverts kā trīsdimensionāls attēls, kad attālums starp tā elementiem ir salīdzinoši tuvs (elementi atrodas $1,9^\circ$ un $3,8^\circ$ lauka ekscentritātē). Proti, relatīvais dziļums tiek noteikts pareizi un ātri atšķirībā no gadījumiem, kad meklējamie elementi atrodas lielākajā lauka ekscentritātē ($7,6^\circ$).

Arī izvērtējot trīsdimensionālu attēlu uztveri dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna, tika apkopoti dati par pareizo atbilžu īpatsvaru un laiku, veicot dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumu. Vidējie pareizo atbilžu īpatsvara rezultāti ir attēloti 3.2. attēlā. Visaugstākais pareizo atbilžu īpatsvars $99\% \pm 1\%$ bija sasniegts 0,5 m skatīšanās attālumā. Tomēr dalībniekam attālinoties no ekrāna vizuālās meklēšanas uzdevums bija izpildīts pareizi arvien retāk. Straujš pareizo atbilžu īpatsvara kritums bija novērojams, kad attālums palielinājās no 0,75 m līdz 1 m, kā arī lielākajos skatīšanās attālumos vidējais pareizo atbilžu īpatsvars turpināja pakāpeniski samazināties.



3.2. att. Pareizo atbilžu īpatsvars dziļuma pazīmes vizuālajā meklēšanā dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Lai novērtētu, vai izmaiņas pareizo atbilžu īpatsvarā ir nozīmīgas, mainoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam, tika izmantota vienfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīze (ANOVA) atkarīgām grupām. Statistiskā analīze apliecināja, ka pareizo atbilžu īpatsvars būtiski mainījās dziļuma pazīmes vizuālajā meklēšanā dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna [$F(8,152) = 58,79, p < 0,001$]. *Post hoc* pāru salīdzinājumi ar t-testiem parādīja, ka pareizo atbilžu īpatsvars samazinājās pakāpeniski bez nozīmīgām atšķirībām ($p > 0,3$) palielinoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam, izņemot tikai izmaiņas salīdzinot rezultātus, kad dalībnieki pildīja uzdevumus 0,75 m un 1 m attālumos. Šajā gadījumā palielinoties skatīšanās attālumam par 0,25 m, bija novērojams statistiski būtisks kritums ($p < 0,001$).

Uzdevuma izpildīšanas laiks pakāpeniski pieauga cilvēkam attālinoties no ekrāna. Salīdzinot datus vistālākajā un vistuvākajā skatīšanās attālumā, laiks vidēji pieauga vairāk kā trīs reizes. Vienfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīzes (ANOVA) rezultāti norādīja, ka uzdevuma izpildīšanas laiks būtiski

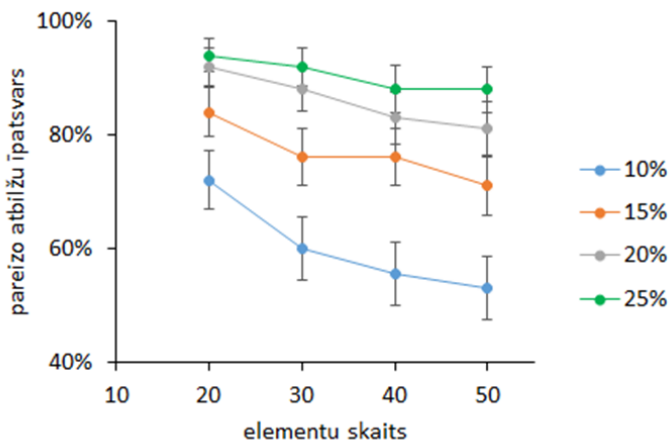
mainījās dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna [$F(2,6; 49,9) = 12, p < 0,001$].

Post hoc analīzē ar t-testiem bija apliecināts, ka dalībnieki paveica uzdevumus ātri, kad salīdzināja volumetrisko attēlu relatīvo dziļumu 0,5 m un 0,75 m attālumā no ekrāna ($p = 0,39$). Tomēr uzdevuma izpildīšanas laiks bija ievērojami ilgāks, kad attālums palielinājās no 0,75 m līdz 1 m ($p = 0,009$). Pieaugot skatīšanās attālumam vēl vairāk, palielinājās vidējo rezultātu izkliede un atšķirības nebija statistiski nozīmīgas ($p > 0,34$). Ņemot vērā visus gūtos rezultātus, turpmāk meklēšanas uzdevumi tika pildīti skatīšanās attālumos mazākos par 0,75 m, lai dalībniekiem būtu viegli noteikt meklējamo elementu savstarpējo izkārtojumu optiskā elementa dziļumā.

3.2.2. Mērķa elementa redzamības ietekme uz vizuālo meklēšanu

Lai noteiktu attēla fizikālos parametrus, pie kuriem tiek novērotas nozīmīgas izmaiņas vizuālajā meklēšanā, tika izvērtēta mērķa elementa redzamības ietekme, mainot mērķa-distraktora līdzību vienas pazīmes ietvaros, elementu skaitu uz ekrāna un attēlu projekciju dziļuma segmentos. Tā kā attēlu projekcijai divos dziļuma segmentos nebija pierādīta statistiski nozīmīga ietekme uz rezultātiem vizuālajā meklēšanā ($p > 0,05$), iegūtie dati ir attēloti kopā.

Apkopojot gūtos rezultātus, tika noskaidrots, ka visaugstākais vidējais sniegums bija demonstrēts, kad mērķa elements atšķīrās no visiem pārējiem 19 apliem uz ekrāna ar 25 % palielinātu līnijas platumu (94 ± 3 %). Tomēr, kā redzams 3.3. attēlā, pareizo atbilžu īpatsvars samazinājās palielinoties gan mērķa-distraktora līdzībai, gan elementu skaitam.



3.3. att. Vidējais pareizo atbilžu īpatsvars visiem dalībniekiem meklēšanas uzdevumos ar dažādu elementu skaitu atkarībā no apla līnijas platuma atšķirības uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) bija apliecināts, ka pareizo atbilžu īpatsvaru būtiski ietekmēja gan mērķa-distraktora līdzība [$F(3,57) = 141,80, p < 0,001$], gan meklējamo elementu skaits meklēšanas uzdevumā [$F(3,57) = 36,50, p < 0,001$]. Turklāt tika noteikta statistiski būtiskā mijiedarbība starp šiem ietekmējošiem faktoriem [$F(9,171) = 2,78, p = 0,005$]. Šīs atradnes interpretācija ir redzama 3.3. attēlā – izmaiņas pareizo atbilžu īpatsvarā elementu skaita pieauguma ietekmē kļūst mazākas, samazinoties mērķa-distraktora līdzībai. Piemēram, elementu skaitam pieaugot no 20 līdz 50 apliem meklēšanas uzdevumā, vidējais pareizo atbilžu īpatsvars mainījās maz (no $94 \pm 3 \%$ līdz $88 \pm 4 \%$), kad apļa līnijas platuma atšķirība bija 25 %. Savukārt, vislielākais kritums vidējā pareizo atbilžu īpatsvarā atkarībā no elementu skaita meklēšanas uzdevumā bija novērojams, kad mērķa elements atšķīrās no pārējiem elementiem ar 10 % palielinātu līnijas platumu – no $72 \pm 5 \%$ līdz $53 \pm 6 \%$, elementu skaitam pieaugot par 30 apliem.

Lai savstarpēji salīdzinātu pareizo atbilžu īpatsvarus meklēšanas uzdevumos ar dažādu mērķa-distraktora līdzību un elementu skaitu uz ekrāna, tika izmantota savstarpēji atkarīgu izlašu vidējo vērtību salīdzināšanas metode. Ar t-testiem tika noskaidrots, ka uzdevumos pakāpeniski samazinoties mērķa-distraktora līdzībai būtiski palielinājās pareizo atbilžu īpatsvars ($p < 0,03$), izņemot rezultātus meklēšanas uzdevumos ar 20 % un 25 % palielinātu apļa līnijas platumu, kuri nebija statistiski nozīmīgi atšķirīgi ($p > 0,05$).

Post hoc analīzē tika noteikts, ka meklējot mērķa elementu ar 25 % lielāku apļa līnijas platumu pareizo atbilžu īpatsvara samazinājums līdz ar meklējamo elementu skaita pieaugumu nebija statistiski būtiski nozīmīgs ($p > 0,05$). Līdzīga situācija bija novērojama arī tad, kad mērķa elementa līnijas platums atšķīrās no citu elementu līnijas platuma par 20 % un 15 %. Proti, pareizo atbilžu īpatsvars pakāpeniski samazinājās palielinoties elementu skaitam par 10 apliem uz ekrāna ($p > 0,14$). Vienīgi tad, kad mērķa-distraktora līdzība bija visaugstākā, bija noteikts statistiski nozīmīgs kritums pareizo atbilžu īpatsvarā palielinoties elementu skaitam uz ekrāna no 20 līdz 30 apliem ($p = 0,03$), turpinot pakāpeniski samazināties līdz ar turpmāku elementu skaita pieaugumu ($p > 0,20$).

Lai izvērtētu, cik ilgi tika izskatīti daudzslāņu attēli atkarībā no redzes stimula fizikālajiem parametriem, kad informācija jāatrod uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, laiks nebija ierobežots izstrādātajā redzes stimulu ģenerēšanas programmā. Iegūtie rezultāti norādīja, ka visātrāk meklēšanas uzdevums bija paveikts pie zemas mērķa-distraktora līdzības (20 % un 25 % atšķirība) un maza informācijas apjoma (20 elementi uz ekrāna plaknēm) – dalībnieki vidēji patērēja 5 ± 1 s. Savukārt gandrīz divreiz ilgāks laiks bija nepieciešams palielinoties mērķa-distraktora līdzībai un projicējot to pašu elementu skaitu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna – 10 ± 1 s pie 10 % un 8 ± 1 s pie 15 % atšķirības apļu līnijas platumā. Turklāt bija novērojams uzdevuma izpildīšanas laika pieaugums attēlojot arvien lielāku elementu skaitu uz ekrāna ar dažādu mērķa-distraktora līdzību. Salīdzinot gūtos rezultātus

uzdevumos ar vismazāko un vislielāko elementu skaitu uz ekrāna, vismazākais vidējā laika pieaugums (par 3 s) bija novērojams pie viszemākās mērķa-distraktora līdzības. Savukārt palielinoties mērķa-distraktora līdzībai, meklēšanas laiks pieauga straujāk (par 5 s). Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) apliecināts, ka gan mērķa-distraktora līdzība [$F(2,35) = 2,03, p < 0,001$], gan elementu skaits [$F(2,38) = 56,11, p < 0,001$] būtiski ietekmēja meklēšanas laikus, bet nebija pierādīta statistiski nozīmīga ietekme šo abu faktoru mijiedarbībai ($p > 0,05$).

Turpmāk *post hoc* analīzē ar t-testiem tika savstarpēji salīdzināti meklēšanas laiki atkarībā no mērķa-distraktora līdzības un elementu skaita uz ekrāna. Kopumā statistiski nozīmīgas atšķirības netika pierādītas salīdzinot meklēšanas laikus uzdevumos ar 10 % un 15 % apla līnijas platuma atšķirību ($p > 0,2$), kā arī 20 % un 25 % ($p > 0,4$), bet meklēšanas laiki būtiski pieauga līnijas platuma atšķirībai mainoties no 15 % līdz 20 % ($p < 0,05$).

Izskatot izpildīšanas laikus uzdevumos ar 10 % līnijas platuma atšķirību, tika noteikts, ka elementu skaitam pieaugot par desmit apliem uz ekrāna ilgums pakāpeniski kāpa, izmaiņām nesasniedzot statistisko nozīmību pāru salīdzinājumos ($p > 0,2$). Arī uzdevumos ar pārējiem mērķa elementiem, laika pieaugums līdz ar elementu skaita palielinājumu nebija statistiski nozīmīgs, kad elementu skaits mainījās no 20 līdz 30 ($p > 0,7$) un no 40 līdz 50 apliem ($p = 1,0$). Savukārt uzdevuma izpildīšanas laiks būtiski paildzinājās uzdevumos ar 15 %, 20 % un 25 % atšķirību, kad kopējais elementu skaits pieauga no 30 līdz 40 apliem uz ekrāna ($p < 0,01$).

Apkopojot rezultātus par vizuālo meklēšanu cilvēkiem darbā ar volumetrisko daudzplakņu ekrānu, ir noteikts, ka fizikālo īpašību ietekme atspoguļojas meklēšanas uzdevuma izpildīšanas pareizībā un laikā. Palielinoties mērķa-distraktora līdzībai, pieaug kļūdu skaits. Mainot mērķa-distraktora līdzības lielumu vienas pazīmes ietvaros, šajā pētījumā tika noskaidrots, ka dalībnieki var atrast mērķa elementus ar 15 %, 20 % un 25 % lielāku apla līnijas platumu salīdzinot ar pārējiem elementiem pie dažāda elementu skaita (20, 30, 40 un 50 apli) uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, savukārt mērķa elementus ar 10 % platāko līniju bija grūti atrast pie palielinātā elementu skaita. Nozīmīgas atšķirības meklēšanas pareizībā bija novērojamas, kad aplu līnijas platums bija par 15 % un 25 % lielāks mērķa elementiem salīdzinot ar distraktoriem. Proti, pareizo atbilžu īpatsvars bija augstāks, kad mērķa elementa līnijas platums bija par 25 % lielāks nekā distraktoriem, norādot uz to, ka uzdevums bija samērā viegli paveicams. Savukārt mainoties mērķa elementa līnijas platuma palielinājumam uz 15 %, būtiski pieauga kļūdu skaits. Izvērtējot elementu skaita ietekmi, tika noteikts, ka pie abām minētām atšķirībām meklējamo elementu izskatā pareizo atbilžu īpatsvars bija līdzīgs, tomēr laiks būtiski mainījās, kad uz ekrāna tika demonstrēti 20 apli un 40 apli. Kopumā 15 % un 25 % atšķirības lielumi bija izvēlēti izmantošanai nākamajā pētījuma posmā, kurā tika pārbaudīta iespējama profesionālās meklēšanas pieredzes ietekme uz cilvēka darba spējām

saistībā ar informācijas meklēšanu attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tā kā būtiskas atšķirības netika pierādītas vizuālās meklēšanas sniegumā, projicējot daudzslāņu attēlus priekšējā un mugurējā dziļuma segmentā, tika izvēlēts turpināt demonstrēt redzes stimulu priekšējā segmentā.

Radiologi, rezidenti un medicīnas studenti izpildīja meklēšanas uzdevumus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Salīdzinoši maza uzdevuma mēģinājumu skaita dēļ, dalībnieku meklēšanas uzdevuma izpildes kvalitāte tika raksturota ar kopējo pareizi izpildītu uzdevumu skaitu, tādēļ rezultāts variēja no 5 (visi mēģinājumi izpildīti pareizi) līdz 0 (neviens no mēģinājumiem netika izpildīts pareizi) katram no fizikālo parametru kombinācijām. Dalībnieki izpildīja lielāku daļu no meklēšanas uzdevumiem pareizi. Visaugstākais pareizo atbilžu skaits bija novērojams meklēšanas uzdevumos, kad uz ekrāna parādītās informācijas apjoms bija mazs un mērķa elements atšķīrās no citiem stimuliem ar 25 % platāku līniju. Savukārt kļūdas tika pieļautas salīdzinoši biežāk, kad mērķa elementu bija grūtāk izšķirt uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna (15 % atšķirība līnijas platumā starp mērķa elementu un distraktoriem).

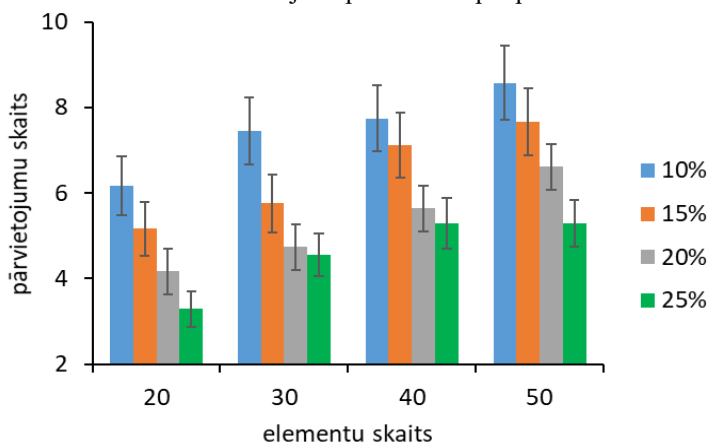
Atšķirības pareizo atbilžu skaitos tika analizētas salīdzinot datus pa pāriem atsevišķi katram no mainīgiem, izmantojot neparametriskās savstarpēji atkarīgo izlašu salīdzināšanas metodes. Pielietojot Vilksoksona rangu zīmju testu, tika norādīts, ka mērķa-distraktora līdzība būtiski ietekmēja pareizo atbilžu skaitu ($p < 0,001$), bet ne elementu skaits uz ekrāna ($p = 0,33$). Turklāt, statistiski nozīmīgas atšķirības nebija novērojamas salīdzinot pareizo atbilžu skaitu dažādās dalībnieku grupās izmantojot Vilksoksona rangu summas testu ($p = 1,00$). Vidējais meklēšanas sniegums variēja tikai atkarībā no tā, cik lielā mērā atšķīrās mērķa elements no visiem pārējiem.

Lai novērtētu mērķa-distraktora līdzības, elementu skaita un dalībnieku grupas ietekmi uz meklēšanas laiku, tika izmantota trīs faktoru dispersijas analīze (ANOVA). Statistiskā analīze uzrādīja, ka gan mērķa-distraktora līdzība [$F(1,44) = 48,12$, $p < 0,001$], gan elementu skaits [$F(1,44) = 36,40$, $p < 0,001$] būtiski ietekmēja gūtos rezultātus. Meklēšanas laiks ievērojami atšķīrās arī dažādās dalībnieku grupās [$F(2,44) = 4,00$, $p = 0,025$].

Ar t-testu palīdzību tika precizēts, ka studenti patērēja ievērojami ilgāku laiku meklējot informāciju ekrāna attēlos salīdzinot ar rezidenti ($p = 0,04$) un radiologi ($p = 0,002$). Savukārt radiologi un rezidenti meklēšanas laiks bija līdzīgs ($p = 0,86$). Vislielākās atšķirības bija novērojamas pie augstas mērķa-distraktora līdzības. Vidēji, radiologi patērēja 13 ± 2 s, rezidenti – 16 ± 2 s un studenti – 26 ± 3 s, lai atrastu mērķa elementu, kad uz ekrāna bija attēloti 40 meklējamie elementi. Savukārt, samazinoties telpiski attēlotas informācijas apjomam uz ekrāna un pieaugot mērķa elementa redzamībai, atšķirības meklēšanas laikā nebija tik izteiktas, salīdzinot rezultātus dalībnieku grupās. Piemēram, radiologi un rezidenti atrada mērķa elementu 8 ± 1 s laikā, un studenti – 10 ± 1 s, kad meklēšanas uzdevumos ar 20 elementiem bija zema mērķa-distraktora līdzība.

3.2.3. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģija

Atšķirībā no parasti izmantojamiem divdimensionālu attēlu demonstrēšanas meklēšanas nolūkiem, uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna bija iespējams ne tikai parādīt stimulus dažādās fiziskās vietās dziļumā, bet arī nodrošināt iespēju lietotājiem mainīt telpiskā attēla izskatu, “pārvietojot” attēlu slāņus tuvāk un dziļāk ekrāna plakņu ietvaros. Rezultātā tas atspoguļojās attēlu izskatīšanas stratēģijā, kas šajā pētījumā tiek aprakstīta analizējot attēla slāņu pārvietošanu skaitu un pārvietošanu virziena maiņu skaitu. Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) apliecināts, ka dalībnieki veica līdzīgu pārvietošanu skaitu aplūkojot attēlus priekšējā un mugurējā segmentā [$F(1,19) = 0,04$, $p = 0,85$]. Visi gūtie rezultāti attēlu pārvietošanu skaitiem atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām ir apkopoti 3.4. attēlā.



3.4. att. Vidējais pārvietošanu skaits visiem dalībniekiem atkarībā no atšķirības apļu līnijas platumā uzdevumos ar dažādu elementu skaitu uz ekrāna.

Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) tika noteikts, ka attēlu slāņu pārvietošanu skaits būtiski mainījās gan mērķa-distraktora līdzības iespaidā [$F(2,32) = 11,94$, $p < 0,001$], gan kopējā meklējamo elementu skaita iespaidā [$F(2,38) = 27,58$, $p < 0,001$]. Visbiežāk attēlu slāņi tika pārvietoti plaknēs, kad mērķa elements atšķīrās par 10 % apļu līnijas platumā no pārējiem 49 elementiem uz ekrāna (9 ± 1 reizes). Savukārt atšķirības lielumam pieaugot līdz 25 %, vidējais attēlu slāņu pārvietošanu skaits nepārsniedza 5 ± 1 reizes.

Lai savstarpēji salīdzinātu attēlu slāņu pārvietošanu skaitus, tika izmantota savstarpēji atkarīgu izlašu vidējo vērtību salīdzināšanas metode. *Post hoc* analīzē tika noskaidrots, ka palielinot elementu skaitu par desmit apļiem, tika novērota tendence, ka attēlu slāņi tika pārvietoti biežāk, bet statistiskā nozīmība nebija sasniegta, kad mērķa elementi atšķīrās no distraktoriem ar palielinātu

līnijas platumu par 10 %, 20 % un 25 % ($p > 0,4$). Savukārt, kad atšķirība bija 15 %, attēlu slāņu pārvietojumu skaits būtiski pieauga aplū skaitam palielinoties no 30 līdz 40 elementiem ($p = 0,005$). Tomēr pārvietojumu skaits pie šīs mērķa-distraktora līdzības bija līdzīgs, salīdzinot rezultātus uzdevumos ar 20 un 30 apliem, kā arī 40 un 50 apliem ($p = 1,0$).

Dalībnieki salīdzinoši reti mainīja attēlu slāņu pārvietojumu virzienu (vidēji līdz divām reizēm), meklējot mērķa elementu uz ekrāna. Neskatoties uz to var atzīmēt, ka pārvietojumu virziena maiņu skaits pieauga samazinoties mērķa elementa redzamībai. Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) tika noteikts, ka pārvietojumu virziena maiņu skaits būtiski mainījās gan mērķa-distraktora līdzības iespaidā [$F(3,9) = 16,08, p < 0,001$], gan elementu skaita iespaidā [$F(3,9) = 42,36, p < 0,001$]. *Post hoc* analīzē tika savstarpēji salīdzināti pārvietojumu virziena maiņu skaiti, izmantojot t-testus. Statistiski nozīmīgas atšķirības netika pierādītas salīdzinot virziena maiņu skaitus uzdevumos ar 10 % un 15 % atšķirību ($p > 0,2$), kā arī 20 % un 25 % ($p > 0,4$), bet skaits būtiski pieauga atšķirībai palielinoties no 15 % līdz 20 % ($p < 0,05$).

Izvērtējot radiologu profesionālās meklēšanas ietekmi uz attēlu izskatīšanas stratēģiju, tika noteikts, ka lielākā daļa pētījuma dalībnieku vairāk pārvietoja telpiskā attēla slāņus uz ekrāna līdz ar redzes informācijas apjoma palielināšanos. Trīs faktoru dispersijas analīze (ANOVA) apliecināja, ka elementu skaits būtiski ietekmēja iegūtos rezultātus [$F(1,44) = 40,1, p < 0,001$]. Turklāt pārvietojumu skaitu ievērojami ietekmēja arī mērķa-distraktora līdzība [$F(1,44) = 24,1, p < 0,001$] un dalībnieku grupa [$F(2,44) = 7,2, p = 0,002$].

Post hoc analīzei tika izmantoti t-testi. Analīzē bija apliecināts, ka nav būtisko atšķirību, kad salīdzina pārvietojumu skaitu rezidentiem un studentiem ($p = 1,0$). Savukārt, radiologi lielākoties izskatīja telpiskus attēlus bez to izmaiņām saistībā ar attēlu slāņu pārvietojumu veikšanu, ko nevar apgalvot gan par rezidentiem ($p < 0,001$), gan par studentiem ($p < 0,001$). Turklāt, bija noteikta nozīmīga mijiedarbība starp mērķa-distraktora līdzību un elementu skaitu [$F(1,44) = 4,13, p = 0,048$]. Pieaugot redzes informācijas apjomam uz ekrāna, dalībnieki veica daudz attēlu slāņu pārvietojumu neatkarīgi no tā, vai meklēšanas uzdevumos bija zema mērķa-distraktora līdzība vai augsta mērķa-distraktora līdzība. Piemēram, radiologi vidēji pārvietoja attēla slāņus 5 reizes, kad uz meklēšanas uzdevumā bija 40 elementu. Savukārt, rezidenti vidēji veica 9 pārvietojumus, kad mērķa-distraktora līdzība bija zema, un 11 – tad, kad mērķa-distraktora līdzība bija augsta. Jāpiebilst, ka vidējais pārvietojumu skaits manāmi pieauga līdz ar mērķa-distraktora līdzības paaugstināšanos, kad elementu skaits uzdevumā bija mazs.

Kopumā vidējais pārvietojumu virziena maiņu skaits nepārsniedza divas reizes. Pielietojot Vilkoksona rangū summas testu, bija parādīts, ka būtiskās atšķirības netika pierādītas salīdzinot iegūtos datus rezidentiem un studentiem ($p = 1,0$). Tomēr pārvietojumu virziena maiņu skaits ievērojami atšķīrās rezidentiem un radiologiem ($p < 0,001$), kā arī radiologiem un studentiem

($p < 0,001$). Pielietojot Vilksoksona rangu zīmju testu, tika noskaidrots, ka gan studenti, gan rezidenti biežāk mainīja pārvietojumu virzienu, kad meklēšanas uzdevumos bija demonstrēts lielāks elementu skaits ($p < 0,001$) un pieauga mērķa-distraktora līdzība ($p < 0,001$). Atšķirībā no studentu un rezidentu attēlu izskatīšanas stratēģijas, radiologiem attēlu fizikālās īpašības būtiski neietekmēja pārvietojumu virzienu maiņu skaitu ($p > 0,05$).

Katram pētījuma dalībniekam bija iespēja aplūkot attēla kopainu, vai noņemt un atgriezt kādu daļu no attēla slāņiem veicot attēla slāņu pārvietojumus uz ekrāna plaknēm. Rezultātā atšķīrās noņemtā attēla daļa, kas ir atspoguļots 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Noņemtā attēla daļa visos meklēšanas uzdevumos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna katrai no dalībnieku grupām

noņemtā attēla daļa	radiologi	rezidenti	studenti
bez izmaiņām	52,5%	38,0%	33,0%
attēla mazākā daļa	33,0%	20,5%	25,0%
attēla lielākā daļa	14,5%	41,5%	42,0%

3.2. tabulā redzams, ka vairāk nekā pusē uzdevuma mēģinājumu radiologi izskatīja trīsdimensionāla attēla kopainu bez attēla slāņu pārvietojumu veikšanas uz ekrāna plaknēm. Savukārt rezidenti un studenti pielietoja šo stratēģiju tikai apmēram trešdaļā no visiem gadījumiem. Pretstatā rezidenti un studenti deva priekšroku attēla selektīvai izskatīšanai, vispirms nodzēšot no ekrāna gandrīz visus slāņus un tad pakāpeniski pievienojot slāņi pēc slāņa.

Kohrana-Mantela-Hencala tests bija izmantots, lai noteiktu saistību starp trim lielumiem – noņemtā attēla daļu, dalībnieku grupu un stimulu fizikālajām īpašībām. Statistiskā analīze apliecināja, ka pārvietotā attēla īpatsvars būtiski mainījās atkarībā no elementu skaita meklēšanas uzdevumos gan radiologiem un studentiem ($p < 0,001$), gan rezidentiem ($p < 0,03$). Visi dalībnieki biežāk izvēlējās samazināt redzes informācijas apjomu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, kad meklēšanas uzdevumos bija 40 elementi, salīdzinot ar uzdevumiem, kuros bija 20 elementi.

Post hoc salīdzinājumiem tika analizētas saistības atsevišķi katram no interesējošo mainīgu lielumu pāriem (noņemtā attēla daļa un elementu skaits, kā arī noņemtā attēla daļa un mērķa-distraktora līdzība), izmantojot Hi-kvadrāta testu katrai no dalībnieku grupām. Radiologiem un rezidentiem noņemtā attēla daļa ievērojami neatšķīrās mērķa-distraktora līdzības dēļ ($p = 1,0$ un $p = 0,25$, respektīvi). Tikai studentiem mērķa-distraktora līdzība būtiski ietekmēja šo attēlu izskatīšanas stratēģijas parametru ($p = 0,001$). Pieaugot mērķa-distraktora līdzībai, studenti daudz retāk izskatīja kopainu un biežāk veica pārvietojumus lielākajā trīsdimensionāla attēla daļā.

DISKUSIJA

Lai izveidotu metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, vispirms bija jānosaka skatīšanās nosacījumi, pie kuriem uz ekrāna plaknēm projicētais redzes stimuls tiktu uztverts kā trīsdimensionāls attēls. Turklāt redzes stimula izkārtojuma ietekmes izvērtēšana ļāva spriest par ekrāna fizikāliem parametriem, ko ekrāna izstrādātāji varētu pilnveidot nākotnē.

Attēlojot redzes stimulu uz secīgām ekrāna plaknēm, tika eksperimentāli noskaidrots, ka augstākais meklēšanas sniegums tiek panākts, kad meklējamie elementi tiek parādīti tuvu viens otram horizontālā un vertikālā virzienā, un cilvēks aplūko attēlus tuvajos skatīšanās attālumos, atbalstot pieņēmumu, ka ar doto optiskā elementa arhitektūru relatīvu dziļumu ir viegli noteikt binokulāros redzes apstākļos pat pie ierobežota dziļuma nosacījumu skaita. Tomēr palielinoties elementu lauka ekscentritātei, dziļuma pazīmes meklēšanas sniegums samazinājās, kas var būt skaidrojams ar mazāku jutību pret binokulārajām disparitātēm virzienā uz tīkles perifēriju (*Howard & Rogers, 2012*). Praktiski tas nozīmē, ka redzes stimula daļas jāprojicē tuvu x un y asīs uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, lai to relatīvais dziļums tiktu precīzi uztverts balstoties uz binokulārajiem dziļuma nosacījumiem. Lai sekmētu dziļuma sajūtu, attēlus var papildināt ar citiem saskaņotiem dziļuma nosacījumiem (*Cutting & Vishton, 1995; Bolshakov & Sgibnev, 2018*).

Kopumā pētījumā gūtās atziņas ļauj spriest par lietotāju spējām uztvert trīsdimensionālu attēlu un to saistību ar optiskā elementa arhitektūru. Proti, esošā modeļa ekrānā plaknes ir novietotas ar vienādu savstarpējo attālumu. Rezultātā binokulārā disparitāte strauji samazinās pieaugot attālumam no lietotāja līdz ekrāna plaknēm (*Howard & Rogers, 2012*), potenciāli sekmējot telpiskās uztveres anizotropijas ietekmi uz dziļuma uztveri (*Matsushima et al., 2014*). Plānojot citu plakņu novietojumu nākamās paaudzes ekrānos, lai tas būtu uztveres diktēts (*perception-driven*), ir jāņem vērā, ka binokulārajai disparitātei ir būtiska loma telpisko attēlu uztverē tuvajos skatīšanās attālumos. Pārkarotojot plakņu novietojumu tā, lai savstarpējais attālums būtu pakārtots vienādai attēlu disparitātei uz secīgām plaknēm, ir iespējams gan saglabāt šobrīd esošo optiskā elementa biezumu un plakņu skaitu, gan sasniegt augstu snieguma kvalitāti relatīvā dziļuma izšķiršanā uz ekrāna noteiktajā skatīšanās attālumā.

Gūtās atziņas par redzes stimula izkārtojuma ietekmi uz sniegumu tika izmantotas vizuālās efektivitātes metodes izveidošanā. Nākamais posms ietvēra attēla fizikālo parametru noteikšanu, pie kuriem tika novērotas nozīmīgas atšķirības vizuālajā meklēšanā. Redzes stimulā meklējamie elementi tika projicēti uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna tā, lai lietotājam ar netraucētām redzes funkcijām nebūtu problēmu izprast to savstarpējo izvietojumu optiskā elementa dziļumā. Līdzīgi kā citos pētījumos (*Scialfa et al., 1998; Hooge & Erkelens, 1999; Wienrich et al., 2009; De Vries et al., 2017*) un saskaņā ar

virzītās meklēšanas modeli (Wolfe, 2007), mūsu pētījumā mērķa-distraktora līdzības lieluma variēšana ļāva noskaidrot, pie kuriem elementu atšķirības lielumiem būtiski mainās sniegums. Tas bija nepieciešams, lai turpmāk atlasītu fizikālos parametrus metodes izveidošanai, un tā iekļautu salīdzinoši vieglākos un grūtākos meklēšanas uzdevumos. Pie vislielākās atšķirības aplū līnijas platumā, pareizo atbilžu skaits bija augsts, kas ļauj apgalvot, ka uzdevums bija salīdzinoši viegli izpildāms. Tomēr palielinoties mērķa-distraktora līdzībai biežāk tika sniegtas nepareizas atbildes neskatoties uz to, ka uzdevuma izpildīšanas laiks nebija ierobežots, kas varētu nozīmēt, ka arī aplūkojot elementus ar centrālo redzi, mērķa elementu bija grūti izšķirt. Centrālās redzes sniegums cieši korelē ar uzdevuma izpildīšanas pareizību (Hughes et al., 2016), savukārt informācijas apstrādei redzes lauka perifērijā ir būtiskā loma uzmanības virzīšanā, acu kustību kontrolē un uzdevuma izpildīšanas laikā (Hooge & Erkelens, 1999; Hughes et al., 2016).

Turklāt pareizo atbilžu īpatsvars mainījās līdz ar informācijas apjoma pieaugumu, kas varētu būt saistīts ar to, ka palielinoties elementu skaitam meklēšanas uzdevumā, pieaug tā saucamā lēmuma nenoteiktība (Eckstein et al., 2000; Huang & Pashler, 2004), kuru ietekmē arī mērķa-distraktora līdzības lielums (Palmer et al., 2000). Informācijas apjoma ietekmi uz lēmuma pieņemšanas pareizību, sevišķi pie augstas mērķa-distraktora līdzības, ir svarīgi ņemt vērā, jo volumetriskie attēli nodrošina lietotāju ar lielāku informācijas apjomu salīdzinot ar divdimensionāliem attēliem. No vienas puses, telpiskā informācijas attēlošana uz ekrāna ļauj ieraudzīt objekta kopainu ar saskaņotiem dziļuma nosacījumiem atšķirībā no daudzslāņu attēlu aplūkošanas uz plakano ekrānu monitoriem. No citas puses, palielinās informācijas apjoms uz ekrāna, un tas var negatīvi ietekmēt meklēšanas sniegumu lēmumu nenoteiktības dēļ. Tas norāda uz nepieciešamību izstrādāt pārdomātu attēlu navigācijas sistēmu, kas nodrošinātu lietotājus gan ar attēlotā objekta kopskatu, gan ar selektīvu objekta daļu izskatīšanu nepieciešamības gadījumā.

Kopumā pētījumā gūtie rezultāti liecina, ka palielinoties mērķa-distraktora līdzībai attēlos uz ekrāna un redzes informācijas apjomam, pieaug nepieciešamība izskatīt informāciju selektīvi. Zinātniskajā literatūrā jau iepriekš tika demonstrēts, ka uzmanības pievēršanu un meklēšanas sniegumu ietekmē attēlu fizikālās īpašības. Informācijas apstrādes procesi atspoguļojas meklēšanas laika izmaiņās (Treisman & Gelade, 1980; Wolfe, 2007) un veidos, kā divdimensionāli attēli (Hooge & Erkelens, 1999; Wienrich et al., 2009; De Vries et al., 2017) un statiski trīsdimensionāli attēli tiek aplūkoti (Pomplun et al., 2013). Mūsu pētījuma rezultāti papildina, ka mērķa redzamības ietekme atspoguļojas arī attēlu izskatīšanas stratēģijā z-virzienā jeb dziļumā, kad cilvēkiem ir pieejama trīsdimensionālu attēlu navigācija. Palielinoties mērķa-distraktora līdzībai uzdevumos, lielākoties dalībnieki biežāk izvēlējās noņemt kādu daļu no projicētā attēla, tādējādi samazinot telpiski attēlotās informācijas daudzumu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Izstrādājot metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai ir būtiski ņemt vērā, ka papildu attēlu fizikālajām īpašībām arī profesionālās meklēšanas pieredze var ietekmēt rezultātus. Tādēļ pēc nozīmīgu fizikālo parametru atlases, izveidotā metode bija aprobēta radiologiem, kuri tiek uzskatīti par profesionāliem meklētājiem darba specifikas dēļ (Wolfe et al., 2016). Parādot trīsdimensionālus attēlus bez medicīniskiem attēliem raksturīgas semantiskās nozīmes, mēs varējām kontrolēt augšupejošo procesu ietekmi (Jameson, 2012; Carrigan et al., 2019), nodrošinot, ka meklējamus elementus varēja atpazīt visi pētījuma dalībnieki (Clark, 2014; Kelly et al., 2018).

Radiologiem, rezidentiem un medicīnas studentiem pareizi izpildītu meklēšanas uzdevumu skaits bija līdzīgs. Uzdevuma izpildīšanas pareizība neatšķīrās arī agrākajos darbos, kuros izmantoja nemedicīniskus meklējamus elementus (Nodine & Krupinski, 1998; Kelly et al., 2018). Tādējādi mūsu pētījums atbalsta iepriekš nodefinētu pieņēmumu, ka atšķirības meklēšanas pareizībā atkarībā no radiologu meklēšanas pieredzes ir raksturīgas tikai specifiskiem uzdevumiem. Gūtie rezultāti paplašina eksperimentālo pierādījumu klāstu, atspoguļojot, ka dotais pieņēmums attiecas arī uz trīsdimensionālu attēlu izskatīšanu, neskatoties uz radiologu potenciāli pārākām spējām uzmanības un darba atmiņas aktivizēšanā aplūkojot trīsdimensionālus attēlus (Haller & Radue, 2005; Sunday et al., 2017).

Tomēr attēlu izskatīšanas stratēģijas analīze uzrādīja nozīmīgas atšķirības radiologiem, rezidentiem un studentiem. Konkrēti, radiologi pārsvarā skatījās kopējo ainu attēliem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Savukārt rezidenti un studenti lielākoties selektīvi izskatīja attēla slāņus. No visiem dalībniekiem, tikai radiologi pārliecinoši demonstrēja stratēģiju, kuru būtiski neietekmēja mērķa-distraktora līdzība. Šī atradne ir saskaņā ar cita pētījuma rezultātiem (Diaz et al., 2015), kurā radiologi uzrādīja organizētāku meklēšanas stratēģiju salīdzinot ar citiem cilvēkiem, izskatot daudzslāņu attēlus. Izteikta lejupejošo kognitīvo procesu kontrole un šī stratēģija varētu būt saskaņā ar pieredzējušo radiologu spēju ātrāk analizēt redzes informāciju globālās uztveres laikā (Sheridan & Reingold, 2017).

Trīsdimensionālā informācijas vizualizācija potenciāli varētu kļūst par vērtīgu palīgriku daudzslāņu attēlu izskatīšanā nākotnē (Andriole et al., 2011; Nguyen et al., 2018). Līdzīgi, ka kādreiz norisinājās pāreja no parasto attēlu izskatīšanas uz daudzslāņu attēlu pielietojumu medicīnā, arī pāreja uz īsto volumetrisko attēlu pielietojumu paredz nepieciešamību uzlabot vizualizācijas iekārtas, izstrādāt viegli izmantojamo attēlu navigācijas sistēmu un apmācīt izmantot priekšrocības, ko sniedz jaunas tehnoloģijas (Andriole et al., 2011). Katrā no šiem posmiem ir būtiski apzināties, kāda veida iespējas un ierobežojumi pastāv cilvēka redzes sistēmā, un kā vizualizācijas tehnoloģijas dizains var uzlabot darba ergonomiku. Pētījumā izstrādātā metode kalpo šim nolūkam ļaujot izvērtēt izmaiņas sniegunā un attēlu izskatīšanas stratēģijā atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām, kas ir saistītas ar ekrānu tehniskiem parametriem.

NOBEIGUMS

Promocijas darbā aprakstīti vizuālās efektivitātes novērtēšanas metodes izstrādes posmi – trīsdimensionālu attēlu uztveres izpēte atkarībā no redzes stimula izkārtojuma volumetriskā daudzplakņu ekrāna optiskā elementa matricā, attēla fizikālo parametru ietekmes noteikšana vizuālās meklēšanas un attēlu izskatīšanas stratēģijas novērtējumam, un metodes aprobēšana lietotājiem ar profesionālās meklēšanas pieredzi. Ņemot vērā to, ka pieprasījums pēc kvalitatīvas trīsdimensionālās vizualizācijas ir liels un augošs, kā arī jauni ekrāni tiek nemītīgi pilnveidoti, pētījumā izstrādāta metode būs noderīga inovatīvu tehnoloģiju izvērtēšanā arī nākotnē.

Vērtējot jauna ekrāna ergonomiskumu jāatceras, ka lietotāja pieredze ir atkarīga gan no ekrāna tehniskiem parametriem, gan no redzes uztveres specifikas. Turklāt atšķirībā no parasti izmantojamiem plakano ekrānu monitoriem, trīsdimensionālās vizualizācijas ekrāniem ir būtiski izvērtēt tā spēju kvalitatīvi atveidot attēlu dziļumu neizraisot redzes diskomfortu. Pētījumā gūtie rezultāti norādīja, ka samazinoties meklējamās informācijas redzamībai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, cilvēki izvēlās izskatīt telpiski attēlotu daudzslāņu informāciju selektīvi, dažādā mērā samazinot informācijas apjomu uz ekrāna atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām. Tomēr arī iespēja aplūkot kopainu ir būtiska un aktuāla, kad informāciju ir viegli atrast. Tas kopumā parāda, ka attēlu izskatīšanas stratēģija ir atkarīga no meklēšanas uzdevuma grūtības, ko ir svarīgi ņemt vērā attēlu navigācijas sistēmas projektēšanā. Turklāt lietotāju profesionālās meklēšanas pieredze var izpausties noteiktā attēlu izskatīšanas stratēģijas pielietojumā, kura padziļināti jāpēta turpmāk arī attēliem ar semantisko nozīmi uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, lai palīdzētu jauniešiem speciālistiem apgūt trīsdimensionālās vizualizācijas izmantošanas priekšrocības profesionālos nolūkos. Nākotnē pētījumā izveidotā metode var tikt pielāgota jaunām vajadzībām un tehniskajām iespējām.

Pateicoties daudzplakņu arhitektūrai ekrāns atveido telpisku attēlu, imitējot dabiskos redzes apstākļus. Tas paver iespēju aplūkot trīsdimensionālus attēlus ilgu laiku, kas ir tik svarīgi profesionālajās jomās. Tomēr diskrēto plakņu izmantošanai jābūt pārdomātai, lai sekmētu dziļuma uztveri. Pētījumā gūtie rezultāti norādīja, ka volumetriskā daudzplakņu ekrāna attēlu var uztvert kā trīsdimensionālu attēlu arī pie ierobežota dziļuma nosacījuma skaita tuvajos skatīšanās attālumos. Papildu citu saskaņotu dziļuma nosacījumu izmantošanai volumetriskos attēlos, nelineārs un pielāgojams plakņu izvietojums varētu sekmēt lietotāju pieredzi tuvajos skatīšanās attālumos. Jāņem vērā, ka pētījumā darba spējas tika izvērtētas cilvēkiem ar labu redzes asumu un netraucētu binokulāro redzi, līdz ar ko nākotnē būtu vērtīgi noteikt, kādas priekšrocības digitālo telpisku attēlu uztverē sniedz informācijas atveide daudzplakņu sistēmā lietotājiem ar samazinātajām redzes funkcijām.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

Aizenman, A., Thompson, M., Ehinger, K., Wolfe, J. M. (2015). Visual search through a 3D volume: Studying novices in order to help radiologists. *Journal of Vision*, 15(2), Article No. 1107

Andriole, P. K., Wolfe, J. M., Khorasani, R., Treves, S. T., Getty, J. D., Jacobson, F. L., Steigner, M. L., Pan, J. J., Sitek, A., Seltzer, S. E. (2011). Optimizing analysis, visualization, and navigation of large image data sets: One 5000-section CT scan can ruin your whole day. *Radiology*, 259, 346-362

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), Article No. 012060

Carriagan, A. J., Curby, K. M., Moerel, D., Rich, A. N. (2019). Exploring the effect of context and expertise on attention: Is attention shifted by information in medical images? *Attention, Perception & Psychophysics*, 81, 1283-1296

Clark, K. (2014). Variation in visual search abilities and performance. Ph.D. Thesis, Duke University, Durham, NC, USA

Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout: The integration, relative dominance, and contextual use of different information about depth. In: W. Epstein & S. Rogers (Eds.), *Handbook of Perception and Cognition: Vol. 5. Perception of Space and Motion*. New York: Academic Press

De Vries, J. P., Van der Stigchel, S., Hooge, I. T. C. (2017). The lifetime of salience extends beyond the initial saccade. *Perception*, 47(2), 125-142

Diaz, I., Schmidt, S., Verdun, F. R., Bochud, F. O. (2015). Eye-tracking of nodule detection in lung CT volumetric data. *Medical Physics*, 42, 2925-2932

Eckstein, M. P., Thomas, J. P., Palmer, J., & Shimozaki, S. S. (2000). A signal detection model predicts the effects of set size on visual search accuracy for feature, conjunction, triple conjunction, and disjunction displays. *Perception & Psychophysics*, 62, 425-445

Enns, J. T., & Kingstone, A. (1995). Access to global and local properties in visual search for compound stimuli. *Psychological Science*, 6(5), 283-291

Faber, L. G., Maurits, N. M., Lorist, M. M. (2012). Mental fatigue affects visual attention. *PloS ONE*, 7, 1-10

Gamble, K. R., Cassenti, D. N., Buchler, N. (2018). Effects of information accuracy and volume on decision making. *Military Psychology*, 30, 311-320

Geng, J. (2013). Three-dimensional display technologies. *Advances in Optics and Photonics*, 5(4), 456-535

Grossman, T., & Balakrishnan, R. (2006). An evaluation of depth perception on volumetric displays. *AVI '06: Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 193-200

Haller, S., & Radue, R. W. (2005). What is different about a radiologist's brain? *Radiology*, 236, 983-989

Hoffmann, C. M., Pizlo, Z., Popescu, V., Rosen, P. (2006). Study of the perception of 3D spatial relations for a volumetric display. *Journal of Electronic Imaging*, 15(3), Article No. 033002

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), Article No. 33

Hooge, I. T. C., & Erkelens, C. J. (1999). Peripheral vision and oculomotor control during visual search. *Vision Research*, 39, 1567-1575

Howard, I. P., & Rogers, B. I. (2012). *Perceiving in Depth*, Vol. 2: Stereoscopic Vision. Oxford University Press

Huang, L., & Pashler, H. (2004). Attention capacity and task difficulty in visual search. *Cognition*, 94, 101-111

Hughes, A. E., Southwell, R. V., Gilchrist, I. D., Tolhurst, D. J. (2016). Quantifying peripheral and foveal perceived differences in natural image patches to predict visual search performance. *Journal of Vision*, 16(10), Article No. 18

Jameson, A. (2012). Visual displays. In: J. A. Jackie (Ed.), *Human Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*: 3rd ed., CRC Press, 157-192

Kelly, B. S., Rainford, L. A., McEntee, M., Kavanagh, E. (2018). Influence of radiology experience on the perception of nonmedical images. *Journal of Medical Imaging*, 5, Article No. 031402

Krupinski, E. A., Berhaum, K. S., Caldwell, R. T., Schartz, K. M., Madsen, M. T., Kramer, D. J. (2012). Do long radiology workdays affect nodule detection in dynamic CT interpretation? *Journal of the American College of Radiology*, 9(3), 191-198

Matsushima, E. H., Vaz, A. M., Cazusa, R. A., Filho, N. P. R. (2014). Independence of egocentric and exocentric direction processing in visual space. *Psychology & Neuroscience*, 7(3), 277-284

McSorley, E., & Findlay, J. M. (2001). Visual search in depth. *Vision Research*, 41, 3487-3496

Mizuno, K., Tanaka, M., Yamaguti, K., Kajimoto, O., Kuratsune, H., Watanabe, Y. (2011). Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behavioral and Brain Functions*, 7, Article No. 17

Navon, D. (1977). Forrest before trees: The precedence of global features in visual processing. *Cognitive Psychology*, 9, 353-383

Nguyen, B. J., Khurana, A., Bagley, B., Yen, A., Brown, R. K. J., Stojanovska, J., Cline, M., Goodsitt, M., Obrzut, S. (2018). Evaluation of virtual reality for detection of lung nodules on computed tomography. *Tomography*, 4, 204-208

Nodine, C. F., & Krupinski, E. A. (1998). Perceptual skill, radiology expertise, and visual test performance with NINA and WALDO. *Academic Radiology*, 5(9), 603-612

O'Toole, A. J., & Walker, C. L. (1997). On the preattentive accessibility of stereoscopic disparity: Evidence from visual search. *Perception & Psychophysics*, 59(2), 202-218

Osmanis, K., Valters, G., Zabels, R., Gertners, U., Osmanis, I., Kalnins, L., Kandere, U., Ozols, A. (2018). Advanced multiplanar volumetric 3d display. *Proceedings of SPIE*, 10555, Article No. 1055510

Palmer, J., Verghese, P., Pavel, M. (2000). The psychophysics of visual search. *Journal of Vision*, 40(10-12), 1227-1268

Pomplun, M., Garaas, T. W., Carrasco, M. (2013). The effects of task difficulty on visual search strategy in virtual 3D displays. *Journal of Vision*, 13(3), Article No. 24

Scialfa, C. T., Esau, S. P., Joffe, K. M. (1998). Age, target-distractor similarity, and visual search. *Experimental Aging Research*, 24(4), 337-358

Sheridan, H., Reingold, E. M. (2017). The holistic processing account of visual expertise in medical image perception: A review. *Frontiers in Psychology*, 8, Article No. 1620

Stuijzand, B. G., van der Schaaf, M. F., Kirschner, F. C., Ravesloot, C. J., van der Gijp, A., Vincken, K. L. (2016). Medical students' cognitive load in volumetric image interpretation: insights from human-computer interaction and eye movements. *Computers in Human Behavior*, 62, 394-403

Sunday, M. A., Donnelly, E., Gauthier, I. (2017). Individual differences in perceptual abilities in medical imaging: The Vanderbilt Chest Radiograph Test. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2, Article No. 36

Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97-136

Venjakob, A., Marnitz, T., Mahler, J., Sechelmann, S., & Roetting, M. (2012). Radiologists' eye gaze when reading cranial CT images. *Proceedings of SPIE*, 8318, Article No. 83180B

Wienrich, C., Heße, U. & Müller-Plath, G. (2009). Eye movements and attention in visual feature search with graded target-distractor-similarity. *Journal of Eye Movement Research*, 3(1), Article No. 4

Williams, L. H., & Drew, T. (2019). What do we know about volumetric medical image interpretation?: A review of the basic science and medical image perception literatures. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 4, Article No. 21

Wolfe, J. M. (2007). Guided Search 4.0: Current progress with a model of visual search. In: W. D. Gray (Ed.), *Series on Cognitive Models and Architectures. Integrated Models of Cognitive Systems*. Oxford University Press, 99-119

Wolfe, J. M., Evans, K. K., Drew, T., Aizenman, A., Josephs, E. (2016). How do radiologists use the human search engine? *Radiation Protection Dosimetry*, 169, 24-31