

LATVIJAS UNIVERSITĀTE



TATJANA PLADERE

**VIZUĀLĀS EFEKTIVITĀTES NOVĒRTĒJUMS
UZ VOLUMETRISKĀ DAUDZPLAKŅU EKRĀNA**

PROMOCIJAS DARBS

Doktora grāda iegūšanai fizikas un astronomijas zinātnes nozarē

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 atsauces 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, trīsdimensionāls attēls, radiologi

ABSTRACT

Doctoral thesis is written in Latvian language on 97 pages. The thesis contains 16 illustrations, 7 tables and 138 references. In the study, the method has been developed to assess visual effectiveness on a volumetric multi-plane display, determining the effect of target conspicuity on visual search and three-dimensional image viewing strategy.

The study of visual perception of individuals searching information on the volumetric multi-plane display indicates that the requirement to view the three-dimensional image in a selective way increases as the target conspicuity decreases due to physical properties of the image which is reflected in the image viewing strategy. In addition, the image viewing strategy is affected by the professional search experience in radiology. The image depth perception is determined by the target-distractor similarity in the binocular disparity which depends on the functionality of the visual system and the architecture of the volumetric multi-plane display's optical element, which is important to consider in the generation of high-quality three-dimensional images.

Keywords: visual search, image viewing strategy, target conspicuity, target-distractor similarity, relative depth, binocular disparity, three-dimensional image, radiologists

SATURS

1. IEVADS	1
1.1. Tēmas aktualitāte	1
1.2. Darba mērķis un uzdevumi	2
1.3. Autora ieguldījums un darba novitāte.....	3
2. LITERATŪRAS APSKATS	5
2.1. Vizuālās meklēšanas uzdevums kā ekrāna parametru izvērtēšanas rīks.....	5
2.2. Redzes uzmanība un vizuālās meklēšanas process.....	7
2.3. Vizuālo meklēšanu ietekmējošo faktoru izpēte	11
2.4. Telpisko attēlu uztvere.....	14
2.5. Dziļuma pazīmes vizuālā meklēšana	20
2.6. Vizuālā meklēšana kā radiologu ikdienas sastāvdaļa	23
2.7. Daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģija	25
2.8. Trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijas.....	29
3. METODE	33
3.1. Dalībnieki	33
3.2. Iekārta	34
3.3. Pētījuma gaita	35
3.3.1. Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšana	35
3.3.2. Mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšana	40
3.3.3. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģijas noteikšana	45
3.4. Datu analīze	45
4. REZULTĀTI	47
4.1. Trīsdimensionālu attēlu uztvere.....	47
4.2. Mērķa elementa redzamības ietekme uz vizuālo meklēšanu	51
4.3. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģija.....	57
5. DISKUSIJA	62
6. SECINĀJUMI UN KOPSAVILKUMS	76
7. AIZSTĀVAMĀS TĒZES	78
8. NOBEIGUMS	79
9. AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	81
9.1. Ar darbu saistītas publikācijas	81
9.2. Citas autora publikācijas	81

10. DALĪBA KONFERENCĒS	83
10.1. Starptautiskās konferences.....	83
10.2. Vietēja mēroga konferences	84
11. IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	86
12. PATEICĪBA	97

1. IEVADS

1.1. Tēmas aktualitāte

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 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 (*Stuijzfang 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 profesionāļiem 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; *Zhan et al.*, 2020). 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*, 2016; *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 trīsdimensionālos

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.

1.2. Darba mērķis un uzdevumi

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.

1.3. Autora ieguldījums un darba novitāte

Promocijas darbā aprakstītais pētījums ir izstrādāts Latvijas Universitātes Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā. Pētījums tika īstenots sadarbībā ar Latvijas privāto uzņēmumu SIA “*LightSpace Technologies*”, kurā izstrādā un pilnveido volumetriskos daudzplakņu ekrānus.

Darba autore izstrādāja metodoloģiju šajā darbā aprakstītam pētījumam. Vizuālās meklēšanas stimulu demonstrācijai un trīsdimensionālu attēlu navigācijai izmantotās datorprogrammas, to maināmie parametri un darbības principi ir autores izdomāti un aprakstīti, konsultējoties ar darba vadītāju Guntu Krūmiņu, kolēģi Karolu Panki un uzņēmuma pārstāvjiem. Saskaņā ar aprakstītiem algoritmiem, SIA “*LightSpace Technologies*” programmētāji izveidoja datorprogrammas redzes stimulu attēlošanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Pētījuma dalībnieku meklēšanu, datu iegūšanu un apkopošanu ir palīdzējuši veikt Optometrijas un redzes zinātnes nodaļas studenti Vita Konošonoka, Kristaps Kļava, Gunita Jankovska, Viktorija Andriksone un Marina Seļežņova. Radiologu vizuālās meklēšanas un attēlu izskatīšanas stratēģijas novērtējums tika īstenots sadarbībā ar Rīgas Stradiņa universitātes Radioloģijas pulciņa vadītāju Reini Pituru, kas piesaistīja pētījuma dalībniekus no Rīgas slimnīcām, Latvijas universitātēm un Lietuvas universitātēm.

Visu pētījumā aprakstīto rezultātu analīzi un statistisko datu apstrādi veikusi darba autore, konsultējoties ar Latvijas Universitātes Statistisko pētījumu un datu analīzes laboratorijas pētnieci Māru Delesu-Vēliņu. Autore prezentējusi darba rezultātus starptautiskās un vietējas nozīmes zinātniskajās konferencēs ar mutiskiem un stenda referātiem, kā arī piedalījusies kā līdzautore. Autore piedalījusies vairāku zinātnisku publikāciju sagatavošanā kā galvenā autore un līdzautore.

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.

2. LITERATŪRAS APSKATS

2.1. Vizuālās meklēšanas uzdevums kā ekrāna parametru izvērtēšanas rīks

Kognitīvā ergonomika pēta kā tehnoloģijas ietekmē cilvēka kognitīvās spējas, atmiņu, lēmumu pieņemšanu u.c. Atbilstoši pētījumi ļauj labāk izprast, kā cilvēks mijiedarbojas ar tehnoloģijām, kā reaģē uz dažādiem ekrānu fizikāliem parametriem. Pētījumos iegūtie rezultāti sniedz priekšstatu par to, kā pareizi izmantot vizualizācijas tehnoloģijas, lai paaugstinātu darba efektivitāti, kvalitatīvi piemērotu darba vidi cilvēka psihiskajām un fiziskajām spējām, nepārslogotu redzes sistēmu, un kādi uzlabojumi ir nepieciešami izstrādājot jaunus ekrānus (*Atkins et al.*, 2006; *Andriole et al.*, 2011; *Dams et al.*, 2014; *Devcic et al.*, 2018; *Uppot et al.*, 2019). Tas, vai lietotājs spēs pieņemt un efektīvi izmantot jauno vizualizācijas tehnoloģiju bez diskomforta un darba kvalitātes traucējumiem, ir lielā mērā atkarīgs no ekrāna kvalitātes, kā arī no vizuālās informācijas atveides, cilvēka uztveres, informācijas apstrādes un interpretācijas. Vizuālā efektivitāte raksturo kā informācijas izskats un tajā esošo vizuālo elementu izmantošana ietekmē to, cik viegli lietotājs var atrast, saprast un izmantot informāciju. Rūpīga ekrāna ergonomiskuma izvērtēšana ir pieprasīta, lai novērtētu vizuālo efektivitāti un noteiktu nepieciešamos ekrāna pilnveidojumus.

Ekrānu ergonomiskuma izvērtēšana aizsākusies jau 20. gadsimtā (*Jameson*, 2012). Īstenojot pirmos pētījumus šajā zinātnes jomā, pārsvarā interese bija vērsta uz būtisku faktoru un to ietekmes īpatsvara definēšanu saistībā ar vizuālo efektivitāti. Tas palīdzēja izprast, kādas priekšrocības sniedza izplatītāko ekrānu izmantošana un kādus trūkumus būtu jānovērš nākotnē.

Īstenojot ergonomiskos pētījumus, jāņem vērā, ka rezultātus spēj ietekmēt gan ekrāna fizikālās īpašības, gan redzes uzdevuma īpatnības jeb tā atveide uz ekrāna. Redzes uzdevuma veidam ir izšķiroša nozīme vizuālo tehnoloģiju novērtēšanā, jo pastāv daudzu faktoru mijiedarbība. Ietekmējošie faktori ir sekojošie:

- 1) uzdevuma veids (kas lietotājam jā dara);
- 2) lietotāja īpašības (pieredze, redzes funkciju kvalitāte, motivācija);
- 3) redzes stimulu fizikālie parametri (izmērs, savstarpējais attālums);
- 4) ekrāna īpašības (kontrasts, izšķirtspēja);
- 5) ārējie faktori (apkārtējais apgaismojums un laika ierobežojums).

Lai pētītu darba spējas cilvēkiem veicot redzes uzdevumus uz jaunā ekrāna, tiek plaši izmantoti viegli objektu noteikšanas un atpazīšanas uzdevumi, lasīšanas un atmiņas uzdevumi, kā arī vizuālās meklēšanas uzdevumi (*Jameson*, 2012). Kopumā visus redzes uzdevumus var klasificēt divos veidos:

- 1) ar semantiskās nozīmes saturu, piemēram, lasīšana, vārdu atpazīšana;
- 2) bez semantiskā satura, piemēram, vizuālā meklēšana.

Izmantojot uzdevumus ar semantisko nozīmi var atveidot īstas darbības, ko cilvēks ikdienā dara strādājot pie ekrāna. Tomēr tādiem redzes uzdevumiem ir novērojami būtiskie trūkumi. Piemēram, raiti lasīt tekstu var arī tad, kad daļa no burtiem nav redzama uz ekrāna, vai attēla kvalitāte ir citādi samazināta, jo lasīšana ir automātisks process (Rayner, 2009). Savukārt pieredzējušie radiologi spēj noteikt patoloģisko izmaiņu klātesamību nepievēršot skatu anatomiskās struktūras attēla vietai, kas satur nepieciešamo informāciju (Diaz *et al.*, 2015; Sheridan & Reingold, 2017). Tas nozīmē, ka samazināta ekrāna attēla kvalitāte nebūs atspoguļota rezultējošā sniegunā veicot redzes uzdevumu. Tādēļ tieši meklēšanas veida uzdevumus bez semantiskās nozīmes iesaka izmantot pētījumos, lai raksturotu cilvēka darba spējas saistībā ar jaunā ekrāna 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 klasiskās 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 (Carrasco, 2011).

Tradicionāli vizuālās meklēšanas uzdevumā jānosaka mērķa elementa klātesamība vai klātneesamība citu elementu vidū divu alternatīvu piespiedu izvēles procedūras ietvaros (Wolfe, 1998). Tādējādi meklēšanas uzdevumos izmanto vairāku veidu elementus. Elementi, kuri atšķiras no mērķa elementa ar vienu vai vairākām pazīmēm, tiek saukti par distraktoriem. Lai samazinātu minēšanas varbūtību, meklēšanas uzdevuma dizains tiek pilnveidots – dalībniekam jānorāda mērķa elementa atrašanās vieta redzes ainā, piemēram, izvēloties vienu no četrām atbildēm (Jäkel & Wichmann, 2006; Diaz *et al.*, 2015; Sunday *et al.*, 2017). Vizuālajā meklēšanā distraktori var atšķirties no mērķa elementa pēc dažādiem parametriem. Klasiskajā klasifikācijā (Treisman & Gelade, 1980) izšķir divus galvenos meklēšanas uzdevuma tipus: pazīmes meklēšanu (*feature search*) un pazīmju kopas meklēšanu (*conjunction search*). Pazīmes meklēšanas uzdevumā katrs distraktors atšķiras no mērķa elementa tikai pēc vienas pazīmes. Tā var būt, piemēram, forma, virziens vai lielums. Savukārt, ja tā ir pazīmju kopu meklēšana, tad distraktori atšķiras no mērķa elementa ar vismaz divām pazīmēm.

Ir labi zināms, ka redzes sistēma nespēj efektīvi apstrādāt pilnīgi visu informāciju no apkārtējās vides vienlaikus (Rosenholtz, 2017). Kognitīvajās zinātnēs šis fenomens tiek plaši pētīts un ir konstatēts, ka uzmanība palīdz pasargāt smadzenes no pārslodzes, ļaujot efektīvi izmantot ierobežoto redzes procesa kapacitāti (Wolfe, 2007). Tādēļ spēja pievērst uzmanību

svarīgām lietām un noturēt to, neskatoties uz uzmanības novērsēju jeb distraktoru klātesamību, ietekmē dažādu aktivitāšu un darba efektivitāti kopumā.

2.2. Redzes uzmanība un vizuālās meklēšanas process

Redzes uzmanība tiek definēta kā kognitīvo procesu kopums, kas strādā kā redzes stimulu filtrācijas mehānisms un sekmē informācijas apstrādi no noteiktiem tīklenes apgabaliem, selektīvi iedarbinot redzes sistēmas mehānismus (*Carrasco, 2011*). Eksperimentāli parādīts, ka redzes uzmanība spēj ietekmēt dažādu smadzeņu reģionu neirālo procesu dinamiku un sinhronizāciju, kontrolējot holīnerģiskos mehānismus redzes garozā (*Gu & Liljenström, 2007*). Līdz ar to tika secināts, ka uzmanības procesi spēj daļēji kontrolēt, vai redzes uztvertie neironu impulsi tiek nodoti tālākai apstrādei vai nomākti. Kopumā uztveres organizācijai un uzmanībai ir izšķiroša nozīme vizuālās informācijas uztverē.

Skaidrojot fokusētās uzmanības darbību, to salīdzina ar izgaismoto vietu (*spotlight*) (*Posner, 1980*), lupu (*Eriksen & Yeh, 1985*) vai Gausa sadalījumu (*Downing & Pinker, 1985*). Visas šīs analogijas apvieno mērķis nodemonstrēt, ka uzmanība var būt pievērsta tikai ierobežotai redzes lauka daļai, ko sauc par redzes uzmanības logu. Informācijas apstrādes efektivitāte ir atkarīga no šī lauka lieluma, norādot uz uzmanības lomu ierobežoto resursu nevienmērīgajā sadalījumā. Kad uzmanība ir pievērsta plašākai redzes lauka daļai, informācijas apstrādes efektivitāte samazinās (*Castiello & Umiltà, 1990*). Uzmanības loga lielums ir atkarīgs gan no redzes stimula fizikālajām īpašībām, gan no cilvēka koncentrēšanās spējām.

Jāatzīmē, ka vizuālā meklēšana ir ne tikai neatņemama ikdienas sastāvdaļa, bet var būt arī ļoti svarīga profesionāļu darbā. Augsta vizuālās meklēšanas efektivitāte ir būtiska tādās profesionālās jomās kā drošība (cilvēku seju atpazīšana, kravu un bagāžas satura analīze) un medicīna (operāciju vizualizācija, radioloģiskā diagnostika). Katrā no šīm jomām ir svarīgi zināt, kā speciālistu uztveres procesus ietekmē attēlu fizikālās īpašības, ekrāna vizualizācijas parametri un iespējas, darbinieku apmācība, un kādas iespējas pastāv cilvēka darbības rezultāta un sniegto pakalpojumu uzlabošanā.

Vizuālā meklēšana ietver dažādus kognitīvos procesus – redzes informācijas uztveri, uzmanības pievēršanu, atmiņas darbību un lēmumu pieņemšanu. Vairākos modeļos apraksta vizuālās meklēšanas procesus, kurus iedala divos pamata veidos – sērijveida un paralēlos (*Egeth, 1966*). Sērijveida meklēšanas laikā uzmanība tiek pievērsta katram elementam atsevišķi, lai atšķirtu, vai tas ir mērķa elements vai distraktors. Savukārt paralēlās meklēšanas laikā visi vai vairāki elementi var tikt uztverti vienlaikus. Dažādos meklēšanas procesu skaidrojošos modeļos atšķiras sērijveida un paralēlo procesu interpretācija un secība.

Pazīmju integrēšanas teorija ir viena no agrīnām, visaptverošajām meklēšanas procesu skaidrojošām teorijām (*Treisman & Gelade, 1980*). Saskaņā ar šo teoriju vizuālajā meklēšanā var izšķirt divus konsekventus posmus ar un bez tiešās uzmanības piesaistīšanas. Sākumā tiešā uzmanība netiek pievērsta, un visas (vai gandrīz visas) redzes informācijas uztvere un apstrāde notiek paralēli. Tas ir īss posms, kad var tikt apstrādāta informācija par redzes stimula pamata īpašībām (piemēram, krāsu vai izmēru), un var ātri atrast stimulu ar atšķirīgu pazīmi. Tādējādi šī procesa rezultātu ietekmē attēla fizikālās īpašības, kuras veido attēla nozīmi (*saliency*), un šī posma kognitīvos procesus sauc par augšupejošiem procesiem (*bottom-up*). Līdz ar to tika piedāvāts, ka vienas pazīmes meklēšanas uzdevumu varēja izpildīt vienlīdz ātri neatkarīgi no stimulu skaita uzdevumā. Šāda veida uzdevums tika uzskatīts par viegli izpildāmu. Savukārt, ja pazīmju, pēc kurām atšķiras mērķa elements un distraktors, ir vairāk, tad būtu nepieciešama tiešās uzmanības pievēršana un sērijveida informācijas apstrāde, iesaistot lejupejošus (*top-down*) kognitīvos procesus, līdz ar ko ievērojami pieaug meklēšanas uzdevuma grūtība. Kā sekas, uzdevuma izpildīšanai patērētais laiks palielinās lineāri atkarībā no kopējā stimulu skaita, un to var raksturot izmantojot lineāru sakarību:

$$RT = slope \times set + intercept, \quad [1]$$

kur *RT* ir reakcijas vai atbildes laiks, *set* ir meklējamo elementu skaits, *slope* ir funkcijas slīpuma koeficients un *intercept* ir taisnes krustpunkts ar *y* asi. Funkcijas slīpuma koeficients parāda, cik lielā mērā pieaug laiks ar katru papildu meklējamo elementu. Savukārt taisnes krustpunkta vērtība demonstrē procesa “fiksētās izmaksas”, saistītas ar meklēšanas īstenošanas specifiku, atbildes sniegšanas veidu un atmiņu (*Wolfe, 2016*).

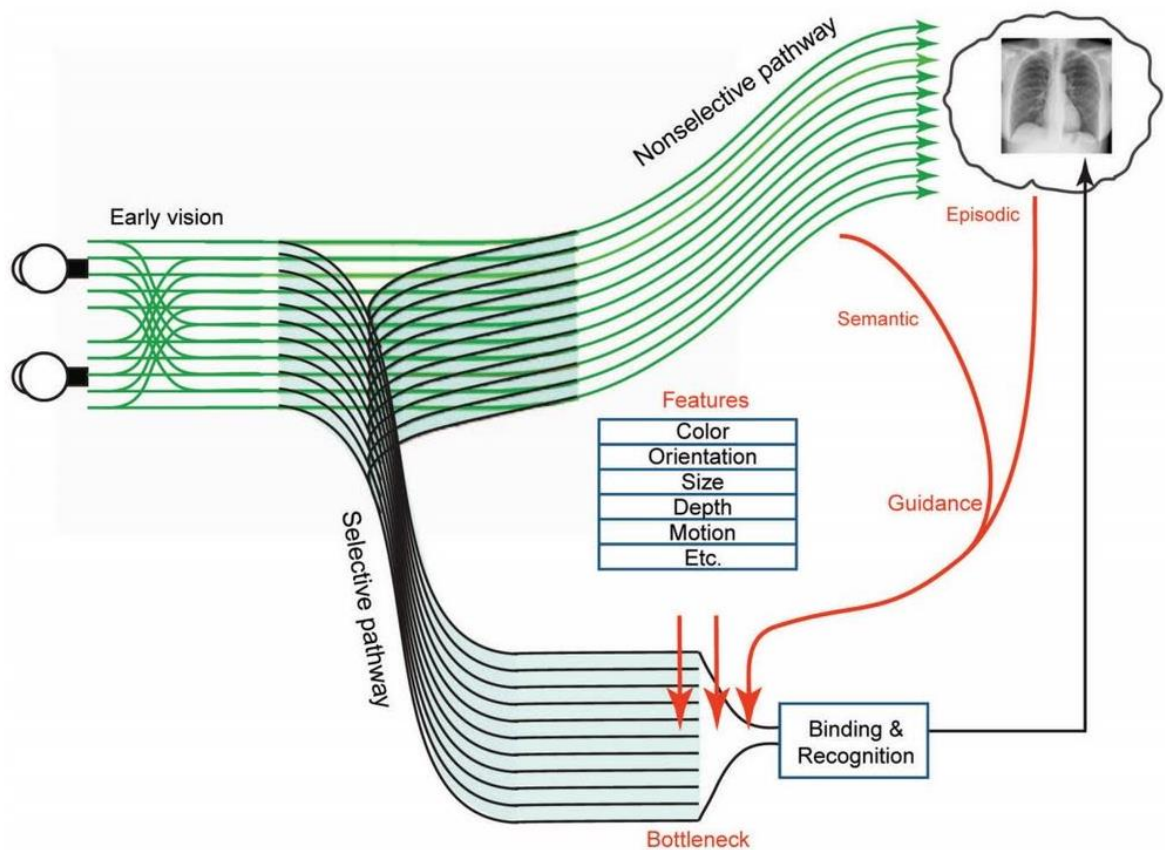
Agrāk tika uzskatīts, ka funkcijas slīpuma koeficients raksturo vizuālo meklēšanu kā sērijveida vai paralēlu (*Treisman & Gelade, 1980*). Tomēr turpmāk tika secināts, ka sadalījums sērijveida un paralēlos kognitīvajos procesos atkarībā no pazīmju skaita, kas atšķir mērķa elementu no visiem pārējiem, ir pārlietu vienkāršots. Piemēram, ir pierādīts, ka, jo mazāk distraktors atšķiras no mērķa elementa, jo grūtāk atrast mērķa elementu un ir nepieciešama tiešās uzmanības iesaistīšana arī pazīmes meklēšanā (*Wolfe, 1998; Wienrich et al., 2009*). Tādā gadījumā (uzdevumā ar augstu mērķa-distraktora līdzību) veiksmīga uzdevuma izpildīšana aizņem vairāk laika, ja elementu skaits tiek palielināts, kas savukārt ir raksturīgs sērijveida apstrādei, neskatoties uz to, ka tikai viena pazīme atšķir mērķa elementu no distraktoriem. Līdzīga atradne ir novērojama uzdevumos ar lielu elementu skaitu un/vai lielu ekrānu uzdevuma demonstrēšanai (*Hulleman & Olivers, 2017*). Tādos gadījumos redzes informācijas apstrādes procesi nevar norisināties vienlaicīgi un efektīvi, jo redzes sistēmas telpiskajai izšķirtspējai ir zināmas robežas (*Rosenholtz, 2017*). Līdz ar to funkcijas slīpuma koeficients

drīzāk palīdz aprakstīt meklēšanas efektivitāti nevis kalpo par kritēriju, vai meklēšanas laikā dominēja sērijveida vai paralēlie kognitīvie procesi (Wolfe, 1998).

Sadalījums sērijveida un paralēlos kognitīvajos procesos nav viennozīmīgs arī tādēļ, ka informācija par vairākām pazīmēm var tikt apstrādāta vienlaikus. Rezultātā arī uzdevumos, kuros mērķa elements atšķiras no distraktoriem pēc vairākām pazīmēm, meklēšanas laiks var būt nemainīgs neskatoties uz elementu skaita pieaugumu (Enns & Kingstone, 1995). Turklāt lejupejošo procesu ietekmē meklēšanas laiks var samazināties pieaugot elementu skaitam pazīmes meklēšanas uzdevumos, rezultējoties negatīvos funkcijas slīpuma koeficientos (Kristjánsson, 2015). Līdz ar to reakcijas laika pieaugums nevar būt cieši saistīts ar kognitīvo procesu iedalījumu sērijveida un paralēlos procesos, kā arī raksturot uzmanības pievēršanu katram elementam vai elementu kopai (Enns & Kingstone, 1995; Kristjánsson, 2015). Kopumā vizuālās meklēšanas procesa izpēte un analīze tiek turpināta, piedāvājot citu skaidrojošo modeli – virzītās meklēšanas modelis (Wolfe et al., 1989; Wolfe, 2007), kurš joprojām ir aktuāls, aktīvi precizēts un papildināts (Wolfe, 2016; Wolfe, 2020).

Saskaņā ar virzītās meklēšanas modeli vizuālās meklēšanas procesā var izšķirt selektīvu un neselektīvu informācijas apstrādi (Wolfe, 2007). Abos ceļos informācijas apstrāde norisinās paralēli. Selektīvajā ceļā izšķir agrīnu paralēlo informācijas apstrādi, balstoties uz kuru norisinās vēlīns objektu izšķiršanas process, lēmuma pieņemšana un atbildes ģenerēšana. Tikai daļa no visas pieejamās informācijas tiek analizēta vēlīnajā procesā. Selektīvu informācijas izvēli nodrošina redzes uzmanība saskaņā ar iegūto virzību (*guidance*). Pastāv divu veidu virzība – augšupejošā un lejupejošā. Augšupejošā virzība ir atkarīga no redzes stimula fizikālajām īpašībām un redzes uztveres, kuras kapacitāte atšķiras dažādās redzes lauka daļās. Ir zināms, ka fizikālās īpašības kā krāsa, spožums un virziens var tikt analizētas vēl pirms tiešās uzmanības pievēršanas. Tādējādi ierobežots fizikālo īpašību skaits var virzīt uzmanību, turklāt to virzības stiprums ir atšķirīgs. Jo vairāk elements atšķiras no blakus esošiem, jo lielāku uzmanību tas piesaista. Virzības lielums ir atkarīgs arī no elementu savstarpējā attāluma. Jāatzīmē, ka virzību ietekmē arī lejupejošie procesi – iepriekšējās zināšanas par mērķa elementa izskatu un atmiņa. Virzība “ierosina” dažādus elementus redzes laukā, un izveidojas tā saucamā aktivizēšanas karte (*activation map*) saskaņā ar virzību summu, kas iegūta augšupejošo un lejupejošo procesu rezultātā. Turpmāk redzes uzmanība būs primāri pievērsta tam elementam, kas ir ieguvis vislielāko virzību.

Atšķirībā no sākotnējā virzītās meklēšanas modeļa (Wolfe et al., 1989), jaunākajā modeļa versijā (Wolfe, 2007) ir iekļauts arī neselektīvais ceļš (skat. 1.1. att.), kas ietekmē uztveri. Paralēli informācijas apstrādei selektīvajā ceļā, norisinās globālā informācijas uztvere un apstrāde par visu redzes ainu un kopējo attēla nozīmi.



1.1. att. Divu ceļu vizuālās informācijas apstrādes modelis. Selektīvajā ceļā (*selective pathway*) informācija tiek analizētas attēla fizikālās īpašības (*features*), šīs informācijas integrēšana (*binding*) un elementu atpazīšana (*recognition*). Procesiem piemīt augsta informācijas izslēgšana (*bottleneck*). Neselektīvajā ceļā (*nonselective pathway*) tiek analizēta informācija par virzību (*guidance*), saistītu ar iepriekšējām zināšanām par elementu izskatu un atrašanās vietu redzes ainā (*semantic*), kā arī ar konkrētas redzes ainas atcerēšanos (*episodic*) (Waite et al., 2019).

Jāatzīmē, ka redzes uzmanības loma ir apspriesta arī redzes uztveri skaidrojošās teorijās. Daudz pētīta redzes uztveres procesu hierarhija, un ir pierādīts, ka aplūkojot attēlu vai redzes ainu, sākumā tiek uztverta kopaina un tikai pēc tam tiek apstrādāta informācija par atsevišķiem elementiem un to detaļām (Navon, 1977; Kimchi, 1992). Tādējādi informācijas apstrādes laikā aina ir drīzāk sadalīta mazākos apgabalos nekā pakāpeniski izveidota no tiem (Navon, 1977), ko raksturo pāreja no globālās jeb holistiskās uztveres uz lokālo. Globālajā redzes uztverē būtiska loma ir informācijas apstrādei visā redzes laukā, ko ierobežo perifērās redzes informācijas uztveres un apstrādes kapacitāte. Savukārt lokālās uztveres laikā pieaug centrālās redzes ieguldījums. Šajā modelī uzmanības hierarhija nav viennozīmīgi definēta (Kimchi, 1992). Tomēr jāpiebilst, ka informācijas analīze nenotiek vispirms globālajā mērogā un tikai tad arī lokālajā mērogā. Tā kā ienākošā redzes informācija bieži mainās, redzes uztvere ir dinamiska, bieži ir pietiekošs laiks tikai daļējai informācijas apstrādei katrā no mērogiem. Globālai redzes uztverei piemīt pirmatnība (Navon, 1977), tomēr tās ilgums un dominance

redzes uztveres procesā ir atkarīgi no attēla fizikālajām īpašībām (Kimchi, 1992; Enns & Kingstone, 1995). Ja vizuālajā meklēšanā dominē globālā uztvere, tiek uzskatīts, ka tā rada lielāku slodzi redzes uzmanībai, salīdzinot ar lokālo meklēšanu (Enns & Kingstone, 1995).

Jaunais virzītās meklēšanas modelis ir zināmā mērā līdzīgs signālu detektēšanas teorijai pie noteiktiem nosacījumiem (Wolfe, 2007) un pieņēmumiem, kas izriet no zema sliekšņa teorijas (Palmer et al., 2000). Signālu detektēšanas teorijas pamatpieņēmums saistībā ar vizuālo meklēšanu ir sekojošs – katrs elements uz displeja izsauc novērotāja atbildi (Eckstein et al., 2000). Novērotāja atbilde mazliet atšķirsies katrā no mēģinājumiem iekšējā trokšņa dēļ. Iekšējā trokšņa avoti ir fluktuācijas neirālā aktivitātē un lēmuma kritēriju mainīgums. Ja distraktori tiek uzskatīti par ārējo troksni, tad mērķa elementa klātesamība ir signāls. Signālam būtu jāizsauc stiprāka atbilde salīdzinot ar distraktoriem, tomēr, ņemot vērā iekšējo troksni, distraktors var izsaukt stiprāku atbildi, salīdzinot ar mērķa elementiem (Eckstein et al., 2000) uzdevumos ar augstu mērķa-distraktora līdzību (Palmer et al., 2000). Palielinoties distraktoru skaitam, kļūst grūtāk atrast mērķa elementu. Ja mērķa-distraktora līdzība ir augsta, tad varbūtība pirmās skata fiksācijas laikā atrast mērķa elementu ir apgriezti proporcionāla kopējam elementu skaitam. Turklāt šajā procesā ir būtiska atmiņas darbība, jo ir nepieciešams atcerēties, kuri elementi redzes ainā jau tika izskatīti. Kad meklēšanas uzdevuma izpildīšanas laiks ir ierobežots un īss, virzītās meklēšanas modelis un signālu detektēšanas teorijas pamati līdzīgi raksturo rezultējošo meklēšanas sniegumu gan pazīmes meklēšanā, gan pazīmju kopas meklēšanā (Eckstein et al., 2000). Tomēr, kad meklēšanas laiks nav ierobežots, teorija drīzāk skaidro meklēšanas rezultātus (Palmer et al., 2000), bet ne meklēšanas procesu un redzes uzmanības piesaistīšanas mehānismu (Wolfe, 2007).

Atšķirībā no pazīmju integrēšanas teorijas (Treisman & Gelade, 1980), virzītās meklēšanas modelis paskaidro, ka vizuālā meklēšana ir nevis paralēls process pirms uzmanības pievēršanas, kam seko sērijveida process ar selektīvas uzmanības pievēršanu, bet ir drīzāk dažādu paralēli notiekošu procesu mijiedarbība. Lejupejošie procesi ietver cilvēka motivāciju, pieredzi un modrību. Kā jebkuru no psihofizikāliem testiem, arī meklēšanas uzdevuma izpildi un iegūtos rezultātus būtiski ietekmē cilvēka motivācija – ārējā un iekšējā (Schneider et al., 2018). Jāpiebilst, ka lejupejošo procesu iesaistīšana un kontrole var samazināties, piemēram, noguruma apstākļos (Faber et al., 2012).

2.3. Vizuālo meklēšanu ietekmējošo faktoru izpēte

Analizējot acu kustības (Anderson et al., 2015) ir pierādīts, ka brīvas izvēles attēla aplūkošanas nosacījumos pirmās acu fiksācijas ir virzītas uz tām attēla vietām, kurām piemīt vislielākā nozīme. Savukārt palielinoties redzes uzdevuma grūtībai mērķa-distraktora līdzības

dēļ, skata fiksācijas var tikt virzītas saskaņā ar attēlu nozīmi arī turpmāk pēc pirmās skata fiksācijas (*De Vries et al.*, 2017). Dotā atradne norāda uz to, ka, ja pirmās skata fiksācijas rezultātā netika atrasts mērķa elements redzes ainā, virzītās meklēšanas modelī aprakstītais process var atkārtoti norisināties no sākuma, lai turpmāk atrastu nepieciešamo informāciju.

Eksperimentāli noteikts, ka perifērajai redzei ir būtiska loma vizuālajā meklēšanā, jo reakcijas laiks uzdevumos ar dažādu mērķa-distraktora līdzību var tikt prognozēts, aprēķinot divdimensionālā attēla fizikālo īpašību statistisko reprezentāciju (*Rosenholtz et al.*, 2014). Tomēr meklēšanas stratēģijas atbilst matemātiski prognozējamiem tikai daļēji. Meklējot informāciju parasti cilvēki veic vairāk skata fiksāciju uz elementiem ainā, nekā tas būtu paredzams ņemot vērā ainas fizikālās īpašības (*Nowakowska et al.*, 2017). Tas varētu būt saistīts gan ar darba atmiņas darbību (*Wolfe*, 2007), gan lēmuma pieņemšanas nenoteiktību (*Huan & Pashler*, 2004). Proti, lai efektīvi meklētu informāciju atkārtoti neizskatot elementus, kuri jau bija izskatīti iepriekš, jāatceras, uz kuriem no elementiem bija vērsts skats, un kāds lēmums tika pieņemts (vai tas noteikti ir distraktors, vai ir šaubas par elementa klasificēšanu). Pieaugot mērķa-distraktora līdzībai (kā sekas arī vizuālās meklēšanas uzdevuma grūtībai) var tikt apstrādāta informācija tikai par vienu no elementiem un vizuālās meklēšanas sniegums ir atkarīgs tikai no mērķa elementa fizikālajām īpašībām. Tomēr vidējas grūtības uzdevumos būtiska loma mērķa elementa izšķiršanas procesos ir arī informācijas apstrādei par mērķa objektam tuvu esošiem distraktoriem (*Hulleman et al.*, 2020).

Carrasco un kolēģu pētījumā (1995) pirmo reizi bija uzsvērts, ka uzmanību skaidrojošās teorijās un eksperimentālā izpētē netika ņemts vērā, vai mērķa stimula atrašanās vieta var ietekmēt meklēšanas efektivitāti. Parasti datu analīzē spriež par vidējo reakcijas laiku un precizitāti neatkarīgi no mērķa elementa atrašanās vietas uz ekrāna. Autoru aizdomas par to, ka mērķa stimula atrašanās vieta uz ekrāna var būtiski ietekmēt meklēšanas rezultātus un to interpretāciju, bija pamatotas ar tīklenes atšķirībām centrālajā un perifērajā redzes laukā. Proti, maksimālais redzes asums ir novērojams tikai mazā centrālā tīklenes daļā, un tas strauji samazinās palielinoties tīklenes ekscentritātei (*Rosenholtz*, 2017). Turklāt, mērķa elementu, kuri atrodas tālu no primārās skata fiksācijas, aplūkošanai noteikti jāveic acu kustības. Tādēļ, tika izpētīts, kā mērķa elementa atrašanās vieta divdimensionālā matricā ietekmē meklēšanas sniegumu divos skatīšanās apstākļos – ar neierobežotu laiku un būtiski ierobežotu laiku (*Carrasco et al.*, 1995). Lai raksturotu mērķa elementa attālumu no skata fiksācijas vietas pirms meklēšanas uzdevuma, tika ieviests speciāls termins – lauka ekscentritāte (*field eccentricity*). Skaidrojot jaunu terminu, pētījuma autori uzsvēra, ka mērķa elementa lauka ekscentritāte ne vienmēr sakrīt ar tīklenes ekscentritāti (*Carrasco et al.*, 1995). Tādēļ, samazinot uzdevuma laiku, tika ierobežota iespēja izdarīt acu kustības, tādējādi bija panākts, ka mērķa elementa lauka

ekscentritāte sakrita ar tīkles ekscentritāti. Savukārt brīvās skatīšanās apstākļos mērķa elementa ekscentritāte varēja gan sakrist, gan nesakrist ar tīkles ekscentritāti. Gan ar acu kustību ierobežojumiem, gan brīvās skatīšanās laikā mērķa elementi, kuri bija tuvāk fiksācijas centram, tika atrasti ātrāk par tiem, kuri bija tālāk no centra. Turklāt arī kļūdu skaits pieauga līdz ar lauka ekscentritātes palielināšanos. Eksperimenta dizainā vislielākā stimulu ekscentritāte sasniedza tikai 3,5° no ekrāna centra, un ekscentritātes efekts varēja būt vēl izteiktāks ārpus šīm redzes lauka robežām.

Redzes stimulu redzamības loma vizuālajā meklēšanā un perifērās redzes ieguldījums vizuālajā meklēšanā tika pētīts arī turpmāk. Mērķa-distraktora līdzību izmaiņas bija veiktas palielinot apļa līnijas platumu (*Hooge & Erkelens, 1999; Becker, 2011*). Pētījumā pierakstīja acu kustības un analizēja to parametrus, kad dalībnieki meklēja apli ar atvērumu (Landolta gredzenu). Eksperimentāli bija noteikts, ka līdz ar mērķa-distraktora līdzības samazinājumu apļa līnijas platumā, ne tikai ievērojami pieaug pareizo atbilžu īpatsvars, bet arī tiek veikts mazāk skata fiksāciju. Pētnieki piedāvāja modeli, lai paskaidrotu vizuālās meklēšanas mehānismu atkarībā no mērķa-distraktora līdzības, modelējot centrālās un perifērās redzes lomu. Saskaņā ar šo modeli centrālajā redzes laukā notika mērķa elementa izšķiršana, savukārt perifērajā redzes laukā norisinājās informācijas apstrāde, lai izvēlētos vietu nākamajai acu kustībai. Piedāvātajā modelī tika aprakstīts redzes lauka sadalījums centrālajā daļā un perifērajā daļā atkarībā no uzdevuma grūtības pakāpes, nevis tas tika saistīts ar tīkles anatomisko uzbūvi un funkcionālajām īpašībām. Šāda veida sadalījums bija drīzāk saistīts ar uzmanības loga lielumu pie dažādām mērķa-distraktora līdzībām.

Arī *Carrasco et al. (1995)* pētījumā diskutēja par uzmanības loga lieluma izmaiņām atkarībā no stimulu fizikālajām īpašībām. Autori skaidroja, ka papildu redzes sistēmas kapacitātes ierobežojumiem uztvert un apstrādāt redzes informāciju visā redzes laukā, viņu darba rezultāti un atradnes ir saskaņā ar vienu no uzmanības modeļiem (*spotlight*), ka informācija var tikt apstrādāta tikai uzmanības loga ietvaros. Saskaņā ar šo teoriju (*Posner, 1980*), uztveres logs nevar tikt sadalīts vairākos mazākos apgabalos, bet var tikt paplašināts, palielinoties elementu skaitam meklēšanas uzdevumā. Tomēr jāņem vērā, ka ierobežoti informācijas uztveres resursi arī tiks pārkārtoti un sadalīti šī loga ietvaros. Kā rezultātā vizuālās meklēšanas sniegums samazināsies. Kopumā tika secināts, ka tīkles uzbūve ierobežo redzes uzmanības potenciālu ietekmēt informācijas apstrādes efektivitāti vizuālās meklēšanas laikā (*Carrasco et al., 1995*).

Šis pieņēmums bija kritiski izvērtēts psihofizikālajā pētījumā (*Wolfe et al., 1998*), nosakot dažādu faktoru ietekmi uz sniegumu vizuālajā meklēšanā, kuru starpā bija arī kortikālais palielinājums un pūļa efekts. Pētījuma dizainā tika pielietots plašāks lauka ekscentritāšu

diapazons – meklējamie elementi varēja atrasties līdz $9,7^\circ$ attālumā no ekrāna centra. Rezultātā reakcijas laiks bija vienāds mazās lauka ekscentritātēs ($2,3^\circ$ un $4,6^\circ$), un tas strauji pieauga turpmāk palielinoties ekscentritātei, kad elementi tika demonstrēti dažādās ekscentritātēs meklēšanas uzdevumā. Novērtējot meklēšanas precizitāti tika noteikts, ka vismazākais kļūdu skaits ir ekscentritātēs, kuras ir mazākās par 5° , un lielākos attālumos meklēšanas precizitāte pakāpeniski samazinājās. Tomēr ekscentritātes efekts vairs nebija novērojams divdimensionālo attēlu izskatīšanā, kad meklējamie elementi atradās vienā attālumā no ekrāna centra (Wolfe et al., 1998). Tādējādi tika parādīts, ka vizuālās meklēšanas snieguma samazinājums līdz ar elementu ekscentritātes pieaugumu nevar būt viennozīmīgi izskaidrojams ar redzes asuma un jutības samazinājumu tīklenes perifērijā (Wolfe et al., 1998). Ātrā un primārā uzmanības vēršana uz redzes stimuliem, kuri ir tuvāk fiksācijas vietai, ir skaidrojama virzītās meklēšanas modelī (Wolfe, 2007). Šajā modelī ekscentritātes efektu var paskaidrot ar to, ka centrālās redzes augstākās izšķirtspējas dēļ, redzes stimulsi, kurš ir tuvāk foveolai, iegūst lielāku aktivizēšanu salīdzinot ar stimuliem redzes lauka perifērijā.

Jāpiebilst, ka meklēšanas sniegums ar vai bez ekscentritātes efekta ir atkarīgs ne tikai no elementu atrašanās vietas, bet arī no mērķa-distraktora līdzības un pazīmes, kas atšķir mērķa elementu no visiem pārējiem (Santhi & Reeves, 2004; Hughes et al., 2016; Wloka et al., 2016). Jo mazāk atšķirīgi stimuli, jo ilgāks ir meklēšanas laiks (Becker, 2011; Hughes et al., 2016; Wloka et al., 2016), kas varētu atspoguļot perifērās redzes informācijas ieguldījumu vizuālajā meklēšanā un uzmanības loga samazinājumu. Turklāt līdz ar mērķa-distraktora līdzības un elementu skaita pieaugumu, palielinās kļūdīšanās varbūtība (Huang & Pahsler, 2004), ko sauc arī par statistisko lēmuma troksni (*statistical decisional noise*). Skata fiksācijas ir ilgākas uz distraktoriem, kad tie ir līdzīgi mērķa elementiem (Becker, 2011). Savukārt snieguma kļūdu pieaugums atspoguļo informācijas apstrādi centrālajā redzes laukā (Hughes et al., 2016). Turklāt ekscentritātes efekta ietekme var mainīties, ja elementu izkārtojums ir heterogēns – attālums starp blakus esošiem elementiem nav vienāds meklēšanas uzdevumā (Santhi & Reeves, 2004).

2.4. Telpisko attēlu uztvere

Dziļuma uztverei ir būtiska nozīme vizuālajā meklēšanā, kad jāatrod objekti telpā vai noteikta veida informācija telpiskajos attēlos. Tā ir svarīga gan mūsu ikdienas dzīvē, gan veicot profesionālos uzdevumus, kas iekļauj kvalitatīvus vai kvantitatīvus spriedumus par attēlu trešo dimensiju. Plaši attīstoties trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijām, kļūst svarīgi skaidri zināt, kā redzes sistēma spēj apstrādāt vizuālo informāciju par ekrāna attēlu dziļumu, un kā tas

ietekmē cilvēka darba spējas. Turpmāk tas palīdz izprast, kādas priekšrocības cilvēkiem sniedz jau izstrādātās tehnoloģijas, un kādi ierobežojumi vēl būtu jāpārvar.

Cilvēks spriež par dziļumu un savstarpējo objektu novietojumu balstoties uz daudzpusēju informāciju, kas nāk no apkārtējās vides. Dziļuma uztvere ir specifiska ar to, ka no visām redzes funkcijām dziļuma sajūta veidojas no vislielākā informācijas daudzuma un daudzveidības (Nagata, 1989). Cilvēka spējas uztvert atšķirības dziļumā variē atkarībā no aplūkojamā objektu atrašanās vietas gan x un y asī, gan z virzienā. Līdz ar to ir skaidri zināms, ka telpiskā uztvere nav homogēna, un uztvertais objektu novietojums bieži nesakrīt ar to fizikālo novietojumu, sevišķi lielākos skatīšanās attālumos. Šo fenomenu sauc par telpiskās uztveres anizotropiju (Matsushima et al., 2014).

Lai raksturotu cilvēka dziļuma uztveres īpatnības atkarībā no skatīšanās attāluma, visu uztveres telpu nosacīti iedala trijās daļās: personīgā (*personal*), darbības (*action*) un redzes (*vista*) telpā (Cutting & Vishton, 1995). Personīgā telpa atbilst skatīšanās attālumiem līdz 1 m. Darbības telpa ir no 1 m līdz 30 m. Savukārt, par redzes telpu sauc attālumus, kuri pārsniedz 30 m. Jāatzīmē, ka katrā no šīm telpām būtiski atšķiras dziļuma uztvere. Samērā precīza dziļuma uztvere ir novērojama aplūkojot objektus personīgajā telpā. Bet skatīšanās attālumos, kuri ir lielāki par 1 m, dziļuma uztveres precizitāte samazinās. Atšķiras arī dziļuma nosacījumu ieguldījums redzes uztverē (Nagata, 1989; Cutting & Vishton, 1995).

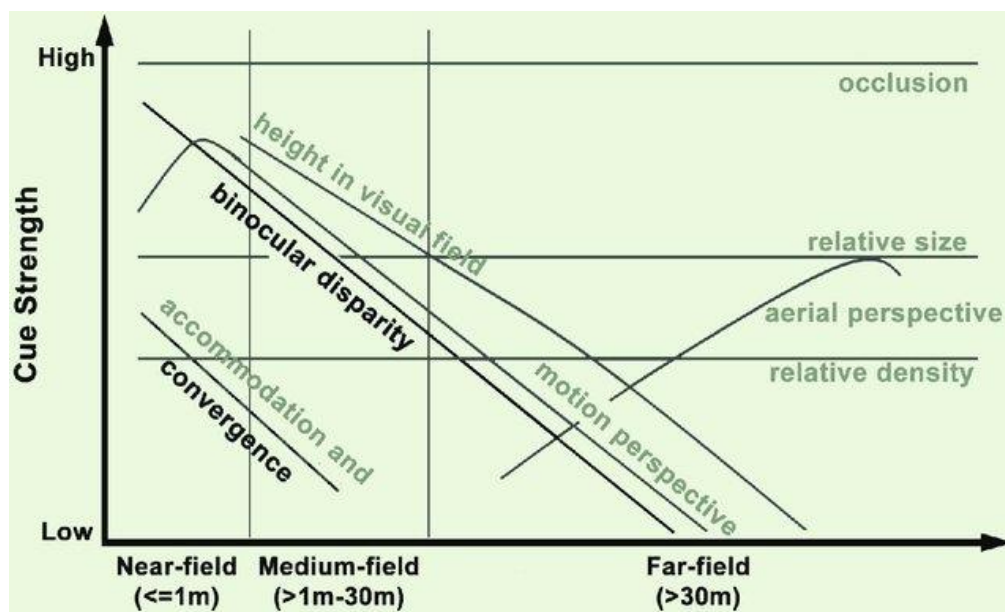
Vizuālu informāciju, pēc kuras mēs spriežam par objektu savstarpējo novietojumu, dziļumu un formu, sauc par dziļuma nosacījumiem. Pastāv dažādi nosacījumi, ar kuru palīdzību tiek nodrošināta dziļuma sajūta. To klasifikācija variē, jo nosacījumi var tikt iedalīti pēc dažādiem principiem. Binokulārie dziļuma nosacījumi (binokulārā tīklenes disparitāte un konverģence) tiek uzskatīti par noteicošiem precīzā dziļuma uztverē, un no tiem vislielāko ieguldījumu dziļuma uztverē sniedz relatīvā binokulārā disparitāte tuvajos skatīšanās attālumos (Cutting & Vishton, 1995; Bolshakov & Sgibnev, 2018). Absolūtā binokulārā disparitāte ir katras acs tīklenes izveidotā attēla leņķiskā atšķirība, kas nodrošina spēju izšķirt, cik tālu līdz novērotāja egocentram atrodas objekts. Pieņemot, ka konverģence ir simetriska un disparitāte ir maza, binokulāro disparitāti maza objekta attēliem aprēķina izmantojot ģeometrisku sakarību:

$$n = \frac{PD \times d}{D^2} \quad [2]$$

kur n – binokulārā disparitāte (radiānos), D – attālums no acīm līdz fiksācijas punktam (m); d – attālums starp objektu un fiksācijas punktu (m), PD – starpzīlīšu attālums (m). Objektu attēlu rezultējošā disparitāte krasi samazinās palielinoties skatīšanās attālumam. Līdz ar to, objektu savstarpējais attālums, kas ir nepieciešams noteiktas disparitātes nodrošināšanai, palielinās pieaugot skatīšanās attālumam no objektiem līdz novērotājam (Howard & Rogers, 2012).

Atšķirība starp objektu absolūtajām disparitātēm ir relatīvā disparitāte, un tā savukārt nodrošina spēju noteikt, kurš objekts atrodas tuvāk vai tālāk (*Howard & Rogers, 2012*). Nosakot relatīvo attālumu starp dažādiem objektiem telpā vispirms tiek uztverta informācija par katru objektu atsevišķi, kas atbilst agrīnam uztveres procesam, un tikai vēlāk šī informācija tiek salīdzināta (*Matsushima et al., 2014*). Taču arī monokulāros redzes apstākļos mēs varam atšķirt, kurš objekts, vai tā daļa, atrodas tuvāk mums, un kurš – tālāk. Tas ir iespējams pateicoties daudziem monokulāriem nosacījumiem. Tie ir akomodācija, izmērs, ēna, aizsegšana, tekstūra, lineārā perspektīva un citi (*Cutting & Vishton, 1995*).

Mainoties skatīšanās attālumam, dziļuma nosacījumu ieguldījums redzes uztverē pieaug, samazinās vai paliek nemainīgs (skat. 1.2. att.). Kad skatīšanās attālums ir mazāks par pieciem metriem, tad binokulārā disparitāte ir viena no dominējošām visu dziļuma nosacījumu vidū. Ar binokulārās disparitātes ieguldījumu skaidro precīzu dziļuma uztveri tuvajos skatīšanās attālumos (*McKee & Taylor, 2010; Howard & Rogers, 2012*). Tomēr līdzīgi akomodācijai un konverģencei, binokulārās disparitātes ieguldījums dziļuma uztverē strauji samazinās, palielinoties skatīšanās attālumam. Savukārt dažu monokulāro nosacījumu nozīmīgums paliek nemainīgs skatīšanās attālumos līdz 100 m (*Cutting & Vishton, 1995*).



1.2. att. Dziļuma nosacījumu stiprums (*cue strength*) atkarībā no skatīšanās attāluma. Binokulārā disparitāte (*binocular disparity*) un konverģence (*convergence*) ir binokulārie dziļuma nosacījumi, savukārt pārējie dziļuma nosacījumi ir monokulāri (*Dey, 2013*).

Tā kā redzes sistēmai ir pieejami daudzi dažādi dziļuma nosacījumi, kuri var būt pretrunā savā starpā, ir svarīgi ņemt vērā, kā tie tiek apvienoti redzes uztverē, un kā to atšķirīgs ieguldījums ietekmē rezultējošo dziļuma uztveri. Visvairāk tiek pētīts, kā telpiskā uztvere

mainās personīgās telpas ietvaros, jo ikdienā apzināti vai neapzināti visbiežāk spriežam par objektu savstarpējo novietojumu tieši tuvajos skatīšanās attālumos.

Vairākos eksperimentālos darbos tika noteikts un salīdzināts akomodācijas un verģences ieguldījums telpiskajā uztverē atkarībā no dažādiem skatīšanās apstākļiem un uzdevumu veidiem (Baird, 1903; Owens & Leibowitz, 1980). Eksperimentāli noteikts, ka monokulāros redzes apstākļos akomodācijas atbilde ir svarīga relatīvā dziļuma uztverē, bet tās ieguldījums būtiski samazinās binokulāros apstākļos (Baird, 1903). Mērot konverģences un akomodācijas atbildi zema apgaismojuma apstākļos (Owens & Leibowitz, 1980), tika noskaidrots, ka konverģences atbildei ir augstāka korelācija ($r = 0,76$) ar uztverto attālumu nekā akomodācijas atbildei ($r = 0,19$). Gan konverģence, gan akomodācija tiek uzskatīti par samērā efektīviem dziļuma nosacījumiem tikai skatīšanās attālumos mazākos par 1 m (Nagata, 1989). Tomēr arī lielākos skatīšanās attālumos akomodācijas ieguldījumu ņem vērā projektējot ekrānus informācijas trīsdimensionālās vizualizācijas nodrošināšanai (Rolland et al., 1999; Akeley et al., 2004).

Precīza konverģences darbība objektu attāluma novērtēšanas laikā personīgajā telpā tika apstiprināta nosakot attāluma uztveri un mērot konverģences reakciju, kad LED lampiņas bija novietotas 20-120 cm attālumā no novērotājiem (Viguer et al., 2001). Vidēji uztvertais attālums pilnībā sakrita ar fizisko attālumu, kad objekti atradās 20, 30 un 40 cm attālumā no dalībnieku acīm. Savukārt turpmāk, palielinoties fiziskajam attālumam, uztvertā attāluma lielums bija mazāks, kā arī bija novērojama lielāka datu izkliede salīdzinot individuālus rezultātus. Turklāt šī atšķirība pieauga līdz ar fiziskā attāluma palielināšanos. Tādējādi tika eksperimentāli parādīts, ka visprecīzākā attāluma noteikšana ir tuvajā redzes telpas daļā, kas aptuveni atbilst rokas garumam (Viguer et al., 2001). Tas bija apliecināts arī izvērtējot dziļuma uztveres precizitāti tuvākā attālumā cilvēkiem ar dažādu garumu rokām (Volcic et al., 2013). Interesanti, ka verģences atbildes precizitāte palika nemainīga skatīšanās attālumos, kuri bija lielāki par 40 cm, tomēr relatīvā attāluma noteikšanas precizitāte samazinājās (Viguer et al., 2001).

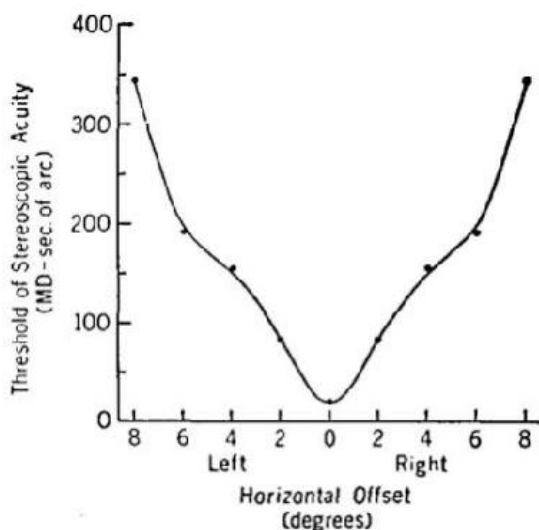
Palielinoties skatīšanās attālumam samazinās binokulāro dziļuma nosacījumu (relatīvas disparitātes un konverģences) ieguldījums, un redzes uztvere ir vairāk atkarīga no monokulāriem dziļuma nosacījumiem, kuru ieguldījums nav tik precīzi interpretējams kvantitatīvajos aspektos salīdzinot ar binokulāro informāciju. Tas paskaidro, kāpēc relatīvā attāluma noteikšanas precizitāte strauji krīt palielinoties skatīšanās attālumam (Foley et al., 2004; Matsushima et al., 2005; Matsushima et al., 2014). Objekti, kas atrodas tālāk, tiek uztverti tuvākā attālumā nekā tie atrodas patiesībā, paliek grūtāk noteikt atšķirības objektu novietojumā. Tādēļ lielākos skatīšanās attālumos telpas uztvere tiek raksturota kā “saplacināta”. Tikko

pamanāmās atšķirības (*just noticeable difference*) dziļumā atkarību no skatīšanās attāluma var aprakstīt izmantojot sekojošu vienādojumu:

$$\log(d_{JND}) = 0,94 \log(D) - 2,25 \quad [3]$$

kur d_{JND} ir tikko pamanāmā atšķirība dziļumā (m) un D ir skatīšanās attālums (m). Pieaugot skatīšanās attālumam, tikko pamanāmā atšķirība dziļumā palielinās eksponenciāli, ja spriedumi par objektu relatīvo dziļumu ir balstīti uz binokulārās disparitātes analīzi (*Cutting & Vishton, 1995; De Silva et al., 2011*).

Relatīvā dziļuma noteikšanas precizitāte, balstoties uz binokulāro disparitāti, variē ne tikai palielinoties skatīšanās attālumam, bet arī atkarībā no stimulu izvietojuma redzes laukā. Raksturojot atšķirības relatīvā dziļuma uztverē redzes laukā, tika eksperimentāli noteikts, kā mainās stereoredzes sliekšnis atkarībā no horizontālā attālumā no skata fiksācijas (*Rawlings & Shipley, 1969*). Nosakot minimālo dziļumu atšķirības lielumu, ko cilvēks spēj izšķirt, tika parādīts, ka jutība pakāpeniski samazinās palielinoties tīklenes ekcentritātei līdz 6° , savukārt lielākajās ekcentritātēs jutības izmaiņas ir daudz straujākas (skat. 1.3. att.). Jāpiebilst, ka stereosliekšņi ir atkarīgi no redzes stimula fizikālajām īpašībām. Stereoredzes asums samazinās palielinoties attālumam starp salīdzināmiem objektiem gan horizontālajā meridiānā (*Enright, 1991*), gan vertikālajā meridiānā (*McKee, 1983*). Tomēr kopumā disparitātes atšķirībām horizontālajā meridiānā ir noteicošā loma dziļuma uztverē salīdzinot ar tām vertikālajā meridiānā.



1.3. att. Vidējie stereoredzes sliekšņi labajā (*right*) un kreisajā (*left*) redzes laukā atkarībā no objektu horizontālās nobīdes (*horizontal offset*) attiecībā pret fiksācijas punktu (*Rawlings & Shipley, 1969*).

Arī jaunākā pētījumā (*Wardle et al., 2012*) turpināja pētīt, kā un kāpēc relatīvā dziļuma izšķiršanas sliekšnis mainās palielinoties tīklenes ekcentritātei. Nosakot stereoredzes asumu

foveolā un trijās tīklenes ekscentritātēs (3° , 6° un 9°) pie dažādiem redzes stimulu disparitātes trokšņu līmeņiem, vidēji sliksnis atšķīrās aptuveni pieckārt vistālāk pārbaudītajā ekscentritātē (9°) un foveolā. Atšķirīgs noteikto izmaiņu apjoms dažādos pētījumos ir skaidrojams ar to, ka tika izmantoti redzes stimuli ar dažādām fizikālajām īpašībām (*Fahle et al.*, 1994). Kopumā samazināta jutība pret disparitātēm redzes lauka perifērijā, salīdzinot ar to centrālajā redzē, ir saistīta gan ar lielākiem receptīviem laukiem, gan ar precizitātes samazinājumu lokālās disparitātes aprēķināšanā agrīnos dziļuma informācijas apstrādes procesos (*Wardle et al.*, 2012).

Nosakot dziļuma uztveres īpatnības ir svarīgi atcerēties, ka dziļumu var novērtēt gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi, kas ietekmē iegūtos rezultātus un atziņas. Lielākoties ikdienā cilvēks nesniedz skaitlisko raksturojumu dziļuma sajūtām un objektu savstarpējam novietojumam. Tā vietā novērtējums ir biežāk kvalitatīvs (objekts atrodas tuvāk vai tālāk) nekā kvantitatīvs (piemēram, objekts ir par 33 cm tuvāk nekā cits), kas ļauj uzskatīt, ka cilvēki spēj labāk spriest par dziļumu raksturojot to kvalitatīvi nekā kvantitatīvi (*Šikl & Šimeček*, 2015). Lai pārbaudītu izvirzīto hipotēzi, pētījums tika veikts dabiskos skatīšanās apstākļos ar objektiem, novietotiem 2-12 m attālumā no novērotājiem, kam bija jānosaka objektu savstarpējais novietojums pēc vairākiem parametriem (*Šikl & Šimeček*, 2015). Snieguma pārbaudei bija izvēlēti trīs dažādi uzdevumi: novērtēt objektu savstarpējā attāluma rangu, salīdzināt objektu relatīvu attālumu līdz atskaites objektam, un noteikt absolūtu attālumu līdz katram no objektiem. Datu analīzes rezultātā tika noskaidrots, ka snieguma precizitāte un pastāvīgums bija visaugstākais, kad novērotājiem bija jāraksturo objektu novietojums kvalitatīvi, salīdzinot ar situācijām, kad tas bija jāraksturo skaitļu izteiksmē.

Kvalitatīvu un kvantitatīvu mērījumu atšķirības bija pētītas arī novērtējot dziļuma uztveri cilvēkiem, kas aplūkoja stereogrammas ar nejauši izvietotiem apliem (*Hibbard et al.*, 2017). Pētījuma autori sprieda, ka, palielinoties attēlu disparitātei, būtu sagaidāma arī dziļuma sajūtas pastiprināšanās. Rezultātā tika apstiprināts, ka līdz noteiktajam līmenim, palielinoties attēlu disparitātes lielumam, pastiprinās arī dziļuma sajūta, tomēr samazinās stimulu relatīvā dziļuma noteikšanas precizitāte.

Dziļuma nosacījumu saskaņotība ir vēl viens svarīgs aspekts uztvertā dziļuma precizitātē un binokulāro acu kustību koordinēšanā, kas bija atspoguļots analizējot binokulārās acu kustības jauniem cilvēkiem, kas skatījās uz īstiem objektiem (LED lampiņām) un to stereoskopiskiem attēliem (*Liversedge et al.*, 2009). Acu kustības būtiski atšķīrās īsto un simulēto telpisku objektu izskatīšanā. Kad dalībnieki skatījās uz LED lampiņām, vergences kustības bija saskaņotas gan fiksāciju, gan skata pārneses laikā, kas norāda uz to, ka dziļuma informācijai redzes lauka parafoveālā un perifērā daļā ir noteicošā loma nākamo acu kustību

plānošanā aplūkojot īstos objektus. Pretstatā stereoskopisko attēlu gadījumā vergences kustības bija atbilstošas stimulu dziļumam tikai fiksāciju laikā. Šī atradne norāda uz to, ka informācija parafoveolā un perifērā redzes laukā netiek efektīvi izmantota binokulārajā acu kustību koordinācijā, kad redzes stimulu dziļums ir simulēts.

Dziļuma nosacījumu nesaskaņotība ietekmē ne tikai acu kustības, bet arī relatīvā dziļuma noteikšanu. Pirmo reizi pārbaudot relatīvā dziļuma novērtēšanas precizitāti ne tikai fiziskiem objektiem, bet arī to stereoskopiskiem attēliem, tika izmantota piespiedu izvēles metode ar diviem alternatīviem atbildes variantiem – uzdevuma pildīšanas laikā cilvēkam bija jānosaka, kurš no piedāvātiem apliem izskatās tuvāk skatītājam (*Naceri et al., 2015*). Iegūto datu izkliede bija daudz mazāka īstajos redzes apstākļos salīdzinot ar simulētiem, norādot uz to, ka dalībniekiem bija daudz grūtāk salīdzināt objektu dziļumu stereoskopiskos attēlos. Īstiem objektiem tikko pamanāmā atšķirība dziļumā ir vairāk kā divas reizes mazāka salīdzinot ar simulētiem telpiskiem objektiem (*Naceri et al., 2015*). Pētījuma autori skaidroja šo atradni ar nesaskaņotiem dziļuma nosacījumiem (akomodāciju un vergenci), kuri ir vienmēr novērojami stereoskopiskiem attēliem. Sniegums cilvēkiem aplūkojot stereoskopiskos attēlus bija trokšņains, līdz ar to tika uzsvērts, ka tā saucamais akomodācijas-vergences konflikts ir šķērslis dziļuma noteikšanā stereoskopiskos attēlos, un tas būtiski samazina sniegumu redzes uzdevumos.

2.5. Dziļuma pazīmes vizuālā meklēšana

Precīza dziļuma informācijas uztvere vizuālajā meklēšanā ir svarīga lēmumu pieņemšanai daudzās profesionālās jomās. Iepriekšējo pētījumu atradnes par vizuālo meklēšanu, kas bija noteiktas cilvēkiem aplūkojot divdimensionālus attēlus, nav pilnā mērā attiecināmas uz vizuālās meklēšanas procesiem izskatot trīsdimensionālus attēlus. Šajos pētījumos trūkst informācijas par to, ka dažādi jauni, ar telpisko informācijas attēlošanu saistītie faktori ietekmē vizuālās meklēšanas sniegumu. Jāatzīmē, ka lielāka daļa no pētījumiem, kuru mērķis bija raksturot vizuālās meklēšanas procesus izskatot informāciju trīsdimensionālā vidē, tika īstenoti izmantojot stereoskopiskos attēlus (*O'Toole & Walker, 1997; McSorley & Findlay, 2001; Finlayson & Grove, 2015, Plewan & Rinkenauer, 2018*).

Downing un *Pinker* pētījums (1985) bija viens no pirmajiem darbiem, kurā bija parādīts, ka redzes uzmanība var tikt atsevišķi pievērsta objektiem ar dažādu atrašanās vietu dziļumā. Autori demonstrēja, ka vizuālās meklēšanas laiks bija ilgāks, kad objekti atradās tālāk no fiksācijas stimula salīdzinot ar tiem, kuri atradās tajā pašā dziļuma plaknē. Tādējādi tika apliecināts, ka vizuālās meklēšanas sniegums ir atkarīgs ne tikai no mērķa elementa atrašanās vietas x un y asī, bet arī z dimensijā jeb dziļumā.

Turpinot pētīt dziļuma pazīmes lomu vizuālajā meklēšanā, tika eksperimentāli pārbaudīts, vai stereoskopiskā disparitāte ir pazīme, kura tiek apstrādāta paralēli, vēl pirms tiešās uzmanības iesaistīšanas (*O'Tooler & Walker, 1997*). Stereogrammās mērķa elements atšķīrās no distraktoriem ar krustoto vai nekrustoto disparitāti, turklāt variēja kopējais stimulu skaits. Rezultātā tika apstiprināts, ka stereoskopiskā disparitāte var tikt apstrādāta pirms tiešās uzmanības iesaistīšanas, bet tas nav attiecināms uz visiem meklēšanas gadījumiem (*O'Tooler & Walker, 1997*). Situācija mainās atkarībā no relatīvās disparitātes lieluma un redzes informācijas apjoma. Šī darba atradnes un secinājumi ir līdzīgi tiem, kuri bija piedāvāti pētot redzes uzmanību un vizuālās meklēšanas procesus stimuliem uz divdimensionāliem ekrāniem (*Wolfe, 1998*). Proti, ir noteiktas redzes stimulu īpašības, kuras var tikt apstrādātas paralēli. Tomēr, samazinoties mērķa-distraktora līdzībai un/vai pieaugot elementu skaitam meklēšanas uzdevumā, samazinās uzmanības logs un sāk dominēt sērijveida informācijas apstrādes procesi.

Mērķa-distraktora līdzības stereoskopiskajā dziļumā un/vai orientācijas virzienā ietekme tika pētīta pierakstot acu kustības vizuālās meklēšanas laikā (*McSorley & Findlay, 2001*). Saskaņā ar pazīmju integrēšanas teoriju (*Treisman & Gelade, 1980*) tika prognozēts, ka vizuālā meklēšana būs ātra un efektīva, kad mērķa elements atšķīrsies no visiem pārējiem tikai ar vienu pazīmi – dziļumu vai orientācijas virzienu, – savukārt vizuālās meklēšanas efektivitāte samazināsies, ja mērķa elements atšķīrsies pēc divām pazīmēm. Acu kustību analīzes rezultātos bija apliecināts, ka abu atsevišķo pazīmju izmantošanas gadījumos pirmās acu kustības pārsvarā bija virzītas uz mērķa elementu, ko nevar apgalvot par gadījumiem, kad mērķa elements atšķīrās no distraktoriem pēc vairākām pazīmēm vienlaikus (*McSorley & Findlay, 2001*).

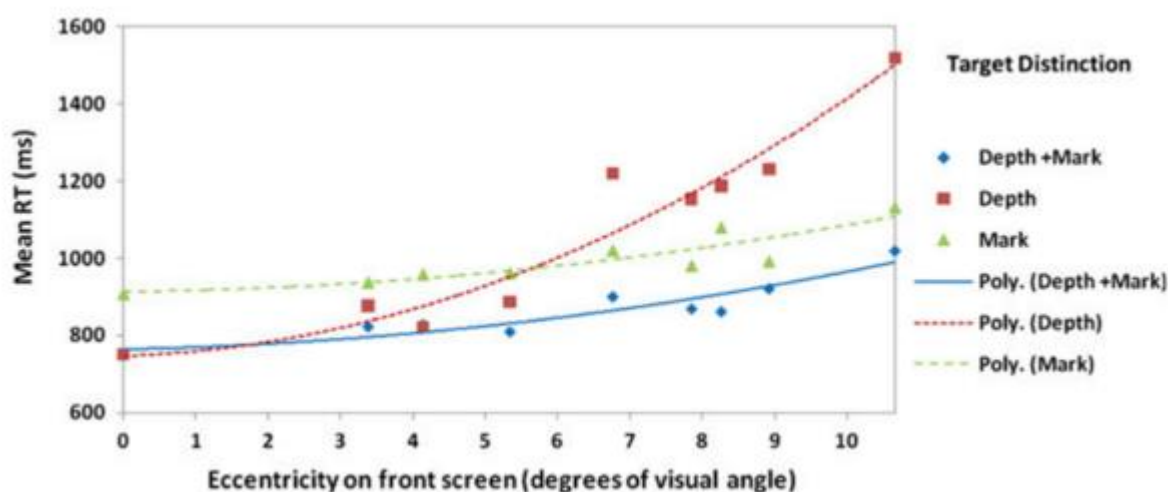
Pārsvarā dziļuma uztveres izvērtēšanas pētījumos tika izmantoti tikai divi dziļuma līmeņi, vienā no kuriem atradās mērķa elements, un citā – distraktori. Turpmāk lielāka dziļuma līmeņu izmantošana ļāva precizēt, kāda loma ir sākotnējās fiksācijas atrašanās vietai trīsdimensionālā vizuālajā meklēšanā. Pētot vizuālās meklēšanas procesus atkarībā no mērķa elementa atrašanās vietas vienā no četrām dziļuma plaknēm tika noteikts, ka redzes uzmanība ir ātrāk pievērsta novērotājam tuvāk esošiem elementiem, tomēr mērķa elementa attālums no fiksācijas dziļumā neietekmē atbildes laiku un sniegumu (*Finlayson & Grove, 2015; Plewan & Rinkenauer, 2018*).

Ātra uzmanības pievēršana skatītājam tuvāk esošiem objektiem bija novērojama vairākos vizuālās meklēšanas pētījumos, nosakot to gan izmantojot simulētus telpiskus attēlus (*O'Toole & Walker, 1997; Plewan & Rinkenauer, 2018; Farel & Ng, 2019*), gan īstos (*Reis et al., 2011*), kopumā pierādot, ka binokulārajai disparitātei ir būtiska loma attēlu nozīmē un augšupejošos procesos vizuālās meklēšanas laikā. Lielāku aktivizēšanu redzes stimulācija var iegūt ne tikai tādēļ, ka tas atrodas tuvāk fiksācijai punktam x un y asī (*Wolfe, 2007*), bet arī atrodoties tuvāk

skatītājam. Tādējādi papildu tam, ka binokulārā disparitāte ir svarīga informācija precīzā dziļuma noteikšanā, tai ir būtisks ieguldījums arī attēla nozīmē.

Turklāt šīs preferences dziļuma uztverē var ietekmēt darba atmiņu, jo skatītājam tuvāk esošie objekti vairāk paliek atmiņā salīdzinot ar tālāk esošiem objektiem (Qiu et al., 2017). Papildu lielākai redzes lauka aktivizēšanai vizuālajā meklēšanā dziļuma komponentes dēļ, cilvēka spēju ātri reaģēt uz tuvāk esošiem objektiem skaidro arī uzvedības neatliekamības hipotēze (Franconeri & Simons, 2003), kurā tiek apgalvots, ka selektīvu uzmanību automātiski piesaista stimuli, kuri norāda uz potenciālu nepieciešamību steidzami rīkoties un pasargāt cilvēku no iespējamajiem draudiem.

Dziļuma efekta un ekscentritātes efekta mijiedarbība ir novērojama meklēšanas uzdevumos ar zemu mērķa-distraktora līdzību (Reis et al., 2011; Pomplun et al., 2013). Proti, meklēšanas laiks ir īss, kad mērķa elements atrodas tuvu ekrāna centram (skat. 1.4. att.), un lielākās lauka ekscentritātēs ($> 5^\circ$) laiks strauji pieaug (Reis et al., 2011; Pomplun et al., 2013). Tomēr, palielinoties mērķa-distraktora līdzībai, redzes stimuluss tiek izskatīts sistemātiskā veidā – virzienā no kreisās puses uz labo un no augšas uz leju, – līdzīgi kā lasīšanā, un izteikts lauka ekscentritātes efekts vairs nav novērojams (Pomplun et al., 2013). Palielinoties mērķa-distraktora līdzībai, samazinās vidējās skata pārnese amplitūdas, pieaug meklēšanas laiks un kļūdu īpatsvars (Pomplun et al., 2013). Kopumā tas nozīmē, ka, palielinoties mērķa-distraktora līdzībai, pieaug nepieciešamība izskatīt un pievērst uzmanību katram elementam atsevišķi, meklējot informāciju gan divdimensionālos attēlos, gan trīsdimensionālos attēlos.



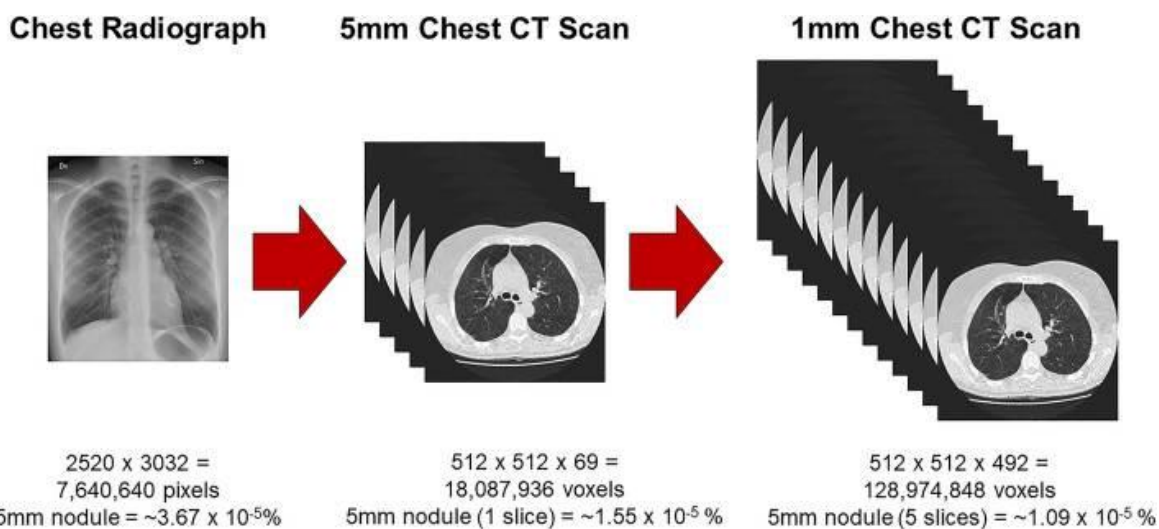
1.4. att. Vidējais reakcijas laiks (*mean reaction time*) meklēšanas uzdevumos atkarībā no mērķa elementa lauka ekscentritātes (*eccentricity*) uz ekrāna ar divām dziļuma plaknēm. Attēlā ir redzams, ka mērķa elementam atšķiroties no distraktoriem ar dziļumu (*depth*), papildu svītriņu (*mark*), vai šo abu pazīmju kopu (*depth + mark*), reakcijas laiks ir īsāks par 1 s, kad mērķa elementa ekscentritāte nepārsniedz 6° , tomēr lielākās ekscentritātēs reakcijas laiks strauji pieaug dziļuma pazīmes meklēšanā (Reis et al., 2011).

2.6. Vizuālā meklēšana kā radiologu ikdienas sastāvdaļa

Radiologi rūpīgi izskata vairākus simptomus medicīniskus attēlus dienā (*Krupinski, 2010*), un liela daļa no viņu profesionāliem uzdevumiem var tikt definēti kā vizuālās meklēšanas uzdevumi (*Wolfe et al., 2016*). Radiologi meklē izmainītas anatomiskās atradnes vadoties pēc dažādām fizikālām īpašībām, tādām kā forma, izmērs, kontrasts un struktūru sienu biezums. Pareiza medicīnisko attēlu izskatīšana un interpretācija ir tieši saistīta ar vizuālās meklēšanas uzdevumu, ko uzrāda radiologi (*Nakashima et al., 2013*).

Neskatoties uz radiologu pieredzi un profesionalitāti, kļūdu īpatsvars paliek samērā augsts (*Krupinski, 2010*). Dažas kļūdas rodas arī uzņemtā attēla kvalitātes dēļ, tomēr tehniskie ierobežojumi neizskaidro visu kļūdu spektru. Zinātniskajā literatūrā situāciju skaidro ar to, ka radiologu atlasīšanā un apmācībā maz uzmanības pievērš radiologu redzes uztveres izprašanai un trenēšanai (*Birchall, 2015*). Proti, radiologs, cik zinošs būtu, nevar diagnosticēt to, ko neieraudzīja attēlā meklēšanas laikā. Tādēļ ir aktuāli radiologu redzes uztveres pētījumi un jauno profesionāļu redzes uztveres treniņu izstrāde, izmantojot nemedicīniskus attēlus (*Krupinski et al., 2020*), kā arī inovatīvu tehnoloģiju attīstība (*Andriole et al., 2011*), kuru ieviešana varētu palīdzēt radiologiem meklēt informāciju un veikt darbu ātri un kvalitatīvi.

Radiologu darba sniegumu spēj ietekmēt vispār zināmi faktori, kuri ietekmē jebkuru meklēšanas procesu. Tomēr radiologiem šis uzdevums var būt sevišķi komplicēts. Daudzos attēlos ir novērojama augsta mērķa-distraktora līdzība, piemēram, asinsvads šķērsgrīzumā izskatās kā plaušu mezgliņš (*Krupinski, 2010*). Radiologiem jānosaka sīkas izmaiņas anatomiskajās struktūrās, piemēram, veidojuma sienas biezuma izmaiņas, no kā ir atkarīga diferenciāldiagnoze (*Cosgrove et al., 2005*). Plaušu mezgliņi var atšķirties savā izmērā – tiem vidēji ir 6 mm diametrs, tomēr var būt arī 1-4 mm lieli mezgliņi (*Nguyen et al., 2018*). Turklāt nereti šis faktors mijiedarbojas ar daļēju mērķa elementa oklūziju, jo anatomiskās struktūras maskē klīniskās atradnes. Piemēram, plaušu mezgliņi var būt daļēji aizklāti vai paslēpti krūškurvja ribu dēļ. No vienas puses, tādā gadījumā noder iespēja apskatīties daudzslāņu attēlus un ieraudzīt anatomisko struktūru no vairākām pusēm dziļumā. Bet no citas puses, palielinoties informācijas apjomam medicīniskos attēlos, var samazināties relatīva attēla daļa, ko aizņem mērķa elements, piemēram, plaušu mezgliņš (skat. 1.5. att.).



1.5. att. Medicīniskā attēla procentuālā daļa, ko izņem 5 mm liels plaušu mezgliņš, plaušu rentgenattēlā (*chest radiograph*), datortomogrāfijas attēlā ar 5 mm biezu šķērsriezumu (*5 mm chest CT scan*) un datortomogrāfijas attēlā ar 1 mm biezu šķērsriezumu (*1 mm chest CT scan*) (*Williams & Drew, 2019*).

Papildu kļūdu iemeslu analīzei, pētījumos pievērs lielu uzmanību tam, kā mainās radiologu darba spējas līdz ar pieredzes paplašināšanos (*Donovan & Litchfield, 2013; Drew et al., 2013; Kelly et al., 2016*) un jaunu tehnoloģiju parādīšanos (*Getty et al., 2008; Douglas et al., 2018; Nguyen et al., 2018*). Līdz ar profesionālās meklēšanas pieredzi, radiologiem mainās vizuālās meklēšanas sniegums un stratēģija. Interesanti, ka būtiskās atšķirības vispirms parādās vizuālās meklēšanas stratēģijā un tikai vēlāk tās ir konstatējamas arī uzdevuma sniegunā radiologiem ar atšķirīgu profesionālu pieredzi izskatot medicīniskus attēlus (*Kelly et al., 2016*). Bieži veicot vizuālās meklēšanas uzdevumus, radiologiem ir novērojamas izmaiņas arī redzes uztveres procesos (*Sowden et al., 2000; Carrigan et al., 2019*).

Lai noteiktu radiologu smadzeņu kapacitāti pret funkcionālo un strukturālo neiroplasticitāti saistībā ar vizuālās meklēšanas pieredzi, tika padziļināti pētīti radiologu un citu cilvēku smadzeņu garozas aktivitāte (*Haller & Radue, 2005*). Vizuālās informācijas apstrādes procesi tika raksturoti medicīnisku un nemedicīnisku attēlu izskatīšanai, izmantojot funkcionālās magnētiskās rezonances izmeklējumu. Analizējot smadzeņu aktivitātes pierakstu, tika demonstrētas būtiskas atšķirības starp radiologu un neradiologu kognitīvajiem procesiem, kad viņi izskatīja ne tikai medicīniskus attēlus, bet arī kontrolattēlus (*Haller & Radue, 2005*). Radiologiem bija novērojama ievērojami augstāka aktivitāte smadzeņu garozas apgabalos, kuri ir saistīti ar telpiskās atmiņas un uzmanības darbību. Rezultātā tika izvirzīta hipotēze, ka radiologu meklēšanas pieredze varēja mainīt redzes informācijas apstrādi kopumā. Tomēr turpmākā uztveres procesu izpēte, izmantojot papildu medicīniskus attēlus (*Maeda et al., 2013; Nakashima et al., 2013*) un ar medicīnu nesaistītus attēlus (*Smoker et al., 1984; Nodine & Krupinski, 1998; Sowden et al., 2000; Moise et al., 2005; Clarke, 2014; Kelly et al., 2018*),

precizēja, ka radiologu pārākas prasmes izpaužas tikai, ja redzes stimuliem ir novērojamas specifiskas fizikālās īpašības, piemēram, zems kontrasts un elementu telpisks izvietojums.

Psihofizikālajā pētījumā, kurā piedalījās pieredzējuši radiologi un radioloģijas studenti, tika noteiktas atšķirības vizuālajā meklēšanā starp abām grupām atkarībā no stimulu fizikālajām īpašībām (*Maeda et al.*, 2013). Medicīniskie attēli tika papildināti ar dažāda kontrasta mērķa elementiem. Salīdzinot ar rezidenti, radiologi uzrādīja ātrākus reakcijas laikus, kad mērķa elementiem bija salīdzinoši zems kontrasts. Ņemot vērā, ka visos citos gadījumos radiologu un rezidentu reakcijas laiki bija līdzīgi, šajā pētījumā tika parādīts, ka redzes uzdevuma grūtībai var būt noteicošā loma ar pieredzi saistīto izmaiņu eksperimentālā noteikšanā. Kopumā būtiskās atšķirības tika atklātas novērtējot uzdevuma izpildes laiku, kad redzes stimuli bija ar zemu kontrastu (*Sowden et al.*, 2000; *Maeda et al.*, 2013), secinot, ka radiologiem varētu būt augstāka kontrastjutība. Tas varētu arī izskaidrot, kāpēc tas nebija novērojams vienā no jaunākiem pētījumiem (*Kelly et al.*, 2018), kura ietvaros netika pierādītas atšķirības meklēšanas sniegunā un stratēģijā radiologiem ar atšķirīgo pieredzi, veicot vizuālās meklēšanas uzdevumus ar augsta kontrasta nemedicīniskiem attēliem.

Papildu redzes uztveres jutības izmaiņām (*tuning*) attiecībā uz dažām stimulu fizikālajām īpašībām, vairāki pētījumi norāda uz to, ka radiologiem ir raksturīgas pārākas spējas iegaumēt un atpazīt jaunus attēlus bez semantiskās nozīmes (*Haller & Radue*, 2005; *Sunday et al.*, 2017). Turklāt radiologiem ir stiprāka lejupejošo procesu ietekme vizuālās meklēšanas laikā salīdzinot ar citiem cilvēkiem (*Cooper et al.*, 2009; *Chin et al.*, 2017; *Sunday et al.*, 2017; *Kelahan et al.*, 2018; *Carrigan et al.*, 2019), kas sekmē efektīvāku informācijas apstrādi un meklēšanas snieguma uzlabošanu. Jau pirmajā sekundē radiologi spēj atpazīt patoloģisko izmaiņu klātesamību efektīvi, izmantojot informāciju parafoveālā un perifērā redzes apgabalā (*Sheridan & Reingold*, 2017). Salīdzinot ar radiologiem, citu cilvēku meklēšanas stratēģiju vairāk ietekmē attēla fizikālie parametri (*Matsumoto et al.*, 2011; *Donovan & Litchfield*, 2013), jo nav pietiekami uztrenēta lejupejošo procesu iesaiste un kognitīvā kontrole, kura ir nepieciešama medicīnisko attēlu izskatīšanai (*Wolfe et al.*, 2016). Medicīnas profesionāļu kognitīvo procesu atšķirības atspoguļojas ne tikai vizuālās meklēšanas sniegunā, bet arī veidā, kā viņi izskata komplicētus daudzslāņu attēlus veicot attēlu slāņu pārvietojumus uz ekrāna, par kuru tiks izklāstīts nākamā nodaļā.

2.7. Daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģija

Pateicoties straujai attēlošanas tehnoloģiju attīstībai, medicīnas profesionāļiem tiek iedots ievērojami lielāks informācijas apjoms nekā tas bija iepriekš (*Andriole et al.*, 2011; *Drew et al.*, 2013; *Ravesloot et al.*, 2015; *Williams & Drew*, 2019). Datortomogrāfijā iegūtie attēli tiek

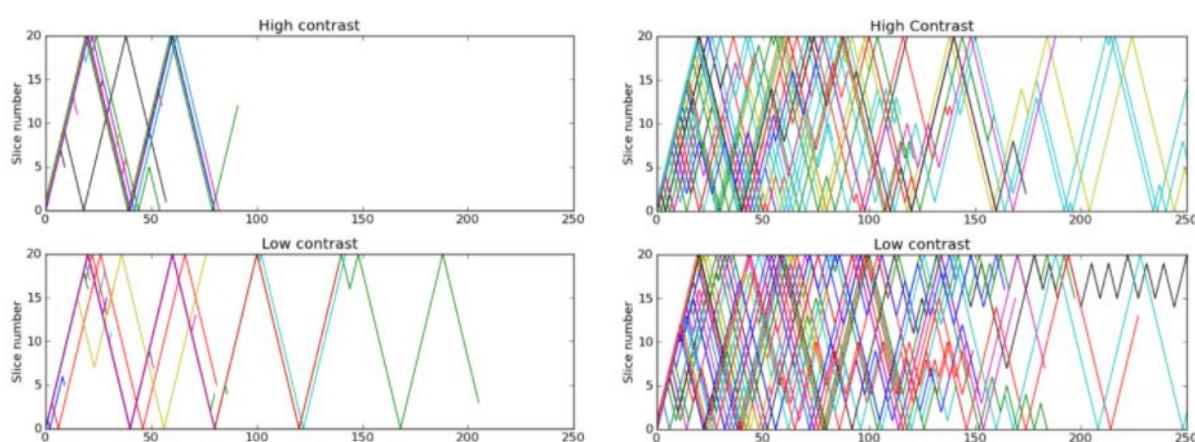
apkopoti daudzslāņu attēlu kopās vai tā saucamos volumetriskajos attēlos. Parādoties volumetriskajiem attēliem, radiologu vizuālās meklēšanas pētījumu interese ir ievērojami paplašinājusies un ir parādījušies jauni parametri, kas raksturotu meklēšanas procesus un novērtētu ergonomikas aspektus.

Papildu meklēšanas uzdevuma sniegumam, tika plaši pētīta radiologu attēlu izskatīšanas stratēģija, vērtējot jaunās datortomogrāfijas daudzslāņu attēlu radioloģijas darba stacijas (*Moise et al.*, 2005; *Atkins et al.*, 2006), nosakot efektīvas meklēšanas stratēģijas (*Drew et al.*, 2013; *Diaz et al.*, 2015; *Kelahan et al.*, 2018), un aprakstot radiologu kognitīvos procesus medicīnisku attēlu izskatīšanas laikā (*Venjakob et al.*, 2012; *Den Boer et al.*, 2018). Līdz ar volumetrisko attēlu parādīšanos liela uzmanība tiek veltīta attēlu izvērtēšanai *z*-virzienā jeb dziļumā, jo tā ir īpašība, kura atšķir daudzslāņu attēlu izskatīšanu no divdimensionālu attēlu izskatīšanas. Proti, pastāvot ierobežotām iespējām attēlot daudzslāņu attēlus uz plakanā ekrāna monitora, speciālistiem jāizmanto attēlu navigācija, kas būtiski maina informācijas meklēšanu. Vizuālās meklēšanas veidu daudzās plāknēs sauc par manuāli papildināto meklēšanu (*Williams & Drew*, 2019). Raksturojot attēlu pārvietojumu secību jeb ritināšanas stratēģiju, noteica, kā speciālisti izskata daudzus attēla slāņus uz plakana ekrāna, izmantojot datora peli, kursorsviru vai datora tastatūru.

Drew un kolēģu pētījums (2013) bija viens no pirmajiem darbiem, kurā piedāvāja volumetrisko attēlu izskatīšanas stratēģijas klasifikāciju un diskutēja par to saistību ar meklēšanas uzdevuma izpildes kvalitāti. Darba autori analizēja acu kustības un attēlu izskatīšanas stratēģiju radiologiem ar atšķirīgu profesionālās meklēšanas pieredzi. Radiologu uzdevums bija atrast mazus, apaļus plaušu mezgliņus daudzslāņu tomogrāfijas bildēs “pārvietojoties” attēlu dziļumā ar datora tastatūras palīdzību. Apkopojot rezultātus, autori piedāvāja, ka ir divas pamata stratēģijas, ko pielieto medicīnas speciālisti. Skenēšanā (*scanning*) dalībnieki lielākoties izskata atsevišķu attēla slāņu kopainu, savukārt urbšanas (*drilling*) stratēģijas lietotāji ierobežo acu kustības attēla segmentos un ātri izskata informāciju attēla kopas dziļumā katra atsevišķa segmenta ietvaros. Līdz ar to salīdzinoši mazs attēla slāņu pārvietojumu skaits bija raksturīgs skenēšanas stratēģijai, savukārt, lielāks atpakaļsoļu skaits bija urbšanas stratēģijai. Analizējot attēlu izskatīšanas stratēģijas saistību ar lietotāju pieredzi un meklēšanas uzdevuma sniegumu, tika diskutēts, ka urbšanas stratēģija varētu būt optimāla plaušu mezgliņu meklēšanas nolūkiem, jo šīs stratēģijas lietotāji pārsvarā uzrādīja augstāku meklēšanas sniegumu, un lielākai daļai lietotāju bija lielāka profesionālā meklēšanas pieredze (*Drew et al.*, 2013). Interesanti, ka urbšanas stratēģija var sekmēt vizuālās meklēšanas sniegumu, izskatot arī nemedicīniskus daudzslāņu attēlus uz plakano ekrānu monitoriem

(Aizenman et al., 2015), tādēļ rodas jautājums par augšupejošo procesu un lejupejošo procesu nozīmi stratēģijas izvēlē (Williams & Drew, 2019).

Izvērtējot acu kustības radiologiem un iesācējiem (*novices*) meklējot plaušu mezgliņus augsta un zema kontrasta daudzslāņu attēlos četru alternatīvu piespiedu atbildes izvēles procedūrā, tika noteikts, ka speciālisti izmanto metodiskāku un labāk organizētu attēlu izskatīšanas stratēģiju vizuālās meklēšanas laikā (Diaz et al., 2015). Gan radiologi, gan iesācēji pārsvarā pielietoja urbšanas stratēģiju. Tomēr radiologi veica daudz mazāk attēla slāņu pārvietojumus salīdzinot ar iesācējiem (skat. 1.6. att.). Turklāt bija novērojama tendence, ka iesācēji biežāk atkārtoti apskatīja jau redzētus attēlu slāņus, kas atspoguļojas pārvietojumu virziena maiņu skaitā (Diaz et al., 2015).



1.6. att. Daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģija z-virzienā radiologam (pa kreisi) un iesācējam (pa labi) meklēšanas uzdevumos ar augstu (*high contrast*) un zemu mērķa elementa kontrastu (*low contrast*). Ir parādīta izskatīšanas secība – kurš no 20 attēla slāņiem tika skatīts uz plakanā ekrāna monitora. Katra līnija attēlo vienu no 100 mēģinājumiem (*trials*). Ir redzams, ka radiologs mainīja pārvietojumu virzienu tikai dažas reizes, savukārt, iesācējs veica daudz vairāk pārvietojumu virziena maiņas (Diaz et al., 2015).

Tas, vai urbšanas stratēģijas priekšrocības ir novērojamas daudzslāņu medicīniskos attēlos ar lielāku fizikālo parametru daudzveidību, tika pārbaudīts izmantojot vēdera un iegurņu datortomogrāfijas attēlos (Kelahan et al., 2018). Vēdera un iegurņu datortomogrāfijas attēliem piemīt zemāks kontrasts salīdzinot ar plaušu attēliem. Turklāt vēdera un iegurņu attēlos mērķa elementi var atšķirties pēc vairākām pazīmēm, savukārt plaušu mezgliņu izskats ir lielākoties nemainīgs. Interesanti, ka arī izskatot komplicētākus attēlus, radiologi pārsvarā izvēlējās urbšanas stratēģiju, tomēr stratēģijas pārākums nebija parādīts, izvērtējot vizuālās meklēšanas sniegumu (Kelahan et al., 2018). Tas varēja būt saistīts ar augstu redzes uzdevuma grūtību, jo meklēšanas pareizība vidēji sasniedza tikai 50 %. Tādēļ turpmāk būtu nepieciešams noteikt, kā redzes stimula fizikālās īpašības ietekmē volumetrisko attēlu izskatīšanas stratēģiju (Williams & Drew, 2019).

Kopumā daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģijas un to interpretēšanas analīze apliecina, ka atšķirīgi kognitīvie procesi ir cieši saistīti ar noteikta veida stratēģijām, ko speciālisti pielieto, veicot attēlu slāņu pārvietojumus uz ekrāna vizuālās meklēšanas laikā (*Den Boer et al.*, 2018). Daudzslāņu attēlu interpretēšana fundamentāli atšķiras no divdimensionālu attēlu interpretēšanas, jo divdimensionālo attēlu uztveres procesā ir aktīvi iesaistīta pārvietojumu veikšana attēla dziļumā uz ekrāna, līdz ar ko redzes aina nemitīgi mainās (*Van der Gijp et al.*, 2015). Vairākos pētījumos (*Venjakob et al.*, 2012; *Den Boer et al.*, 2018) bija piedāvāts aprakstīt attēlu izskatīšanas stratēģijas atkarībā no daudzslāņu attēla apjoma, kura ietvaros tika veikti pārvietojumi meklēšanas laikā (mazāk par 25 %, no 25 % līdz 50 %, un vairāk par 50 %). Izskatot daudzslāņu attēlus uz plakanā ekrāna monitora, pārvietojumu veikšana mazāk par 50 % attēla apjoma ietvaros bija saistīta ar informācijas sintēzes un analīzes procesiem. Savukārt lielāka attēla apjoma izskatīšanas laikā norisinājās informācijas uztvere (*Den Boer et al.*, 2018).

Speciālistiem jāstrādā ar lielu informācijas apjomu aplūkojot daudzslāņu attēlus uz plakano ekrānu monitoriem (*Skaane et al.*, 2013; *Aizenman et al.*, 2017; *Dong et al.*, 2018), kas palielina kognitīvo slodzi, sevišķi jauniem speciālistiem (*Stuijzfand et al.*, 2016). Ilgstoša augsta kognitīvā slodze izraisa nogurumu (*Mizuno et al.*, 2011), kas savukārt negatīvi ietekmē redzes uzmanību (*Faber et al.*, 2012) un lēmuma pieņemšanas pareizību (*Krupinski et al.*, 2012; *Gamble et al.*, 2018). Pastāvošās situācijas dēļ, pieaug interese uzlabot redzes ergonomiku radioloģijā izmantojot jaunas vizualizācijas iekārtas, kuras nodrošinātu medicīnas profesionāļus ar kvalitatīvu un pilnvērtīgu trīsdimensionālu aplūkojamo objektu attēlošanu.

Divdimensionālu attēlu sapludināšana (*rendering*) un ērta attēlu navigācija var kļūt par šīs problēmas iespējamo risinājumu (*Andriole et al.*, 2011; *Krupinski et al.*, 2012; *Devcic et al.*, 2018). Proti, šķērsgriezuma attēli var tikt “sapludināti” trīsdimensionālā informācijas attēlošanā un parādīti virtuālajā realitātē (*Nguyen et al.*, 2018; *Uppot et al.*, 2019), papildinātajā realitātē (*Douglas et al.*, 2018; *Uppot et al.*, 2019), uz stereoskopiskiem ekrāniem (*Getty et al.*, 2008; *Ferre et al.*, 2018) vai uz volumetriskiem ekrāniem (*Favalora*, 2005; *Osmanis & Osmanis*, 2016). Papildus demonstrējot anatomisko struktūru sapludinātus telpiskus attēlus, medicīnas speciālistiem būtu nodrošināta iespēja redzēt anatomiskās struktūras kopainu dziļumā, ātrāk izvēlēties interesējošos attēla apgabalus turpmākai detalizētākai izskatīšanai un tādējādi samazinātos nepieciešamība turēt lielu informācijas daudzumu atmiņā.

Kā analizēt attēlu izskatīšanas stratēģiju, kad tiek attēloti telpiskie objekti ar jaunu vizualizācijas rīku, ir joprojām aktuāls jautājums (*Williams & Drew*, 2019). Trūkst zināšanas par meklēšanas stratēģijas īpatnībām, kuras nepieciešamas, lai veidotu profesionāliem nolūkiem piemērotas attēlu navigācijas sistēmas un lai jēgpilni modernizētu jaunu speciālistu apmācību. Neskatoties uz to, ka mūsdienu programmās tiek iezīmētas attēla vietas, kuras

potenciāli varētu būt saistītas ar nozīmīgām klīniskajām atradnēm, radiologu redzes uztverei un vizuālās meklēšanas sniegunam ir svarīga loma diagnozes uzstādīšanā (*Waite et al.*, 2020). Vizualizācijas tehnoloģijām attīstoties, parādās iespēja uzlabot darba ergonomiku profesionālās jomās, kurās cilvēki pieņem lēmumus balstoties uz daudzslāņu vai telpisko attēlu aplūkošanu. Jāatzīmē, ka attēlu izskatīšanas stratēģijas netika analizētas pētījumos, kuros radiologi izskatīja sapludinātus trīsdimensionālus attēlus virtuālajā realitātē (*Nguyen et al.*, 2018) un uz stereoskopiskā ekrāna (*Ferre et al.*, 2018). Sapludinātu attēlu izskatīšanas stratēģiju analīze darbā ar volumetrisko ekrānu ļaus izprast vizuālās meklēšanas procesu un lietotāju vajadzības darbam ar jaunām trīsdimensionālās vizualizācijas iekārtām.

2.8. Trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijas

Līdz ar vizuālās informācijas pieaugumu, ir kļuvis skaidrs, ka profesionālajās nozarēs tradicionāli izmantojamie plakano ekrānu monitori ierobežo iespējas efektīvi meklēt informāciju un izpildīt darba uzdevumus. Tikai ļoti maza daļa no visas pieejamās informācijas var tikt demonstrēta uz plakanā ekrāna monitora, turklāt attēlos ir ierobežots dziļuma nosacījumu skaits, līdz ar ko telpiskā informācija tiek attēlota nepilnvērtīgi (*Geng*, 2013). Trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijām ir ievērojams potenciāls tikt jēgpilni pielietotām medicīnā, uzlabojot radiologu darba ergonomiku (*Andriole et al.*, 2011).

Izmantojot jaunas vizualizācijas tehnoloģijas, ir iespējams nodrošināt vairāk dziļuma nosacījumu attēlos, salīdzinot ar ikdienā izmantojamiem plakano ekrānu monitoriem. Pastāv dažādi veidi, kā atainot telpisku attēlu (*Geng*, 2013). Stereoskopiskā vizualizācija bija viena no pirmajām, ko varēja īstenot uz plakano ekrānu monitoriem, atdalot abu acu attēlus izmantojot speciālas brilles. Rezultātā tiek uztverti divi attēli ar mazu nobīdi (binokulāro disparitāti), bet smadzenēs tie tiek apvienoti vienā telpiskā attēlā. Iegūtos attēlus sauc par simulētiem, jo uz ekrāna netiek atveidots reāls attēla dziļums.

Stereoskopisko vizualizāciju plaši izmantoja izklaides jomās, kā arī vēlāk pārbaudīja to izmantošanas iespējas profesionālajās nozarēs. Vairāk nekā desmit gadus atpakaļ uzlabotās diagnostikas sniegums bija eksperimentāli parādīts digitālajā mammogrāfijā ar stereoskopiskajiem attēliem, salīdzinot ar divdimensionāliem attēliem (*Getty et al.*, 2008). Tomēr šī metode tā arī netika apstiprināta klīniskajā praksē, un tās priekšrocības tika tālāk pētītās turpmāko gadu pētījumos (*Ferre et al.*, 2018).

Nesen tika diskutēts par iespējamu mobilās stereoskopiskās sistēmas izmantošanu izglītībā un diagnostiskās radioloģijas treniņos (*Uppot et al.*, 2019), tomēr joprojām trūkst pētījumu, lai pierādītu šo metožu efektivitāti. Pirmo reizi izvērtējot telpisko attēlu pielietojumu diagnostiskajā radioloģijā, tika noteikts, ka radiologi spēj vienlīdz labi atrast 1-4 mm lielus

plaušu mezgliņus, gan izmantojot profesionālu medicīnas ekrānu, gan virtuālās realitātes rīku (*Nguyen et al.*, 2018). Tādēļ tika secināts, ka telpiskie attēli var tikt jēgpilni pielietoti profesionālajā jomā. Tomēr pārsvarā radiologi atzīmēja, ka piedzīvoja fizisko un mentālo stresu pēc ilgstoša darba virtuālajā realitātē.

Redzes diskomforts, astenopiskās sūdzības un slikta pašsajūta pēc ilgstošas simulētu trīsdimensionālu attēlu aplūkošanas ir saistīta ar nesaskaņotību starp attēla dziļuma nosacījumiem – acs akomodāciju un vergenci (*Hoffman et al.*, 2008). Šī nesaskaņotība ietekmē arī redzes funkcijas – rodas acs akomodācijas pārpūle (*Fukushima et al.*, 2009), tiek apgrūtināta attēlu fūzija (*Howarth*, 2011; *Vienne et al.*, 2014) un palēnināta vergences dinamika (*Vienne et al.*, 2014). Tā kā šo problēmu nav iespējams pilnībā atrisināt simulētu attēlu gadījumā (*Reichelt et al.*, 2010), ir apšaubāma šīs vizualizācijas metodes izmantošana ilgstošam redzes darbam, kurš ir raksturīgs profesionālajām jomām.

Pretstatā iepriekš minētam problēma nav novērojama cilvēkiem, aplūkojot īstos trīsdimensionālus attēlus uz volumetriskā ekrāna. Šajā gadījumā trīsdimensionāla attēla efekts tiek panākts secīgi projicējot divdimensionālus attēlus uz ekrāna optiskā elementa, kas var būt kustīgs vai stacionārs (*Sullivan & Snuffer*, 2002; *Favalora*, 2005; *Grossman & Balakrishnan*, 2006; *Geng*, 2013; *Osmanis*, 2016; *Osmanis et al.*, 2018; *Zhan et al.*, 2020). Ātri parādītie divdimensionālie attēli tiek uztverti kā vienots telpiskais attēls. Atšķirībā no daudzām citām telpiskās vizualizācijas iekārtām, volumetriskā ekrāna attēli tiek projicēti reālā fiziskā telpā, un tas rada iespēju uztvert telpisku attēlu atšķirības, pamatojoties uz binokulāriem dziļuma nosacījumiem līdzīgi kā dabiskajos apstākļos (*Smalley et al.*, 2018), un rezultējošs attēls ir redzams bez papildu ierīcēm (*Geng*, 2013). Līdz ar to vēl viena volumetriskā ekrāna priekšrocība ir tā, ka attēlu var skatīties vairāki cilvēki no dažādiem skata punktiem (*Geng*, 2013), kas ir svarīgi profesionāļiem, kuri pieņem lēmumus kolektīvi.

Volumetriskais ekrāns ir inovatīva vizualizācijas tehnoloģija, kura tiek izstrādāta, lai nākotnē dažādu profesiju pārstāvjiem atvieglotu darbu un samazinātu slodzi, jo telpisku attēlu aplūkošanu, salīdzināšanu un analīzi varētu veikt trīsdimensionālajā vidē nevis izskatot daudzus atsevišķus divdimensionālus attēlus. 2017. gada apkopojumā (*Statistics MRC*, 2017) par pasaules tirgus izpēti ir minēts, ka volumetrisko ekrānu pielietojums medicīnā ir liels (35,5 %) un to pielietojums turpinās pieaugt arī nākotnē. Volumetriskie attēli var tikt izmantoti medicīnā radioloģiskās diagnostikas un minimāli invazīvas ķirurģisko operāciju plānošanas nolūkos (*Osmanis & Osmanis*, 2016; *Statistics MRC*, 2017), bet nav zināms, kā mediķi veic redzes uzdevumus, kad visa informācija ir pieejama īsto trīsdimensionālu attēlu veidā. Ir svarīgi noteikt, kā šī jaunā vizuālās informācijas attēlošanas tehnoloģija ietekmē cilvēka darba spējas

veicot meklēšanas uzdevumus, un kāda veida pilnveidojumi sekmētu tehnoloģijas apstiprināšanu lietotāju vidū.

Viens no nozīmīgākajiem šķēršļiem šajā ceļā ir ekrāna lietotāju snieguma (*user experience*) novērtēšanas metodes trūkums (*Osmanis, 2016; 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, kas ir bijis viens no agrīniem volumetriskā ekrāna veidiem. Taču piedāvātas metodes nav jēgpilni pielietojamas volumetriskajam daudzplakņu ekrānam optisko elementu arhitektūru atšķirību dēļ. Volumetriskajā daudzplakņu ekrānā dziļuma plakņu skaits ir ļoti mazs, un tādēļ prioritāri tika izvērtēts, kā attēla slāņu projicēšana uz dažām diskrētajām dziļumu plaknēm ietekmē dziļuma sajūtu un redzes komfortu (*Akeley et al., 2004; Hoffman et al., 2008; MacKenzie et al., 2010; Osmanis, 2016*). Pārsvarā ergonomiskuma izpēte volumetriskajiem daudzplakņu ekrāniem tika īstenota izmantojot ekrānu prototipus ar trim dziļuma plaknēm (*Akeley et al., 2004; Hoffman et al., 2008; MacKenzie et al., 2010*). Kopumā neviena no šīm piedāvātajām metodēm neļauj novērtēt attēlu izskatīšanas procesu – kā cilvēks meklē informāciju daudzslāņu attēlos uz jauniem ekrāniem. Turklāt nav zināms, vai visas informācijas projekcija volumetriskā ekrāna dziļumā sekmē lietotāju komfortu un darba sniegumu.

Jaunās vizualizācijas iekārtas ergonomiskā izvērtēšanā ir nepieciešams ņemt vērā dažādus faktoros, kas spēj ietekmēt lietotāju darbu. Literatūras apskata pētījumi norāda, ka vizuālās meklēšanas uzdevums ir ērts rīks, ar kura palīdzību var visaptveroši spriest par cilvēka darba spējām un jaunas vizualizācijas iekārtas pielietojumu. Atšķirībā no divdimensionālu attēlu aplūkošanas, redzes uzmanības pievēršanu un spēju efektīvi atrast informāciju trīsdimensionālos attēlos var ietekmēt relatīvā dziļuma uztvere. Savukārt spriedumi par relatīvo dziļumu ir saistīti gan ar trīsdimensionālā attēla atveides veidu, gan ar cilvēka spējām uztvert to atkarībā no dažādiem fizikāliem faktoriem saistītiem ar ekrāna uzbūvi. Bez stimulu fizikālajām īpašībām vizuālās meklēšanas sniegumu un attēlu izskatīšanas stratēģiju var ietekmēt arī profesionālās meklēšanas pieredze, ko ir svarīgi ņemt vērā nosakot lietotāju darba spējas saistībā ar jaunā ekrāna izvērtēšanu.

Promocijas darba ietvaros tiek izstrādāta metode vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, ko nākotnē varētu pielāgot dažādu volumetrisko ekrānu izvērtēšanai un papildināt to atkarībā no jaunām vajadzībām un tehniskajām iespējām. Lai izstrādātu metodi bija nepieciešams izpētīt attēla fizikālu īpašību ietekmi uz cilvēka darba spējām saistībā ar ekrānu. Šim nolūkam primāri bija jānoskaidro skatīšanās apstākļi, pie kuriem dažādās vietās fizikālajā telpā projicētais redzes stimulds tiek uztverts kā trīsdimensionāls attēls.

Tad bija būtiski izprast, kā informācijas redzamība ietekmē cilvēka spējas atrast to uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, lai atlasītu tādus fizikālos parametrus attēlos uz ekrāna, pie kuriem tiek novērotas nozīmīgas atšķirības sniegunā. Nozīmīgo fizikālo parametru atlase ļauj turpmāk aprobēt izveidoto metodi lietotājiem ar profesionālās meklēšanas pieredzi, lai paplašinātu izpratni par ietekmējošiem faktoriem, kad cilvēki darbojas ar volumetrisko daudzplakņu ekrānu.

3. METODE

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. Tādēļ 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 (meklējamu elementu lauka ekscentritāte un dziļuma segments) ietekmē pareizo atbilžu 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.

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 attēlu izskatīšanas stratēģijā. Šie fizikālie parametri tika izvēlēti vizuālās efektivitātes metodes aprobēšanai.

Beigās izstrādāta metode ar izvēlētiem fizikālajiem parametriem bija aprobēta lietotājiem ar dažādu profesionālās meklēšanas pieredzi radioloģijā. Tas ļāva paplašināt zināšanas par ietekmējošo faktoru ietekmi saistībā ar vizuālās efektivitātes novērtēšanu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

3.1. Dalībnieki

Pētījumā brīvprātīgi piedalījās 107 dalībnieki (skat. 3.1. tab.). Dalībnieku iekļaušanas kritēriji bija sekojoši: labs redzes asums tuvumā ar vai bez optiskās korekcijas ($Visus = 1,0$ decimālajās vienībās, vai labāks, noteikts ar tuvuma redzes tabulu), netraucēta binokulārā redze, pietiekams stereoredzes asums tuvumā (60" vai labāks, noteikts ar Titmusa stereoredzes testu). Nevienam pētījuma dalībniekam nebija pieredzes darboties ar volumetrisko daudzplakņu

ekrānu pirms šī pētījuma. Pētījums norisinājās saskaņā ar Helsinku deklarācijas saturu un bija apstiprināts Latvijas Universitātes Ētikas komisijā. Dalībnieki tika iepazīstināti ar pētījuma mērķi un pielietojamām metodēm, kā arī sniedza rakstisku apliecinājumu par brīvprātīgu dalību pētījumā un atļauju izmantot iegūtos datus pētījuma mērķim.

3.1. tabula

Pētījuma dalībnieku apraksts

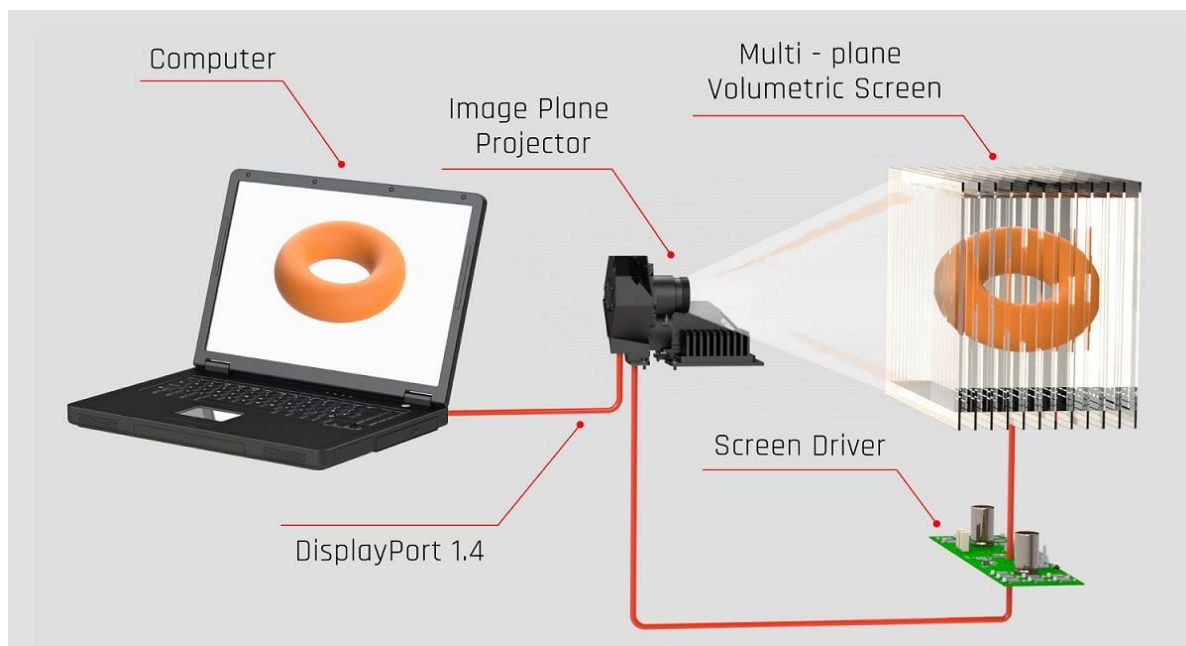
pētījuma posms	dalībnieki
Trīsdimensionālu attēlu uztvere atkarībā no redzes stimula izkārtojuma	20 dalībnieki vecumā no 21 līdz 29 gadiem.
Trīsdimensionālu attēlu uztvere dažādos skatīšanās attālumos no ekrāna	20 dalībnieki vecumā no 20 līdz 25 gadiem. Papildu kritērijs: labs redzes asums tālumā ar vai bez optiskās korekcijas (<i>Visus</i> = 1,0, decimālajās vienībās), netraucēta binokulārā redze tālumā.
Mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšana vizuālajā meklēšanā	20 dalībnieki vecumā no 21 līdz 28 gadiem.
Metodes aprobēšana lietotājiem 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.

3.2. Iekārta

Pētījumā tika izmantots volumetriskais daudzplakņu ekrāns (SIA “*LightSpace Technologies*”, modelis: x1405). Volumetriskā ekrāna galvenās sastāvdaļas ir daudzplakņu optiskais elements un ātrgaitas projektors (*Osmanis*, 2016; *Osmanis et al.*, 2018). Papildus ir nepieciešams dators, kas ir saslēgts ar volumetrisko daudzplakņu ekrānu, lai izvadītu datus uz ekrāna ar speciālas programmatūras palīdzību. Optisko elementu veido secīgi izvietotas plaknes ar optiskiem slēdžiem, kuri ir elektroniski vadāmi 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. Projektors secīgi projicē volumetriskā attēla slāņus uz ekrāna plaknēm. Slāņi tiek parādīti dažādās vietās fizikālajā telpā pietiekami ātri, lai mūsu redzes sistēma uztvertu to vienotā telpiskā attēlā.

Volumetriskā daudzplakņu ekrāna optisko elementu (skat. 3.1. att.) veido divdesmit plaknes. Plaknes biezums ir 1,10 mm. Plaknes ir novietotas viena aiz otras tā, ka savstarpējais attālums starp kārtām (un volumetriskā attēla slāņiem) sastāda 5,04 mm. Optiskā elementa

plaknes garums un platums ir 395×295 mm. Ekrāna izšķirtspēja ir 1024×768 pikseļi katrai plaknei. Līdz ar to pikseļa izmērs ir $0,38 \times 0,38$ mm. Volumetriskā daudzplakņu ekrāna attēla atjaunošanas frekvence ir 60 Hz.



3.1. att. Volumetriskā daudzplakņu ekrāna galvenās sastāvdaļas¹. Ar ātrgaitas projektora (*image plane projector*) palīdzību volumetriskā attēla slāņi tiek projicēti uz optiskā elementa kārtām (*multi-plane volumetric screen*).

Visi pētījuma mērījumi tika veikti demonstrējot gaišus elementus uz tumša ekrāna fona. Spožums bija nemainīgs redzes stimuliem uz dažādām volumetriskā ekrāna plaknēm. Maksimālais spožums un melnā līmeņa spožums attēliem uz katras plaknes tika mērīts ar *PhotoResearch* spektrometru PR-655, tad tika aprēķinātas vidējās vērtības. Vidējais maksimālais spožums gaišiem attēliem uz šī modeļa ekrāna plaknēm ir $21,1 \text{ cd/m}^2$. Vidējais melnā līmeņa spožums ir $0,6 \text{ cd/m}^2$.

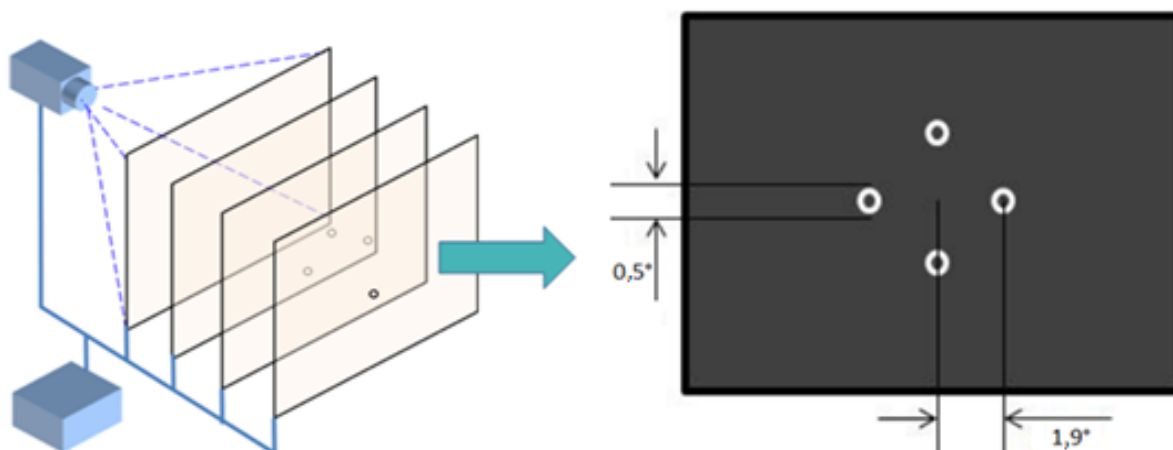
3.3. Pētījuma gaita

3.3.1. Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšana

Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšanas nolūkiem tika izveidota datorprogramma, kas ģenerē redzes stimulus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna saskaņā ar ievadītiem parametriem (skatīšanās attālums līdz ekrānam, meklējamo elementu leņķiskais izmērs, meklējamo elementu ekscentritāte un dziļuma segments). Iestrādāto mainīgo parametru klāsts ļauj noteikt dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevuma izpildīšanas pareizību un laiku konstanto stimulu metodes ietvaros.

¹ <https://www.lightspace3d.com/index.php/Products/gen3-volumetric-3d-image-displays/>

Ņemot vērā dominējošo binokulāro dziļuma nosacījumu ieguldījumu precīzā dziļuma uztverē tuvajos skatīšanās attālumos (*Cutting & Vishton, 1995*), tika izveidots redzes stimul ar ierobežotu dziļuma nosacījumu skaitu. Vizuālās meklēšanas uzdevumā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna parādījās četri apli, viens no kuriem tika demonstrēts par vienu ekrāna plakni (5,04 mm) tuvāk pētījuma dalībniekam nekā visi pārējie (skat. 3.2. att.). Tādējādi redzes stimula daļas tika attēlotas dažādās vietās ekrāna optiskā elementa fizikālajā telpā, un mērķa elements atšķīrās no distraktoriem ar relatīvo dziļumu. Apli tika attēloti četros virzienos attiecībā pret ekrāna plakņu centru – uz augšu, uz leju, pa labi un pa kreisi, dažādās lauka ekscentritātēs (attālumos no ekrāna plakņu centra līdz aplu centram).



3.2. att. Piemērs aplu izkārtojuma uz ekrāna plaknēm, viens no kuriem bija projicēts par vienu plakni tuvāk skatītājam (attēlā pa kreisi). Aplu izmērs un izvietojums uz ekrāna skatoties no priekšas uzdevumā ar meklējamiem elementiem $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē (attēlā pa labi).

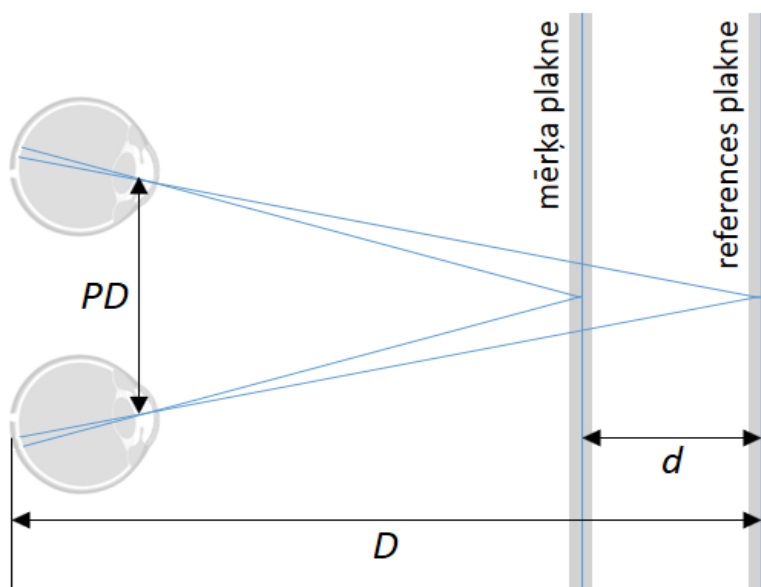
Apliem bija vienāds leņķiskais izmērs ($0,5^\circ$ ārējais diametrs, $0,1^\circ$ līnijas platums) uz visām ekrāna plaknēm, savukārt to fiziskais izmērs mainījās saskaņā ar plakņu novietojumu optiskajā elementā un skatīšanās attālumu. Piemēram, 45 cm skatīšanās attālumā aplu ārējais diametrs mainījās no 4,0 mm tuvākajā plaknē līdz 4,8 mm tālākajā plaknē. Tāpat kā aplu izmērs, arī ekscentritātes leņķiskais izmērs nemainījās radot redzes stimulu uz dažādām ekrāna plaknēm, bet tās fiziskais izmērs bija saskaņā ar skatīšanās attālumu līdz katrai plaknei.

Ņemot vērā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna projicētā redzes stimula fizikālās īpašības un dziļuma uztveres specifiku (*Cutting & Vishton, 1995*), tika sagaidīts, ka attēla relatīvā dziļuma noteikšana būs balstīta uz binokulāro disparitāti, tādēļ ka vidējais konverģences un akomodācijas sliekšnis (*Rolland et al., 1999*) ir augstāks nekā būtu nepieciešams izveidotā uzdevuma izpildīšanai. Plakņu savstarpējais novietojums volumetriskajā daudzplakņu ekrānā nosaka projicētā attēla fizikālās īpašības. Vismazākā atšķirība attēla dziļumā sastāda 5,04 mm, bet ar to saistīta binokulāra disparitāte ir atkarīga no

skatīšanās attāluma. Binokulārā disparitāte tika aprēķināta izmantojot ģeometrisku sakarību starp redzes stimula elementu novietojumu uz ekrāna plaknēm pret novērotāju un attēlu disparitāti:

$$n = \frac{PD \times d_{layers}}{D^2} \quad [4]$$

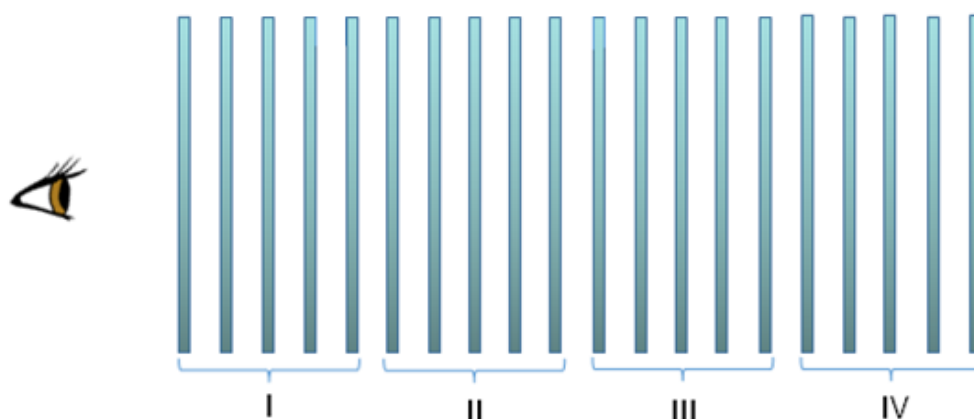
kur n – binokulārā disparitāte (radiānos); D – attālums no acīm līdz references ekrāna plaknei, kurā tiek demonstrēti trīs no četriem aplīem (m); d_{layers} – attālums starp konsekventām ekrāna plaknēm (m); PD – starpzīlīšu attālums (m). Lai noteiktu disparitāti loka sekundēs, iegūtā vērtība jāreizina ar $60 \times 60 \times \frac{180^\circ}{\pi}$. Shematiskais skaidrojums tam, kādi fizikālie lielumi tika ņemti vērā aprēķinot binokulāro disparitāti, ja redzes stimulš projicēts uz ekrāna plaknēm, ir redzami 3.3. attēlā. Binokulārās disparitātes aprēķinos tika pieņemts, ka vidējais starpzīlīšu attālums ir vienāds ar 0,065 m.



3.3. att. Shematiskais skaidrojums binokulārās disparitātes aprēķinam, kad redzes stimulš ir demonstrēts uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ar references plakni ir atzīmēta tā plakne, uz kuras tika projicēti trīs no četriem aplīem uzdevumā. Savukārt ar mērķa plakni ir atzīmēta plakne, uz kuras tika projicēts viens (novērotājam tuvākais) aplis. D ir starpzīlīšu attālums un d ir attālums starp secīgām optisko slēdžu kārtām.

Redzes stimulš varēja būt selektīvi attēlots dažādos ekrāna dziļuma segmentos. Šī funkcija bija iestrādāta datorprogrammā ar mērķi turpmāk noteikt, vai redzes stimula relatīvais dziļums var būt vienlīdz pareizi un ātri noteikts, ja attēls tiek parādīts dažādos volumetriskā daudzplakņu ekrāna dziļuma segmentos (cilvēks nemaina savu atrašanās vietu attiecībā pret ekrānu, bet skatīšanās attālums pieaug projicējot redzes stimulu dziļāk optiskajā elementā). Visas optiskā elementa plaknes bija nosacīti iedalītas četros dziļuma segmentos skaitot no

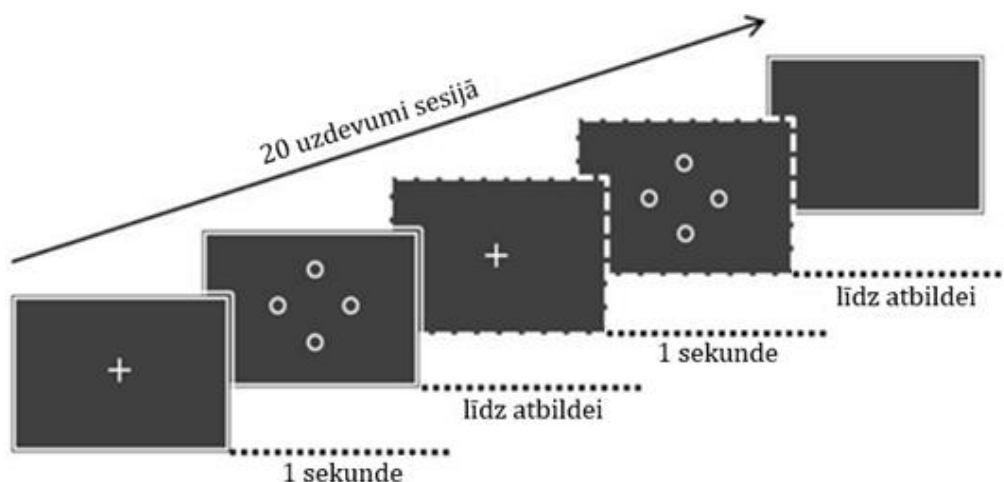
vistuvākās dalībniekam: I segments: 1.-5. plakne, II segments: 6.-10. plakne, III segments: 11.-15. plakne, IV segments: 16.-20. plakne (skat. 3.4. att.).



3.4. att. Ekrāna optiskā elementa plakņu nosacītais sadalījums četros dziļuma segmentos. Katrs dziļuma segments ietvēra piecas plaknes. Redzes stimulš tika projicēts uz divām secīgām plaknēm atsevišķi dažādos dziļuma segmentos.

Pirms katra dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevuma uz vienu sekundi parādījās fiksācijas krusts dalībniekam vistuvākajā plaknē atbilstošajā dziļuma segmentā. Dalībniekam tika lūgts saglabāt skatienu uz šo fiksācijas krustu. Fiksācijas krusta lielums bija vienāds ar aplū leņķisko izmēru.

Tad uz ekrāna parādījās četri apli, 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 (pa labi, pa kreisi, uz augšu vai uz leju) nospiežot attiecīgo bultiņas taustiņu uz datora tastatūras (piespiedu izvēles metode ar četrām alternatīvām). Uzreiz pēc atbildes sniegšanas uz ekrāna parādījās fiksācijas krusts un sekoja nākamais mēģinājums (skat. 3.5. att.).



3.5. att. Dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumu sesijas gaita. Pēc fiksācijas krusta uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna parādījās četri apli, no kuriem vienam bija atšķirīgs dziļums uz ekrāna. Katra sesija ietvēra divdesmit uzdevumu mēģinājumus.

Trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšanas sākumā bija noteikts, kā redzes stimula izkārtojums uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna ietekmē meklēšanas uzdevuma izpildīšanas pareizību un laiku. Šim nolūkam dalībnieki veica meklēšanas uzdevumus 45 cm skatīšanās attālumā pēc īsas adaptācijas mezopiskiem skatīšanās apstākļiem un uzdevuma izpildīšanas instrukciju saņemšanas. Lai mazinātu galvas kustības un kontrolētu skatīšanās attālumu, pētījumā tika izmantots zoda un pieres balsts.

Redzes stimula izkārtojums volumetriskā daudzplakņu ekrāna matricā variēja atkarībā no meklējamo elementu lauka ekscentritātes ($1,9^\circ$, $3,8^\circ$ un $7,6^\circ$) un dziļuma segmenta (I, II, III un IV). Gan lauka ekscentritātes secība, gan dziļuma segmenta secība mainījās pēc nejaušības principa meklēšanas uzdevumos. Katrai no mainīgu lielumu kombinācijām bija veikti divdesmit mēģinājumi.

Jāatzīmē, ka līdz ar redzes stimula attēlošanu dažādos dziļuma segmentos, mainījās apļu relatīvā disparitāte uz secīgām ekrāna plaknēm. Neskatoties uz to, ka dalībnieks neattālinājās no ekrāna, tomēr attālums līdz redzes stimulam mainījās optiskā elementa plakņu novietojuma dēļ. 3.2. tabulā ir aprēķinātu relatīvās binokulārās disparitātes vērtību diapazons, kad attālums no dalībnieka acīm līdz volumetriskajam daudzplakņu ekrānam bija 45 cm. Ir redzams, ka, projicējot attēlus uz divām secīgām ekrāna plaknēm un aplūkojot tos tuvajā attālumā, relatīvā disparitāte mainās no 226" līdz 326".

3.2. tabula

Relatīvā binokulārā disparitāte atkarībā no redzes stimula projekcijas uz divām secīgām plaknēm dziļuma segmentos, kad skatīšanās attālums ir 45 cm līdz ekrānam

dziļuma segments	vidējā disparitāte (n)	disparitāšu diapazons
I	320"	305" – 326"
II	284"	275" – 292"
III	257"	249" – 264"
IV	233"	226" – 240"

Turpmāk trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšanā tika noteikts, kādos skatīšanās attālumos jēgpilni atveidot attēlu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, lai tas tiktu uztverts kā trīsdimensionāls attēls. Pēc īsas adaptācijas mezopiskiem skatīšanās apstākļiem un uzdevuma izpildīšanas instrukciju saņemšanas dalībnieki pildīja dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumus deviņos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Skatīšanās attālums variēja no 0,5 m līdz 2,5 m ar soli 0,25 m. Šajā pētījumā posmā meklējamie elementi tika projicēti $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē pirmā dziļuma segmenta ietvaros. Dotā lauka ekscentritāte bija izvēlēta, lai redzes stimulš ietilptu volumetriskā daudzplakņu ekrānā arī tālākajos skatīšanās attālumos,

savukārt viens dziļuma segments tika izmantots tādēļ, ka izmaiņas rezultējošā disparitātē nebija nozīmīgas projicējot redzes stimulu dažādos dziļuma segmentos palielinoties skatīšanās attālumam.

Līdz ar skatīšanās attālumu mainījās arī rezultējošā binokulārā disparitāte. Ņemot vērā, ka volumetriskajā daudzplakņu ekrānā optiskais elements nosaka trīsdimensionāla attēla daļu novietojumu fizikālajā telpā, tika aprēķināts, ka skatīšanās attālumam palielinoties no 0,5 m līdz 2,5 m. 3.3. tabulā ir norādītas rezultējošās disparitātes katrā no skatīšanās attālumiem projicējot attēlu uz divām secīgām ekrāna plaknēm dalībniekam vistuvāko piecu plakņu robežās.

3.3. tabula

Relatīvā binokulārā disparitāte atkarībā no skatīšanās attāluma līdz ekrānam, kad volumetriskā attēla slāņi tiek projicēti uz divām secīgām ekrāna plaknēm dalībniekam tuvākajā dziļuma segmentā

skatīšanās attālums (<i>D</i>)	vidējā disparitāte (<i>n</i>)	disparitāšu diapazons
0,50 m	257"	249" – 264"
0,75 m	116"	114" – 118"
1,00 m	66"	65" – 67"
1,25 m	43"	42" – 43"
1,50 m	30"	29" – 30"
1,75 m	22"	22"
2,00 m	17"	17"
2,25 m	13"	13"
2,50 m	11"	11"

Ņemot vērā to, ka relatīvās disparitātes ir mazas tālākajos skatīšanās attālumos, vispirms katrs dalībnieks izpildīja dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumus vienā no tuvajiem skatīšanās attālumiem (0,50 m, 0,75 m vai 1,00 m), lai nodrošinātu, ka dalībnieks izprot uzdevuma būtību. Nākamās uzdevumu sesijas tika pildītas pārējos skatīšanās attālumos nejaušā secībā.

3.3.2. Mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšana

Gūtās atziņas par redzes stimula izkārtojuma ietekmi uz trīsdimensionālu attēlu uztveri tika ņemtas vērā izveidojot datorprogrammu mērķa elementa redzamības ietekmes izpētei uz meklēšanu un attēlu izskatīšanas stratēģiju cilvēkiem aplūkojot trīsdimensionālus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tas turpmāk ļāva noteikt, pie kādiem fizikāliem parametriem ir novērojamas būtiskas atšķirības sniegtā cilvēkiem darbojoties ar jaunu ekrānu. Tā kā vizuālās meklēšanas uzdevumi bez semantiskā satura tiek uzskatīti par jutīgākiem






pret attēla kvalitātes pasliktināšanos salīdzinot ar uzdevumiem, kuri atveido ikdienas aktivitātes (Jameson, 2012), redzes stimulsi ietvēra aplū, kuri tika projicēti dažādos attālumos no ekrāna plakņu centriem, izvēloties tādas lauka ekscentritātes, pie kurām projicētais attēls tika uztverts kā trīsdimensionāls attēls, balstoties uz iepriekšējā pētījuma posmā gūtājiem rezultātiem (aprakstīti Rezultātu sadaļā). Projicējot aplūus uz vairākām ekrāna plaknēm tika izveidots daudzslāņu attēls, kurā katra slāņa novietojumu fizikālajā telpā nosaka ekrāna plakņu atrašanās vieta optiskajā elementā.

Aplūiem bija vienāds lenķiskais izmērs (ārējais diametrs – $0,5^\circ$) uz ekrāna plaknēm, savukārt to fiziskais izmērs mainījās saskaņā ar skatīšanās attālumu līdz katrai no plaknēm. Aplū iekšējais diametrs atšķīrās distraktoriem un mērķa elementiem. Visiem distraktoriem bija vienāds līnijas platums ($0,1^\circ$) neatkarīgi no plaknes atrašanās vietas optiskajā elementā. Savukārt mērķa elements atšķīrās no distraktoriem ar palielinātu aplū līnijas platumu.

Dotā meklējamo elementu forma un mērķa-distraktora līdzības veids bija izvēlēti meklēšanas uzdevumiem iedvesmojoties no radiologu redzes uzdevumu specifikas. Proti, mazu aplūveidīgo plaušu mezgliņu atrašana attēlos tiek uzskatīta par vienu no visizaicinošākajiem un svarīgiem redzes uzdevumiem, ko bieži veica radiologi pētījumos (Krupinski, 2010; Nguyen et al., 2018). Plaušu mezgliņi ir viena no agrīnām klīniskajām atradnēm, kura ir raksturīga plaušu audzējam. Šī iemesla dēļ, pareiza plaušu mezgliņu noteikšana plaušu attēlos ir priekšnoteikums savlaicīgai ārstēšanas uzsākšanai. Tomēr bieži mezgliņi paliek nepamanīti tādēļ, ka tie izskatās līdzīgi kā plaušu asinsvadi šķērsgrīzumā. Jāpiebilst, ka arī citām patoloģisko izmaiņu atradnēm plaušās ir raksturīga aplūveidīgā forma, un to izskatam ir būtiska loma diferenciāldiagnozē. Piemēram, plaušu dobumi atšķīras no cistām ar sienas biezumu, tā arī asinsvadiem var būt vairāk un mazāk izteiktas sienas (Cosgrove et al., 2005). Katrā no pieminētiem klīniskiem gadījumiem būs atšķīrīga diferenciāldiagnoze, kas norāda uz to, ka medicīnas speciālistiem ir svarīgi izšķīrt ļoti mazas izmaiņas objektos uz ekrāna.

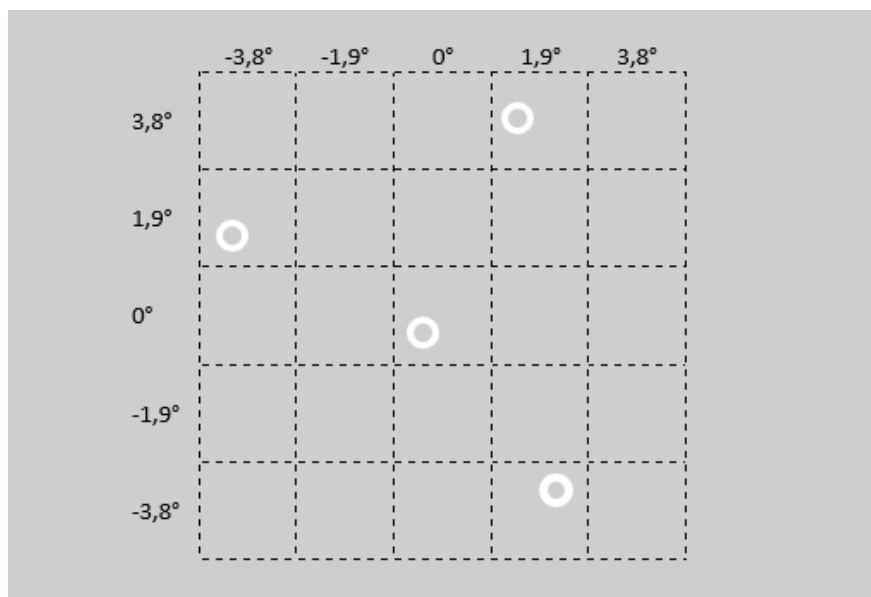
Attēla fizikālo parametru ietekmes izpētei konstanto stimulu metodē tika izvēlēti trīs mainīgie: līnijas platuma atšķīrība (raksturojot mērķa-distraktora līdzību), elementu skaits un dziļuma segments. Mērķa elements atšķīrās no distraktoriem ar aplū līnijas platumu, kurš bija par 10 %, 15 %, 20 % un 25 % lielāks aplū centra virzienā (skat. 3.4. tab.). Jaatzīmē, ka procentuālais novērtējums raksturo līnijas platuma atšķīrības starp mērķa elementu un distraktoriem lenķiskajos izmēros nevis to fiziskajos izmēros. Pieaugot aplū līnijas platuma atšķīrībai, samazinājās mērķa-distraktora līdzība.

Meklējamo elementu veidi

	distraktors	mērķa elements atkarībā no līnijas platuma atšķirības			
		+ 10 %	+ 15 %	+ 20 %	+ 25 %
shematiskais zīmējums					
līnijas leņķiskais platums	6,0'	6,6'	6,9'	7,2'	7,5'

Uz vienas ekrāna plaknes varēja tikt projicēti 2, 3, 4 un 5 apli. Tādējādi kopumā redzes stimulā ietvēra 20, 30, 40 un 50 aplis uz desmit plaknēm. Tas ir elementu skaits meklēšanas uzdevumā. Ekrāna optiskais elements bija nosacīti iedalīts divos dziļuma segmentos (priekšējā un mugurējā), lai noteiktu, vai meklēšanas sniegums mainās, kad redzes stimulā tiek demonstrēts tuvāk vai dziļāk ekrāna optiskajā elementā tuvajā skatīšanās attālumā. Priekšējais segments ietvēra dalībniekam vistuvākās optiskā elementa plaknes, un mugurējais – vistālākās. Balstoties uz vizuālās meklēšanas procesus aprakstošo modeli (Wolfe, 2007) un eksperimentālo pētījumu atradnēm (Hooge & Erkelens, 1999; Pashler, 2004; Santhi & Reeves, 2004; Wienrich et al., 2009; Becker, 2011; Pomplun et al., 2013) tika sagaidīts, ka palielinoties mērķa-distraktora līdzībai un elementu skaitam, samazināsies mērķa elementa redzamība un pieaugs meklēšanas uzdevuma grūtība, jo līdz ar mērķa-distraktora līdzības samazināšanos paliek grūtāk noteikt mērķa elementu redzes ainā (galvenokārt balstoties uz redzes informācijas apstrādi redzes lauka perifērijā) un izšķirt to (informācijas apstrāde centrālajā redzē), kas ietekmē vizuālajā meklēšanā iesaistītos kognitīvus procesus.

Katras ekrāna plaknes centrālā daļa ($4,75^\circ \times 4,75^\circ$) bija sadalīta neredzamā vienāda izmēra kvadrātu režģī ar viduslīnijām 0° , $1,9^\circ$ un $3,8^\circ$ leņķiskajos attālumos, skaitot no ekrāna plaknes centra. Katrā kvadrātā varēja tikt demonstrēts viens no apliem saskaņā ar izvēlēto elementu skaitu uz plaknes izpildoties vairākiem nosacījumiem. Pirmkārt, katras plaknes ietvaros apliem nevarēja būt kopējo punktu. Otrkārt, lai nodrošinātu mērķa elementa relatīvās atrašanās vietas noteikšanu saskaņā ar atbilstošajiem variantiem, mērķa elements nevarēja būt projicēts kvadrātos ar viduslīniju 0° . Tomēr citi apli (distraktori) varēja tikt parādīti arī kvadrātos ar viduslīniju 0° . Piemēru atbilstošajam aplu izkārtojuma uz vienas no ekrāna plaknēm var redzēt 3.6. attēlā.

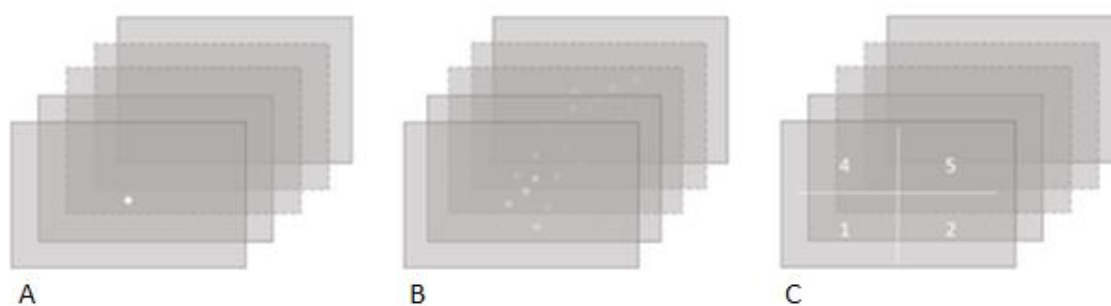


3.6. att. Aplū izkārtojuma piemērs vienam no attēla slāņiem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, kad meklēšanas uzdevumā uz katras plaknes attēlo četrus elementus. Aplis ar platāku līniju (jeb mērķa elements) atrodas kvadrātā ar koordinātēm $x = 1,9^\circ$, $y = -3,8^\circ$. Šajā attēlā stimulu izkārtojuma mērogs nav atbilstošs volumetriskā daudzplakņu ekrāna lielumam, koordinātes un līnijas netika attēlotas uz ekrāna.

Z-virzienā mērķa elements tika attēlots uz vienas no 6.-10. plaknes izvēlētajā dziļuma segmenta ietvaros. Vistuvākās dalībniekam segmenta plaknes neietvēra mērķa elementu uzdevuma sākumā, lai novērstu iespējamo *pop-out* efektu, kas varēja radīties izteiktas elementa dziļuma komponentes dēļ (*O'Toole & Walker, 1997; Finlayson & Grove, 2015; Pewan & Rinkenauer, 2018; Farel & Ng, 2019*).

Pirms katra meklēšanas uzdevuma uz vienu sekundi parādījās gaišs fiksācijas krusts attiecīgi priekšējā vai mugurējā segmenta pirmās plaknes centrā. Fiksācijas krusta lielums bija $0,5^\circ$. Dalībniekam bija jāsaģlabā skatiens uz tā. Uzreiz pēc fiksācijas krusta tika projicēti apli uz desmit secīgām ekrāna plaknēm (1.-10. vai 11.-20.) un sākas meklēšanas uzdevums. Uzdevuma izpildīšanas laiks bija neierobežots.

Dalībnieka uzdevums bija pareizi un ātri noteikt mērķa elementa relatīvu atrašanās vietu uz ekrāna attiecībā pret ekrāna viduslīnijām (nebija attēlotas uz ekrāna). Meklēšanas uzdevuma mēģinājums beidzās tad, kad dalībnieks nospieda atstarpes taustiņu uz datora tastatūras. Pēc atstarpes taustiņa nospiešanas, uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna parādījās četri atbilžu varianti (piespiedu izvēles procedūra ar četrām alternatīvām) pirmajā plaknē attiecīgajā dziļuma segmentā (skat. 3.7. att.). Dalībniekam bija jāizvēlas viena no četrām atbildēm, atbildot, kurā no kvadrantiem redzēja mērķa elementu. Pēc atbildes sniegšanas parādījās fiksācijas krusts, un sekoja nākamais meklēšanas uzdevuma mēģinājums.



3.7. att. Meklēšanas uzdevuma secība. Vispirms dziļuma segmenta priekšējās plaknes centrā parādījās fiksācijas krusts uz vienu sekundi (A). Tad sekoja meklēšanas uzdevums, šeit ilustrēts, kā apļu kopums uz desmit ekrāna plaknēm, līdz atstarpes pogas nospiešanas (B). Atbildes sniegšanas laikā dalībniekam tika parādīti četri atbilžu varianti, no kurām bija jāizvēlas viena atbilde, raksturojot kurā no kvadrantiem bija noteikts mērķa elements (C).

Dalībnieki pildīja meklēšanas uzdevumus 45 cm skatīšanās attālumā no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Pēc īsas adaptācijas mezopiskajiem redzes apstākļiem un instrukcijas sniegšanas, katrs dalībnieks pildīja desmit meklēšanas uzdevumus, lai iepazītos ar redzes stimulu, uzdevumu un daudzslāņu attēla navigāciju uz volumetriskā ekrāna. Šajā laikā pētījuma operators sniedza atbildes uz precizējošiem dalībnieka jautājumiem par mērķa elementa izskatu un attēlu navigāciju, ja tādi ir bijuši. Iepazīšanas uzdevumu parametri bija sekojoši – mērķa elementam bija 20 % platāka līnija un kopā bija projicēti 30 apļi priekšējā segmentā. Turpmākā datu apstrādē un analīzē šie rezultāti netika ņemti vērā.

Tad sekoja pētījuma meklēšanas uzdevumi. Apļa līnijas platuma palielinājums, elementu skaits un dziļuma segments tika mainīti vizuālās meklēšanas uzdevumos pēc nejaušības principa. Ar katru no uzdevuma parametru kombinācijām, dalībnieki veica divdesmit meklēšanas uzdevumu mēģinājumus. Kopumā eksperimentā bija 4 (apļa līnijas platuma atšķirības) $\times 4$ (elementu skaits) $\times 2$ (dziļuma segmenti) $\times 20$ (atkārtojumi) = 640 uzdevumu mēģinājumi.

Lai turpmāk noteiktu medicīnas speciālistu profesionālās meklēšanas pieredzes ietekmi, tika izvēlēti tādi fizikālie parametri, pie kuriem tika pierādītas būtiskās atšķirības meklēšanas sniegunā telpiskajos attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna (aprakstīti Rezultātu sadaļā). Ņemot vērā, ka medicīnas speciālistiem bija ierobežots laiks dalībai pētījumā, meklēšanas uzdevumi tika veikti piecas reizes ar katru no mainīgo lielumu pāriem. Dalībnieki sēdēja 60 cm attālumā no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Kopumā katrs dalībnieks izpildīja divdesmit vizuālās meklēšanas uzdevumus pēc trim izmēģinājuma uzdevumiem.

3.3.3. Trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģijas noteikšana

Attēlojot vizuālās meklēšanas elementus uz vairākām ekrāna plaknēm un ļaujot pētījuma dalībniekiem mainīt attēla slāņu novietojumu optiskā elementa ietvaros, mēs varējām noteikt, kā tiek izskatīti trīsdimensionāli attēli uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna atkarībā no fizikālajām īpašībām. Proti, tika uzzināts, vai samazinoties mērķa elementa redzamībai, cilvēks meklē informāciju aplūkojot trīsdimensionāla attēla kopainu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna vai tomēr samazina demonstrējamās informācijas apjomu, apskatot attēla slāņus selektīvā veidā.

Iepriekšējā sadaļā aprakstīts uzdevums tika izmantots, lai noteiktu attēlu izskatīšanas stratēģiju atkarībā no fizikālajām īpašībām. Meklēšanas uzdevuma sākumā visi elementi bija projicēti uz desmit secīgām ekrāna plaknēm. Meklējamie elementi varēja tikt projicēti uz ekrāna plaknēm tuvāk vai tālāk no pētījuma dalībnieka izmantojot datora tastatūras “uz augšu” un “uz leju” bultiņas (divi pārvietojumu virzieni). Kad dalībnieks vienreiz nospieda “uz augšu”, visi apli “pārvietojās” par vienu ekrāna plakni tuvāk dalībniekam, izņemot apļus, kuri bija uz vistuvākās dalībniekam plaknes pirms šīs rīcības, un tie uz laiku pazuda no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Savukārt, kad dalībnieks vēlējās atgriezt noņemtus apļus uz ekrānu (mainot pārvietojumu virzienu), viņš nospieda “uz leju”, un apli “pārvietojās” par vienu plakni dziļāk. Attēlu slāņu pārvietojumu laikā aplu leņķiskais izmērs un savstarpējais attālums bija saglabāts nemainīgs, savukārt, to fiziskais izmērs un attālums mainījās saskaņā ar skatīšanās attālumu no dalībnieka acīm līdz katrai no ekrāna plaknēm.

Katrā no pārvietojumu virzieniem maksimāli varēja būt veikti deviņi pārvietojumi. Pārvietojumu skaits un pārvietojumu virziena maiņu skaits nebija ierobežots uzdevumā. Līdzīgi kā medicīnisko attēlu izskatīšanas stratēģiju izpētē (*Drew et al., 2013*), mēs izvēlāmies nodrošināt attēlu navigāciju izmantojot datora tastatūru, tādēļ, ka mūsu mērķis bija kvantitatīvi raksturot attēla izskatīšanas stratēģiju, un diskrēti datora tastatūras pogu klikšķi ļāva samazināt nejaušu kustību troksni. Tādējādi, pierakstot attēla slāņu izmaiņu secību uz ekrāna plaknēm, mēs varējām izsekot attēla navigācijai z -virzienā, ko dalībnieki izmantoja izskatot telpiski attēlotus daudzslāņu attēlus.

3.4. Datu analīze

Divās izveidotās programmās redzes stimulu ģenerēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna tika reģistrēti dati *comma-separated values* formāta dokumentos. Trīsdimensionālu attēlu uztveres novērtēšanas programmas dokumentos bija atrodama sekojoša informācija par katru no mēģinājumiem: uzdevuma izpildīšanas laiks (sākot ar apli parādīšanās brīdi uz ekrāna līdz dalībnieka atbildes iesniegšanas nospiežot tastatūras pogu) un atbildes pareizība (1/0

veidā). Atbilde tika vērtēta kā pareiza vai nepareiza atkarībā no tuvākā apļa atrašanās virziena uz ekrāna pret centru un izvēlētas atbildes. Datu analīzei tika aprēķināts pareizo atbilžu īpatsvars procentos – pareizo atbilžu skaits dalīts ar visu mēģinājumu skaitu, – katrai no neatkarīgo mainīgo kombinācijām.

Mērķa elementa redzamības ietekmes noteikšanas programmas dokumentos bija atrodama sekojoša informācija par katru no mēģinājumiem: meklēšanas laiks (noteikts no brīža, kad apļi parādījās uz ekrāna plaknēm līdz brīdim, kad dalībnieks nospieda atstarpes taustiņu, lai pabeigtu attēla izskatīšanu), atbildes pareizība un attēla slāņu pārvietojumu secība. Laika izmaiņas atkarībā no elementu skaita tika aprakstītas ar funkcijām. Uzdevums tika uzskatīts par pareizi paveikto, ja tika izvēlēts kvadrants, kurā atradās mērķa elements.

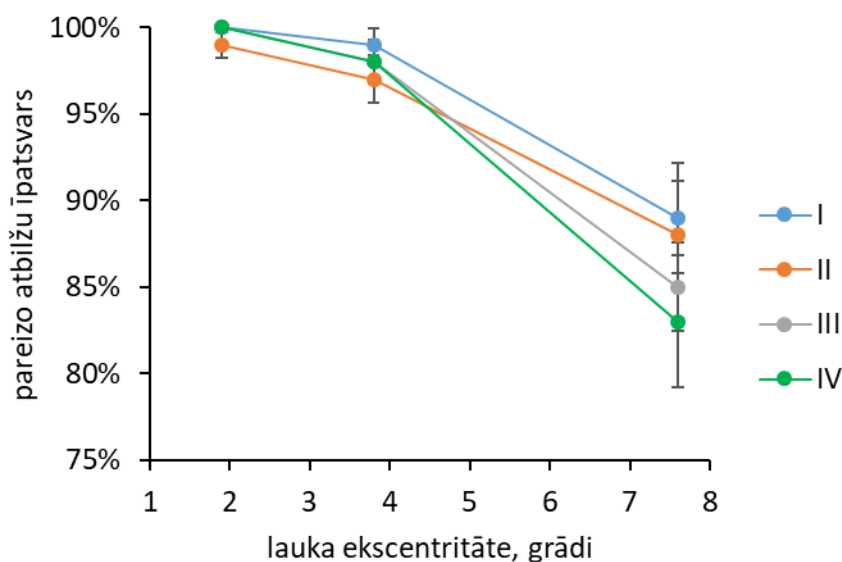
Lai izpētītu attēlu izskatīšanas stratēģiju, tika analizēti vairāki lielumi no attēlu slāņu pārvietojumu secības. Pirmkārt, katram uzdevumam tika saskatīts kopējais attēla slāņu pārvietojumu skaits, lai raksturotu, cik daudzas reizes dalībnieks veica redzes informācijas izkārtojuma un apjoma izmaiņas atkarībā no stimulu fizikālajām īpašībām meklējot mērķa elementu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Otrkārt, tika apskatīts, cik reizes dalībnieki mainīja attēla slāņu pārvietojumu virzienu. Piemēram, ja dalībnieks noņēma vistuvākos attēla slāņus no ekrāna vairākas reizes nospiežot bultiņu “uz augšu”, un tad atgriezta attēla slāņi, nospiežot bultiņu “uz leju”, tas tika skaitīts kā viena pārvietojumu virziena maiņa.

Nosakot medicīnas speciālistu attēlu izskatīšanas stratēģiju, analīze bija papildināta ar vēl vienu parametru – noņemtā attēla daļu. Dalībnieks varēja noņemt gandrīz visus attēla slāņus vai tikai kādu mazu daļu no tiem meklējot mērķa elementu uz ekrāna. Ņemot vērā, ka radiologiem ir raksturīga spēja efektīvi uztvert kopainu, mēs vēlāmies noteikt, cik lielu telpiskā attēla daļu pārvieto dalībnieks ar atšķirīgo darba stāžu radioloģijā atkarībā no redzes stimulu fizikālajām īpašībām, ja attēls ir demonstrēts uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Lai raksturotu noņemtā attēla daļu, mēs definējām trīs pamata veidus, iedvesmojoties no pētījumiem, kuros analizēja daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģiju (*Venjakob et al.*, 2012; *Den Boer et al.*, 2018). “Nav izmaiņu” nozīmē, ka dalībnieks izskatīja visu telpisko attēlu uz ekrāna bez attēla slāņu pārvietojumiem. “Attēla mazākā daļa” nozīmē, ka tikai pieci (vai mazāk) volumetriskā 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” uzdevuma izpildīšanas laikā. Visu datu analīze tika veikta izmantojot programmu *R Statistical Software*.

4. REZULTĀTI

4.1. Trīsdimensionālu attēlu uztvere

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 4.1. attēlā, kurā ir apkopoti vidējie pareizo atbilžu īpatsvara rezultāti. Tikai dažas kļūdas bija pieļautas, kad redzes stimulā bija attēlots II segmentā. Tādējādi, kopumā bija sasniegts visaugstākais pareizo atbilžu īpatsvars, un tas būtiski nemainījās, kad redzes stimulā bija parādīts dažādos dziļuma segmentos.



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

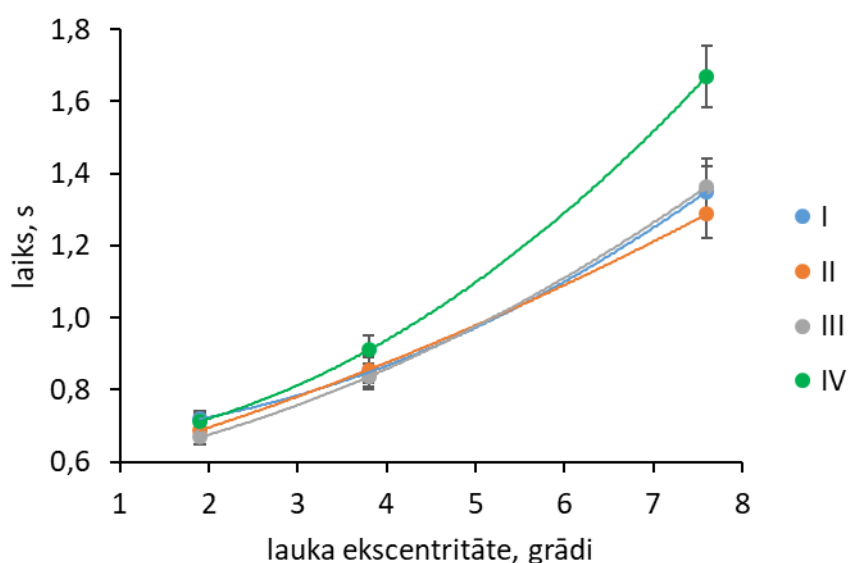
Salīdzinot ar vismazāko testētu lauka ekscentritāti, vidēji par 2 % samazinājās sniegums, kad apli bija novietoti 3,8° lauka ekscentritātē. Vēl vairāk palielinot lauka ekscentritāti, pareizo atbilžu īpatsvars redzami samazinājās, jau nosakot apli savstarpējo novietojumu vistuvākajā dziļuma segmentā. 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).

Neatkarīgo mainīgo ietekmes nozīmīgums bija aprēķināts izmantojot varbūtības proporciju (*Likelihood ratio*) testu. Statistiskajā analīzē 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, statistiskā analīzē 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 stimuls tika radīts tālākajos dziļuma segmentos ($z = -2,56, p = 0,01$). Tomēr pareizo atbilžu īpatsvars būtiski nemainījās, salīdzinot sniegumu, kad redzes stimuls bija demonstrēts I un II segmentā ($z = -1,11, p = 0,27$), kā arī II un III ($z = -0,84, p = 0,40$).

Papildus pareizo atbilžu īpatsvaram, tika apskatīts, cik ilgs laiks bija nepieciešams redzes uzdevuma izpildīšanai, kad trīsdimensionāls attēls tika projicēts dažādās vietās ekrāna optiskā elementa matricā. 4.2. attēlā ir parādīti vidējie uzdevuma izpildīšanas laiki katrai no neatkarīgo mainīgo kombinācijām. Ir redzams, ka dalībnieki spēja ātri atrast mērķa elementu ar atšķirīgo dziļumu un sniegt atbildi par tā atrašanās virzienu uz ekrāna, kad meklējamie elementi bija attēloti salīdzinoši tuvu viens otram. Savukārt, vidējais uzdevuma izpildīšanas laiks paildzinājās palielinoties lauka ekscentritātei.



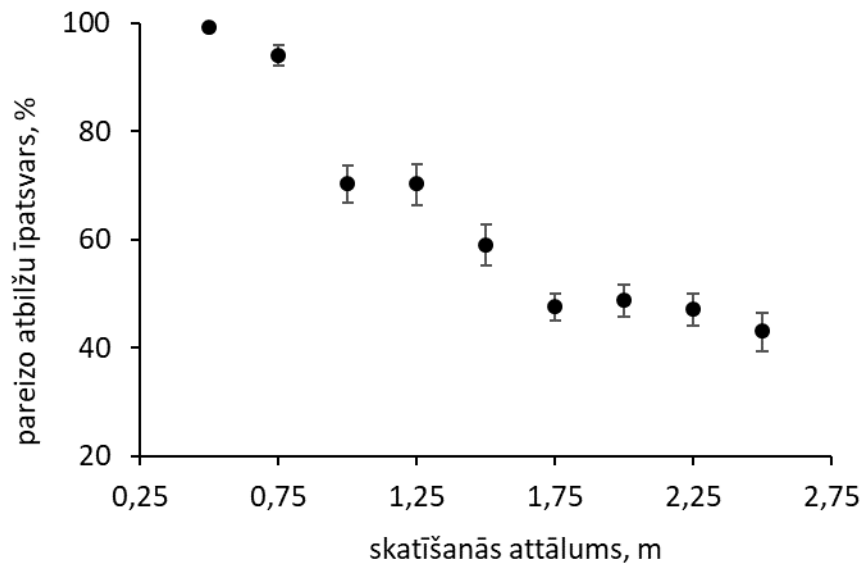
4.2. att. Meklēšanas uzdevuma izpildīšanas laiks atkarībā no redzes stimula izkārtojuma ekrāna optiskā elementa matricā (elementu lauka ekscentritātes un dziļuma segmenta).

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 [$\chi(2,6) = 9,70, p = 0,14$]. Galvenokārt uzdevuma izpildīšana aizņēma mazāk par vienu sekundi, kad apli bija attēloti $1,9^\circ$ un $3,8^\circ$ lauka ekscentritātē. Dalībnieki patērēja visīsāko laiku, kad sprieda par samērā tuvu projicēto apli relatīvo dziļumu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Vidēji, tas variēja no 663 ± 22 ms līdz 755 ± 35 ms, kad redzes stimulš bija projicēts dažādos volumetriskā 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 stimulšu 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 (meklējamie 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 ekscentritātē ($7,6^\circ$).

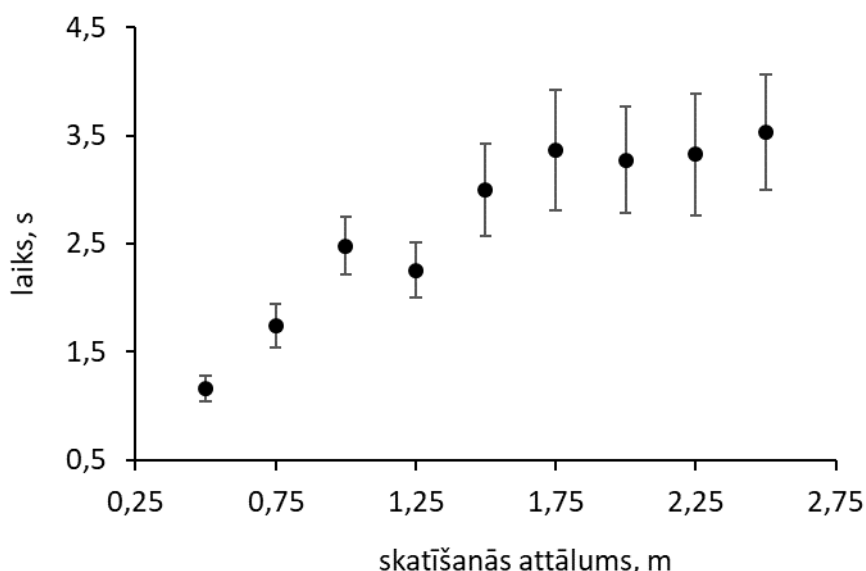
Arī izvērtējot trīsdimensionālu attēlu uztveri dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna, tika apkopoti dati par pareizo atbilžu īpatsvaru un laiku, veicot dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumu. Vidējie pareizo atbilžu īpatsvara rezultāti ir attēloti 4.3. attēlā. Ir redzams, ka vistuvākajā skatīšanās attālumā dalībnieki spēja pareizi atrast mērķa elementu ar atšķirīgo relatīvo dziļumu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tādējādi visaugstākais pareizo atbilžu īpatsvars 99 ± 1 % bija sasniegts 0,5 m skatīšanās attālumā. Tomēr dalībniekam attālinoties no volumetriskā daudzplakņu 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.



4.3. 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 volumetriskajam daudzplakņu ekrānam, tika izmantota vienfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīze (ANOVA) atkarīgām grupām, kur skatīšanās attālums tika norādīts kā iekšējais mainīgais. 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 izmantojot t-testus parādīja, ka kopumā pareizo atbilžu īpatsvars samazinājās pakāpeniski bez statistiski 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 pareizo atbilžu īpatsvarā ($p < 0,001$).

Mēs izskatījām, cik ilgs laiks tika patērēts meklēšanas uzdevuma izpildīšanai, kad cilvēks atradās dažādos attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. 4.4. attēlā ir attiecīgi apkopoti vidējie rezultāti. Ir redzams, ka uzdevuma izpildīšanas laiks pakāpeniski pieauga cilvēkam attālinoties no ekrāna. Salīdzinot datus vistālākajā un vistuvākajā skatīšanās attālumā, laiks vidēji pieauga vairāk kā trīs reizēs. Vienfaktoru atkārtoto mērījumu dispersijas analīzes (ANOVA) rezultāti norādīja, ka uzdevuma izpildīšanas laiks būtiski mainījās dažādos skatīšanās attālumos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna [$F(2,6; 49,9) = 12, p < 0,001$].



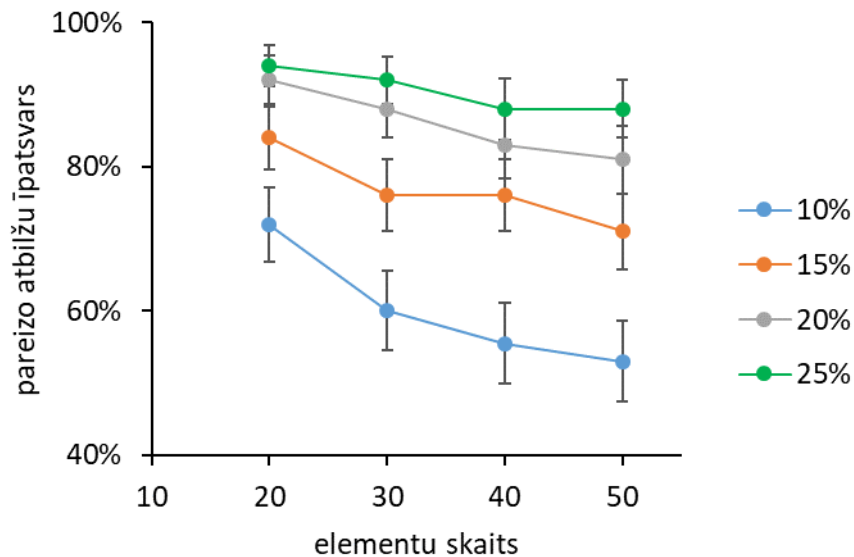
4.4. att. Vidējais dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevuma izpildīšanas laiks dažādos skatīšanās attālos no volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Post hoc analizē ar t-testiem bija apliecināts, ka pētījuma 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 attālos mazākos par 0,75 m, lai dalībniekiem būtu viegli noteikt meklējamo elementu savstarpējo izkārtojumu optiskā elementa dziļumā.

4.2. 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 volumetriskā daudzplakņu 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.

Sākumā tika analizēts pareizo atbilžu īpatsvars. Apkopojot gūtos rezultātus, tika noskaidrots, ka visaugstākais vidējais sniegums bija demonstrēts, kad mērķa elements atšķīrās no visiem pārējiem 19 apliem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna ar 25 % palielinātu līnijas platumu (94 ± 3 %). Tomēr, kā redzams 4.5. attēlā, pareizo atbilžu īpatsvars samazinājās palielinoties gan mērķa-distraktora līdzībai, gan elementu skaitam.



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

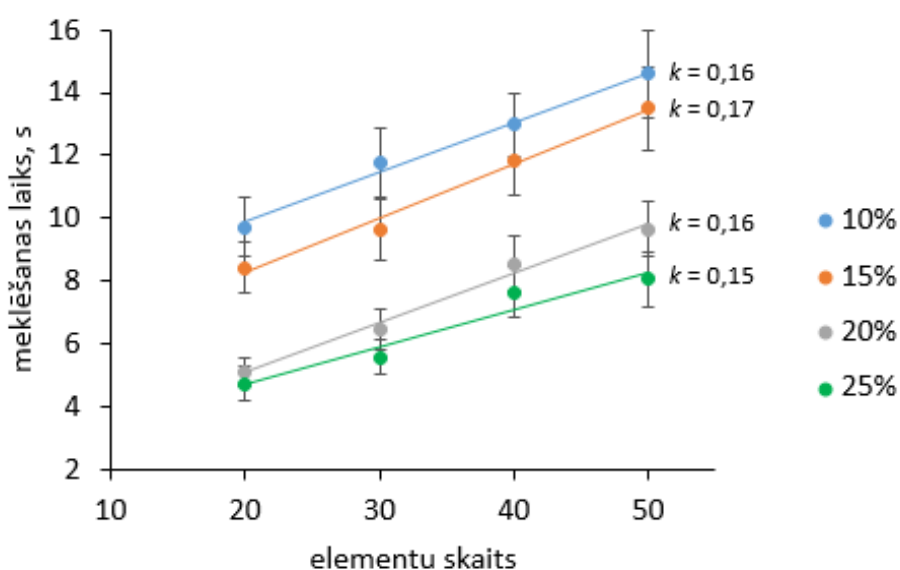
Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) bija apliecināts, ka pareizo atbilžu īpatsvaru būtiski ietekmēja gan mērķa-distraktora līdzība [$F(3,57) = 141,80, p < 0,001$], gan kopējais elementu skaits meklēšanas uzdevumā [$F(3,57) = 36,50, p < 0,001$]. Turklāt tika noteikta statistiski būtiskā mijiedarbība starp šiem ietekmējošiem faktoriem [$F(9,171) = 2,78, p = 0,005$]. Šīs atradnes interpretācija ir redzama 4.5. 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 apla 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 uzdevumos ar dažādu mērķa-distraktora līdzību un elementu skaitu uz ekrāna, turpmāk tika izmantota savstarpēji atkarīgu izlašu vidējo vērtību salīdzināšanas metode. Ar t-testiem tika noskaidrots, ka meklēšanas uzdevumos pakāpeniski samazinoties mērķa-distraktora līdzībai būtiski palielinājās pareizo atbilžu īpatsvars ($p < 0,03$), izņemot rezultātus meklēšanas uzdevumos ar 20% un 25% palielinātu apla līnijas platumu, kuri nebija statistiski nozīmīgi atšķirīgi ($p > 0,05$).

Post hoc analīzē tika noteikts, ka meklējot mērķa elementu ar 25% lielāku apla 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 atšķirās 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 par desmit elementiem ($p > 0,20$).

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. Pētījumā gūtās vidējās meklēšanas laika vērtības ir atspoguļotas 4.6. attēlā.



4.6. att. Vidējais meklēšanas laiks visiem dalībniekiem atkarībā no apla līnijas platuma atšķirības uzdevumos ar dažādu elementu skaitu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ir norādīti lineāro funkciju slīpuma koeficienti (k).

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 samazinoties 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 aplu līnijas platumā. Turklāt ir 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 vidējais 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. Jāpiebilst, ka nebija pierādīta statistiski nozīmīga ietekme uz gūtiem rezultātiem 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 % apļa 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 ($p < 0,01$). Aprakstot laiku atkarībā no elementu skaita ar lineāro funkciju, tika noteikts, ka līniju slīpuma koeficienti bija līdzīgi uzdevumos ar dažādu mērķa-distraktora līdzību.

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 apļa 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 apļu līnijas platumu bija par 15 % un 25 % lielāks mērķa elementiem salīdzinot ar distraktoriem. Proti, pareizo atbilžu īpatsvars bija augstāks, kad mērķa elementa līnijas platumu bija par 25 % lielāks nekā distraktoriem, norādot uz to, ka uzdevums bija samērā viegli paveicams. Savukārt mainoties mērķa elementa līnijas platumu 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. Tādēļ 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 sniegunā, 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. 4.1. tabulā ir norādītas vidējās pareizo atbilžu skaita vērtības katrā no šīm dalībnieku grupām. 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. Kā redzams, dalībnieki izpildīja lielāku daļu no meklēšanas uzdevumiem pareizi. Visaugstākais pareizo atbilžu skaits bija novērojams meklēšanas uzdevumos, kad uz volumetriskā daudzplakņu 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).

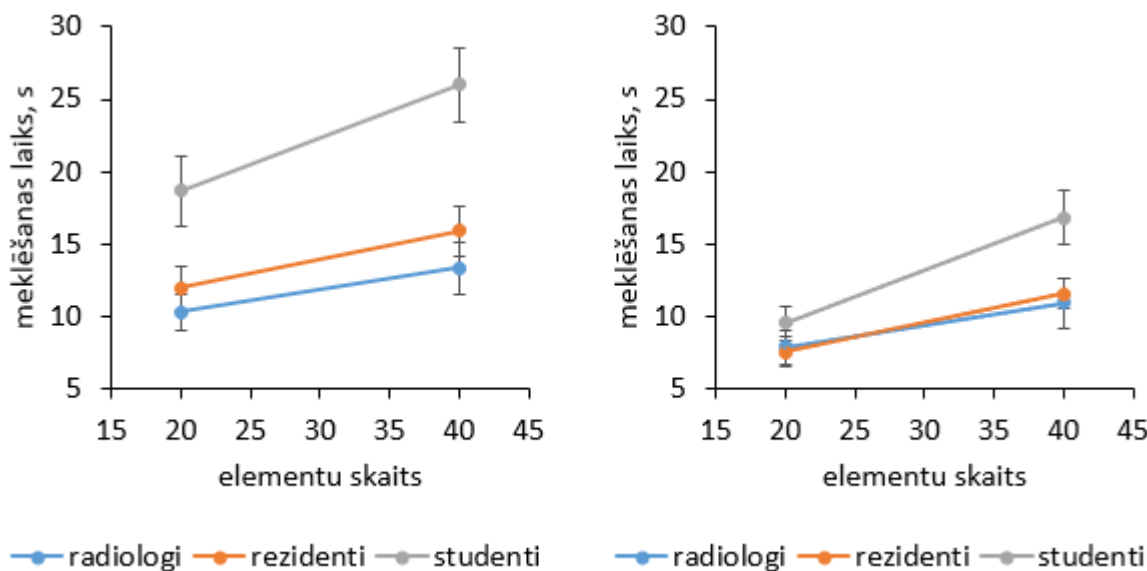
4.1. tabula

Vidējais pareizi izpildītu meklēšanas uzdevumu skaits (SE) atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna

uzdevuma parametri		radiologi	rezidenti	Studenti
augsta mērķa-distraktora līdzība (15 % atšķirība)	mazs skaits	4,1 (0,3)	4,0 (0,3)	3,5 (0,2)
	liels skaits	3,6 (0,3)	3,9 (0,3)	3,5 (0,2)
zema mērķa-distraktora līdzība (25 % atšķirība)	mazs skaits	4,6 (0,2)	4,4 (0,2)	4,5 (0,1)
	liels skaits	4,4 (0,3)	4,3 (0,2)	4,0 (0,2)

Atšķirības pareizo atbilžu skaitos tika analizētas salīdzinot datus pa pāriem atsevišķi katram no mainīgiem, izmantojot neparametriskās savstarpēji atkarīgo izlašu salīdzināšanas metodes. Statistiskā analīze, pielietojot Vilkoksona rangū zīmju testu, norādīja, ka mērķa-distraktora līdzība būtiski ietekmēja pareizo atbilžu skaitu ($p < 0,001$), bet ne kopējais elementu skaits uz ekrāna ($p = 0,33$). Turklāt, statistiski nozīmīgas atšķirības nebija novērojamas salīdzinot pareizo atbilžu skaitu dažādās dalībnieku grupās izmantojot Vilkoksona rangū summas testu ($p = 1,00$). Tādējādi visi pētījuma dalībnieki spēja atrast informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Vidējais meklēšanas sniegums variēja tikai atkarībā no tā, cik lielā mērā atšķīrās mērķa elements no visiem pārējiem.

Papildu pareizo atbilžu skaitam, tika noteikts, cik ilgs laiks bija nepieciešams radiologiem, rezidentiem un medicīnas studentiem, lai atrastu mērķa elementu telpiskajos attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. 4.7. attēlā ir parādīts vidējais meklēšanas laiks katrai no mainīgo kombinācijām.



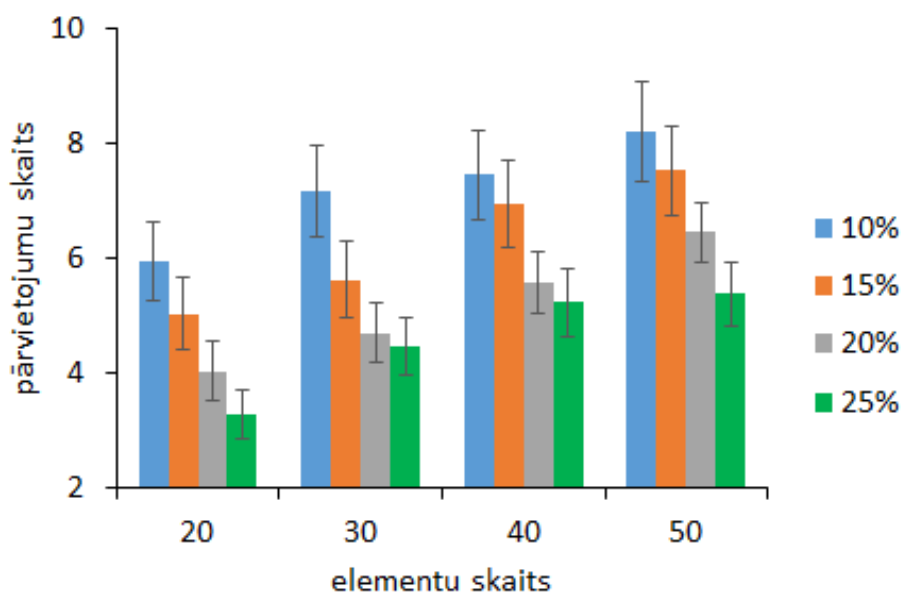
4.7. att. Vidējais meklēšanas laiks atkarībā no elementu skaita meklēšanas uzdevumos ar augstu mērķa-distraktora līdzību (pa kreisi) un zemu mērķa-distraktora līdzību (pa labi).

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 iegūtos rezultātus. Atšķirībā no pareizo atbilžu skaita, meklēšanas laiks ievērojami atšķirās arī dažādās pētījumu dalībnieku grupās [$F(2,44) = 4,00, p = 0,025$]. Nebija noteikta statistiski būtiska mijiedarbība starp iepriekš nosauktajiem faktoriem ($p > 0,05$).

Ar t-testu palīdzību tika precizēts, ka studenti patērēja ievērojami ilgāku laiku meklējot informāciju volumetriskā daudzplakņu ekrāna attēlos salīdzinot ar rezidentiem ($p = 0,04$) un radiologiem ($p = 0,002$). Savukārt radiologiem un rezidentiem 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.

4.3. 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 trīsdimensionālu attēlu izskatu, “pārvietojot” attēlu slāņus tuvāk un dziļāk ekrāna plakņu ietvaros. Proti, pētījuma dalībniekam bija nodrošināta izvēle daudzslāņu attēlu aplūkošanā – izskatīt visu telpiskā attēla kopainu, vai pielietot iestrādāto navigācijas sistēmu un noņemt daļu no attēla vienlaikus pietuvinot sākotnēji dziļāk projicētos attēla slāņus, uz ekrāna meklējot mērķa elementu ar zināmo pazīmi. Rezultātā tas atspoguļojās attēlu izskatīšanas stratēģijā, kas šajā pētījumā tiek aprakstīta analizējot attēla slāņu pārvietojumu skaitu un pārvietojumu virziena maiņu skaitu. Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) apliecināts, ka dalībnieki veica līdzīgu pārvietojumu skaitu aplūkojot attēlus priekšējā un mugurējā segmentā [$F(1,19) = 0,04$, $p = 0,85$]. Visi gūtie rezultāti attēlu pārvietojumu skaitiem atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām ir apkopoti 4.8. attēlā.



4.8. att. Vidējais pārvietojumu skaits visiem dalībniekiem atkarībā no atšķirības apļu līnijas platumā meklēšanas uzdevumos ar dažādu elementu skaitu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

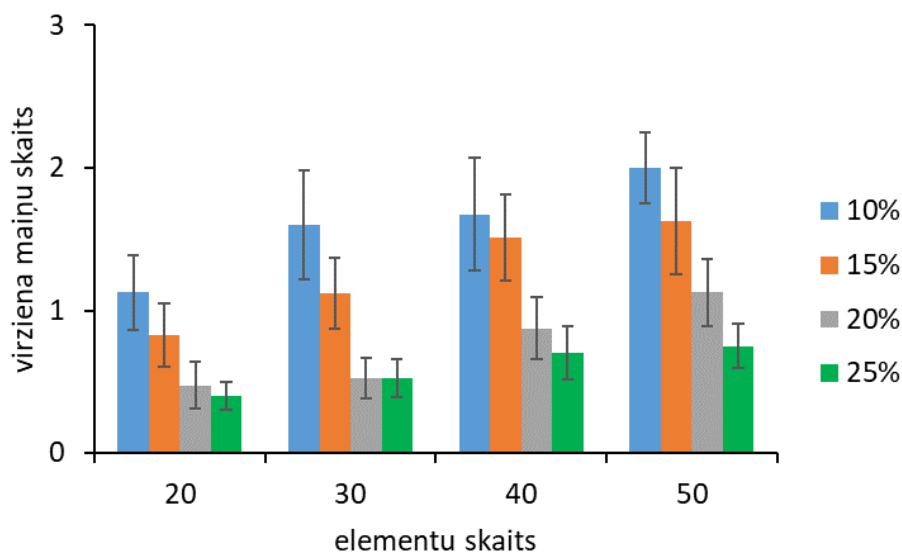
Atkārtoto mērījumu dispersijas analīzē (ANOVA) izvērtējot, kādu attēlu izskatīšanas stratēģiju pielietoja pētījuma dalībnieki, tika noteikts, ka attēlu slāņu pārvietojumu skaits būtiski mainījās gan mērķa-distraktora līdzības iespaidā [$F(2,32) = 11,94$, $p < 0,001$], gan kopējā meklējamo elementu skaita iespaidā [$F(2,38) = 27,58$, $p < 0,001$].

Meklēšanas uzdevumā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna lielākais pārvietojumu skaits vienā virzienā (uz priekšu vai atpakaļ dziļumā) ietvēra deviņus klikšķus. Tā kā attēlu izskatīšanas laikā varēja neierobežoti mainīt attēlu slāņu pārvietojumu virzienu, kopējais

pārvietojumu skaits varēja arī pārsniegt deviņus klikšķus. Visbiežāk attēlu slāņi tika pārvietoti volumetriskā ekrāna plaknēs, kad mērķa elements atšķīrās par 10 % aplū līnijas platumā no pārējiem 49 elementiem uz ekrāna (9 ± 1 reizes). Savukārt atšķirības lielumam pieaugot līdz 25 %, vidējais attēlu slāņu pārvietojumu skaits nepārsniedza 5 ± 1 reizes.

Lai savstarpēji salīdzinātu attēlu slāņu pārvietojumu skaitus meklēšanas uzdevumos ar dažādu mērķa-distraktora līdzību atkarībā no demonstrētā elementu skaita, tika izmantota savstarpēji atkarīgu izlašu vidējo vērtību salīdzināšanas metode. *Post hoc* analizē tika noskaidrots, ka palielinot elementu skaitu par desmit apliem, 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 meklēšanas uzdevumos ar 20 un 30 apliem, kā arī 40 un 50 apliem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna ($p = 1,0$).

4.9. attēlā ir redzams, ka dalībnieki salīdzinoši reti mainīja attēlu slāņu pārvietojumu virzienu, meklējot mērķa elementu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Neskatoties uz to var atzīmēt, ka pārvietojumu virziena maiņu skaits pieauga samazinoties mērķa elementa redzamībai uz ekrāna.

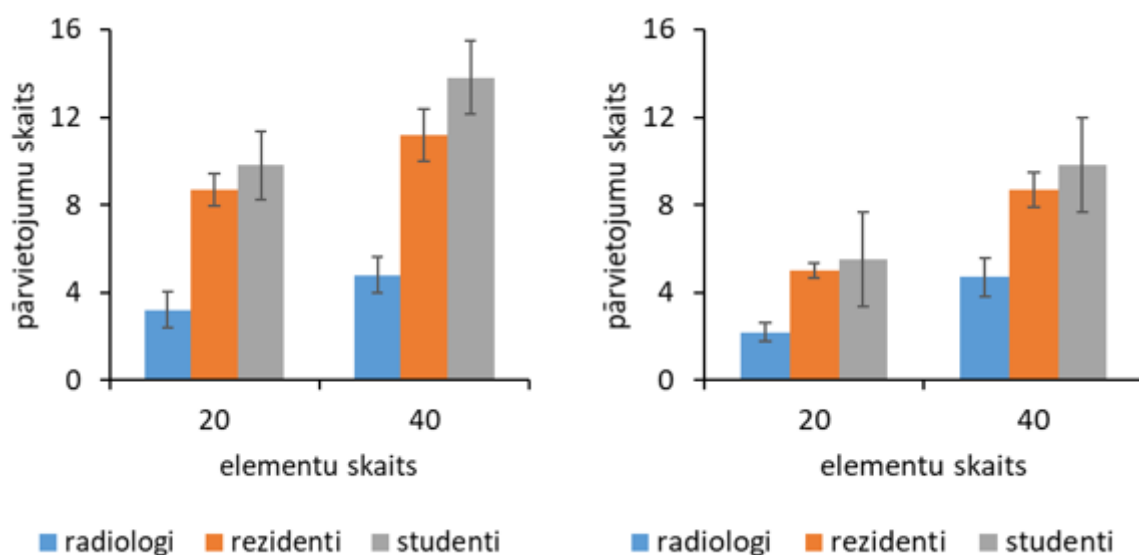


4.9. att. Vidējais pārvietojumu virziena maiņu skaits atkarībā no atšķirības apla līnijas platumā meklēšanas uzdevumos ar dažādu elementu skaitu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Atkārtoto mērījumu dispersijas analizē (ANOVA) tika noteikts, ka attēlu slāņu pārvietojumu virziena maiņu skaits būtiski mainījās gan mērķa-distraktora līdzības iespaidā [$F(3,9) = 16,08$, $p < 0,001$], gan meklējamo elementu skaita iespaidā [$F(3,9) = 42,36$,

$p < 0,001$]. Turpmāk *post hoc* analīzē tika savstarpēji salīdzināti pārvietojumu virziena maiņu skaiti atkarībā no mērķa-distraktora līdzības un elementu skaita uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, 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 virziena maiņu 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 volumetriskā daudzplakņu ekrāna līdz ar redzes informācijas apjoma palielināšanos, kā ir redzams 4.10. attēlā. Trīs faktoru dispersijas analīze (ANOVA) apliecināja, ka meklēšanas elementu skaits būtiski ietekmēja iegūtos rezultātus [$F(1,44) = 40,1, p < 0,001$]. Turklāt pārvietojumu skaitu ievērojami ietekmēja arī mērķa-distraktora līdzība [$F(1,44) = 4,1, p < 0,001$] un dalībnieku grupa [$F(2,44) = 7,2, p = 0,002$].



4.10. att. Vidējais attēla slāņu pārvietojumu skaits atkarībā no elementu skaita meklēšanas uzdevumos ar augstu mērķa-distraktora līdzību (pa kreisi) un zemu mērķa-distraktora līdzību (pa labi).

Post hoc analīzei tika izmantoti t-testi. Analīzē bija apliecināts, ka nav būtisko atšķirību, kad salīdzina pārvietojumu skaitu rezidentiem un studentiem ($p = 1,0$). Tas nozīmē, ka abu grupu pārstāvji vienlīdz daudz pārvietoja attēla slāņus uz ekrāna veicot vizuālās meklēšanas uzdevumus. 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, statistiskajā analīzē bija noteikta nozīmīga mijiedarbība starp diviem faktoriem – mērķa-distraktora līdzību un elementu skaitu [$F(1,44) = 4,13, p = 0,048$]. Pieaugot redzes informācijas apjomam uz volumetriskā daudzplakņu 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. Tā kā maksimāli iespējams pārvietojumu skaits vienā virzienā bija 9 reizes, iegūtie rezultāti norāda uz to, ka rezidenti mainīja arī pārvietojumu virzienu meklējot informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Jāpiebilst, ka vidējais pārvietojumu skaits manāmi pieauga līdz ar mērķa-distraktora līdzības paaugstināšanos, kad elementu skaits uzdevumā bija mazs. Rezultāti pārvietojumu virziena maiņu skaitam ir parādīti 4.2. tabulā. Ir norādīti vidējie dati visiem pētījuma dalībniekiem katrā no grupām (SE).

4.2. tabula

Vidējais pārvietojumu virziena maiņu skaits meklēšanas uzdevumos atkarībā no attēla fizikālajām īpašībām (mērķa-distraktora līdzības un elementu skaita uzdevumā)

uzdevuma parametri		radiologi	rezidenti	studenti
augsta mērķa-distraktora līdzība (15 % atšķirība)	mazs skaits	0,22 (0,27)	1,07 (0,47)	1,10 (0,37)
	liels skaits	0,30 (0,21)	1,52 (0,50)	1,93 (0,61)
zema mērķa-distraktora līdzība (25 % atšķirība)	mazs skaits	0,04 (0,06)	0,63 (0,36)	0,58 (0,22)
	liels skaits	0,36 (0,28)	0,89 (0,46)	1,15 (0,35)

Statistiskā analīzē, 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 Vilkoksona rangū 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 virziena maiņu skaitu vizuālajā meklēšanā ($p > 0,05$).

Izskatot daudzslāņu attēlus uz plakanā ekrāna monitora, medicīnas profesionāļi parasti aplūko tikai daļu no visas pieejamas informācijas, līdz ar ko pastāv iespēja neizskatīt attēla daļu, kas satur mērķa elementu. Atšķirībā no daudzslāņu attēlu demonstrēšanas uz plakanā ekrāna, visa informācija bija attēlota uz volumetriskā ekrāna vizuālā meklēšanas uzdevuma sākumā. Katram pētījuma dalībniekam bija iespēja izvēlēties skatīšanās veidu meklējot informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna – 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 4.3. tabulā.

4.3. 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%

4.3. 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 apmērām trešdaļā no visiem gadījumiem. Pretstatā rezidenti un studenti deva priekšroku volumetrisko attēla selektīvai izskatīšanai, vispirms nodzēšot no ekrāna gandrīz visus slāņus un tad pakāpeniski pievienojot slāņi pēc slāņa. 42 % meklēšanas uzdevumu bija izpildīti pēc aprakstīta principa katrā no grupām. Jāatzīmē, ka radiologi ievērojami retāk pielietoja šo attēlu izskatīšanas stratēģiju.

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 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. Tādējādi tika noteikts, ka 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.

5. DISKUSIJA

Lai izveidotu metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, vispirms bija jānosaka skatīšanās nosacījumi, pie kuriem uz ekrāna plaknēm projicētais redzes stimulants tiku uztverts kā trīsdimensionāls attēls. Turklāt redzes stimula izkārtojuma ietekmes izvērtēšana ņemot vērā pareizo atbildi īpatsvaru un laiku dziļuma pazīmes vizuālajā meklēšanā dažādos skatīšanās attālumos no ekrāna ļāva spriest par ekrāna fizikāliem parametriem, ko ekrāna izstrādātāji varētu pilnveidot nākotnē.

Optiskā elementa daudzplakņu struktūra ļauj attēlot trīsdimensionāla attēla daļas dažādās vietās telpā nodrošinot saskaņotus dziļuma nosacījumus. Tādējādi lietotājam ir iespēja aplūkot telpisku attēlu bez redzes diskomforta, un pētniekiem – noteikt dziļuma uztveres īpatnības kontrolētos binokulārajos redzes apstākļos bez akomodācijas-verģences konflikta ietekmes uz gūtiem rezultātiem. Agrāk šī mērķa sasniegšanai bija nepieciešams veidot speciālo eksperimentālo izkārtojumu, kurā katram mērījumam vajadzētu mainīt objektu izvietojumu un manuāli nodrošināt objekta novietojuma precizitāti, tādējādi padarot eksperimenta procedūru par ilgstošu un ieviešot mērījumu kļūdu manuāli kontrolējamā objekta novietojuma neprecizitātes dēļ.

Uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna redzes stimulu var projicēt precīzi dažādās vietās fizikālajā telpā, ņemot vērā, ka ekrāna optiskā elementa arhitektūra ierobežo vislielāko un vismazāko attēla slāņu attālumu. Vismazākais attālums starp attēla slāņiem ir 5,04 mm, to nosaka optisko slēdžu kārtu izvietojums šobrīd aktuālā modeļa ekrānā. Atkarībā no skatīšanās attāluma mainās dziļuma nosacījumu ieguldījums. Vismazākais piensums tuvajā skatīšanās attālumā ir raksturīgs binokulārajai disparitātei. Akomodācija un verģence arī ietekmē dziļuma sajūtu, tomēr šiem dziļuma nosacījumiem nebija primārās lomas precīzā attālumā noteikšanā salīdzinoši augsta sliekšņa dēļ (*Rolland et al.*, 1999). Atšķirībā no akomodācijas ieguldījuma, pateicoties binokulārajai disparitātei ir iespējams noteikt smalkas atšķirības dziļumā. Tādēļ ir svarīgi zināt, cik precīzi cilvēks izšķir relatīvo dziļumu attēliem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna balstoties uz binokulārās disparitātes ieguldījumu, un kā varētu pilnveidot nākamās paaudzes ekrāna modeļus.

Pētījumā tika noteikts, kā vizuālo meklēšanu ietekmē trīsdimensionālu attēlu uztvere attēliem uz ekrāna plaknēm atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām. Attēlojot redzes stimulu uz secīgām ekrāna plaknēm, tika eksperimentāli noskaidrots, ka augstākais meklēšanas sniegums tiek panākts, kad meklējamie elementi tiek attēloti tuvu viens otram horizontālā un vertikālā virzienā un cilvēks aplūko attēlus skatīšanās attālumos zem 1 m līdz ekrānam. Tikai dažas kļūdas bija pieļautas 45 cm skatīšanās attālumā, parādot, ka ar doto optiskā elementa

arhitektūru relatīvu dziļumu ir viegli noteikt binokulāros redzes apstākļos pat pie ierobežota dziļuma nosacījumu skaita. Tomēr palielinoties meklējamo elementu savstarpējam attālumam horizontālajā un vertikālajā virzienā, kā arī pieaugot skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam daudzplakņu ekrānam, krīt vizuālās meklēšanas pareizība un paildzinās uzdevuma izpildīšanas laiks.

Cilvēki izpildīja dziļuma pazīmes meklēšanas uzdevumus pareizi un ātri, kad redzes stimula daļas bija projicētas tuvu viena otrai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, tomēr pareizo atbilžu skaits samazinājās palielinoties elementu savstarpējam attālumam x un y asīs. Tā kā laiks uzdevuma izpildīšanai nebija ierobežots, dalībniekiem bija iespēja izskatīt katru no elementiem ar centrālo redzi pievēršot tiešo uzmanību. Tādējādi kļūdu pieaugums līdz ar elementu savstarpējā attāluma palielināšanos norāda, ka nosākot relatīvo dziļumu trīsdimensionālam stimulam ar ierobežotu dziļuma nosacījumu skaitu informācijas apstrāde tikai centrālajā redzes laukā nenodrošina iespēju noteikt relatīvu dziļumu. Binokulārajai disparitātei ir būtisks ieguldījums dziļuma uztverē tuvajos skatīšanās attālumos. Tā kā attēlu projicēšana optiskā elementa matricā bija nemainīga, kad attēla elementu daļas bija ar atšķirīgo lauka ekscentritāti, vizuālās meklēšanas rezultāti ir skaidrojami ar attēlu binokulārās disparitātes uztveres specifiku redzes laukā.

Pakāpeniski palielinoties attēla daļu lauka ekscentritātei ($1,9^\circ$, $3,8^\circ$ un $7,6^\circ$), pieauga arī attālums starp blakus esošām daļām ($2,7^\circ$, $5,4^\circ$ un $10,8^\circ$, skaitot no elementu centriem). Nosakot stereoredzes asuma izmaiņas tīklenes perifērijā, pētījumos (*Rawlings & Shipley*, 1969; *Wardle et al.*, 2012) norādīts, ka dziļuma uztveres sliekšnis palielinās virzienā no foveolas uz perifēriju. *Rawlings* un *Shipley* (1969) aprakstīja, ka stereoredzes sliekšnis ir viszemākais centrālajā redzē, tad tas pakāpeniski palielinās 0° - 6° tīklenes ekscentritātē, savukārt lielākajās ekscentritātēs sliekšņa izmaiņas ir straujākas. Tas varētu skaidrot kāpēc vizuālās meklēšanas sniegums bija nemainīgi augsts tuvā skatīšanās attālumā (45 cm), kad meklējamie elementi bija projicēti tuvu viens otram uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna – $1,9^\circ$ lauka ekscentritātē. Arī $3,8^\circ$ lauka ekscentritātē bija samērā maz kļūdu meklējot elementu ar atšķirīgu dziļumu, tomēr sniegums samazinājās, kad attēli bija projicēti vistālākajā dziļuma segmentā. Tas varētu būt saistīts ar binokulārās disparitātes samazinājumu lielākā skatīšanās attāluma dēļ. Ievērojams snieguma kritums bija raksturīgs attēlojot attēla daļas vistālāk x un y asī ($7,6^\circ$ lauka ekscentritātē), kas norāda uz perifērās redzes ieguldījumu trīsdimensionāla attēla uztverē (*Howard & Rogers*, 2012), kad redzes stimuls tiek demonstrēts uz dažādām ekrāna plaknēm.

Līdz šim mērķa elementa lauka ekscentritātes ietekmi uz vizuālās meklēšanas rezultātiem pārsvarā pētīja, izmantojot plakanus attēlus (*Carrasco et al.*, 1995; *Wolfe et al.*, 1998; *Scialfa et al.*, 1998). Tas ļāva noskaidrot, ka meklēšanas sniegums var būt atkarīgs no mērķa elementa

atrašanas vietas redzes ainā attiecībā pret skata fiksāciju pirms uzdevuma izpildīšanas vai uzdevuma izpildīšanas laikā (Carrasco et al., 1995). Īsāks meklēšanas laiks un augstākā uzdevuma izpildīšanas pareizība meklējot elementu tuvu skata fiksācijai bija skaidroti ar uzmanības aktivizēšanu un pievēršanu attēla daļām ar vislielāko nozīmi (Wolfe et al., 1998), kā arī acu kustību īstenošanu (Carrasco et al., 1995). Izskatot informāciju trīsdimensionālos attēlos īsāks meklēšanas laiks bija nepieciešams, ja mērķa elements bija tuvu fiksācijas vietai x un y virzienā (Reis et al., 2011), bet ne z virzienā (Finlayson & Grove, 2015).

Mūsu pētījuma atradnes paplašina zināšanas, papildinot, ka meklēšanas pareizība var būt saistīta ne tikai ar mērķa elementa atrašanas vietu, bet arī ar tā pazīmes veidu un lielumu. Proti, ja mērķa elementa pazīmi nav iespējams izšķirt tikai ar centrālo redzi, tad palielinoties elementu savstarpējam attālumam, rezultējošs sniegums krīt. 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, volumetriskos attēlus var papildināt ar citiem saskaņotiem dziļuma nosacījumiem, kuri ir izmantojamie divdimensionālos attēlos, tādiem kā perspektīva, izmērs u.c. (Cutting & Vishton, 1995; Bolshakov & Sgibnev, 2018).

Augsts pareizo atbilžu īpatsvars un īss uzdevuma izpildīšanas laiks norādīja uz to, ka cilvēkiem ir viegli noteikt 5,0 mm dziļuma atšķirību attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, kad skatīšanās attālums ir tuvs (< 1 m). Tikai dažas kļūdas bija pieļautas, kad cilvēki pildīja meklēšanas uzdevumus 50 cm attālumā no volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tas bija sagaidāms rezultāts, jo minimālā atšķirība plakņu dziļumā visticamāk rezultējās virssliekšņa disparitātes vērtībās. Īss uzdevuma izpildīšanas laiks norāda, ka uzmanības pievēršana mērķa elementam ar atšķirīgo disparitāti, informācijas apstrāde un lēmuma pieņemšana norisinājās ātri. Tomēr palielinoties skatīšanās attālumam līdz ekrānam, meklēšanas sniegums būtiski samazinājās. Snieguma kritums lielākos skatīšanās attālumos varēja būt skaidrojams ar straujām izmaiņām dominējošā dziļuma nosacījuma vērtībā, jo binokulārā disparitāte ir apgriezti proporcionāla skatīšanās attāluma kvadrātam.

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 relatīvā binokulārā disparitāte strauji samazinās pieaugot attālumam no lietotāja līdz ekrāna plaknēm, potenciāli sekmējot telpiskās uztveres anizotropijas ietekmi uz dziļuma uztveri (Matsushima et al., 2014). Ņemot vērā to, ka citos volumetriskajos ekrānos ar trim dziļuma plaknēm (Akeley et al., 2004; Hoffman et al., 2008; MacKenzie et al., 2010) plakņu izvietojums pakārtots izmaiņām redzes funkciju (akomodācijas) pieprasījumā, rodas jautājumi – kāpēc volumetriskajā daudzplakņu ekrānā

plakņu izvietojums ir lineārs, un vai tas ir optimāls veids, kā projicēt attēlu, lai sekmētu dziļuma sajūtu? Lineārs izvietojums tipiski tiek izmantots volumetriskajos ekrānos ar kustīgo plakni, nodrošinot 200 attēlu šķērsriezumu projekcijas dažādas telpas vietās (*Zhan et al., 2020*), bet pie būtiski mazāka dziļuma slāņu skaita varētu piedomāt pie cita plakņu novietojuma optiskajā elementā, lai kompensētu dziļuma jutības samazināšanos pieaugot skatīšanās attālumam līdz ekrāna plaknei (*Sullivan & Snuffer, 2002*).

Plānojot citu plakņu novietojumu nākamās paaudzes volumetriskos daudzplakņu ekrānos, lai tas būtu uztveres diktēts (*perception-driven*), ir jāņem vērā, ka binokulārajai disparitātei ir būtiska loma telpisko attēlu uztverē tuvajos skatīšanās attālumos pie salīdzinoši maza plakņu savstarpējā attāluma ekrānā. Lai nepieļautu “kartona efektu” (*Reichelt et al., 2010*), nevajadzētu samazināt kopējo optiskā elementa biezumu. Ņemot vērā pētījumā iegūtos rezultātus, var apgalvot, ka pārkārtojot plakņu novietojumu tā, lai savstarpējais attālums būtu pakārtots vienāda attēlu relatīvajai 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 volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ja attālums starp plaknēm ir vienāds, optiskā elementa kopējo biezumu (W) aprēķina pēc matemātiskās sakarības:

$$W = w_{layers} + d_{layers} \times (N_{layers} - 1) \quad [5]$$

kur w ir plaknes biezums (m), d_{layers} ir divu dziļuma plakņu savstarpējais attālums (m), N_{layers} ir dziļuma plakņu skaits. Pastāv arī citi zināmi ierobežojumi optiskā elementa arhitektūrā – minimālais attālums starp optisko slēdžu kārtām, ko nosaka plakņu biezums (1,1 mm), un kopējais plakņu skaits (līdz 20). Attiecīgi plakņu biezums ierobežo minimālo relatīvo disparitāti tuvajos skatīšanās attālumos (piemēram, 73" – 45 cm attālumā). Ja vēlamies nodrošināt vienādu disparitāti volumetriskā attēla slāņiem uz blakusesošām ekrāna plaknēm, plakņu savstarpējām attālumam jāmainās atkarībā no skatīšanās attāluma līdz katrai plaknei un disparitātes pēc sekojošas matemātiskās sakarības:

$$W = w_{layers} + \sum_{i=1}^{N_{layers}-1} \left(\frac{n \times D_i^2}{PD} \right) \quad [6]$$

kur N_{layers} ir dziļuma plakņu skaits, n ir binokulārā disparitāte (radiānos), D_i ir attālums no acīm līdz references plaknei (m) un PD ir starpzīlīšu attālums (m).

Tādējādi mainot plakņu novietojumu optiskā elementa ietvaros var panākt, ka secīgiem attēla slāņiem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna ir nodrošināta vienāda disparitāte noteiktajā skatīšanās attālumā. Piemēram, ja kopējais plakņu skaits ir 20 vienības, tad 45 cm skatīšanās attālumā relatīvā disparitāte ir 278", 60 cm attālumā – 163", aprēķinos pieņemot, ka starpzīlīšu attālums ir 0,065 m. Pie tādā plakņu izkārtojuma optiskajā elementā nav sagaidāms snieguma samazinājums relatīvā dziļuma noteikšanā tuvajos skatīšanās attālumos, jo dziļuma pazīmes

meklēšanas pareizība nebija statistiski atšķirīga, kad redzes stimulu disparitāte variēja no 114" līdz 305". Tomēr jāpiebilst, ka aprēķinot plakņu savstarpējo attālumu vienam skatīšanās attālumam, rezultējoša disparitāte volumetriskā attēla slāņiem uz blakusesošām plaknēm būs mainīga citos skatīšanās attālumos. Nākotnē interesants un potenciāli noderīgs pilnveidojums optiskā elementa arhitektūrā būtu iespēja kalibrēt ekrānu, pārkārtojot ekrāna plakņu novietojumu optiskajā elementā atkarībā no skatīšanās attāluma un lietotāja redzes prasībām, kas sekmētu ekrāna ergonomiskumu un apstiprināšanu lietotāju vidū. Samazināts attālums starp attēla slāņiem var kalpot par priekšrocību arī risinot problēmu ar attēlu slāņu sapludināšanu – informācijas attēlošanas veids uz vairākām dziļuma plaknēm, lai volumetriskais attēls izskatītos kā vienots objekts nevis būtu redzami tā atsevišķu slāņu robežas pie attēla malām (*MacKenzie et al.*, 2010). Papildu tam svarīgi ir uzlabot attēlu kontrastu nākamās paaudzes volumetriskā daudzplakņu ekrānos, jo attēla kontrasts būtiski ietekmē stereoredzes sliksni (*Legge & Gu*, 1989).

Turpmāk 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 ekrāna tā, lai lietotājam nebūtu problēmu izprast to savstarpējo izvietojumu optiskā elementa dziļumā.

Pētījuma dalībniekiem bija jāpamana izmaiņas apļu izskatā, aplūkojot trīsdimensionālus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, un jāizvēlas mērķa elementa relatīvai atrašanās vietai atbilstošs kvadrants. Pētījuma dalībnieki izpildīja šo uzdevumu ātri un pareizi, kad mērķa elements atšķīrās no visiem pārējiem ar 25 % lielāku apļa līnijas platumu. Kaut arī bija novērojams kritums sniegunā pie 20 % atšķirības, tas nebija statistiski nozīmīgs salīdzinot ar sniegumu pie 25 % atšķirību. Arvien vairāk palielinoties mērķa-distraktora līdzībai apļu līnijas platumā dalībnieki ievērojami retāk sniedza pareizas atbildes par mērķa elementa relatīvu atrašanās vietu uz ekrāna.

Mērķa-distraktora līdzības ietekme uz kļūdīšanos tika plaši pētīta vizuālajā meklēšanā nosakot izmaiņas sniegunā uzdevumos ar dažādu redzes stimulu fizikālo īpašību izmaiņām. Dažos pētījumos redzes uzdevuma grūtību variēja, mainot meklēšanas uzdevuma veidu – pazīmes vai pazīmju kopas (*McSorley & Findlay*, 2001; *Huang & Pashler*, 2004; *Reis et al.*, 2011; *Pomplun et al.*, 2013; *Hulleman et al.*, 2020). Šī pieeja ir saskaņā ar Treismanes teoriju (*Treisman & Gelade*, 1980), kurā apgalvots, ka pazīmju kopas meklēšana ir grūtāks uzdevums, kas lielākoties pieprasa sērijveida informācijas apstrādi. Bieži šajos pētījumos iegūtos spriedumus kritizē, jo trūkst saskaņotības dažādu fizikālo parametru lielumos pazīmes meklēšanā un pazīmju kopas meklēšanā (*Palmer et al.*, 2000). Kā zināms tad meklēšanas

uzdevuma grūtība mainās ne tikai atkarībā no pazīmju skaita, kas atšķir mērķa elementu no distraktoriem, bet arī no pazīmes lieluma, ko skaidro virzītās meklēšanas modelis (*Wolfe et al.*, 1998; *Wolfe*, 2007). Šis modelis noliedz striktu sadalījumu paralēlos un sērijveida procesos vizuālajā meklēšanā atkarībā no pazīmju skaita, bet drīzāk paredz, ka informācijas apstrāde ir atkarīga no tā, cik grūti noteikt mērķa elementu redzes ainā. Tādēļ liela daļa pētījumu ir veltīta tam, lai saprastu, kurā brīdī un kādā veidā notiek pāreja no viegla meklēšanas uzdevuma ar tam raksturīgu augstu sniegumu un ātru izpildīšanas laiku uz grūtu uzdevumu, kad samazinās sniegums un/vai paildzinās izpildīšanas laiks. Lai noskaidrotu noteiktās pazīmes veida ietekmi uz meklēšanas procesu un rezultātiem, vizuālās meklēšanas pētījumos maina mērķa-distraktora līdzības lielumu vienas pazīmes ietvaros (*Scialfa et al.*, 1998; *Hooge & Erkelens*, 1999; *Hughes et al.*, 2016; *Wienrich et al.*, 2009; *De Vries et al.*, 2017; *Wloka et al.*, 2017). Jāpiebilst, ka katrā no šiem pētījumiem par mērķa elementa pazīmi tika izvēlēta atšķirīga fizikālā īpašība – krāsa, spožums, virziens, izmērs un līnijas platums, – paplašinot izpratni par vizuālās meklēšanas procesiem.

Arī mūsu pētījumā mērķa-distraktora līdzības lieluma variēšana ļāva noskaidrot, pie kuriem atšķirības lielumiem būtiski mainās sniegums un attēlu izskatīšanas stratēģija, kas bija nepieciešams, lai turpmāk atlasītu fizikālos parametrus metodes izveidošanai, un tā iekļautu salīdzinoši vieglākos un grūtākos meklēšanas uzdevumos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tas, ka pie 25 % atšķirības aplū līnijas platumā, pareizo atbilžu skaits bija augsts un būtiski nemainījās, palielinoties elementu skaitam uz ekrāna, ļauj apgalvot, ka meklēšanas uzdevums bija salīdzinoši viegls. Tomēr līdz ar informācijas apjoma pieaugumu, palielinājās arī pieļauto kļūdu skaits pie lielākās mērķa-distraktora līdzības, līdzīgi kā *Wloka et al.* pētījumā (2017). Tas varētu būt saistīts ar statistisko lēmumu troksni (*Huang & Pashler*, 2004), paskaidrojot, ka palielinoties elementu skaitam meklēšanas uzdevumā, pieaug arī tā saucamā lēmuma nenoteiktība. Proti, ja mērķa elements nav pamanīts meklēšanas sākumā, tad jāizskata atsevišķi elementi (vai elementu kopas, atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām), un jāpieņem lēmums par katru no tiem – vai tas varētu būt mērķa elements. Saskaņā ar signālu detektēšanas teoriju (*Eckstein et al.*, 2000), katrs elements redzes ainā kalpo par signālu cilvēka redzes sistēmai meklēšanas laikā. Lielāks elementu skaits pieprasa pieņemt lielāku lēmumu apjomu, līdz ar ko pieaug arī lēmuma nenoteiktība. Mūsu rezultāti parāda, ka samazinoties mērķa elementa pazīmes lielumam un sasniedzot 10 % mērķa-distraktora atšķirību aplū līnijas platumā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, sniegums krīt strauji līdz ar elementu skaita pieaugumu. Šī atradne atbalsta uzskatu, ka lēmuma nenoteiktību ietekmē ne tikai informācijas apjoms, bet 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 ievērojami lielāku informācijas apjomu salīdzinot ar parasti izmantojamiem divdimensionāliem attēliem. No vienas puses, telpiskā informācijas attēlošana uz ekrāna ļauj ieraudzīt objekta kopainu 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 jēgpilnu un pārdomātu attēlu navigācijas sistēmu, kas nodrošinātu lietotājus gan ar attēlotā objekta kopskatu, gan ar selektīvu objekta daļu izskatīšanu nepieciešamības gadījumā.

Atšķirības meklēšanas sniegumā līdz ar mērķa-distraktora līdzības pieaugumu mūsu pētījumā atspoguļo arī informācijas apstrādes efektivitāti. Palielinoties mērķa-distraktora līdzībai biežāk tika iesniegtas 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. Turklāt sniegums krasi samazinājās, kad atšķirība starp mērķa elementu un distraktoriem sasniedza 10 %. Līdzīgas atradnes bija novērojamas vizuālajā meklēšanā, kad mērķa elements samērā maz atšķīrās no visiem pārējiem elementiem arī pēc citiem fizikālajiem parametriem (*Scialfa et al.*, 1998; *Wienrich et al.*, 2009; *Wloka et al.*, 2016). Proti, pie noteiktā mērķa-distraktora līdzības lieluma paliek grūti izšķirt meklējamo objektu, tādējādi pat patērējot ilgāku laiku netiek sasniegts augsts sniegums. *Hughes et al.* (2016) secināja, ka centrālās redzes sniegums cieši korelē ar meklēšanas uzdevuma izpildīšanas pareizību, savukārt perifērajai redzei ir būtiskā loma uzmanības virzīšanā, acu kustību kontrolē un uzdevuma izpildīšanas laikā (*Hooge & Erkelens*, 1999; *Hughes et al.*, 2016).

Pētījumā uzdevuma izpildīšanas laiks paildzinājās pieaugot gan mērķa-distraktora līdzībai, gan elementu skaitam. Gūtie rezultāti norāda, ka meklēšanas laiku būtiski ietekmē mērķa elementa redzamība telpiskajā attēlā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Samazinoties mērķa elementa redzamībai uz ekrāna, ilgāks laiks tika patērēts attēla aplūkošanai, līdzīgi kā citos pētījumos (*Wienrich et al.*, 2009; *Wloka et al.*, 2017). Atkarībā no vizuālās meklēšanas nosacījumiem, uzdevuma izpildīšanas laiks var atspoguļot dažādā veida procesu norisi, tādus kā stimula uztveri, uzmanības piesaistīšanu, acu kustības un lēmuma pieņemšanu. Vizuālās meklēšanas laiks būtiski nemainās uzdevumos ar dažādu elementu skaitu, kad mērķa elements ievērojami atšķīrās no distraktoriem, liecinot, ka mērķa elements var tikt ātri noteikts aplūkojot kopainu. Tomēr samazinoties mērķa elementa redzamībai redzes ainā, pieaug nepieciešamība izskatīt elementus vai elementu kopas selektīvi, līdz ar ko paildzinās meklēšanas laiks (*Wolfe*, 2007). Turklāt, jo mazāk mērķa elements atšķīrās no distraktoriem, jo ilgāks laiks var tikt veltīts elementa izskatīšanai un lēmuma pieņemšanai, kas atspoguļojās ilgākās skata fiksācijās

(Becker, 2011). Pie paaugstinātā lēmumu trokšņa nosacījumiem (Palmer et al., 2000), darba atmiņa ir pārslogota, fiksāciju skaits pieaug (Hooge & Erkelens, 1999), un redzes ainas elementi biežāk tiek izskatīti atkārtoti meklēšanas laikā (Wienrich et al., 2009). Lai detalizētāk izpētītu vizuālās meklēšanas procesus un aprakstītu pāreju no kopainas aplūkošanas uz selektīvu elementu izskatīšanu atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām, turpmāk būtu nepieciešams pierakstīt un analizēt acu kustības, kad cilvēks aplūko telpiskus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Šajā pētījumā gūtie rezultāti liecina, ka palielinoties mērķa-distraktora līdzībai attēlos uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, pieaug nepieciešamība izskatīt informāciju selektīvi. Tas atspoguļojas ne tikai vizuālās meklēšanas sniegumā, bet arī attēlu izskatīšanas stratēģijā. Palielinoties mērķa-distraktora līdzībai meklēšanas uzdevumos, lielākoties pētījuma dalībnieki biežāk izvēlējās noņemt kādu daļu no projicētā attēla, tādējādi samazinot telpiski attēlotās informācijas daudzumu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tas bija novērojams attēla slāņu pārvietojumu skaita izmaiņās. Visbiežāk un visvairāk attēla slāņi tika noņemti tad, kad mērķa elements maz atšķīrās no distraktoriem aplūkojamās līnijas platumā. Savukārt, pieaugot atšķirībai starp mērķa elementu un distraktoriem, lietotāji mainīja attēlu izskatīšanas veidu – pārsvarā tika izskatīts telpisks attēls pilnā apjomā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, neveicot attēla slāņu pārvietojumus optiskajā elementā. Kopumā rezultāti norāda uz to, ka attēlojot telpiskus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna un nodrošinot navigācijas sistēmu ar iespēju mainīt trīsdimensionāla attēla izkārtojumu optiskā elementa matricā, lietotājiem rodas iespēja atrast informāciju uz ekrāna pielāgojot attēlu izskatīšanas stratēģiju atkarībā no redzes stimula fizikālajām īpašībām un paveicamā uzdevuma.

Izstrādājot metodi vizuālās efektivitātes novērtēšanai ir būtiski ņemt vērā, ka papildu attēlu fizikālajām īpašībām arī profesionālās meklēšanas pieredze var ietekmēt snieguma un attēlu izskatīšanas stratēģijas 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).

Medicīniskie attēli atšķiras ar lielu fizikālo īpašību daudzveidību un bieži satur attēla artefaktus, kas kopā novērš redzes uzmanību (Carrigan et al., 2019). Turklāt, ekrāna attēlu fizikālo īpašību ietekme var tikt neatspoguļota iegūtajos rezultātos medicīnisko attēlu semantiskās nozīmes dēļ (Jameson, 2012). Pielietojot izstrādāto meklēšanas uzdevumu, mēs varējām noteikt, kā speciālisti ar atšķirīgo profesionālās meklēšanas pieredzes apjomu izskata trīsdimensionālus attēlus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna atkarībā no attēla fizikālajām īpašībām. Parādot trīsdimensionālus attēlus bez medicīniskiem attēliem raksturīgas semantiskās nozīmes, mēs varējām kontrolēt augšupejošo procesu ietekmi, nodrošinot, ka

meklēšanas objektus varēja atpazīt gan pieredzējušie radiologi, gan jauni profesionāļi un ne-radiologi, kā arī kontrolēt redzes apstākļus, kā tas tika īstenots citos pētījumos, radot attēlus uz plakano ekrānu monitoriem (*Clark, 2014; Moise et al., 2005; Aizenman et al., 2015*).

Visās trijās grupās, dalībnieki vislabāk izpildīja meklēšanas uzdevumus (mazs kļūdu skaits un īss meklēšanas laiks), kad mērķa elements daudz atšķīrās no pārējiem elementiem un kopējais uz ekrāna demonstrētas redzes informācijas apjoms bija samērā mazs. Kopumā mērķa-distraktora līdzība būtiski ietekmēja meklēšanas uzdevuma veikumu, bet radiologi, rezidenti un studenti neuzrādīja atšķirīgus rezultātus salīdzinot iesniegto pareizo atbilžu skaitu šajās grupās. Salīdzinot meklēšanas laiku, tika parādīts, ka radiologi un rezidenti atrada informāciju ievērojami ātrāk salīdzinot ar studentiem. Turklāt attēlu izskatīšanas stratēģijas analīze z-virzienā uzrādīja nozīmīgas atšķirības attēla izskatīšanas stratēģijās radiologiem, rezidentiem un studentiem. Konkrēti, radiologi pārsvarā skatījās kopējo ainu attēliem uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Savukārt rezidenti un studenti lielākoties samazināja redzes informācijas apjomu un selektīvi izskatīja trīsdimensionāla attēla slāņus. Palielinoties redzes informācijas apjomam meklēšanas uzdevumā, studenti veica vairāk pārvietojumu virziena maiņu pretstatā rezidentiem un radiologiem. Kopumā no visiem pētījuma dalībniekiem, tikai radiologi pārlicinoši demonstrēja attēla izskatīšanas stratēģiju, kuru būtiski neietekmēja mērķa-distraktora līdzība.

Vizuālās meklēšanas pareizība ir augstā prioritātē radiologu darbā, kas ietekmē turpmāko lēmumu pieņemšanu un diagnozes uzstādīšanu. Tādēļ lielāka daļa no iepriekšējiem eksperimentāliem darbiem mērķēja noteikt, kā darba pieredze un attēlu fizikālās īpašības ietekmē meklēšanas rezultātu. Līdzīgi mūsu iegūtajiem rezultātiem, pareizo atbilžu skaits būtiski neatšķīrās agrākajos darbos, kuros tika salīdzināts radiologu un tā saucamo ne-radiologu (medicīnas studentu vai citu cilvēku) meklēšanas uzdevumu sniegums, izmantojot nemedicīniskus meklējamos objektus (*Nodine & Krupinski, 1998; Moise et al., 2005; Maeda et al., 2013; Kelly et al., 2018*). Tādējādi mūsu pētījums atbalsta iepriekš nodefinētu pieņēmumu, ka atšķirības meklēšanas pareizībā atkarībā no radiologu meklēšanas pieredzes ir raksturīgas tikai specifiskiem, profesionāliem uzdevumiem, nevis ir attiecināmas uz jebkuriem meklēšanas uzdevumiem. Atšķirība ir saistīta ar to, ka radiologiem ir plašākās zināšanas par iespējamām klīniskajām atradnēm un to izskatu salīdzinot ar ne-radiologiem un jauniem profesionāļiem, kas veicina uzmanības virzīšanu un mērķa objekta atpazīšanu. Tādēļ veicot profesionālus meklēšanas uzdevumus, radiologi tipiski uzrāda augstāko pareizo atbilžu skaitu salīdzinot ar citiem dalībniekiem. Tomēr šī priekšrocība nav attiecināma uz uzdevumiem bez medicīniskiem meklējamiem objektiem, tādēļ, ka gan radiologi, gan ne-radiologi ir vienādos apstākļos – visi dalībnieki vienlīdz labi zina, kā izskatās mērķa objekts un attēla kopējā aina. Tas ietekmē

lejupejošus procesus vizuālajā meklēšanā un lēmumu pieņemšanu. Mūsu pētījuma rezultāti paplašina eksperimentālo pierādījumu klāstu, atspoguļojot, ka dotais pieņēmums attiecas ne tikai uz divdimensionālo attēlu aplūkošanu, bet arī uz daudzslāņu attēlu izskatīšanu, kad redzes informācija ir demonstrēta telpiski, neskatoties uz radiologu potenciāli pārākām spējām uzmanības un darba atmiņas aktivizēšanā aplūkojot trīsdimensionālus attēlus (*Haller & Radue, 2005*).

Kopumā visi dalībnieki varēja atrast mērķa elementus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, tomēr dažāds laiks tika patērēts uz uzdevuma izpildīšanu salīdzinot rezultātus dalībnieku grupās. Agrākajos darbos radiologu snieguma laika aspekts tika pētīts nemedicīniskiem attēliem izmantojot acu kustību pierakstu (*Nodine & Krupinski, 1998; Kelly et al., 2018*), nosakot reakcijas laiku (*Haller & Radue, 2005; Maeda et al., 2013*) un uzdevuma izpildes laiku (*Moise et al., 2005*). Neskatoties uz to, ka analizējot skata fiksācijas raksturlielumus visā uzdevuma pildīšanas laikā netika pierādītas būtiskās atšķirības (*Kelly et al., 2018*) samērā lielās datu izkliedes dēļ, radiologi demonstrēja daudz ātrākus reakcijas laikus salīdzinot ar citiem dalībniekiem, nosakot sīku izmaiņu klātesamību ne-radioloģiskos attēlos (*Haller & Radue, 2005*), un meklējot zema kontrasta mērķa elementus (*Sowden et al., 2000; Maeda et al., 2013*), kas kopumā ļāva pieņemt, ka redzes stimulu fizikālajām īpašībām ir kritiska loma eksperimentāli nosakot meklēšanas laiku, lai turpmāk izvērtētu to atkarībā no radiologu profesionālās meklēšanas pieredzes. Mūsu pētījumā tika novērots, ka studenti patērēja ievērojami ilgāku laiku meklējot informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna salīdzinot ar radiologiem un rezidenti. Tomēr neskatoties uz samērā zemu stimulu kontrastu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, netika konstatēts ātrāks meklēšanas laiks radiologiem salīdzinot ar rezidenti, visticamāk, meklēšanas uzdevuma sarežģītības un ilguma dēļ. Redzes stimulš tika demonstrēts optiskā elementa matricā, tādējādi ilgāks laiks bija nepieciešams, lai izskatītu tādu attēlu nekā tas būtu nepieciešams divdimensionālā attēla gadījumā. Rezultātā attēla telpiskums varēja maskēt ātrāku radiologu reakciju. Iepriekš bija eksperimentāli parādīts, ka radiologi veic meklēšanas uzdevumus vienlīdz ātri neatkarīgi no dažādiem faktoriem, tādiem kā mērķa elementu skaits uzdevumā un dienas laiks (*Krupinski et al., 2012; Clarke, 2014*).

Papildu vizuālās meklēšanas sniegumam, arī radiologiem izvērtējām attēlu izskatīšanas stratēģiju. Līdz ar jaunu vizualizācijas tehnoloģiju parādīšanos, nemitīgi mainās veids, kā radiologi izskata attēlus. Agrāk radiologiem bija pieejama informācija pārsvarā divdimensionālo attēlu veidā. Savukārt medicīniskās attēlošanas tehnoloģiju attīstības dēļ, mūsdienās medicīnas speciālisti arvien vairāk strādā ar daudz lielāku informācijas apjomu, izskatot daudzslāņu attēlus. Tas iespaido veidu, kā tiek veikta vizuālā meklēšana, un kāda veida apmācība ir nepieciešama topošiem medicīnas speciālistiem. Šī iemesla dēļ attēla izskatīšanas

stratēģijas tika plaši pētīti nosakot kognitīvus procesus attēlu izskatīšanas laikā (*Stuijzand et al.*, 2016; *Diaz et al.*, 2015; *Den Boer et al.*, 2018) un vizuālās meklēšanas rezultātus (*Drew et al.*, 2013; *Aizenman et al.*, 2015; *Kelahan et al.*, 2018). Kamēr lielā daļā no atbilstošiem pētījumiem tika izmantoti medicīniskie attēli (*Drew et al.*, 2013; *Diaz et al.*, 2015; *Den Boer et al.*, 2018; *Kelahan et al.*, 2018), daļa pētījumu ar nemedicīniskiem meklēšanas objektiem uz plakanā ekrāna arī iekļāva attēlu izskatīšanas stratēģijas analīzi (*Moise et al.*, 2005; *Atkins et al.*, 2006; *Aizenman et al.*, 2015).

Moise, Atkins & Rolling pētījumā (2005) ar nemedicīniskiem attēliem vizuālās meklēšanas uzdevumiem bija trīs dažādi sarežģītības līmeni atkarībā no mērķa-distraktora līdzības un distraktoru skaita. Līdzīgi mūsu pētījuma atradnēm, klikšķu skaits palielinājās radiologiem un ne-radiologiem, kad grūtāki redzes uzdevumi tika veikti salīdzinot ar viegliem uzdevumiem. Tādējādi attēlu izskatīšanas stratēģijā (kopējā klikšķu/pārvietojumu skaitā) atspoguļojās grūtības lēmuma pieņemšanā vizuālajā meklēšanā.

Savukārt *Aizenman et al.* (2015) pētījumā dalībnieki bija instruēti meklēt mērķa elementus daudzslāņu nemedicīniskos attēlos uz plakano ekrānu monitoriem pielietojot skenēšanas un urbšanas attēlu izskatīšanas stratēģijas. Rezultātā atrasto mērķa elementu skaits bija lielāks, pielietojot urbšanas stratēģiju salīdzinot ar skenēšanas stratēģiju. Tomēr urbšanai dalībnieki patērēja gandrīz divreiz ilgāku laiku salīdzinot ar to, kurš bija nepieciešams skenēšanas veikšanai. Šī atradne varētu būt saistīta ar atšķirībām darba atmiņas slodzē pielietojot atšķirīgas stratēģijas. Proti, uz plakanā ekrāna monitora pakāpeniski izskatot attēla slāņi pēc slāņa, kas ir raksturīgs skenēšanas stratēģijai, ir jāpatur atmiņā informācija par iepriekšējo slāņu saturu un pieņemtiem lēmumiem attiecībā uz attēlu slāņu informāciju (vai tas varēja saturēt mērķa elementu). Tas var sekmēt kognitīvās slodzes pieaugumu, koncentrēšanas spēju samazināšanos, un rezultātā pieaug iespēja kļūdīties. Savukārt, urbšanas stratēģijā varētu tikt radīta mazāka atmiņas noslodze, jo uzmanība tiek pievērsta selektīvi dažādiem maziem redzes lauka apgabaliem, un daudzslāņu attēls tiek izskatīts *z*-virzienā. Interesanti, ka arī mūsu pētījumā dalībnieki pielietoja atšķirīgas attēlu izskatīšanas stratēģijas, tomēr izvēlēta stratēģija nebija saistīta ar redzes uzdevuma izpildes pareizību. Līdz ar to var pieņemt, ka radot visu daudzslāņu attēlu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, interesējošā informācija var tikt efektīvi atrasta arī attēla kopainas skenēšanas rezultātā. Atšķirībā no *Aizenman et al.* redzes uzdevumu specifikas, visa informācija bija pieejama dalībniekam meklēšanas uzdevuma sākumā uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tādējādi varēja tikt samazināta nepieciešamība turēt atmiņā informāciju par dažādiem slāņiem un pielietot urbšanas stratēģiju. Turklāt, attēlu izskatīšana varēja norisināties ar atšķirīgu ātrumu, ko apliecināja rezidentu un studentu pārvietojumu skaita salīdzinošā analīze. Proti, abu dalībnieku grupu pārstāvji pārsvarā veica daudz vairāk attēlu

slāņu pārvietojumus salīdzinot ar radiologiem veicot meklēšanas uzdevumus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Tomēr, rezidenti spēja paveikt uzdevumus ievērojami ātrāk par medicīnas studentiem. Kopumā tas norāda, ka specifiskās attēlu izskatīšanas stratēģijas pielietojums ne vienmēr ir saistīts ar uzdevuma izpildes ātrumu un pareizību, līdzīgi kā uzsvērts *Kelahan et al.* pētījumā (2018). Turklāt strauji attīstoties trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijām, turpmāk būs nepieciešams izvērtēt kognitīvo procesu saistību ar pielietoto stratēģiju.

Mūsu pētījumā redzes stimulu fizikālās īpašības dažādā mērā ietekmēja attēla izskatīšanas stratēģiju radiologiem, rezidentiem un medicīnas studentiem. Interesanti, ka atšķirībā no radiologiem, rezidenti un studenti veica ievērojami vairāk pārvietojumu virziena maiņas ietekmējoties no redzes stimulu fizikālajām īpašībām. Tas nozīmē, ka noņemot attēla slāņus no volumetriskā daudzplakņu ekrāna radiologi pārsvarā neatgriezta tos atpakaļ, lai izskatītu atkārtoti. Savukārt rezidenti un studenti rīkojās citādi – viņi biežāk noņēma un atgriezta slāņus meklējot informāciju uz ekrāna. Šī atradne ir saskaņā ar cita pētījuma rezultātiem (*Diaz et al.*, 2015), kurā radiologi uzrādīja ievērojami organizētāku meklēšanas stratēģiju *z*-virzienā salīdzinot ar citiem cilvēkiem, izskatot daudzslāņu attēlus uz plakanā ekrāna monitora. Arī *Diaz et al.* pētījumā (2015) radiologi reti mainīja pārvietojumu virzienu un dažreiz neskatījās uz mērķa elementu pirms pareizas atbildes iesniegšanas. Organizētākā attēlu izskatīšanas stratēģija, ko uzrāda radiologi vizuālajā meklēšanā var būt saistīta ar labāku atmiņu, kas bija norādīts vairākos pētījumos (*Haller & Radue*, 2005; *Sunday et al.*, 2017). Atmiņai ir būtiskā loma dažādos vizuālās meklēšanas posmos. Piemēram, tā sekmē mērķa elementa atšķiršanu no distraktora vadoties pēc iepriekšējām zināšanām par mērķa elementa pazīmi (*Wolfe*, 2007), turklāt cilvēkam jāatceras, kuri elementi redzes ainā jau tika apskatīti un kāds lēmums bija pieņemts par katru no tiem, lai neveiktu liekas skata fiksācijas uz elementiem, kuri jau bija izskatīti (*Nowakowska et al.*, 2017). Tādējādi pārākas spējas iegaumēt un atpazīt jaunu informāciju ietekmē lejupejošos procesus vizuālajā meklēšanā, kas var atspoguļoties attēlu izskatīšanas stratēģijā. Jāpiebilst, ka lejupejošos procesus ietekmē arī koncentrēšanas spējas, kuras sekmē vizuālās meklēšanas uzdevuma izpildi.

Izteikta lejupejošo kognitīvo procesu kontrole varētu nodrošināt ar zināmām priekšrocībām trīsdimensionālu attēlu izskatīšanā sistemātiskā veidā. Mūsu pētījumā radiologi nemainīja daudzslāņu attēla izskatu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna vairāk nekā pusē meklēšanas uzdevumu, ko nevar apgalvot par rezidentiem un studentiem. Tas nozīmē, ka radiologi meklēja mērķa elementus skatoties telpiskā attēla kopainu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Šī pieeja varētu būt saskaņā ar pieredzējušo radiologu spēju ātrāk analizēt redzes informāciju globālās uztveres laikā (*Sheridan & Reingold*, 2017).

Ņemot vērā radiologu spēju ātri atrast informāciju ar minimālajām telpiskā attēla izmaiņām, trīsdimensionālā informācijas vizualizācija potenciāli varētu kļūst par vērtīgu palīgrīku attēlu izskatīšanā nākotnē. Trīsdimensionālās vizualizācijas metodes tiek izstrādātas, lai uzlabotu radiologu darba ergonomiku (Favalora, 2005; Getty et al., 2008; Osmanis & Osmanis, 2016; Douglas et al., 2018; Ferre et al., 2018; Nguyen et al., 2018; Uppot et al., 2019) samazinot kognitīvu slodzi un laiku, kas ir nepieciešams, lai izskatītu daudzslāņu attēlus un pieņemtu lēmumu par to, kurai attēla daļai ir jāpievērš lielāka uzmanība, meklējot patoloģiskās izmaiņas anatomiskajās struktūrās. Informācijas trīsdimensionālās vizualizācijas potenciālais noderīgums medicīnā un jaunu speciālistu apmācībā jau bija pieminēts vairākos pētījumos (Nguyen et al., 2018; Uppot et al., 2019), bet nevienā no tiem netika analizēta telpiski demonstrētu daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģija. Informācija par telpisko attēlu slāņu pārvietojumiem un izmaiņām meklēšanas laikā būs nepieciešama izstrādājot lietotājiem noderīgu un jēgpilnu navigācijas sistēmu darbam ar jaunām vizualizācijas tehnoloģijām. Mūsu pētījuma rezultāti parāda, ka speciālistiem ar dažādu darba stāžu var būt atšķirīgas prasības pret navigāciju attēlos, kad visa informācija ir demonstrēta telpiski uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna.

Jaunu trīsdimensionālās vizualizācijas sistēmu izstrādes joma ir liela un augoša. Dažādi informācijas attēlošanas paņēmieni tiek piedāvāti, lai atbilstu kvalitatīvās telpiskās atveides prasībām, kad ir jādemonstrē komplikētais redzes stimuls, tāds kā medicīniskais attēls, un uzlabotu ergonomiku diagnostiskajā radioloģijā. Dažādu lietotāju snieguma izpēte ļauj spriest par jaunu vizualizācijas sistēmu lietojamību un definēt specifiskās prasības pret tās izmantošanu. Tomēr, bieži pastāv grūtības piesaistīt dalībniekus jaunā ekrāna vai attēlu navigācijas programmas testēšanai, jo profesionāļiem nav laika piedalīties pētījumos (Wolfe et al., 2016). Līdz ar to citos pētījumos piesaistīja rezidentus (Atkins et al., 2006; Den Boer et al., 2018; Brams et al., 2020) vai analizēja rezultātus radiologiem un rezidentiem kopā (Drew et al., 2013; Nguyen et al., 2018), lai spriestu par vizuālo meklēšanu medicīniskajos attēlos un testētu jaunas darba stacijas profesionālo nolūku izmantošanai. Mūsu pētījuma rezultāti parādīja, ka meklēšanas sniegums var būt līdzīgs, tomēr arī nemedicīnisku attēlu izskatīšanas stratēģijas atšķiras radiologiem un rezidentiem. Tā kā ir svarīgi precīzi aprakstīt attēlu izskatīšanas stratēģiju īpatnības plānojot atbilstošu attēlu navigācijas sistēmu jaunai trīsdimensionālās vizualizācijas iekārtai, lietotāju sniegums tomēr jānovērtē iesaistot pieredzējušos radiologus, lai iegūtu atbilstošus un ticamus rezultātus turpmākai analīzei un uz datiem balstīto priekšlikumu izvirzīšanai navigācijas sistēmas projektēšanā.

Svarīgi piebilst, ka salīdzinot ar daudzslāņu attēliem parasti parādītiem uz plakanajiem ekrāniem, trīsdimensionālā informācijas vizualizācija atgriež radiologiem iespēju gūt labumu

no attēlu kopainas izskatīšanas (*Andriole et al.*, 2011). Pētījumā radiologi pārsvarā izskatīja trīsdimensionālus attēlus bez attēla kopainas izmaiņām, tomēr viņi mainīja meklēšanas stratēģiju un redzes informācijas apjomu demonstrēšanai uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, kad mērķa elementa redzamība samazinājās. Izstrādājot profesionāliem nolūkiem noderīgu saplūdinātu attēlu navigācijas sistēmu, būtu jāņem vērā, ka vizuālajā meklēšanā ir svarīgi gan redzēt kopainu (*Sheridan & Reingold*, 2017), gan samazināt redzes apjomu uz ekrāna, lai selektīvi izskatītu un padziļināti izvērtētu kādu telpiskā attēla segmentu vai slāni.

Joprojām daudzām trīsdimensionālās vizualizācijas tehnoloģijām ir ievērojami zemāka ekrāna izšķirtspēja (*Nguyen et al.*, 2018) salīdzinot ar specifiskiem ekrāniem, ko izmanto radiologi darba ikdienā (*Dams et al.*, 2014; *Nguyen et al.*, 2018). Pikseļu izmērs ir gandrīz divreiz mazāks uz radioloģijas monitoriem (piemēram, 0,21 mm uz *NEC*, *Eizo* un *Barco 3MP* monitoriem, *Dams et al.*, 2014) salīdzinot ar pikseļu izmēru uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna (0,38 mm, *Osmanis et al.*, 2018). Augstākās ekrāna izšķirtspējas nodrošināšana ir viens no būtiskiem priekšnosacījumiem turpmākajā volumetriskā daudzplakņu ekrāna pilnveidošanā, lai tas kalpotu par vērtīgu vizualizācijas rīku profesionālajās jomās, tādās kā radioloģija. Ir sagaidāms, ka nākotnē augstāka objektu detalizācija uzlabos mērķa elementu redzamību, ļaujot profesionāļiem biežāk izskatīt objekta kopainu uz ekrāna meklēšanas laikā un ātrāk pieņemt lēmumu par turpmākām rīcībām.

Kopumā var spriest, ka 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 jēgpilnu un viegli izmantojamo attēlu navigācijas sistēmu un apmācīt izmantot priekšrocības, ko sniedz jaunas tehnoloģijas. 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, kad lietotājs darbojas ar telpiskiem attēliem projicētiem īstajā dziļumā uz ekrāna. Pētījumā izstrādātā metode kalpo šim nolūkam ļaujot izvērtēt izmaiņas sniegunā un daudzslāņu attēlu izskatīšanas stratēģijā atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām, kas ir saistītas ar ekrānu tehniskiem parametriem.

6. SECINĀJUMI UN KOPSAVILKUMS

Analizējot dziļuma pazīmes meklēšanas rezultātus, novērots, ka mērķa elements bija atrasts ātri un pareizi, kad redzes stimula daļas tika projicētas tuvu viena otrai vertikālā un horizontālā virzienā no centra uz secīgām ekrāna plaknēm tuvajos skatīšanās attālumos. Pētījumā gūtie rezultāti norāda, ka cilvēkiem nav grūtību izšķirt telpisko attēlu relatīvu dziļumu pat pie ierobežotā dziļuma nosacījumu skaita, kad attēla daļas ir projicētas uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, apstiprinot relatīvās binokulārās disparitātes kritisko lomu dziļuma uztverē tuvajos skatīšanās attālumos. Pieaugot skatīšanās attālumam līdz volumetriskajam daudzplakņu ekrānam, dziļuma pazīmes meklēšanas pareizība krīt, jo rezultējošā relatīvā binokulārā disparitāte strauji samazinās pie lineārā plakņu izvietojuma optiskajā elementā.

Analizējot, kā cilvēki veic vizuālās meklēšanas uzdevumus uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna, tika noteikts, ka mērķa elementa redzamības ietekmē mainās ne tikai rezultējošs sniegums, bet arī veids, kā daudzslāņu attēli tiek izskatīti uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ir novērojama būtiska ietekme ar fizikālo īpašību saistītiem informācijas apstrādes procesiem vizuālajā meklēšanā. Proti, meklēšanas uzdevumos ar augstu mērķa-distraktora līdzību un elementu skaita pieaugumu uz ekrāna ir novērojams snieguma samazinājums un aktīvāka attēla slāņu pārvietojumu veikšana, kas norāda uz nepieciešamību ierobežot informācijas apjomu un selektīvi izskatīt redzes stimula daļas.

Turklāt jāņem vērā, ka attēlu izskatīšanas stratēģija var atšķirties lietotājiem ar profesionālās meklēšanas pieredzi. Atšķirībā no medicīnas studentiem un rezidentiem, radiologi visretāk mainīja attēlu izskatīšanas stratēģiju atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām, pārsvarā izskatot trīsdimensionālu attēlu kopainu uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna vizuālajā meklēšanā. Šī atradne varētu būt saistīta ar literatūrā pausto radiologu spēju veikt vizuālo meklēšanu organizētā veidā pateicoties lejupejošo procesu dominējošai kontrolei.

Apkopojot visus iegūtos rezultātus, tiek piedāvāts veids, kā novērtēt vizuālo efektivitāti uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Redzes stimuls tiek projicēts uz desmit dziļuma plaknēm. Tas sastāv no vienāda leņķiskā izmēra apliem ($0,5^\circ$ ārējais diametrs, $0,1^\circ$ līnijas platums), viens no kuriem atšķiras no pārējiem apliem ar palielinātu līnijas platumu apla centra virzienā. Lietotāja uzdevums ir atrast mērķa elementu ar atšķirīgu līnijas platumu un sniegt atbildi par tā relatīvu atrašanās vietu uz ekrāna izvēloties vienu no četrām piedāvātajām atbildēm. Lietotājs var izmantot iespēju mainīt redzes stimula izkārtojumu dziļuma plaknēs pildot meklēšanas uzdevumu ar iestrādātas attēlu navigācijas sistēmas palīdzību. Lietotājam jāizpilda pieci meklēšanas uzdevumi katrai no fizikālo mainīgo kombinācijām, kas ir mērķa-distraktora līdzība (15% un 25% atšķirība aplu līnijas platumā) un elementu skaits (20 un 40 apli $4,75^\circ \times 4,75^\circ$

ekrāna centrālajā daļā), nejaušā secībā. Kopā ar instrukciju sniegšanu un iepazīšanas uzdevumu pildīšanu, šī pārbaude lietotājiem ar netraucētajām redzes funkcijām var aizņemt līdz 15 minūtēm.

Izmantojot dažādas grūtības vizuālās meklēšanas uzdevumus, konstanto stimulu metodē tiek izvērtēts vizuālās meklēšanas izpildīšanas sniegums (pareizība un laiks), kā arī trīsdimensionālu attēlu izskatīšanas stratēģija (attēla slāņu pārvietojumu skaits, pārvietojumu virziena maiņu skaits un noņemtā attēla daļa) atkarībā no informācijas redzamības (mērķa-distraktora līdzības un elementu skaita) uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Pareizi un ātri izpildītie uzdevumi izskatot trīsdimensionālus attēlus norāda uz to, ka cilvēks spēj veiksmīgi atrast informāciju uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna. Ja cilvēks nespēj atrast informāciju tuvajā skatīšanās attālumā, tad jāpārliciecinās par viņa spējām uztvert uz volumetriskā daudzplakņu ekrāna projicēto redzes stimulu kā telpisko attēlu, izmantojot trīsdimensionālu attēlu uztveres izvērtēšanai izveidoto programmu. Nākotnē uzlabojot ekrānu tehniskus parametrus, mērķa-distraktora līdzību var samazināt vizuālās meklēšanas uzdevumos.

7. 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).

8. 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 nemitīgi 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 jaunajiem speciālistiem apgūt trīsdimensionālās vizualizācijas izmantošanas priekšrocības profesionālos nolūkos. Volumetriskā daudzplakņu ekrāna izšķirtspējas uzlabošana potenciāli var sekmēt biežāku izvēli izskatīt attēlu kopainu meklēšanas laikā. Pētījumā izveidotā metode var tikt pielietota, lai izvērtētu attēlu kvalitātes pilnveidojumu ietekmi uz lietotāju darba spējām. Turklāt nākotnē tā var tikt pielāgota jaunām vajadzībām un tehniskajām iespējām. Proti, attēli var tikt papildināti ar semantisko nozīmi, kura ir raksturīga konkrētas profesijas specifikai, tā arī metode var tikt izmantota vizuālās efektivitātes novērtēšanai uz cita veida volumetriskajiem ekrāniem. Attēlu izskatīšanas stratēģijas izpētē noderēs arī acu kustību pieraksts un galvas smadzeņu bioelektriskās aktivitātes pieraksts meklēšanas laikā, lai iegūtu padziļinātas zināšanas par kognitīvajiem procesiem atkarībā no attēlu fizikālajām īpašībām, un turpmāk izstrādātu algoritmu, ar kura palīdzību varētu prognozēt attēla fizikālo īpašību izmaiņu ietekmi uz lietotāju darba spējām.

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 dziļumu nosacījuma skaita tuvajos skatīšanās attālumos pateicoties attēla slāņu projicēšanai dažādā dziļumā ekrāna optiskajā elementā. 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.

9. AUTORA PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

9.1. Ar darbu saistītas publikācijas

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.

9.2. Citas autora publikācijas

1. Pladere, T., Naderi, M., Zabels, R., Osmanis, K., Krumina, G. (2020). "Comparative assessment of brain activity during depth perception of stereoscopic and volumetric images," *Proceedings of SPIE, 11481*, Article No. 1148108; doi: 10.1117/12.2567461.

2. Naderi, M., Pladere, T., Krumina, G. (2020). “EEG based assessment of user performance for a volumetric multiplanar display,” *Proceedings of SPIE*, 11350, Article No. 113500C; doi: 10.1117/12.2555646.
3. Pladere, T., Muravjova, V., Krumina, G. (2019). “Evaluation of brightness perception for a multi-planar volumetric display,” *Journal of Vision*, 19(15), Article No. 47; doi: 10.1167/19.15.47.
4. Panke, K., Pladere, T., Velina, M., Svede, A., Krumina, G. (2019). “Objective user visual experience evaluation when working with virtual pixel-based 3D system and real voxel-based 3D system,” *Photonics*, 6(4), Article No. 106; doi: 10.3390/photonics6040106.
5. Panke, K., Pladere, T., Velina, M., Svede, A., Ikaunieks, G., Krumina, G. (2019). “Ocular performance evaluation – How prolonged near work with virtual and real 3D image modifies our visual system,” *ACM International Conference Proceeding Series*, Article No. 14; doi: 10.1145/3309772.3309786.
6. Pladere, T., Velina, M., Konosonoka, V., Klava, K., Seleznova, M., Panke, K., Krumina, G. (2019). “Visual search performance depending on target-distractor difference on volumetric display and flat panel display,” *OSA Technical Digest*, Article No. JTu4A.96; doi: 10.1364/FIO.2019.JTu4A.96.
7. Panke, K., Stokmane, V., Pladere, T., Svede, A., Krumina, G. (2018). “Focusing in depth: post-task accommodation shifts after sustained near work with volumetric multi-planar display,” *OSA Technical Digest*, Article No. 3Tu5G.3, doi: 10.1364/3D.2018.3Tu5G.3.
8. Pladere, T., Bete, D., Skilters, J., Krumina, G. (2016). “Visual grouping under isoluminant condition: the impact of mental fatigue,” *Proceedings of SPIE*, 9971, Article No. 997133; doi: 10.1117/12.2236516.

10. DALĪBA KONFERENCĒS

10.1. Starptautiskās konferences

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.

10.2. Vietēja mēroga konferences

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 vizualajā 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.

11. IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- Aizenman, A., Drew, T., Ehinger, K. A., Georgian-Smith, D., Wolfe, J. M. (2017). Comparing search patterns in digital breast tomosynthesis and full-field digital mammography: An eye tracking study. *Journal of Medical Imaging*, 4(4), Article No. 045501.
- 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.
- Akeley, L., Watt, S. J., Girschick, A. R., Banks, M. S. (2004). A stereo display prototype with multiple focal distances. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3), 804-813.
- Anderson, N. C., Ort, E., Kruijne, W., Meeter, M., Donk, M. (2015). It depends on when you look at it: Saliency influences eye movements in natural scene viewing and search early in time. *Journal of Vision*, 15(5), Article No. 9.
- 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.
- Atkins, M. S., Moise, A., Rohling, R. (2006). An application of eyegaze tracking for designing radiologists' workstations: Insights for comparative visual search tasks. *ACM Transactions on Applied Perception*, 3, 136-151.
- Baird, J. W. (1903). The influence of accommodation and convergence upon the perception of depth. *The American Journal of Psychology*, 14(2), 150-200.
- Becker, S. I. (2011). Determinants of dwell time in visual search: Similarity or perceptual difficulty. *PLoS ONE*, 6(3), Article No. e17740.
- Birchall, D. (2015). Spatial ability in radiologists: a necessary prerequisite? *British Journal of Radiology*, 88, Article No. 20140511.
- 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.
- Brams, S., Ziv, G., Hooge, I. T. C., Levin, O., De Brouwere, T., Verschakelen, J., Dauwe, S., Williams, A. M., Wagemans, J., Helsen, W. F. (2020). Focal lung pathology detection in radiology: Is there an effect of experience on visual search behavior? *Attention, Perception & Psychophysics*, 82(6), 2837-2850.

- Broy, N., Alt, F., Schneegaß, S., Henze, N., Schmidt, A. (2013). Perceiving layered information on 3D displays using binocular disparity. *Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Pervasive Displays*, 61-66.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: the past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1484-1525
- Carrasco, M., Evert, D. L., Chang, I., Katz, S. M. (1995). The eccentricity effect: Target eccentricity affects performance on conjunction searches. *Perception & Psychophysics*, 57(8), 1241-1261.
- Carrigan, 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.
- Castiello, U., & Umiltà, C. (1990). Size of the attentional focus and efficiency of processing. *Acta Psychologica*, 73(3), 195-209.
- Chin, M. D., Evans, K. K., Wolfe, J. M., Bowen, J., Tanaka, W. (2017). Inversion effects in the expert classification of mammograms and faces. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3, Article No. 31.
- Clark, K. (2014). Variation in visual search abilities and performance. Ph.D. Thesis, Duke University, Durham, NC, USA.
- Cooper, L., Gale, A., Darker, I., Toms, A., Saada, J. (2009). Radiology image perception and observer performance: How does expertise and clinical information alter interpretation? Stroke detection explored through eye-tracking. *Proceedings of SPIE*, 7263, Article No. 72630K.
- 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, NY: Academic Press, 69-117.
- Dams, F., Leung, K., van der Valk, P. H., Kock, M. C., Bosman, J., Niehof, S. P. (2014). Technical and radiological image quality comparison of different liquid crystal displays for radiology. *Medical Devices: Evidence and Research*, 7, 371-377.
- Den Boer, L., Van der Schaaf, M. F., Vincken, K. L., Mol, C. P., Stuijzand, B. G., Van der Gijp, A. (2018). Volumetric image interpretation in radiology: Scroll behavior and cognitive processes. *Advances in Health Sciences Education. Theory and Practice*, 23, 783-802.
- De Silva, D. V. S. X., Ekmekcioglu, E., Fernando, W. A. C., Worrall, S. T. (2011). Display dependent preprocessing of depth maps based on just noticeable depth difference modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(2), 335-351.

- Devicic, Z., Idakoji, I., Kesselman, A., Shah, R., AbdelRazek, M., Kothary, N. (2018). Augmented virtual reality assisted treatment planning for splenic artery aneurysms: A pilot study. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 29, Article No. 30.
- 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.
- Dey, A. (2013). Perceptual characteristics of visualizations for occluded objects in handheld augmented reality. Ph. D. Thesis, University of South Australia, Adelaide, Australia.
- 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.
- Donovan, T., & Litchfield, D. (2013). Looking for cancer: Expertise related differences in searching and decision making. *Applied Cognitive Psychology*, 27(1), 43-49.
- Douglas, B. D., Venets, D., Wilke, C., Gibson, D., Liotta, L., Petricoin, E., Beck, B., Douglas, R. (2018). Augmented reality and virtual reality: Initial successes in diagnostic radiology. In: N. Mohamudally (Ed.), *State of the Art Virtual Reality and Augmented Reality Knowhow*, United Kingdom, London: IntechOpen.
- Downing, C. J., & Pinker, S. (1985). The spatial structure of visual attention. In: M. Posner & O. Marin (Eds.), *Attention and Performance XI: Mechanisms of Attention and Visual Search*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Drew, T., Vo, M. L., Olwal, A., Jacobson, F., Seltzer, S. E., Wolfe, J. M. (2013). Scanners and drillers: Characterizing expert visual search through volumetric images. *Journal of Vision*, 13, 1-13.
- 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.
- Egeth, H. E. (1966). Parallel versus serial processes in multidimensional stimulus discrimination. *Perception & Psychophysics*, 1(8), 245-252.
- Enns, J. T., & Kingstone, A. (1995). Access to global and local properties in visual search for compound stimuli. *Psychological Science*, 6(5), 283-291.
- Enright, J. T. (1991). Stereo-thresholds: Simultaneity, target proximity and eye movements. *Vision Research*, 31, 2093-2100.
- Eriksen, C. W., Yeh, Y. Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 583-597.
- Faber, L. G., Maurits, N. M., Lorist, M. M. (2012). Mental fatigue affects visual attention. *PLoS ONE*, 7, 1-10.

- Fahle, M., Henke-Fahle, S., Harris, J. (1994). Definition of thresholds for stereoscopic depth. *British Journal of Ophthalmology*, 78(7), 572-576.
- Farel, B., Ng, C. J. (2019). Attentional selection in judgements of stereo depth. *Vision Research*, 158, 19-30.
- Favalora, G. E. (2005). Volumetric 3D displays and application infrastructure. *Computer*, 38, 37-44.
- Ferre, R., Goumot, P.-A., Mesurole, B. (2018). Stereoscopic digital mammogram: Usefulness in daily practice. *Journal of Gynecology Obstetrics and Human Reproduction*, 47, 231-236.
- Finlayson, N. J., & Grove, P. M. (2015). Visual search is influenced by 3D spatial layout. *Attention, Perception & Psychophysics*, 77, 2322-2330.
- Franconeri, S. L., & Simons, D. J. (2003). Moving and looming stimuli capture attention. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 999-1010.
- Fukushima, T., Torii, M., Ukai, K., Wolffsohn, J. S., Gilmartin, B. (2009). The relationship between CA/C ratio and individual differences in dynamic accommodative responses while viewing stereoscopic images. *Journal of Vision*, 9(13), Article No. 21.
- 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.
- Getty, D. J., D'Orsi, C. J. D., Pickett, R. M. (2008). Stereoscopic digital mammography: Improved accuracy of lesion detection in breast cancer screening. In: E. A. Krupinski (Ed.), *Digital Mammography, IWDM 2008, Lecture Notes in Computer Science 5116*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 74-79.
- 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.
- Gu, Y., & Liljenström, H. (2007). A neural network model of attention-modulated neurodynamics. *Cognitive Neurodynamics*, 1(4), 275-285.
- Haller, S., & Radue, R. W. (2005). What is different about a radiologist's brain? *Radiology*, 236, 983-989.
- Hibbard, P. B., Haines, A. E., Hornsey, R. L. (2017). Magnitude, precision, and realism of depth perception in stereoscopic vision. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(1), Article No. 25.

- 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.
- Howarth, P. A. (2011). Potential hazards of viewing 3-D stereoscopic television, cinema and computer games: A review. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 31(2), 111-122.
- 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.
- Hulleman, J., Lund, K., & Skarratt, P. A. (2020). Medium versus difficult visual search: How a quantitative change in the functional visual field leads to a qualitative difference in performance. *Attention, Perception & Psychophysics*, 82, 118-139.
- Hulleman, J., & Olivers, C. N. L. (2017). The impending demise of the item in visual search. *Behavioral and Brain Sciences*, 40, 1-69.
- Jäkel, F., & Wichmann, F. A. (2006). Spatial four-alternative forced-choice method is the preferred psychophysical method for naïve observers. *Journal of Vision*, 6(11), 1307-1322.
- 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.
- Kane, D., Guan, P., & Banks, M. S. (2014). The limits of human stereopsis in space and time. *Journal of Neuroscience*, 34(4), 1397-1408.
- Kelahan, L. C., Fong, A., Blumenthal, J., Kandaswamy, S., Ratwani, R. M., Filice, R. W. (2018). The radiologist's gaze: Mapping three-dimensional visual search in computed tomography of the abdomen and pelvis. *Journal of Digital Imaging*, 32(2), 234-240.
- Kelly, B. S., Rainford, L. A., Darcy, S. P., Kavanagh, E. C., Toomey, R. J. (2016). The development of expertise in radiology: In chest radiograph interpretation, "expert" search

- pattern may predate “expert” levels of diagnostic accuracy for pneumothorax identification. *Radiology*, 280, 252-260.
- 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.
- Kimchi, R. (1992). Primacy of wholistic processing and global/local paradigm: A critical review. *Psychological Bulletin*, 112, 24-38.
- Kristjánsson, A. (2015). Reconsidering visual search. *i-Perception*, 6(6).
- Krupinski, E. A. (2010). Current perspectives in medical image perception. *Attention, Perception & Psychophysics*, 72, 1205-1217.
- 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.
- Krupinski, E. A., Zhan, H., Sahraian, S., Beheshtian, E., Morales, R., Yousem, D. (2020). Where’s WALDO: A potential tool for training radiology residents? *Proceedings of SPIE*, 11316, Article No. 1131605.
- Liversedge, S. P., Holliman, N. S., Blythe, H. I. (2009). Binocular coordination in response to stereoscopic stimuli. *Proceedings of SPIE*, 7237, Article No. 72370M.
- Maeda, E., Yoshikawa, T., Nakashima, R., Kobayashi, K., Yokosawa, K., Hayashi, N., Masutani, Y., Yoshioka, N., Akahane, M., Ohtomo, K. (2013). Experimental system for measurement of radiologists’ performance by visual search task. *SpringerPlus*, 2, Article No. 307.
- MacKenzie, K. J., Hoffman, D. M., Watt, S. J. (2010). Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control. *Journal of Vision*, 10(8), Article No. 22.
- Matsumoto, H., Terao, Y., Yugeta, A., Fukuda, H., Emoto, M., Furubayashi, T., Okano, T., Hanajima, R., Ugawa, Y. (2011). Where do neurologists look when viewing brain CT images? An eye-tracking study involving stroke cases. *PLoS ONE*, 6(12), Article No. e28929.
- Matsushima, E. H., de Oliveira, A. P., Ribeiro-Filho, N. P., Da Silva, J. A. (2005). Visual angle as determinant factor for relative distance perception. *Psicológica*, 26, 97-104.
- Matsushima, E. H., Vaz, A. M., Cazuza, R. A., Filho, N. P. R. (2014). Independence of egocentric and exocentric direction processing in visual space. *Psychology & Neuroscience*, 7(3), 277-284.

- McKee, S. P. (1983). The spatial requirements for fine stereoacuity. *Vision Research*, 23(2), 191-198.
- McKee, S. P., & Taylor, D. G. (2010). The precision of binocular and monocular depth judgments in natural settings. *Journal of Vision*, 10(10), Article No. 5.
- 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.
- Moise, A., Atkins, M. S., Rohling, R. (2005). Evaluating different radiology workstation interaction techniques with radiologists and laypersons. *Journal of Digital Imaging*, 18, 116-130.
- Legge, G. E., & Gu, Y. C. (1989). Stereopsis and contrast. *Vision Research*, 29(8), 989-1004.
- Naceri, A., Moscatelli, A., Chellali, R. (2015). Depth discrimination of constant angular size stimuli in action space: Role of accommodation and convergence cues. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, Article No. 511.
- Nagata, S. (1989). How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures. In: S. R. Ellis (Ed.), *Pictorial Communication in Virtual and Real Environments*, New York: Taylor & Francis, 527-545.
- Nakashima, R., Kobayashi, K., Maeda, E., Yoshikawa, T., Yoshikawa, K. (2013). Visual search of experts in medical image reading: The effect of training, target prevalence, and expert knowledge. *Frontiers in Psychology*, 4, Article No. 166.
- 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.
- Nowakowska, A., Clarke, A. D. F., & Hunt, A. R. (2017). Human visual search behaviour is far from ideal. *Proceedings of Royal Society B*, 284, Article No. 20162767.
- Owens, A. D., Leibowitz, H. W. (1980). Accommodation, convergence, and distance perception in low illumination. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 57(9), 540-550.
- Osmanis, K. (2016). Multi-planar volumetric 3D visualization system model analysis and implementation in FPGA. Doctoral thesis. Latvia, Riga: RTU Press.

- Osmanis, K., Osmanis, I. (2016). Real-time volumetric 3D imaging technology. *BioPhotonics*, 23, 30-33.
- 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.
- 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.
- Palmer, J., Verghese, P., Pavel, M. (2000). The psychophysics of visual search. *Journal of Vision*, 40(10-12), 1227-1268.
- Plewan, T., Rinkenauer, G. (2018). Surprising depth cue captures attention in visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(4), 1358-1364.
- 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.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3-25.
- Qiu, J., Li, J., Wang, K., Liu, S., & Lei, Q. (2017). Evidence for the effect of depth on visual working memory. *Scientific Reports*, 7, Article No. 6408.
- Ravesloot, C. J., Van der Schaaf, M. F., Van Schaik, J. P. J., Ten Cate, O. T. J., Van der Gijp, A., Mol, C. P., Vincken, K. L. (2015). Volumetric CT-images improve testing of radiological image interpretation skills. *European Journal of Radiology*, 84, 856-861.
- Rawlings, S. C., Shipley, T. (1969). Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation. *Journal of the Optical Society of America*, 59(8), 991-993.
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457-1506.
- Reichelt, S., Haausler, R., Futterer, G., Leister, N. (2010). Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays. *Proceedings of SPIE*, 7690, Article No. 76900B.
- Reis, G., Liu, Y., Havig, P., Heft, E. (2011). The effects of target location and target distinction on visual search in a depth display. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22, 29-41.
- Rolland, J. P., Kruefer, M. W., Goon, A. A. (1999). Dynamic focusing in head-mounted displays. *Proceedings of SPIE*, 3639, 463-470.
- Rosenholtz, R. (2017). Capacity limits and how the visual system copes with them. *Proceedings of Human Vision and Electronic Imaging*, 16, 8-23.

- Rosenholtz, R., Huang, J., Raj, A., Balas, B. J., Ilie, L. (2014). A summary statistic representation in peripheral vision explains visual search. *Journal of Vision*, 12(4), Article No. 14.
- Santhi, N., Reeves, A. (2004). The roles of distractor noise and target certainty in search: A signal detection model. *Vision Research*, 44(12), 1235-1256.
- Schneider, D., Bonmassar, C., & Hickey, C. (2018). Motivation and short-term memory in visual search: attention's accelerator revisited. *Cortex*, 102, 45-56.
- 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.
- Šikl, R., Šimeček, M. (2015). Visual space perception at different levels of depth description. *Attention, Perception & Psychophysics*, 77, 2098-2107.
- Smalley, D., Poon, T.-C., Gao, H., Kvavle, J., Qaderi, K. (2018). Volumetric displays: Turning 3-D inside-out. *Optics and Photonics News*, 29(6), Article No. 26.
- Sowden, P. T., Davies, I. R. L., Rolling, P. (2000). Perceptual learning of the detection of features in X-ray images: A functional role for improvements in adults' visual sensitivity? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 379-339.
- 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.
- Sullivan, A., Snuffer, J. (2002). Multi-planar volumetric display system and method of operation using psychological vision cues. Patent No. US20020113752A1.
- 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.
- Uppot, R. N., Laguna, B., McCarthy, C. J., De Novi, G., Phelps, A., Siegel, E., Cortier, J. (2019). Implementing virtual and augmented reality tools for radiology education and training, communication, and clinical care. *Radiology*, 291, Article No. 3.
- Van der Gijp, A., Ravesloot, C. J., Van der Schaaf, M. F., Van der Schaaf, I. C., Huige, J. C. B. M., Vincken, K. L., *et al.* (2015). Volumetric and two-dimensional image

- interpretation show different cognitive processes in learners. *Academic Radiology*, 22, 632-639.
- 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.
- Vienne, C., Sorin, L., Blonde, L., Huynh-Thu, Q., Mamassian, P. (2014). Effect of the accommodation-vergence conflict on vergence eye movements. *Vision Research*, 100, 124-133.
- Viguiet, A., Clément, G., Trotter, Y. (2001). Distance perception within near visual space. *Perception*, 30(1), 115-124.
- Volcic, R., Fantoni, C., Caudek, C., Assad, J. A., Domini, F. (2013). Visuomotor adaptation changes stereoscopic depth perception and tactile discrimination. *Journal of Neuroscience*, 33(43), 17081-17088.
- Waite, S., Farooq, Z., Grigorian, A., Siström, C., Kolla, C., Mancuso, A., Martinez-Conde, S., Alexander, R. G., Kantor, A., Macknick, S. L. (2020). A review of perceptual expertise in radiology – how it develops, how we can test it, and why humans still matter in the era of artificial intelligence. *Academic Radiology*, 27(1), 26-38.
- Wardle, S. G., Bex, P. J., Cass, J., Alais, D. (2012). Stereoacuity in the periphery is limited by internal noise. *Journal of Vision*, 12(6), Article No. 12.
- 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.
- Wloka, C., Sang-Ah, Y., Sengupta, R., Tsotsos, J. K. (2017). The interaction of target-distractor similarity and visual search efficiency for basic features. *17th Vision Science Society Annual Meeting*.
- Wolfe, J. M. (1998). What can 1 million trials tell us about visual search? *Psychological Science*, 9(1), 33-39.
- 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. (2016). Visual search revived: The slopes are not that slippery: A reply to Kristjansson. *i-Perception*, 7(3).

- Wolfe, J. M. (2020). Visual search: How do we find what we are looking for? *Annual Review of Vision Science*, 6, 539-562.
- Wolfe, J. M., Cave, K. R., Franzel, S. L. (1989). Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(3), 419-433.
- Wolfe, J. M., O'Neill, P., Bennett, S. C. (1998). Why are there eccentricity effects in visual search? Visual and attentional hypotheses. *Perception & Psychophysics*, 60(1), 150-156.
- 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.
- Zhan, T., Xiong, J., Zou, J., Wu, S.-T. (2020). Multifocal displays: Review and prospect. *Photonix*, 1, Article No. 10.

12. PATEICĪBA

Pateicība profesorei *Dr. phys.* Guntai Krūmiņai par atbalstu, uzticēšanos, saprotošo attieksmi un interesantu darba piedāvājumu.

Paldies studentiem un kolēģiem: Karolai Pankei, Vitai Konošonokai, Kristapam Kļavam, Gunitai Jankovskai, Viktorijai Andriksonei, Veronikai Muravjovai un Marinai Seļezņovai. Bija prieks sadarboties.

Pateicība SIA “*LightSpace Technologies*”, Rīgas slimnīcu vadībai, Latvijas Universitātes pētniecei Mārai Delesai-Vēliņai, Rīgas Stradiņa universitātes Radioloģijas pulciņam un tā vadītājam Reinim Pituram par uzdrīkstēšanos īstenot inovatīvas idejas un izstrādāt starpdisciplināro pētījumu.

Pateicība Optometrijas un redzes zinātnes nodaļas kolēģiem un pētījuma dalībniekiem par iesaistīšanos.

Paldies manai ģimenei par atbalstu un pacietību.

Pateicība Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātei, Latvijas Universitātes Zinātnes departamentam, starptautiskajām profesionālajām biedrībām SPIE un OSA par finansiālo atbalstu, nodrošinot iespēju apmeklēt starptautiskas konferences un prezentēt darba rezultātus.

Pateicība Latvijas Zinātņu akadēmijai, Latvijas Universitātei un masu medijiem par iespēju pastāstīt par paveikto darbu plašai publikai.

Promocijas darbs bija izstrādāts vairāku projektu ietvaros. Pētījumu atbalstīja Latvijas Universitāte un SIA „*LightSpace Technologies*” (ESP projekts Nr. ZD2017/20467 “3D volumetriskais ekrāns un redzes sistēmas funkcionalitāte”, projekts Nr. ZD2019/20807 “Volumetriskā displeja 3D attēla ietekmes uz cilvēka redzes sistēmu novērtējums”), kā arī darbu atbalstīja mecenāta SIA “Mikrotīkls” ziedojums projektam “Redzes ergonomikas pētījumu vides attīstība”, ko administrēja Latvijas Universitātes fonds. Projektu Nr. 1.1.1.1/18/A/179 “Kompaktas augsta spožuma lāzeru attēlprojekcijas sistēmas izveide pielietojumiem volumetriska tipa 3D displeju sistēmās” atbalstīja Eiropas Reģionālās attīstības fonds.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē