



LATVIJAS UNIVERSITĀTE
DATORIKAS FAKULTĀTE

REDZES LOKA PAPLAŠINĀŠANA AR VIRTUĀLU EKRĀNU

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Mārtiņš Ceplis**
Stud.apl.nr. mc11029

Darba vadītājs: profesors Dr.dat. Leo Seļāvo

Rīga 2013

ANOTĀCIJA

Darbā „Redzes loka paplašināšana ar virtuālu ekrānu” piedāvāta virtuālā ekrāna tehnoloģija, kas ļautu uzlabot virtuālās realitātes brīļļu sniegtās imersijas pakāpi, palielinot lietotāja redzes lauku. Tā vietā, lai nosegtu visu lietotāja redzes lauku ar dārgu un sarežģītu displeju, virtuālais ekrāns piedāvā izmantot salīdzinoši lētāku un vienkāršāku adaptīvo apgaismojumu perifērajā redzes apgabalā. Darba ietvaros virtuāli modelēta šāda iekārta un eksperimentālā ceļā pētīta tās efektivitāte pie dažādiem parametriem.

Atslēgas vārdi: virtuālais ekrāns, virtuālā realitāte, imersija, perifērā redze, redzes lauks

ABSTRACT

Master thesis "Extending Field of View by Virtual Screen" proposes a new technology that would allow to enhance the quality of immersion of virtual reality glasses by providing larger field of view. But, instead of using expensive and complex high resolution display, virtual screen offers more cost effective solution by using LED matrix to create adaptive lighting for peripheral vision. During the research a virtual model of such a device was developed and its efficiency was tested in a number of experiments with varied parameters.

Keywords: virtual screen, virtual reality, immersion, peripheral vision, field of view

AUTOREFERĀTS

Darba autors ir izstrādājis virtuālā ekrāna konceptuālo ideju, apkopojis informāciju par esošajiem un projektam aktuālajiem virtuālās vides risinājumiem, iepazinies ar cilvēka redzes īpatnībām, izstrādājis eksperimenta metodiku, uzprogrammējis eksperimenta lietojumprogrammu, veicis eksperimentus, apkopojis un analizējis datus, sagatavojis šo darbu.

SATURS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	6
IEVADS	8
2 TRADICIONĀLIE VIRTUĀLĀS REALITĀTES VIZUALIZĀCIJAS RISINĀJUMI	9
2.1 VIRTUĀLĀS REALITĀTES BRILLES	9
2.1.1 <i>Darbības pamatprincips un attīstība</i>	9
2.1.2 <i>Oculus Rift</i>	10
2.2 CAVE.....	12
2.2.1 <i>Darbības pamatprincips</i>	12
2.2.2 <i>CAVE</i>	13
2.2.3 <i>CAVE 2</i>	13
2.2.4 <i>Mini-CAVE</i>	13
2.2.5 <i>LAIR</i>	14
2.2.6 <i>Immersa Desk 2</i>	14
2.2.7 <i>DAVE</i>	15
2.2.8 <i>Desktop-CAVE</i>	15
2.2.9 <i>PARIS</i>	15
2.2.10 <i>Holodesk</i>	15
2.2.11 <i>Microsoft Illumiroom</i>	16
3 REDZES LAUKS.....	17
3.1 ACS UZBŪVE.....	17
3.2 REDZES ASUMA MĒRĪŠANA	19
3.3 REDZES LAUKA SADALĪJUMS	20
3.4 REDZES LAUKS VIRTUĀLĀS REALITĀTES SISTĒMĀS.....	21
4 VIRTUĀLAIS EKRĀNS.....	23
5 VIRTUĀLĀ EKRĀNA SIMULĀCIJAS IEKĀRTA.....	25
5.1 PAMATOJUMS	25
5.2 TEHNISKĀ REALIZĀCIJA	25
5.2.1 <i>Aparatūra</i>	25
5.2.2 <i>Vizualizācijas lauka konfigurācija</i>	26
5.2.3 <i>Programmatūra</i>	26
5.3 PARAMETRI	28
6 EKSPERIMENTS NR.1.....	30
6.1 METODIKA.....	30
6.2 EKSPERIMENTA GAITA	31

6.3	REZULTĀTI UN ANALĪZE.....	32
7	EKSPERIMENTS NR. 2.....	37
7.1	METODIKA.....	37
7.2	EKSPERIMENTA GAITA	37
7.3	REZULTĀTI UN ANALĪZE.....	37
7.3.1	<i>Statiskās un dinamiskās vides mērījumu salīdzinājums</i>	37
7.3.2	<i>Nevienmērīgs diožu izkārtojums</i>	40
8	KVALITATĪVAIS PĒTĪJUMS.....	43
	NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI.....	47
8.1	REZULTĀTI	47
8.2	OPTIMĀLĀ VIRTUĀLĀ EKRĀNA KONFIGURĀCIJA	47
8.2.1	<i>Izšķirtspēja</i>	47
8.2.2	<i>Diožu krāsas algoritms</i>	48
8.2.3	<i>Diožu izkārtojums</i>	48
8.3	GRŪTĪBAS DARBA IZSTRĀDĒ	48
8.3.1	<i>Pikseļu informācijas iegūšana</i>	48
8.3.2	<i>Trīs monitoru sistēma</i>	50
8.4	NEPAVEIKTAIS UN TURPMĀKAIS DARBS	51
	PATEICĪBAS.....	53
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	54

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

Virtuālais ekrāns—ekrāns, kura izmērs virtuāli paplašināts, izmantojot adaptīvo apgaismojumu.

Redzes loks - telpas apgabals, kurā cilvēks vai iekārta „redz” – var uztvert vizuālos stimulus un informāciju. Parasti to raksturo ar horizontālo un vertikālo izvērzes leņķi.

Perifērā redze, perifērais redzes lauks – tā redzes lauka daļa, kas neatrodas redzes centrā.

Faveola – redzes centrs, kurā ir visaugstākā fotoreceptoru koncentrācija tīklenē; acs daļa ar visaugstāko izšķirtspēju.

Adaptīvais apgaismojums – apgaismojums, kas maina krāsu un intensitāti pielāgojoties tam nodotajai informācijai.

Virtuālās realitātes brilles – virtuālās realitātes vizualizācijas iekārta, kas veidota kā brilles, kuru lēcu vietā ir katrai acij individuāls vai abām kopējs displejs.

Virtuālā ala, CAVE– virtuālās realitātes vizualizācijas iekārta, kas realizēta izmantojot stereoskopisku attēlu projekcijas uz lietotāju iekļaujošas telpas sienām.

Aktīvā slēdža stereoskopiskā brilles – no angļu valodas termina *activeshutterglasses* – stereoskopiskās brilles, kas 3D efektu rada ļoti strauji aizsedzot vienu vai otru aci, lai, sinhronizējoties ar stereoskopisku attēlu, rastos stereoskopiskais telpiskuma efekts. Pēdējā laikā populārākais risinājums 3D kino industrijā.

Imersija – pārlicinošs klātesamības, „īstuma” efekts, iejušanās; parasti kontekstā ar virtuālo vidi, kas citādi nav gana „īsta”. Svētais grāls, pēc kura tiecas visi virtuālās realitātes veidotāji.

MUD– no angļu valodas, *multi-userdungeon*. Daudzspēlētāju tīkla spēle ar teksta interfeisu, mūsdienu daudzspēlētāju tīkla datorspēļu (piemēram, *WorldofWarcraft*) vectētiņš.

IRC – no angļu valodas, *internetrelaychat*, savulaik ļoti populārs tiešsaistes tērzēšanas protokols.

ActionScript 3.0, AS3 – kompānijas *Adobe* izstrādāta objektorientēta atvērtā koda programmēšanas valoda.

Šeideris – speciāla, zema līmeņa programma, kas darbojas tieši uz videokartes un veic apgaismojuma aprēķinus attēlā. Mūsdienās šeiderus izmanto arī dažādu vizuālu efektu iegūšanai un pat apjomīgām, ar vizualizāciju nesaistītām, peldošā punkta matemātikas kalkulācijām.

Unity – populāradatorspēļu (un citas trīsdimensionālas programmatūras) izstrādes un vadības vide. Balstīta uz C# valodu.

Java3D – trīsdimensionālas grafikas ietvars valodai *Java*. Realizēts, atkarībā no operētājsistēmas, uz OpenGL vai DirectX slāņiem.

OpenGL – starpplatformutrīsdimensionālās grafikas zīmēšanas bibliotēka ar ļoti senu vēsturi (kopš 1992).

Eyefinity – grafisko karšu ražotāja *AMD/ATI* tehnoloģija, kas ļauj pieslēgt vairāk nekā divus monitorus vienlaicīgi (pat sešus piemēram).

Surround – analogiska tehnoloģija *Eyefinity*, tikai no kompānijas *NVidia*.

Tekstūra– attēls, ko uzklāj uz trīsdimensionāla objekta, ja objekts ir taisnstūris; divdimensiju gadījumā tekstūra ir faktiski tas pats attēls.

Cpd – *cycles per degree*, cikli uz vienu leņķa grādu; redzes asuma, izšķirtspējas mērvienība.

Px – pikseļi, saīsinājums.

IEVADS

Virtuālās vides mūsdienās kļūst populārākas un tiek pielietotas arvien biežāk dažādās sfērās – sākot ar izklaidi un beidzot ar zinātni. Neatkarīgi no pielietojuma, ir svarīgi piedāvāt lietotājam pēc iespējas plašākas iespējas saņemt informāciju un mijiedarboties ar virtuālo pasauli. Parasti tiek realizēts ar speciālu aparāturu – virtuālās realitātes brillēm vai virtuālo alu, kas ļauj cilvēkam virtuālajā vidē rīkoties gandrīz tāpat kā realitātē; piemēram, aplūkojot virtuālu muzeja eksponātu, lietotājs var pagriezt galvu un apskatīt objektu arī no aizmugures. Šī darba mērķis ir sniegt papildus pienesumu šajā jomā, piedāvājot jaunu tehnoloģiju esošo risinājumu efektivitātes uzlabošanai.

Vispirms darbā apskatītas populārākās virtuālās vides attēlošanas metodes, novērtētas to priekšrocības un trūkumi. Esošās sistēmas un risinājumi aplūkoti arī tīri praktisku apsvērumu dēļ – tie piedāvā jau gatavus risinājumus, kurus būtu lietderīgi „aizņemties”, izstrādājot eksperimenta iekārtu. Tāpat darba izstrādes laikā arvien lielāku popularitāti un atbalstu izpelnījās jauna virtuālās realitātes brillu tehnoloģija *OculusRift*, kas piedāvā ļoti augstvērtīgu sniegumu par pieejamu cenu, tāpēc šī tehnoloģija aplūkota sīkāk un analizēta virtuālā ekrāna kontekstā.

Pēc tam seko īss cilvēka redzes lauka pamatprincipu apskats balstoties uz acs anatomiju un cilvēka psiholoģisko uztveri. Tālāk īsumā izklāstīts virtuālā ekrāna darbības princips, pamatidejas.

Tad seko praktiskā daļa – apskatītā virtuālā ekrāna modelēšana un eksperimenti. Eksperimenta galvenais mērķis ir pārbaudīt hipotēzi par to, ka cilvēkam virtuālās realitātes vizualizēšanai perifērās redzes laukā nav nepieciešams augstas izšķirtspējas ekrāns, bet pietiek ar gaismas diožu matricu.

Ja hipotēze kaut daļēji apstiprinās, svarīgi ir iegūt priekšstatu par to, kā diožu izmērs, skaits un izkārtojums ietekmē virtuālās realitātes vizualizācijas kvalitāti. To nepieciešams novērtēt gan kvalitatīvi (subjektīvās izjūtas), gan tīri kvantitatīvi – iegūt objektīvu skaitlisku parametru, ar kura palīdzību var novērtēt, cik ļoti viena virtuālā ekrāna konfigurācija atšķiras no otras.

Darba noslēgumā apkopoti pētījumu un izstrādes rezultāti, to analīze un secinājumi maģistra darba kontekstā.

1 TRADICIONĀLIE VIRTUĀLĀS REALITĀTES VIZUALIZĀCIJAS RISINĀJUMI

1.1 Virtuālās realitātes brilles

1.1.1 Darbības pamatprincips un attīstība

Pirmais un šķietami vienkāršākais risinājums, kā radīt klātesamības efektu virtuālajā vidē ir speciālas brilles. Tā ir ierīce, kas katru aci aizsedz ar ekrānu, kur tiek konstruēts attēls atbilstoši sensoru informācijai par briļļu (un līdz ar to lietotāja) orientāciju telpā. Tiek izmantoti viens vai divi nelielidisplayi; tā kā displayi(-s) atrodas ļoti tuvu acīm (apmēram tikpat cik briļļu lēcas) un tie ir piesaistīti galvai, tiem nav jābūt pārāk lieliem, lai noklātu visu redzes lauku. Lai aplūkotu virtuālu objektu, lietotājam ir jāpagriež galva, ko, savukārt, var nolasīt sensori un attiecīgi likt vizualizācijas programmai mainīt attēlus, t.i., orientācijas maiņa tiek simulēta.

Šādas sistēmas pasaulē ir ļoti populāras, par pirmo pilnvērtīgu tāda veida ierīci pieņemts uzskatīt Aivena Sazerlenda (*Ivan E. Sutherland*) radīto trīsdimensiju galvas displeju [1,2], kuru viņš izstrādāja kopā ar savu studentu Bobu Spraulu (*Bob Sproull*) jau 1968. gadā.

Ierīce bija tik smaga, ka to vajadzēja nostiprināt pie griestiem un galvas pozīcija tika noteikta izmantojot kaprīzu ultraskaņas vai neērtu mehānisko sensoru (skat. 1.1. att (a)). Tomēr neskatoties uz ierīces robustumu, tā veiksmīgi pildīja savu uzdevumu un radīja ticamu klātesamības efektu [1]. Mūsdienās, vairāk nekā 40 gadus vēlāk, šī tehnoloģija ir būtiski attīstījusies un šobrīd datorspēļu nozare ar nepacietībugaida jaunu produktu – virtuālās realitātes brilles *Oculus Rift* [3,4,5], kas sola piedāvāt augstas kvalitātes virtuālo realitāti plašam cilvēku lokam par pieejamu cenu.

Virtuālās realitātes briļļu trūkumi saistīti galvenokārt ar tehnoloģiju attīstību – tas, kas bija problēma senāk, ir jau atrisināts jaunākajās ierīcēs. Tā piemēram, Sazerlends saskārās ar nepietiekamu skaitļotāja jaudu [1], lai renderētu vienkāršus objektus vektorgrafikā, kamēr mūsdienu datori spēj norenderēt miljoniem poligonu sekundē. Tas pats attiecas uz sensoriem – tie kļuvuši precīzāki, vieglāki, kompaktāki. Arī izmērs un svars iepriekš vienmēr bija problēma, kamēr, piemēram, *Oculus Rift* brilles sver tikai 250 gramus (1.1. att.).

Ir novērojama izteikta sakarība starp klātesamības efekta kvalitāti un briļļu displeja redzes lauku [6]. Bez tam perifērās redzes lauks ir svarīgs, lai lietotājs varētu labāk orientēties, tas, savukārt, ietekmē virtuālās vides lietojamību. Tomēr tehniski tas nozīmē

nepieciešamību pēc lielāka izmēra un liektas konstrukcijas displeja(-iem). Liekums nozīmē arī ģeometriskus kropļojumus, ar kuriem jārēķinās; parasti to kompensē ar programmatūras palīdzību. Šīs nianse būtiski sadārdzina un padara sarežģītāku virtuālās realitātes briļļu ražošanu un attiecīgi arī cenu.



(a)

(b)

1.1.att. Virtuālās realitātes brilles tad un tagad:

(a) Aivena Sazerlenda „Damokla zobens” (1968) – pirmais galvas displejs[1] (b) *Oculus Rift* šobrīd gaidītākā virtuālās realitātes iekārta[5]

Tomēr dažas lietas šajā sistēmā ir problemātiskas jau pēc savas būtības. Pirmkārt, papildus aparatūra uz ķermeņa, – lai cik tā nebūtu viegla, tā tik un tā vienmēr ietekmēs kustību brīvību un sajūtas, tāpat arī vadi un citi tehnoloģiskie risinājumi. Otrkārt, šīm ierīcēm ir nelāga slava izraisītšūpes kaiti, kas ir dabiska organisma reakcija uz nepamatotu kustību [7] – piemēram, kad vestibulārais aparāts konfliktē ar vizuālo informāciju. Simptomi ir nelabums, nogurums, problēmas ar koordināciju, slikta pašsajūta. Pret šo kaiti jūtīgi ir apmēram trešdaļa cilvēku. Cēloņi tam ir dažādi, piemēram, novēlota attēla pārzīmēšana, reaģējot uz orientācijas maiņu vai kustību. Augstākas frekvences sensori, ātrāk atjaunojami displeji var samazināt vai novērst šo problēmu lielākajai daļai cilvēku, tomēr daļai tā joprojām saglabāsies.

1.1.2 OculusRift

Darba izstrādes laikā iepriekš nezināms projekts *OculusRift* parādījās virtuālās realitātes nozarē ar ļoti spēcīgu pieteikumu – augstas kvalitātes virtuālās realitātes brilles par pieejamu cenu, kur galvenais pielietojums ir datorspēles. Radušās kaislīga datorspēlētāja un elektronikas entuziasta Palmera Lakija (*Palmer Luckey*) garāžā tās bija domātas, kā labāka alternatīva esošajiem, salīdzinoši zemākas kvalitātes produktiem, kas nebija īsti piemēroti

datorspēlēm. Drīz vien radās kompānija, tika uzsākta naudas ziedošanas kampaņa, kas jau pirmajās dienās savāca 250 000 dolāru uzstādīto mērķi (kopumā akcijas ietvaros sasniedzot 2 437 429 dolāru apjomu) [4] –un nu jau pēc dažiem mēnešiem reāli *OculusRift* prototipi nonāca interesentu un spēļu izstrādātāju rokās, no kuriem šobrīd dzirdamas tikai sajūsmas pilnas atsauksmes. Papildus šim projektam atbalstu publiski izteica nozares veterāni un leģendas Džons Kārmaks (*JohnCarmack*) un Markuss Pārsons (*Marcus 'Notch' Parson*) –neko tādu iepriekš citas virtuālās realitātes iekārtas sasniegušas nebija.

Galvenās *OculusRift* priekšrocības un panākumu atslēga ir zems latentums (zibenīga reakcija uz galvas kustību), 9 kustības brīvības pakāpes un – šī darba kontekstā īpaši interesējošais – plašs redzeslauks. Tas ir 90° horizontāli, 110° - pa diagonāli, vizualizācija notiek ar 7 collu (17,78 cm) 1280x800 pikseļu LCD ekrānu (to pašu, ko izmanto *GoogleNexus 7*)[8], kas ar lēcu palīdzību tiek sadalīts katrai acij (640 x 800 pikseļu) stereoskopiskā efekta panākšanai. Attēla atjaunošanās frekvence – 60 Hz, bet sensoriem – pat 1000 Hz. Iekārtas masa – 379 grami. Šobrīd *OculusRift* var iegādāties par 300 dolāriem, kas salīdzinot pat ar zemākas kvalitātes virtuālās realitātes brillēm, ir ievērojami maz.

OculusRift šobrīd jau atbalsta vairākas populāras datorspēles – *Doom 3*, *TeamFortress 2*, *Portal 2*, *Half-Life 2* un ar speciālas programmatūras *Vireio*(vireio.io)palīdzību daudzas citas. Iekārtai jau pieejami papildinājumi – piemēram *Hydra* tehnoloģija, kas, izmantojot tādu kā pulti, ļauj virtuālajā realitātē dabiski manipulēt gandrīz kā realitātē ar rokām [9].

Kopumā viss liecina par to, ka šī iekārta kļūs, iespējams, par pirmo masveida virtuālās realitātes rīku civilizācijas vēsturē un varbūt pat uz visiem laikiem izmainīs mūsu realitāti, tāpat kā to savulaik izdarīja grāmatu iespiešana, internets, sociālie tīkli.

Tomēr šai pasakainajai ierīcei, acīmredzot ir arī trūkumi. Piemēram redzes lauks, kas, kā izrādās, lai arī ir ievērojams un vairākas reizes apsteidz konkurentus, tomēr tik un tā ir ierobežots, t.i., ne 180°, bet labi ja puse. Protams, tas pilnībā nosedz redzes lauka pamatdaļu, tomēr perifērā redze joprojām ir ierobežota.

Šo problēmu ir mēģināts risināt ar *Oculight* palīdzības, kas pēc būtības ir RGB diožu lenta, kas iebūvēta iekārtā un rada videi atbilstošu ambientu apgaismojumu [10]. Pēc būtības – primitīvs virtuālais ekrāns, tiesa pēdējais ir solis tālāk.

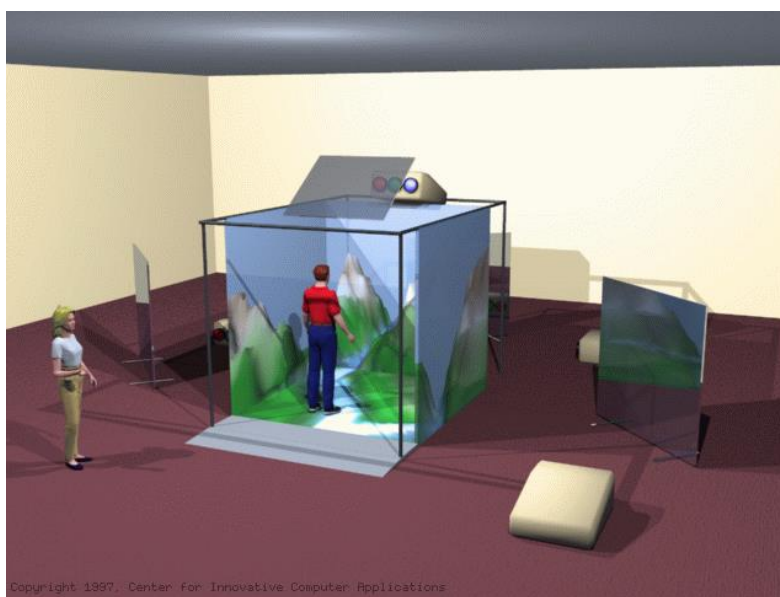
Tas liecina, ka darbā aprakstītā tehnoloģija joprojām ir aktuāla pat, ja parādījies tik spēcīgs virtuālās realitātes risinājums kā *OculusRift*.

1.2 CAVE

1.2.1 Darbības pamatprincips

Otrs populārs veids, kā pilnvērtīgi vizualizēt virtuālu vidi ir tā saucamā *CAVE* (*Cave automatic virtual environment*) jeb virtuālās alas tehnoloģija. Tās pamatideja ir tāda, ka virtuālā vide tiek vizualizēta telpā apkārt lietotājam, nevis tieši acu priekšā, kā virtuālo brīļu gadījumā.

Tehniski tās ir divas telpas – lielākā telpā ievietota mazāka. Sienu tekstūra tiek mainīta izmantojot augstas izšķirtspējas projektorus, kas no ārpuses projicē stereoskopisku attēlu uz mazākās telpas puscaurspīdīgajām sienām (skat. 1.2. att.). Lietotājs arī šajā gadījumā izmanto brilles, bet šajā gadījumā tās ir stereoskopiskās 3D brilles (kā kinoteātros), kas rada telpiskuma efektu. Tām parasti tiek izmantota aktīvā slēdža, nevis anaglifu tehnoloģija. Izmantojot ārējus sensorus, lietotāja kustība, pārvietošanās tiek analizēta (izmantojot, piemēram, videokameras, marķierus) un telpas tekstūra mainās atbilstoši lietotāja pozīcijai vai rīcībai. 3D brīļu izmantošana ļauj ieviest arī telpiskus objektus interakcijai.



1.2.att. CAVE:

klasiskā CAVE konfigurācija. [11]

Priekšrocības ir acīmredzamas – lietotājam vajadzīgas tikai stereoskopiskās brilles, viņš var (salīdzinoši) brīvi kustēties un pat pārvietoties telpas ietvaros. Vēl svarīgi, atšķirībā no virtuālās realitātes brīlēm – galvas orientācijas maiņa netiek simulēta, jo tas nav nepieciešams

– jebkurā pozīcijā lietotājs redz sienu, griestus, grīdu vai jebkuru to kombināciju, attiecīgi, jau pēc konstrukcijas izpaliek latentuma problēma.

Galvenie *CAVE* trūkumi ir augstās izmaksas un salīdzinoši komplicētā uzbūve. Nepieciešamas divas telpas un vairāki (parasti četri) augstas izšķirtspējas projektori kā arī faktiski datoru klasteris, lai to visu kontrolētu. Rezultātā radušies *CAVE* iedvesmoti projekti, kas mēģina samazināt izmaksas un nepieciešamās telpas izmērus, izmantojot citus tehnoloģiskos risinājumus un konfigurāciju. Tālāk apskatīti daži, uz šī principa balstīti risinājumi.

1.2.2 CAVE

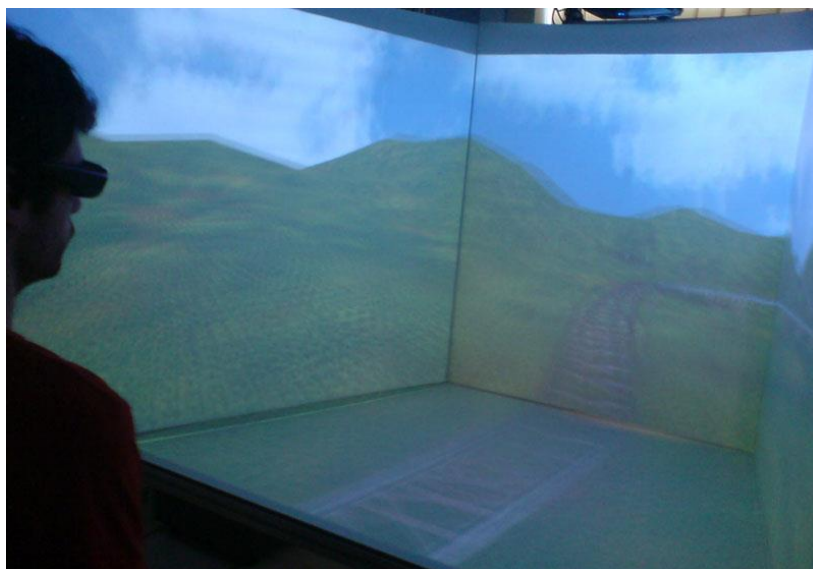
Pirmā *CAVE* sistēma oriģināli ir radīta Ilinoisas universitātē Čikāgā un demonstrēta *SIGGRAPH* konferencē 1992. gadā [12] un kopš tā laika izmantotā tehnoloģija un darbības principi kļuvusi par spēcīgu alternatīvu virtuālās realitātes brillēmvirtuālās pasaules vizualizēšanai.

1.2.3 CAVE 2

Šobrīd Čikāgā jau darbojas nākamās paaudzes sistēma – *CAVE2*[13]– daudzstūra formas telpa, aptuveni 8 metru diametrā, 2,5 metru augsta, kur sienas veido 72 3D ekrāni, kas savienoti vienotā virsmā bez sadalošām maliņām. Lai to visu darbinātu nepieciešams 36 datoru klasteris, 100 gigabiti/sekundē tīkla pieslēgums un 10 kameru optiskā sekošanas sistēma. *CAVE 2* nodrošina bildes asumu, kas atbilst normālai cilvēka redzei (un tā ir 10 reizes lielāka izšķirtspēja nekā oriģinālai sistēmai *CAVE*). 20 skaļruņu sistēma nodrošina arī līdzvērtīga reālisma apskaņošanas sistēmu.

1.2.4 Mini-CAVE

Svētās Annas augstskolas *PERCRO* Uztveres robotikas laboratorijā Itālijā izveidotā *Mini-CAVE* ir *CAVE* samazināta versija (aptuveni 2x2 metri), kura ir tik neliela, ka izvietota uz galda (1.2. att).



1.3.att.PERCROMini-CAVE

1.2.5 LAIR

LAIR (light-weightaffordableimmersionroom) projektorus novieto „mazās telpas” iekšpusē, nevis ārpusē, tā iekonomējot kopējo sistēmai nepieciešamo telpu. Pareizs projektoru izvietojums garantē to, ka noteiktā reģionā telpas centrā lietotājs var kustēties un pārvietoties, neuztraucoties par projekcijas aizsegšanu[14].

1.2.6 ImmersaDesk2

1996. gadā radītais *ImmersaDesk2*[15] izmanto *CAVE* konceptu un tehnoloģiju, bet tikai vienā plaknē (84 collu, 1,3 proporciju ekrāns). Sistēmaparedzēta salīdzinoši kompakta un ērti pārvietojuma – tā ir iekļaujama vienā lidmašīnas bagāžai paredzētā kastē. Darba režīmā tai ir pieejami divi stāvokļi – virtuālās realitātes darbvirsma (ekrāns pavērsts 45° leņķī) vai klasisks videoekrāns (vertikālā pozīcijā).

Interakcijai tiek izmantotas stereoskopiskās brilles ar galvas pozīcijas sensoru, kā arī rokas manipulatoru.



1.2.att.ImmersaDesk 2

1.2.7 DAVE

DAVE (Definitelyaffordablevirtualenviroment)[16] ir klasiska *CAVE* sistēma, tikai ar divām būtiskām atšķirībām – tā ir būvēta izmantojot standarta komponentus izmaksu samazināšanai, un otrs – sistēma aktīvi seko līdz lietotāja galvas kustībām, lai koriģētu vizualizāciju efektīvākai imersijai.

1.2.8 Desktop-CAVE

Saistībā ar šo darbu, tēmas un realizācijas ziņā interesants ir projekts *Desktop-CAVE*[17], kur *CAVE* tehnoloģija tiek realizēta uz trim monitoriem, kas veido trīs paralelograma skaldnes. To paredzēts lietot līdzīgi kā parastu monitoru, pie galda, ar klaviatūru un peli, bet ar iespēju palūkoties sāņus. Jo vairāk, līdzīgi kā šajā darbā, šī tehnoloģija analizēta datorspēles kontekstā.

1.2.9 PARIS

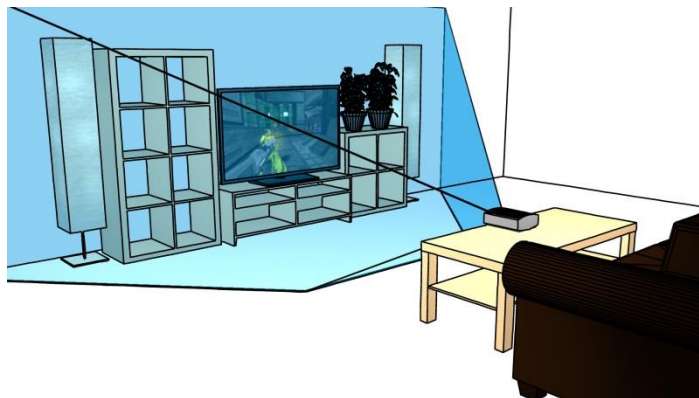
PARIS jeb *PersonalAugmentedRealityImmersiveSystem* [18], līdzīgi *ImmersaDesk 2* ir vienas plaknes virtuālās realitātes sistēma, taču ar interesantu papildinājumu – lietotājs var redzēt savas rokas iekļautas virtuālajā realitātē. Šī šķietami triviālā iespēja patiesībā atstāj būtisku iespaidu uz imersijas sajūtu un arī tīri praktiski ļauj veikt komplicētas manipulācijas ar virtuāliem objektiem (piemēram zīmēt, vai „operēt” ķirurga stimulatorā utt.).

1.2.10 Holodesk

Līdzīgi *PARIS, Holodesk* [19] arī piedāvā iespēju izmantot rokas un pat citus patvaļīgus fiziskus priekšmetus, lai manipulētu vai mijiedarbotos ar virtuāliem objektiem virtuālā vidē. *Holodesk* ir modernāks projekts (2012), tas izmanto virkni dažāduprogrammatūras risinājumu, lai analizētu „manipulatorus” – roku un/vai objektus – un reālajā laikā tos radītu un transformētu virtuālajā realitātē. Projekts izstrādāts *Microsoft Research* paspārnē.

1.2.11 Microsoft Illumiroom

Programmatūras izstrādes gigants *Microsoft* piedalās arī virtuālās realitātes sistēmu izstrādē [20]. Iepriekš kā baumas [32], bet nu jau reāls projekts ir *Microsoft Illumiroom* – izklaides centram *Xbox* paredzēts papildinājums, kas lietotāja istabu ar projekciju palīdzību pārvērtīs par spēles papilddekrānu.



(a)



(b)

*1.3.att. Microsoft Illumiroom:
princips (a) un sistēma darbībā (b) [21]*

Darba kontekstā tas ir interesanti, jo līdzīgi kā aplūkotais virtuālais ekrāns, arī *Illumiroom* risina ierobežotā perifērā redzes lauka problēmu.

2 REDZES LAUKS

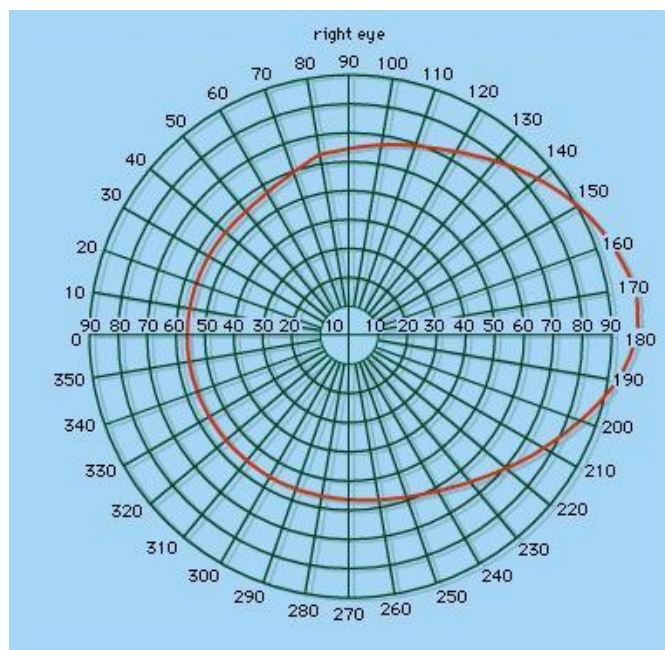
2.1 Acs uzbūve

Bieži vien ikdienā runājot par virtuālo realitāti, galvenokārt tiek domāta tieši tās vizualizācija. Lai gan tehniski virtuālā pasaule var būt arī tikai tekstuāla (*MUD*, *IRCutt.*), tomēr „īsta” virtualitāte būs tieši vizuāla. Tas ir arī saprotams, jo cilvēks ļoti daudz uztver tieši ar redzi, pat neapzinātā līmenī. Mēdz pat teikt – „noticēšu, kadieraudzīšu” – tā uzsverot tiešu sakarību starp vizualizācijas kvalitāti un virtuālās realitātes ticamību.

Kopš virtuālās realitātes eksperimentu pirmsākumiem vizualizācijas tehnoloģija ir ievērojami attīstījusies – ja A. Sazerlendsvarēja uzzīmēt tikai dažus vienkāršus vektorlīniju objektus [1], tad mūsdienu displeji piedāvā tik augstu izšķirtspēju, ka cilvēka acs pat vairs nespēj izšķirt atsevišķus pikselus. Kā arī atjaunošanās frekvence praktiski visiem mūsdienu ekrāniem ir stabili virs maģiskās kino 24 kadru sekundē robežas. Attēla kvalitāte, attiecīgi, vairs nav vai katrā ziņā vairs nav tik liela problēma, ka pirmsākumos.

Tomēr joprojām aktuāls ir redzamā apjoms – tā saucamais redzes lauks. Mēs ikdienā to pat nemanām, bet patiesībā cilvēks spēj uztvert apkārtējo vidi diezgan plašā leņķī – tuvu pie 180°[22], skat 2.1. attēlu. Tiesa, kā izrādās, ne visu mēs uztveram vienlīdz labi.

Iemesls, kāpēc tas ir tā, saistīts ar acs uzbūvi. Cilvēks vizuālo informāciju uztver ar tīklenes palīdzību, kurā atrodas fotoreceptori – galvenokārt divu tipu gaismas jutīgās nervu šūnas: vālītes un nūjiņas. Vālītes nodrošina krāsu uztveri un spēj uztvert augstāku detalizāciju, tās labi darbojas dienas laikā, kad ir daudz gaismas. Tās ir izvietotas blīvi acs centrālajā daļā – foveolā – aptuveni 0,3 mm diametra laukumā, tālāk to blīvums strauji samazinās. Nūjiņas, no otras puses, nespēj uztvert krāsu, taču spēj darboties sliktāka apgaismojuma apstākļos – tās spēj reaģēt pat uz vienu fotonu un ir vidēji 100 reizes jūtīgākas nekā vālītes. Vairākas nūjiņas ir savienotas ar vienu un to pašu neironu, kas uzlabo gaismas detektēšanas efektivitāti, bet samazina izšķirtspēju. Tāpat viena no nūjiņu speciālajām īpašībām ir spēja labi uztvert kustību.

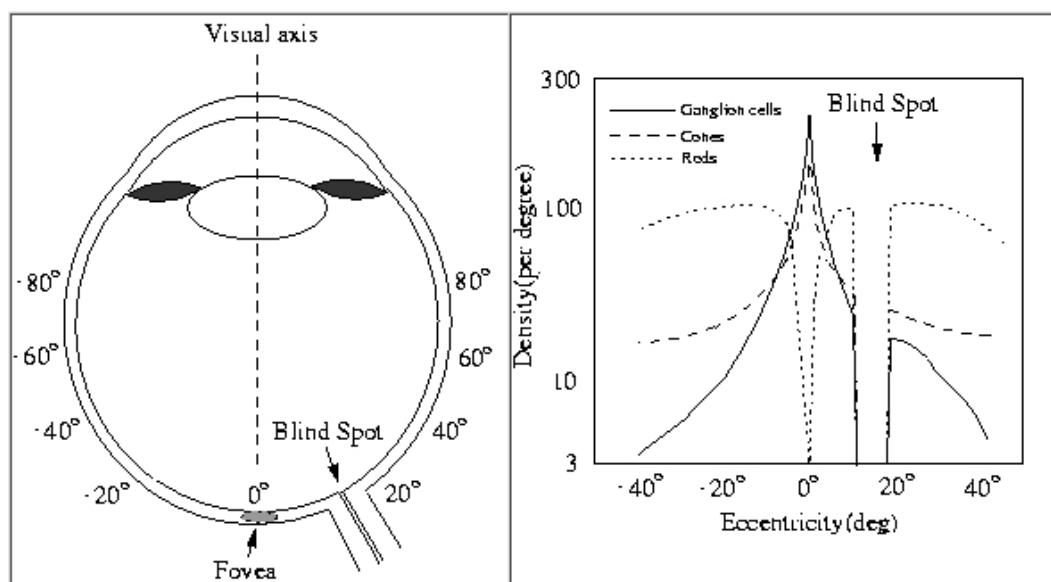


2.1. att. Cilvēka acs redzes lauks:

ar sarkano līniju iezīmēts cilvēka labās acs redzes lauks (pa kreisi ir deguns). Attēls:

„*EncyclopediaBritannicaOnline*”[22]

Nūjiņas ir izkārtotas tālāk no centra, attiecīgi tieši tās ir atbildīgas par perifēro redzi, savukārt vālītes koncentrētas pamatā centrā. Šī iemesla dēļ veidojas atšķirības redzes lauka uztveres kvalitātē – pašā fokusā cilvēka acs var labi izšķirt detaļas, krāsu, formu, bet tālāk no redzes centra – kur vālīšu skaits ir mazāks – jāpaļaujas uz nūjiņām, kas krāsu neizšķir un piedāvā arī krietni zemāku detalizācijas līmeni. Arī nūjiņu blīvums samazinās tuvojoties tīklenes malām, kas nozīmē vēl papildus izšķiršanas spējas krišanos – skat. 2.2. attēlu. Par izšķirtspējas krišanās straujumu nav viennozīmīgas informācijas – dažos avotos norādīts, ka tas gandrīz atbilst ar otrās pakāpes polinomam[23], citur, ka lineāri [24]. Tomēr kustību tās uztver ļoti labi – šī iemesla dēļ pat fiziski neredzot objektu, tā piepēšu sakustēšanos cilvēks uzreiz pamanīs.



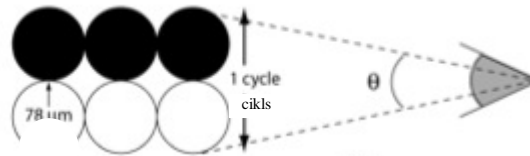
2.2.att. Fotoreceptoru sadalījums uz tīklenes[23]

Tiesa, protams, viss augstāk minētais ir patiesss gadījumā, ja pieņem, ka acs pati nekustās, kas, protams, reālā situācijā nav taisnība. Patiesībā cilvēka acs nemitīgi fokusējas uz dažādiem punktiem redzes laukā, palielinot uztveres noklājumu[23,25], tas notiek tik strauji un tik zemā refleksu līmenī, ka cilvēki to pat nemana. Šīs kustības sauc par sakādēm un tās ir fundamentāli svarīgas vizuālās informācijas uztverē. Tādēļ nevar iegūt cilvēka redzes lauku, balstoties tikai uz acs ģeometrisko un anatomisko uzbūvi.

Par laimi, pētījumi liecina, ka sakādes, kas lielākas par 20° parasti tiek pavadītas ar galvas kustību [26], tas nozīmē, ka fiksējot galvu nekustīgā pozīcijā acs nejauši (nekontrolēti) vistīcamāk neaizklīdīs tālāk par 20° no redzes centra. Virtuālās realitātes briļļu gadījumā tas nozīmē, ka jānodrošina maksimālā kvalitāte šādā izvērsumā, bet tālāk var iztikt ar zemāku kvalitāti, jo lietotājs vairumā gadījumu automātiski pagriež galvu, tā signalizējot virtuālajai videi par skatiena maiņu.

2.2 Redzes asuma mērīšana

Eksistē dažādas metodes kā novērtēt acs izšķirtspēju jeb faktiski redzes asumu, bieži tomēra ciklos uz grādu [27]. Parasti to attiecina uz acs anatomiskajām spējām – cik smalkas detaļas tā spēj izšķirt, tomēr nereti izmanto, lai novērtētu arī vizualizācijas sistēmas – cik augstu maksimālo asumu tās vispār var piedāvāt. Ar ciklu apzīmē divu atšķirīgu objektu pāri un mēra cik daudz šādu ciklu var iekļauties vienā grādā (skat. 2.3.att.). Tipiski vērtē spēju izšķirt divas līnijas no attāluma, šajā gadījumā tā ir līnija un attālums līdz otrajai līnijai.



2.3.att. CPD

Normāla redze tiek vērtēta ap 30 *cpd*, lai gan daļa cilvēkuspēj redzēt ar 40 un 50 *cpd* asumu. Normālu redzi mēdz dēvēt arī par 20/20 vai 6/6 redzi, kas nozīmē, ka cilvēks no 20 pēdu (6 metru) attāluma var izšķirt līnijas 1,75 mm attālumā. Virtuālā ekrāna gadījumā pusi no fiziskās izšķirtspējas (diožu skaita rindā) dalot ar ekrānam atvēlēta redzes lauka leņķi, tiks iegūta maksimālā *cpd* vērtība, ko nodrošina šī konfigurācija:

$$\theta = \frac{n_x}{2\alpha} \quad (2.1)$$

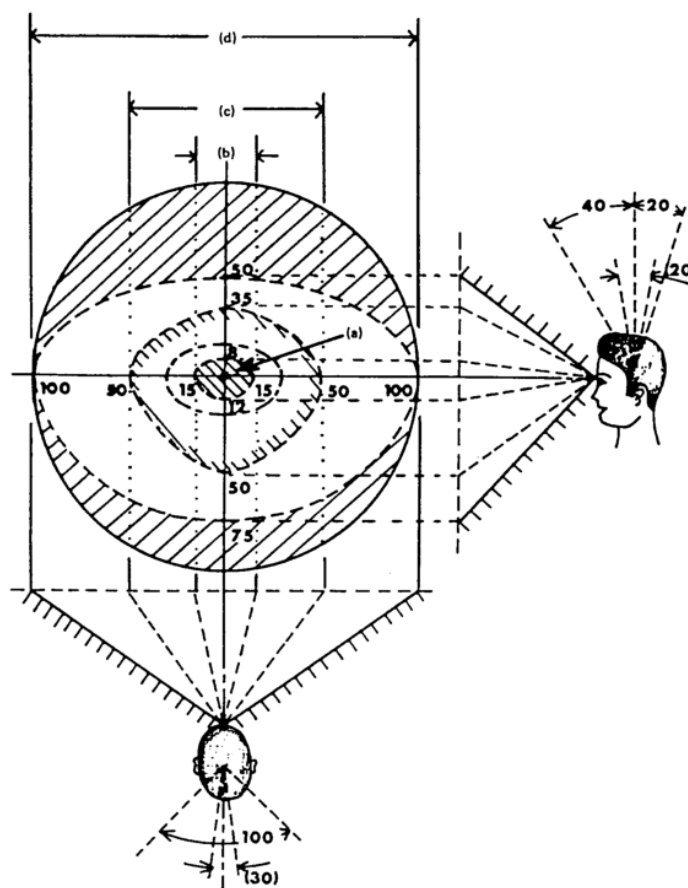
kur θ ir izšķirtspēja, n_x – diožu skaits rindā un α - ekrānu iekļaujošais leņķis.

Tiesa, jāņem vērā, ka augstākais cilvēka redzes asums ir tikai ļoti mazā laukumīnā – faveolā – perifērajā redzes apgabalā tas ir daudz mazāks, līdz pat 0,8 *cpd* un no maksimuma līdz minimumam mainās kvadrātiski[28].

2.3 Redzes lauka sadalījums

Svarīgi ir arī saprast, kā šī acs uzbūves specifika ietekmē praktisko redzes lauka uztveri. Rakstā „Plaša lauka vizuālā ekrāna izsauktā psihofiziskā realitātes sajūtas analīze” profesors Tojohito Hatada, izšķir sekojošus redzes lauka apgabalus [6]:

- 1) **izšķirtspējas apgabals** – aptuveni 30° platumā, kurā iespējams bez īpašas piepūles izšķirt atsevišķus objektus;
- 2) **efektīvais apgabals** – aptuveni 60° platumā, 8° augšup, 12° leju; tajā izšķiršanas spēja samazinās, bet ar nelielu laika nobīdi, cilvēks var efektīvi atpazīt un izšķirt dažādus objektus. Tas ir apgabals, kurā mēs dabiski varam palūkoties uz objektu nepagriežot galvu;
- 3) **izsauktais apgabals** – 20° līdz 100° horizontāli, 20° līdz 85° vertikāli. Šajā apgabalā cilvēks var noteikt dažādu vizuālo stimulu eksistenci, bet praktiski nespēj tos izšķirt. Tomēr šis apgabals ir ļoti svarīgs, jo spēlē būtisku lomu spējā orientēt ķermeni telpā;
- 4) **papildapgabals** – šim apgabalam, kas noklāj 100°–200° horizontāli un 85°–125° vertikāli, nav tiešas nozīmes vizuālās informācijas uztverē, bet kustība šajā apgabalā var izsaukt automātisku refleksu fokusēt skatienu šajā virzienā.



2.4. att. Redzes lauka apgabali:

(a) centrālais izšķirtspējas apgabals (b) efektīvais (c) izsauktais un (d) papildapgabals [6]

2.4 Redzes lauks virtuālās realitātes sistēmās

CAVE sistēmai šīs problēmas vienkārši nav – tā kā lietotājs atrodas mazajā istabā, tā viņam ir visapkārt – teorētiski vajadzētu būt iespējamam 100% redzes laukam. Praktiski, tik un tā nepieciešams lietot 3D stereoskopiskās brilles, kas tomēr ierobežo redzes lauku. Savukārt virtuālās realitātes brilles, diemžēl, pagaidām piedāvā vēl pat krietni mazāku izvērse leņķi. Vairums tirgū pieejamās iekārtas piedāvā horizontālo izvērsi 30–45° katrai acij (rupji rēķinot, kopā 60–90°), *OculusRift*–kopējais 110° [4].

Pieejot šai problēmai tīri mehāniski, nekas cits neatliek, kā izvēlēties dārgus un sarežģītus ekrānus, kas nosedz visu redzes lauku. No otras puses, iespējams, tomēr nav nepieciešams vienādi labs ekrāns visā redzes lauka platumā – cilvēka acs uztveres spējas nav konstantas, vislabāk cilvēks spēj uztvert vizuālo informāciju nelielā apgabalā (+/-15°) redzes lauka centrā, bet jo tālāk no centra, jo teorētiski mazāk detaļu nepieciešams[28].

Ja ir pieejams augstas izšķirtspējas ekrāns, kas var nosegt visus apgabalus, nav īsti nozīme tos īpaši diferencēt – ekrānā jāattēlo maksimālā kvalitāte visā apgabalā, lai acs pati izšķir cik daudz var. Darba autors, tomēr, uzskata, ka vizuālās informācijas diferencēšana paver iespējas būtiski samazināt virtuālās realitātes displeju izmaksas, centrā piedāvājot augstāku izšķirtspēju nekā sānos.

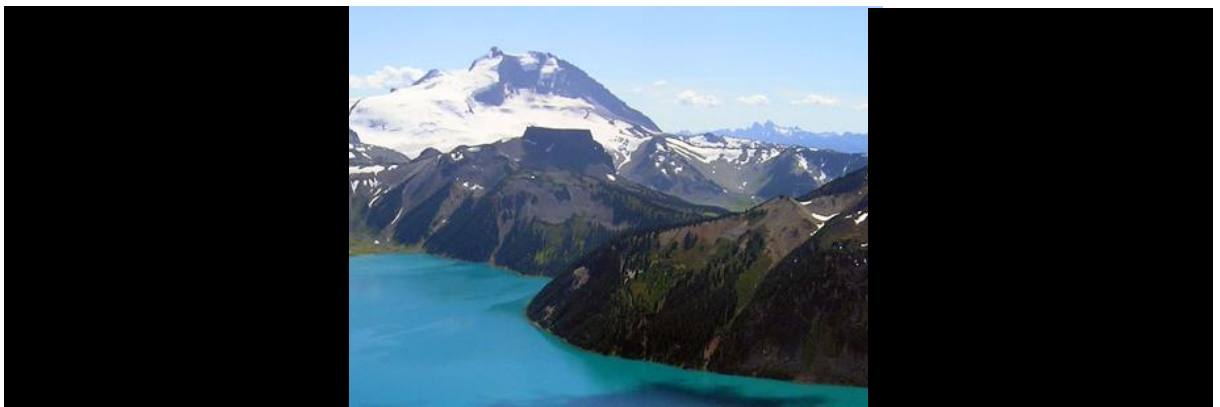
Uz šī pieņēmuma balstās darbā tālāk aprakstītā virtuālā ekrāna uzbūve.

3 VIRTUĀLAIS EKRĀNS

Darbā tiek piedāvāts alternatīvs risinājums nepilnīga redzes lauka problēmai. Tā vietā, lai izmantotu augstas izšķirtspējas un komplicētu liektu ekrānu, tiek piedāvāts izmantot vienu augstas izšķirtspējas displeju, tā saucamo galveno displeju, kas atradīsies lietotāja fokusā, bet pārējo redzes lauku aizpildīt ar adaptīvo apgaismojumu, kas sinhronizēts ar galveno displeju (skat. 3.1 att.). Adaptīvā apgaismojuma risinājums tad arī ir „virtuālais ekrāns”. „Ekrāns”, jo pilda vizualizēšanas uzdevumus un „virtuāls”, jo patiesībā tas ir fona apgaismojums.



(a)



(b)

3.1.att. Redzes lauks ar (a) un bez (b) virtuālā ekrāna

Līdzīga pieeja praksē jau tiek izmantota; piemēram, *Ambilight* tehnoloģija *Philipstelevizoriem* [29]. *Microsoft Research* pētnieki ar vērā ņemamiem panākumiem izmantojuši idejiski līdzīgu pieeju [24], lai uzlabotu 3D grafikas renderēšanas ātrdarbību (detalizēti zīmējot fokusu un tad, ar pakāpeniski zemāku detalizāciju – to, kas tālāk no centra).

Praktiski virtuālo ekrānu veido gaismas diožu matrica zem izkliedējoša materiāla (piemēram, pienstikla) virsmas. Silueti veidotos mainot diožu spožuma intensitāti un krāsu. Tāpat, būtiski, ka virtuālais ekrāns nav statisks, tas spēj vizualizēt arī kustību lietotāja

netiešajā redzes laukā – ļoti svarīga lietojamības informācija, jo tieši kustība ir tas, ko mēs vislabāk varam uztvert ar perifēro redzi.

Virtuālajam ekrānam jānoklāj maksimāli plašs perifērās redzes lauks – ideāli, kopā ar pamatekrānu, 180 grādu apjomā. Tāpat pilnvērtīgam ekrānam būtu svarīgi nodrošināt arī vertikālo redzes lauka noklājumu, tomēr prioritāte ir tieši horizontālajam izvērsumam.

4 VIRTUĀLĀ EKRĀNA SIMULĀCIJAS IEKĀRTA

4.1 Pamatojums

Izstrādājot virtuālo ekrānu, nepieciešams saprast, kāda ir tā tehniskā uzbūve, t.i., cik daudz vajag būt diodēm un kā tām jābūt izkārtotām. Bet kur ņemt šos parametrus? Viegļākais būtu izvēlēties diožu izšķirtspēju „uz aci” – tā, lai izskatās puslīdz blīvi. Diemžēl būs jāpatērē daudz laika, enerģijas un materiālu, meklējot labāko virtuālā ekrāna konfigurāciju šādā ceļā. Tā varēja atļauties rīkoties senie vijoļmeistari, kas zinības un amata knifus nodeva no paaudzes paaudzē. Prātīgāk būtu veikt analītiski pamatotu minējumu, balstoties uz jau apskatīto redzes lauka struktūru, tā parametriem un tuvinātām kalkulācijām. Tomēr arī tas tik un tā negarantē 100% veiksmi, jo paliek vēl tīri subjektīvais aspekts – kas notiek, ja teorētiski ekrāns ir optimāls, bet praktiski lietotājam tas neder? Izveidot ekrānu, lai atklātu, ka efekts nav gluži vajadzīgais, ir diezgan nepatīkami, lieki piebilst – dārgi.

Darba autors uzskata, ka labākais veids, kā izvēlēties virtuālā ekrāna konfigurāciju un parametrus, ir izveidot speciālu, bet tehnoloģiski salīdzinoši vienkāršu eksperimentālo iekārtu, kas ļautu viegli mainīt dažādus virtuālā ekrāna parametrus un novērtēt to efektu. Šī darba ietvaros izstrādāta šāda iekārta, programmatūra un metodes, kā arī veikts eksperiments uz reāliem lietotājiem, ar mērķi noskaidrot optimālos plānotās ierīces tehniskos raksturlielumus, kā arī pētītu reālu virtuālā ekrāna lietošanas procesu.

4.2 Tehniskā realizācija

4.2.1 Aparatūra

Eksperimentālā iekārta sastāv no trim *SamsungSyncMaster SA350* 24 collu monitoriem, kas pievienoti pie diviem lokālā tīklā saslēgtiem PC skaitļotājiem (2 monitori pie viena, 1 pie otra) un izkārtoti puslokā ap subjektu. Uz diviem sānu monitoriem tiek simulēts virtuālais ekrāns – bilde aizstāta ar dinamisku virtuālu LED matricas attēlojumu. Centrā, savukārt, atrodas pilnas izšķirtspējas monitors. Viena ekrāna izmēri ir 57,86 cm platumā un 43,87 cm augstumā, laukums - 2538,32 cm², monitora dabiskā izšķirtspēja – 1920x1080 pikseļi.

Servera specifikācija: *IntelPentium CPU G850 @ 2,9 GHz*, 8 Gb operatīvā atmiņa, *Windows 7 64bit* operētājsistēma. Klienta specifikācija: *IntelCeleronDualCore 2,64 GHz*, operatīvā atmiņa 4 Gb un arī *Windows 7 64bit*. Skaitļotāji savienoti lokālajā tīklā ar viena gigabitārūteri.

4.2.2 Vizualizācijas lauka konfigurācija

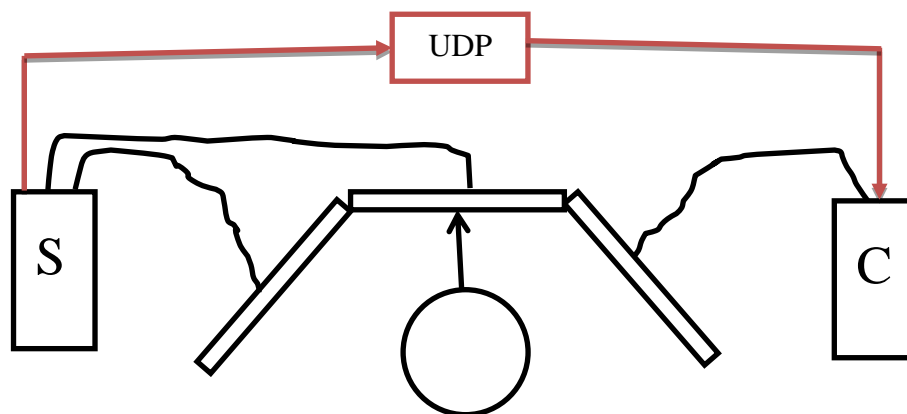
Lietotājs izvietojas tā, lai galva atrastos 32 cm attālumā no centrālā ekrāna un sānu ekrāni nosegtu perifēro redzes lauku. Sānu monitorus novieto tā, lai to galējās malas atrastos uz vienas līnijas, t.i., veidotos 180° leņķis. Izvietojot tiek arī veikta pārbaude ar kustības kairinājumu uz monitoru ārmalām (fokusējot skatienu galvenā ekrāna centrā) pārliecinoties, ka lietotājs reaģē uz šo stimulu.

Rezultātā lietotājam pieejamais kopējais redzes lauks ir 182,3°, kur centrālais ekrāns aizņem 95,77°, kreisais 42,12° un labais – 44,42°. Oriģināli sistēma tika veidota ar mērķi, lai lauks būtu simetrisks, bet vēlāk, analizējot foto, atklājās neliela asimetriska nobīde labajā pusē, kas tad arī tika izskaitļota un tāpēc ir tieši tādas vērtības. Zinot diožu matricas vienas rindas garumu (elementu skaitu) var noteikt leņķisko izšķirtspēju vienam ekrānam. Parasti izmantojamais parametrs – punkti uz garuma vienību (piemēram, drukas gadījumā populārais *dpi* jeb *dots per inch*) īsti nav derīgs, jo fiziskais ekrāna loka garums un attālums līdz acij dažādām virtuālās realitātes iekārtām var būtiski atšķirties – šajā gadījumā tie ir trīs lieli monitori salīdzinoši tālu no acs, bet virtuālo briļļu gadījumā tie var būt pavisam nelieli displeji, bet pavisam tuvu acīm.

Lai varētu novērtēt rezultātus universālāk, tos var izteikt diožu skaitā uz grādu vai, drīzāk, izmantojot pasaulē pielietotu mērvienību, ciklos uz grādu jeb *cpd*. Tad var salīdzināt rezultātus ar jau zināmajām cilvēka redzei raksturīgajām vērtībām: pilnas ekrāna izšķirtspējas gadījumā – 1920 pikseli rindā – *cpd* sanāk 22,97 kreisajam ekrānam un 21,61 labajam. Normāla redze ir 30 *cpd*, bet tikai redzes centrā; šis ekrāns ir domāts perifērai redzei, kur minimums var būt tik zemu kā pat 0,8 [28]. Analogiski var rēķināt arī vertikālo izšķirtspēju, bet šī eksperimentālā iekārta paredzēta galvenokārt tieši horizontālā redzes lauka analīzei.

4.2.3 Programmatūra

Tīri tehniski tiek darbinātas paralēli divas lietojumprogrammas, kas sazinās tīklā izmantojot UDP protokolu – viena darbojas kā serveris, bet otra kā klients, kas reaģē atbilstoši servera ievadei (peles, klaviatūras notikumiem).



4.1.att. Eksperimentālās iekārtas shēma

Programma būtībā ir tipiska trīsdimensiju pirmās personas rīcības spēle, kas papildināta ar eksperimentam vajadzīgajām funkcijām. Tā ir rakstīta daļēji *UnityScript* (sintaktiski atgādina *JavaScript*), daļēji *C#* valodās un izstrādāta uz populāras datorspēļu izstrādes platformas *Unity 4.0 Pro*, kas ļoti bieži tiek praktiski izmantota industrijā pilnvērtīgu datorspēļu izstrādei.

Tā kā datorspēles izstrāde ir ļoti laikietilpīgs un dārgs, kā arī eksperimenta kontekstā – neinteresants uzdevums, tika pieņemts lēmums izmantot brīvi pieejamus, gatavus risinājumus. Par pamatu tika izvēlēta brīvi pieejama, atvērtā koda demonstrācijas versija spēlei *AngryBots*, kas ir trešās personas (skats no augšas uz varoni) rīcības spēle fantastikas pasaulē. Eksperimentā būtisks ir tieši pirmās personas skats, tāpēc spēle nācās atbilstoši pārveidot (4.2. att.).

Atbilstoši izkārtojumam programma ģenerē trīs attēlus, kas teorētiski nosedz visu spēles varoņa redzes lauku – katrs monitors attēlo savu trešdaļu. Galvenajam ekrānam nekādas izmaiņas netiek veiktas, bet virtuālā ekrāna monitoros attēls reālajā laikā tiek aizstāts ar krāsas aplīšu (LED diožu) matricu.

Programmas izejas kods kā *Unity 4.1* projekts atrodams pielikumā Nr. 1.

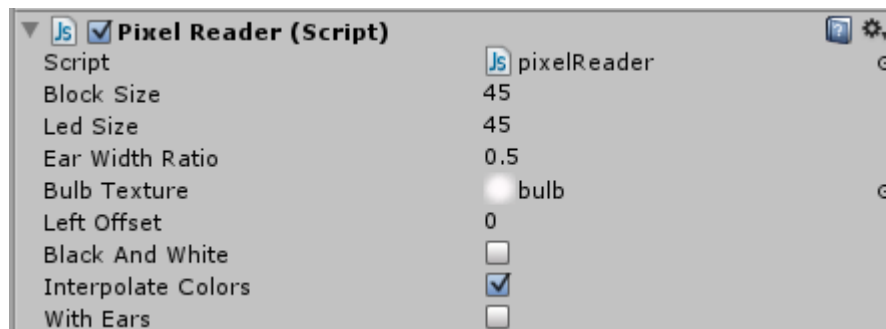


4.2.att. Oriģinālā spēles lietotne (augšā) un pēc modifikācijām (apakšā)

Lai iegūtu virtuālā ekrāna matricu, vispirms tiek uzrenderēts pilnas izšķirtspējas attēls ekrāna dimensijās, tad, atbilstoši izvēlētajam režģim, tiek pārstaigāti visi punkti, tajos nolasīta attiecīgā pikseļa RGB krāsas vērtība un piekārtota atbilstošajai LED diodei – baltas krāsas tekstūrai, kas tiek zīmēta uz ekrāna atbilstošās koordinātās ar attiecīgo RGB toni. Fons ir vienkārši aizpildīts ar melnu krāsu.

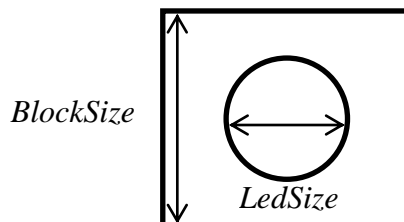
4.3 Parametri

Eksperimentālā iekārta ļauj viegli mainīt virtuālo ekrānu, modificējot tā raksturojošos parametrus. 4.3. attēlā redzams virtuāla ekrāna moduļa konfigurācijas panelis, kurā iespējams mainīt tā parametrus.



4.3.att. Virtuālā ekrāna moduļa konfigurācijas panelis

Vissvarīgākie ir divi pirmie parametri – *LedSize* nosaka, cik liela ir diode (diametrs, pikseļos), *BlockSize*, savukārt, raksturo laukumu, kurā tā atrodas (skat. 4.4. attēlu), tas faktiski ir attālums starp divām diodēm.



4.4.att. *BlockSize* un *LedSize*

Ar šiem abiem parametriem iespējams modelēt dažādus izgaismošanas apstākļus – mazs diodes izmērs, liels attālums starp tām reprezentēs gadījumu, kad uz melna, matēta fona ir izkārtotas nelielas diodes. Savukārt gadījumā, ja šie lielumi būs vienādi, vai diodes izmērs pat nedaudz pārsniegs attālumu (tas gan iespējams tikai virtuāli), iegūsim situāciju, kad tiek izmantots izkliedējošs pienstikls vai citādi tiek panākts viendabīgs izgaismojums.

Attālums starp diodēm arī faktiski nosaka virtuālā ekrāna izšķirtspēju.

Parametrs *BulbTexture* norāda attēlu ar diodes izgaismojuma izklājumu. Tas var būt ass vai izplūdis, centrēts vai eksponenciāli cirkulārs utt. Tekstūra un līdz ar to izklājums ir viegli maināmi, simulējot dažādas diodes un apstākļus – pienstiklu, fonu utt.

Pēdējie divi parametri modificē to, kāds signāls tiek padots diodei. *BlackAndWhite* jeb melnbaltais režīms ir pašsaprotams: izmantojot luminiscences algoritmu pelēkā krāsa tiek iegūta ņemot vidējo no visu trīs RGB komponentu vērtībām, taču ar atšķirīgiem koeficientiem – $0.21 R + 0.71 G + 0.07 B$ balstoties uz cilvēka acs krāsu uztveri (zaļo vislabāk).

Savukārt *Interpolate* režīmā tiek nolasīta un attēlota nevis viena pikseļa vērtība, bet gan tiek paņemta vidējā krāsa no pieciem pikseļiem – katrā bloka stūrī un viens centrā, pie kam centrā esošais tiek ņemts ar dubultu svaru. Tādā veidā vajadzētu izvairīties no asiem ekstrēmiem, iegūstot dabiskākas pārejas starp diodēm.

5 EKSPERIMENTS NR.1

5.1 Metodika

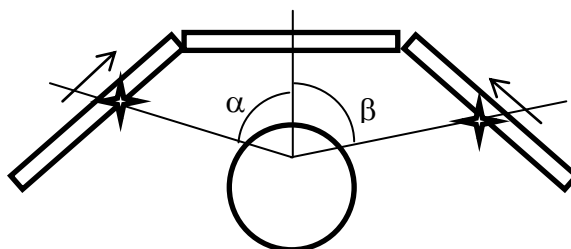
Eksperiments tiek veikts uz potenciāla virtuālās realitātes lietotāja (turpmāk: subjekts) – vīrieša aptuveni 30 gadu vecumā, kas ir aktīvs datorspēļu spēlētājs, virtuālās realitātes iekārtu tirgus mērķauditorija. Lai sasniegtu eksperimenta mērķus, tiek izmantoti sekojoši paņēmieni.

Lai iegūtu kvantitatīvu novērtējumu virtuālā ekrāna efektivitātei, novērtēta tā spēja nodot informāciju caur subjekta perifēro redzi, t.i., cik efektīvi subjekts pamanīs kustību redzes lauka malā, ārpus fokusa. Tā kā kustība ir vērsta uz uzmanības centru, leņķis, kurā tā tiek pamanīta raksturos virtuālā ekrāna kvalitāti – jo tā agrāk pamanīta, jo ekrāns labāk pilda savas funkcijas.

Kustīgs objekts ir tipiska informācija spēlē (un, patiesībā arī realitātē) – tas ir pretinieks no kā vajag uzmanīties, vai tieši otrādi medījums, kas jānotver. Galu galā perifērās redzes viena no svarīgākajām funkcijām bija pamanīt kustību, kas aizvēsturiskajam cilvēkam vai tā priekštecim bija vitāli svarīga informācija.

Lai padarītu situāciju tuvāku realitātei, šie mērījumi tiek veikti tipiskā spēles vidē, kur ir lietūs un apgaismojuma efekti, tā radot reālistisku vizuālo fona troksni, uz kura būtu jāspēj uztvert netipiska, sveša kustība.

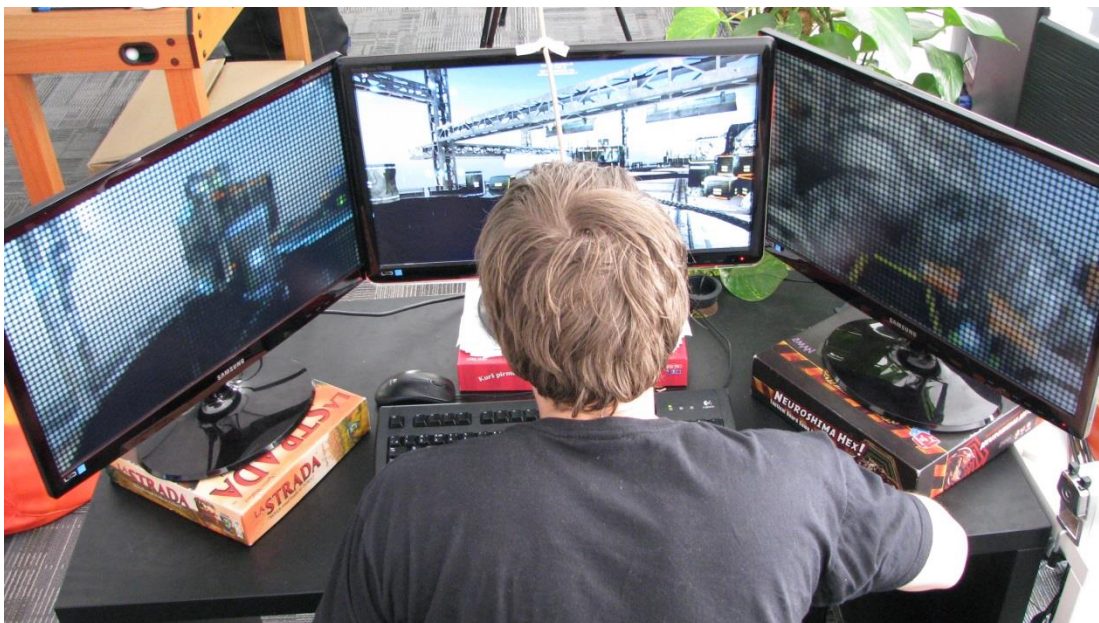
Mērījums, kas tiek iegūts, ir leņķis, kurā subjekts objektu ir pamanījis. Ņemot vērā, ka tie ir divi dažādi virzieni un divas sākumpozīcijas (pa labi vai pa kreisi), eksperimentā ir svarīga leņķiskā starpība starp centra punktu, kurā subjekts fiksējis skatienu, un objekta pozīciju. Summējot šīs vērtības, iegūst kopējo uztveramo ekrāna laukumu; jo tas lielāks, jo virtuālais ekrāns efektīvāks. Šajā gadījumā nav svarīga absolūtā leņķiskā vērtība, bet gan salīdzinājums – procentuāli cik katra konfigurācija ir sliktāka nekā pilnas izšķirtspējas ekrāns.



5.1.att. Mērījums $\alpha+\beta$

5.2 Eksperimenta gaita

Eksperimentaprocessnorisa atbilstoši plānam – eksperimenta subjekts tika nopozicionēts tā, lai tā galva atrastos pusloka, ko veido trīs monitori centrā un lai malējo ekrānu pašas malās viņš nespētu uztvert – tas tika pārbaudīts ar kustīgu objektu palīdzību, atrodot pozīciju, kurā subjekts uz kairinājumu vairs nereaģē. Galvas atrašanās vieta tika nofiksēta ar speciālas nūjiņas palīdzību, lai visos mērījumos tā saglabātos vienāda (5.1. att.).



5.1.att. Virtuālā ekrāna simulācijas iekārta darbībā

Pēc tam, kad subjekts bija nofiksēts pareizajā pozīcijā, tika veikti kvantitatīvie mērījumi: veicot *Enter* pogas spiedienu subjekts izsauca eksperimenta funkciju, kas pēc nejauša (2-5 sekunžu gara) intervāla izveidoja pretinieku – lidojošu robotu kaut kur subjekta perifērajā redzes laukā – vai nu pa labi, vai pa kreisi. Robots lēnām pārvietojās pa riņķa līniju uz subjekta fokusa centru.

Subjektam, saglabājot skatienu fokusētu uz vidējā ekrāna centru, pēc iespējas ātrāk jānorāda, no kuras puses pretinieks tuvojas ar taustiņu *A* (no kreisās) vai *D* (no labās) palīdzību. Ja norādīts nepareizais virziens, tiek izvadīts kļūdas paziņojums un mērījums tiek atkārtots. Lai nodrošinātu subjekta skatienu fokusu vidējā ekrāna centrā, tur ar nelielu intervālu tiek mainīti skaitļi un burti, kas subjektam skaļi jāsauc. Pēc mērījuma tiek uzrādīta saukto simbolu sekvenču un, ja tā nesakrīt ar subjekta saukto, tad mērījums netiek ņemts vērā.

Rezultātā tika mērīts leņķis, pie kura tika saņemts pareizs signāls. Ja tas ir no 300 līdz 360 grādiem tad pretinieks ir kreisajā ekrānā, ja 60-180 – labajā pusē. Mērījumi tika izdarīti

vienādu parametru sērijās; katrā sērijā – vismaz pieci mērījumi, dažkārt desmit. Lai varētu vērtēt sistēmas efektivitāti, tika veikti kontrolmērījumi ar pilnu ekrāna izšķirtspēju un vispār bez sānu ekrāniem. Tas arī ļauj izslēgt pamanīšanas reakcijas laiku, jo visos mērījumos tam būtu jābūt puslīdz nemainīgam.

5.3 Rezultāti un analīze

Eksperimenta ietvaros tika veikti mērījumi 11 dažādās sērijās, kā arī divi kontrolmērījumi – vispār bez virtuālā ekrāna (monitori izslēgti) un ar pilnu izšķirtspēju (skat. 5.1. tabulu). Par atskaites punktu izvēlēts pilnas izšķirtspējas gadījums, pret kura redzes lauku tiek salīdzināti visi pārējie. Kā redzams, pilnībā bez sānu ekrāniem, redzes lauks ir tikai 40%, salīdzināšanai – vidējais ekrāns nosedz 95,77°, kas ir 53% no 182,3° - pilnā iekārtas teorētiskā redzes lauka.

Pēc atskaites punktu iegūšanas, tika veikti mērījumi pie „uz aci” vidēji blīvas diožu matricas (5.2. tabula). Būtiski, ka objekta pamanīšana ar perifēro redzi ir gandrīz tikpat efektīva, cik pie pilnas izšķirtspējas (>95%!), lai gan izšķirtspēja ir vairāk nekā 40 reižu (!) zemāka (0,51 pret 22,79).

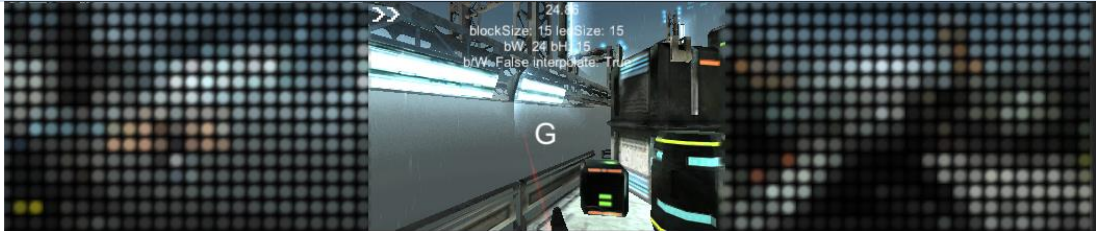
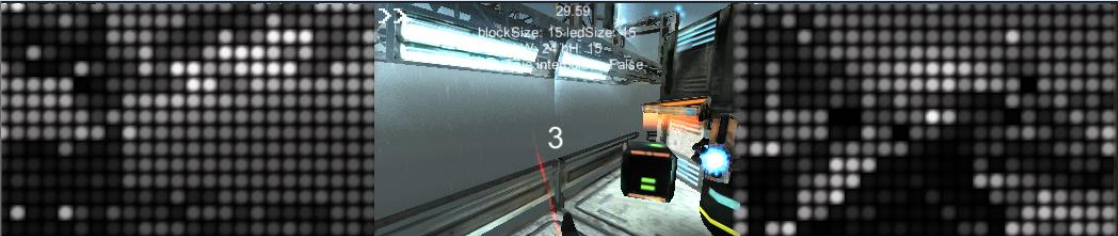
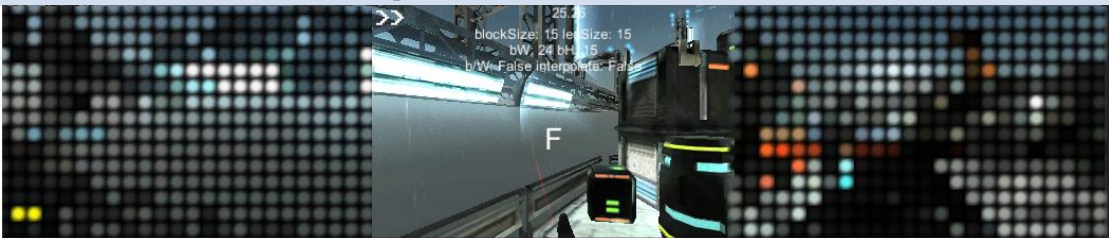
Vēl interesanti, ka konfigurācija Nr.3 ir pat „labāka” (100,2%)! To varētu skaidrot ar to, ka objekts – dažādu toņu, krāsu pāreju mākonis – pikseļu krāsas režīmā tiek reducēts uz vienu spožu un labi pamanāmu citas krāsas lampiņu, kamēr interpolētās krāsas gadījumā tas daudz vairāk saplūst ar pārējo vidi.

5.1 tabula

Kontrolmērījumi

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
1	-	-	-	1920x1080	22,79	100%	1,37%
							
2	-	-	-	0x0	0	40,43%	1,57%
							

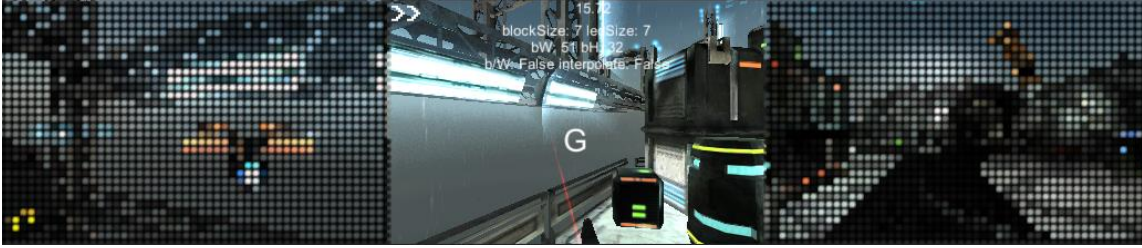
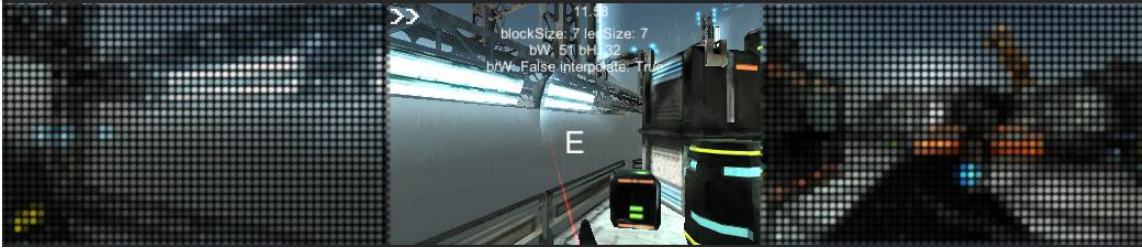
Vidēji smalka matrica

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
3	45	45	Interpolēta	43x24	0,51	98,44%	1,57%
							
4	45	45	Melnbalta	43x24	0,51	96,92%	2,14%
							
5	45	45	pikseļu krāsa	43x24	0,51	100,2%	1,04%
							



Pēc tam tika apskatīta (5.3. tabula) praktiski divreiz lielāka blīvuma matrica (92x52 diodes uz ekrānu). Tīri vizuāli novērtējot attēlu – šādā izšķirtspējā varētu jau diezgan labi saprast un novērtēt objektu izmērus, telpas izkārtojumu, pat ja šis būtu galvenais ekrāns. Tomēr, kā izrādās, lai ar perifēro redzi pamanītu kustību, nav īpašas starpības ar iepriekšējo, divreiz rupjāko, variantu – tāpat efektivitāte ir virs 95%.

Vēl smalkāku režģi, autoraprāt, pētīt nebija jēgas, tāpēc nākamajās mērījumu sērijās (5.4. tabula) tika apskatīta principiāli savādāka konfigurācija – attālums starp diodēm ir divreiz lielāks nekā to izmērs. Tā varētu izskatīties virtuālais ekrāns, ja diodes salīdzinoši reti izvietotu uz tumšas, matētas virsmas bez papildus kļiedējoša pārklājuma. Kā jau bija paredzams, attēls ar tiešu skatienu kļūst ļoti grūti uztverams, taču, lai arī sliktāk, perifērā redze tik un tā salīdzinoši efektīvi (85-90%) detektē kustību. Interesanti, ka melnbaltais režīms šajā konfigurācijā šķiet īpaši nelabvēlīgs.

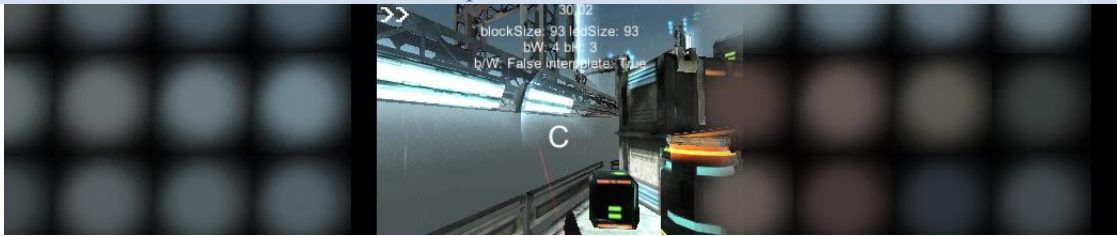


Smalka izšķirtspēja

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
6	21	21	pikseļu krāsa	95x52	1,12	99,95%	0,29%
							
7	21	21	Interpolēta	95x52	1,12	99,95%	2,10%
							

Reti izkārtotas mazas diodes

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
8	21	45	pikseļu krāsa	43x24	0,51	91,69%	0,36%
							
9	21	45	Melnbalta	43x24	0,51	85,67%	4,35%
							



Īpaši rupja matrica

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
10	280	280	Interpolēta	7x4	0,08	78,97%	5,81%
							
11	280	280	pikseļu krāsa	7x4	0,08	81,51%	6,45%
							
12	280	280	Melnbalta	7x4	0,08	75,52%	10,41%
							

Redzot, cik labi rezultāti ir līdz šim, radās interese noskaidrot, kas notiks pie īpaši rupja diožu sadalījuma. 5.5. un 5.6. tabulās redzami rezultāti 7x4 diožu matricai, kas ir diezgan pārsteidzoši – neskatoties uz dramatiskajiem attālumiem starp diodēm, pareiza kustības identificēšana notika vidēji tikai par 20% sliktāk (!) nekā pilnā izšķirtspējā. Tiesa mērījumiem pie šīs konfigurācijas ir tendence svārstīties diezgan plašā amplitūdā – tā kā diodes ir izvietotas tik reti, objekts veic diezgan lielu attālumu, pirms atkal var tikt novērots. Savukārt, ja lietotājam izdodas uztvert jau pašas malējās diodes izmaiņu, tiek iegūts tikpat augsts rezultāts, cik pie augstākas izšķirtspējas.

Tas gan neattiecas uz ļoti reti izvietotām mazām diodēm (5.6. tabula), jo šajā gadījumā rezultāti bija pat augstāki nekā lielo diožu gadījumā un kļūda – vairākas reizes zemāka. Iespējams lielais monotonais laukums starp diodēm kalpo par lielisku fonu, uz kura labi izceļas konkrēti signāli. Tā kā diodes ir mazas, iespējams skaidri identificēt to pozīciju. Otra priekšrocība – diodes izvietotas reti tāpēc dažādi vizuālie fona trokšņi nedod viltus signālus.

Ļoti reti izkārtotas mazas diodes

Nr.	Diametrs (<i>px</i>)	Attālums (<i>px</i>)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (<i>cpd</i>)	Redzes lauks	Kļūda
13	53	280	pikseļu krāsa	7x4	0,08	83,77%	1,95%
							
1	53	280	Melnbalta	7x4	0,08	85,20%	2,50%
							

6 EKSPERIMENTS NR. 2

6.1 Metodika

Pēc pirmā eksperimenta, radās bažas par to vai metodika ir gana efektīva – pat ļoti rupja matrica spēja nodot informāciju perifērajai redzei ļoti veiksmīgi.

Tāpēc tika izlemts veikt otro eksperimentu, kurā tiktu izmantots dinamisks, nevis statisks redzes lauks. Sākoties eksperimentam, objekts joprojām lēnam slīdētu ap spēlētāja galvu, bet vienlaikus tiktu simulēta spēlētāja taisnvirziena pārvietošanās. Sagaidāms, ka būs grūtāk izšķirt statisko objektu ņirboņu no mazliet citas kustības objekta.

Citādi tika izmantoti tie paši eksperimenta Nr. 1 uzstādījumi un metodika.

6.2 Eksperimenta gaita

Vispirms, atkal, kontrolmērījumi, lai būtu atskaites punkts, kur vienīgā izmaiņa – atslēgtu virtuālo ekrānu gadījumā centrālā ekrāna nodrošinātais redzes lauks ir 45% - nedaudz vairāk nekā pirmajā eksperimentā.

Otrajā eksperimentā tika izmantots tā pati eksperimentālā iekārta un tas pats eksperimenta subjekts. Katrai konfigurācijai tika veikti vismaz 10 mērījumi. Diemžēl ierobežotā laika dēļ nebija iespējams veikt gana plašu mērījumu spektru, izmēģinot visas konfigurācijas, tāpēc šajā reizē galvenais mērķis bija novērot, kā tieši virtuālā ekrāna izšķirtspēja ietekmē redzes lauku dinamiskā vidē.

6.3 Rezultāti un analīze

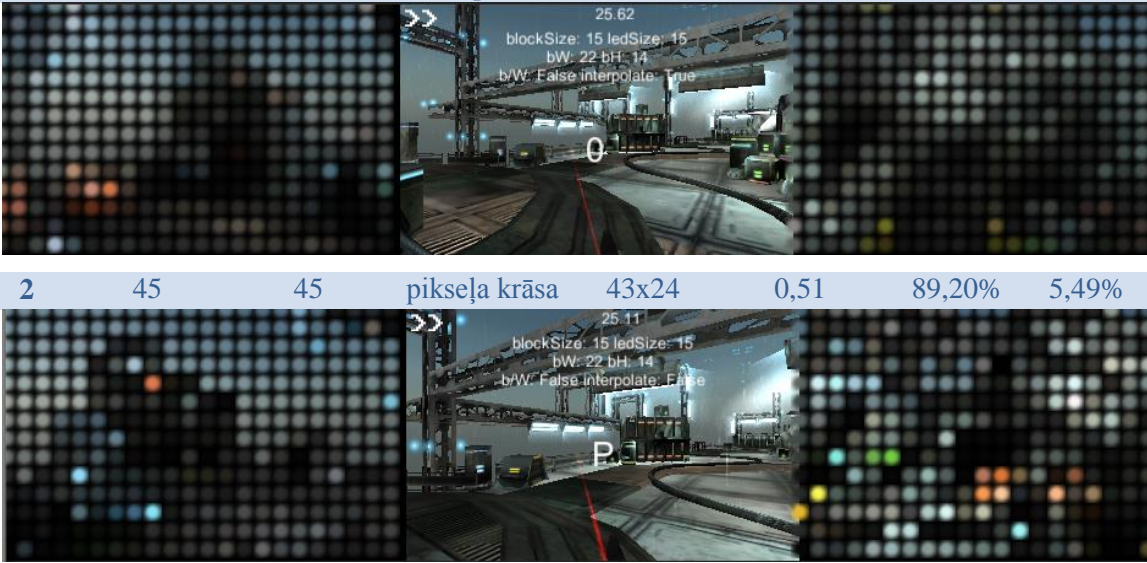
6.3.1 Statiskās un dinamiskās vides mērījumu salīdzinājums

6.1. tabulā redzami rezultāti diviem 43x24 izšķirtspējas mērījumiem – ar un bez interpolācijas. Vizuāli atšķirībai diezgan manāma, versijai bez interpolācijas izskatoties jau nedaudz pēc raiba tepiķa. Tomēr mērījumu atšķirība ir tikai 2% robežās. Salīdzinot šo mērījumu ar statiskās vides mērījumu pie šiem pašiem parametriem, redzams, ka vērtība ir kritusies, kā tas būtu sagaidāms kustības gadījumā, tomēr – pārsteidzoši – atšķirība ir tikai 6% (90,90% pret 96,92%)!

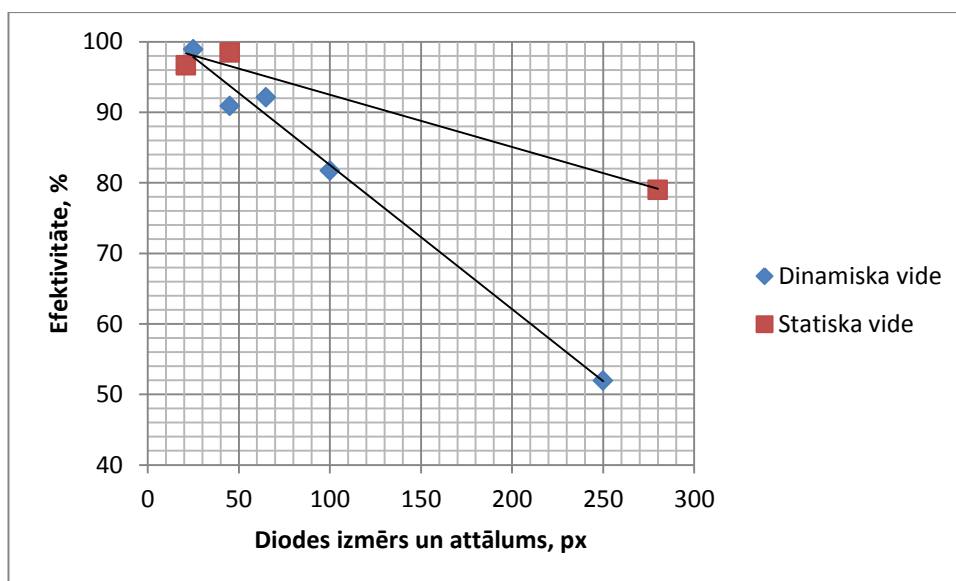
Dinamiskā vide toties, kā jau bija sagaidāms, atstājusi būtisku iespaidu uz mērījuma kļūdu: 3-4 reizes lielāka nekā analogiskā konfigurācijā statistiskā vidē. Pamanīt objektu šādos apstākļos nozīmē spēt identificēt atšķirīgu kustību; tas pieprasa augstāku izšķirtspēju.

6.1.tabula

Vidēji smalka diožu matrica

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
1	45	45	interpolēta	43x24	0,51	90,90%	7,24%
							
2	45	45	pikseļa krāsa	43x24	0,51	89,20%	5,49%

6.2. tabulā ir apkopoti mērījumatricām no 77x43 līdz 8x5. Interesanti, ka pat pie samērā rupjas matricas (20x11) efektivitāte saglabājas joprojā augsta (80%). Interesanti salīdzināt dinamiskā redzes lauka rezultātus ar statistiskā redzes lauka mērījumiem (6.1. attēls).



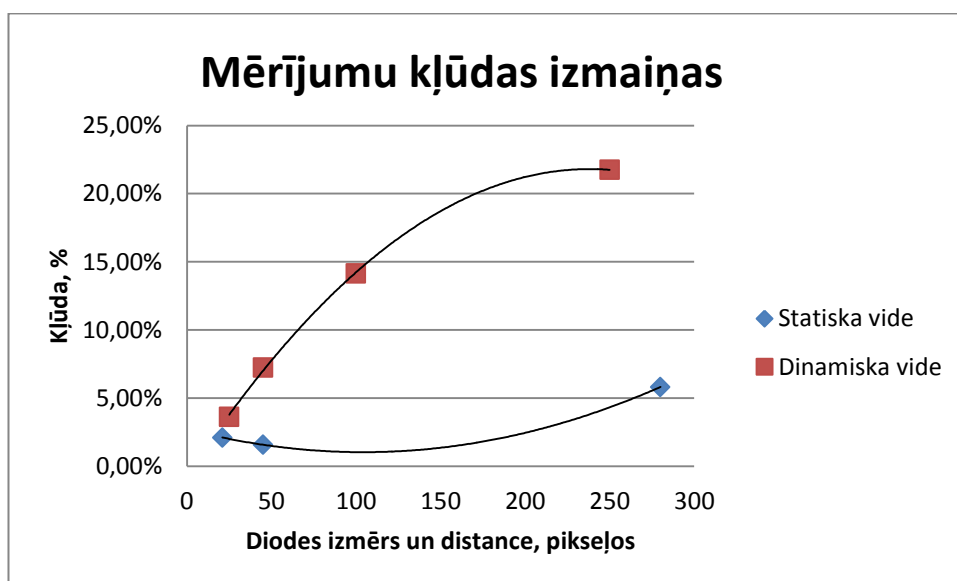
6.1. att. Statiskās un dinamiskās vides mērījumu salīdzinājums

Virtuālā ekrāna izšķirtspējas ietekme uz redzes lauku dinamiskā vidē

Nr.	Diametrs (px)	Attālums (px)	Krāsa	Matrica	Izšķirtspēja (cpd)	Redzes lauks	Kļūda
3	25	25	interpolēta	77x43	0,91	98,91%	3,62%
1	45	45	interpolēta	43x24	0,51	90,90%	7,24%
4	65	65	interpolēta	30x17	0,36	92,12%	12,41%
5	100	100	interpolēta	20x11	0,24	81,72%	14,14%
5	250	250	interpolēta	8x5	0,095	51,94%	21,76%

Redzams, ka dinamiskā vidē virtuālā ekrāna efektivitāte, palielinoties diodes izmēriem, samazinās straujāk nekā statiskā vidē. Jo īpaši to var izjust pie liela izmēra diodēm. Ja statiskā situācijā var objekts izsauc izmaiņu pamatā vienā vai divās diodēm, tad dinamiskā gadījumā visas virtuālā ekrāna diodes nemitīgi mainās un šādā situācijā pie tik rupjas matricas, izšķirt, kuras diodes signalizē par objektu, kuras ir vienkārši fons kļūst grūti. Tuvojoties redzes lauka centram, lielāku nozīmi sāk spēlēt krāsa un tad var pagūt izšķirt tuvojošos objektu identificējot to pēc fonam neraksturīgā toņa.

Vēl vērtīgi ir salīdzināt novērojumu un detektēšanas kļūdas statiskas un dinamiskas vides gadījumā (6.2. att).



6.2.att. Statiskās un dinamiskās vides mērījumu kļūdas

Intuitīvi mērījumu kļūda pieaug līdz ar diodes izmēru (krītoties virtuālā ekrāna izšķirtspējai) abos gadījumos, taču dinamiskās vides gadījumā tas notiek krietni straujāk. Arī eksperimentā tas bija novērojams, ka dinamiskā situācijā lietotājs pie lielāka diožu izmēra pieļauj kļūdas, pamana objektu tur, kur tā nav un notur statiskus vides objektus vai efektus par pretinieku.

Tas iezīmē vēl vienu būtisku problēmu zemai izšķirtspējai, ko īsti nevarēja skaidri novērtēt tikai ar mērījumu vērtībām.

6.3.2 Neviendabīgs diožu izkārtojums

Vēl, papildus dinamiskai videi, otrā eksperimentā tika arī apskatīti papildus varianti virtuālā ekrāna konfigurācijai. Iepriekš tika pieņemts, ka virtuālais ekrāns ir diožu matrica,

kur var mainīties to izmērs un attālums starp tām; tomēr neviens neliedz mainīt arī diožu izvietojumu – tuvāk skatiena centram diodes izvietot blīvāk un mazākas (augstāka detalizācija), bet tālāk – retāk un lielākas. Tā kā redzes lauks nav viendabīgi labi uztverams visā savā diapazonā, ir loģiski to mēģināt atspoguļot arī virtuālā ekrāna uzbūvē.

Tika aplūkoti trīs neviendabīgi diožu izkārtojumi, kas balstās uz atšķirīgas klases funkcijām: lineārs, kvadrātisks un eksponenciāls. Lineārs ir pirmais acīmredzamais risinājums, kā ieviest neviendabīgu izkārtojumu, tāpat, atsevišķos avotos minēts, ka acs izšķirtspēja mainās lineāri [24]. Savukārt eksponenciāla sakarība ir ļoti populāra un bieži sastopama dabas likumos. Kvadrātiskais sadalījums ir faktiski vidusceļš starp lineāru un eksponenciālu, un citos avotos norādīts, kafotoreceptoru sadalījums acī mainās gandrīz pēc kvadrātiskas funkcijas[23].

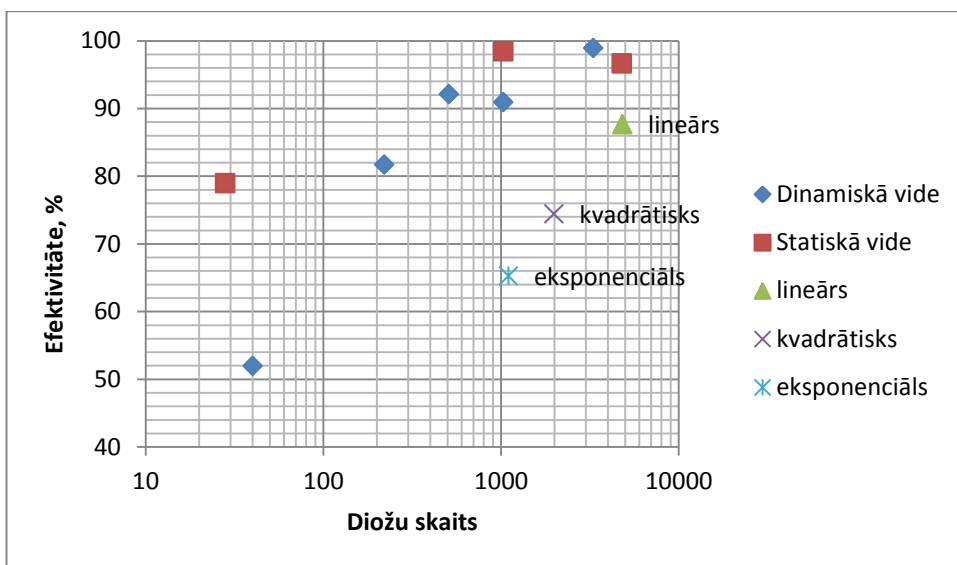
6.3. Tabula

Nevienmērīgs diožu izkārtojums

Nr.	Pirmās diodes izmērs un attālums	Funkcija	Diožu krāsa	Diožu skaits	Redzes lauks	Kļūda
0	5	$f(x) = 0,2x$	interpolēta	4824	87,67%	11,62%
2	5	$f(x) = 0,04x^2$	interpolēta	1988	74,41%	8,66%
3	5	$f(x) = e^{0,2x}$	interpolēta	1101	65,26%	19,58%

Neviendabīgs diožu sadalījums vizuāli izskatās interesanti, radot savdabīgu optisko efektu. Vienlaikus tas radapakāpenisku pāreju no pilnas izšķirtspējas ekrānu uz virtuālo ekrānu.

Teorētiski nevienmērīgajam sadalījumam vajadzētu nodrošināt augstāku detektēšanas līmeni pie zemāka diožu skaita. Diemžēl konkrētie rezultāti par to neliecina. Kā redzams 6.3. attēlā, visi trīs funkcionālie izkārtojumi kvalitātes ziņā būtiski atpaliek no pārējiem pie līdzīga diožu skaita. Iespējams, veicot plašākus testus varētu piemeklēt tādu koeficientu un diodes sākuma izmēru, lai iegūtu optimālākus rezultātus.



6.3.att. Konstanta un variabla diožu sadalījuma salīdzinājums

7 KVALITATĪVAIS PĒTĪJUMS

Tā kā virtuālā ekrāna galvenais uzdevums ir nodrošināt lietotājam maksimālu iejušanos virtuālajā vidē, klātesamības efektu, svarīgi novērtēt konfigurācijas un parametrus iespaidu arī subjektīvi.

Kvalitatīvā pētījuma ietvaros tiek simulēta tradicionālas datorspēles spēlēšana izmantojot virtuālo ekrānu. Mainot tā parametrus (LED diožu izmērs, izkārtojums, signāls u.c.), analizē subjektīvo spēles lietošanas kvalitāti 5 baļļu skalā:


- 3 – maksimālais novērtējums – nekādas atšķirības no pilnas izšķirtspējas ekrāna;
- 2 – ievērojams pozitīvs efekts;
- 1 – nebūtisks, bet pozitīvs efekts;
- 0 – nav novērojams nekāds efekts, ekrāns varētu arī nebūt;
- 1 – drīzāk negatīva ietekme, traucē.

Šī vērtēšanas sistēma izvēlēta šāda tādēļ, lai pēc iespējas atvieglotu lēmuma pieņemšanu – traucē, negatīvs, nekāds efekts – loģiski nulle, 1-3 gradācija viegli atšķirama. Lietotājs var piešķirt vērtējumam niansi ar + vai -.

Spēlētājs lieto spēli tādā pašā pozīcijā, kā pārējos eksperimentos, cenšoties fokusēt skatienu tikai spēles ekrāna centrā un negrozot galvu, kā arī izvairoties no acu zīlīšu kustībām. Trīs monitori nosedz vismaz 180 grādu redzes lauku. Parametri tiek mainīti spēlētājam nezinot – viņš uz brīdi aizklāj acis un spēles laikā izvairās no sānskatiem. Visi rezultāti apkopoti 7.1. tabulā.

7.1. tabula

Dažādu virtuālā ekrāna konfigurāciju subjektīvs vērtējums

Nr.	Konfigurācija (izmērs/attālums, režīms)	Komentāri	Vērtējums -1 līdz 3
1	40/40 interpolācija	<ul style="list-style-type: none">• Nekas netraucē• Nemirguļo pat pie straujām kustībām• Laba klātesamības sajūta	2
			

Nr.	Konfigurācija (izmērs/attālumš, režīms)	Komentāri	Vērtējums -1 līdz 3
2	40/40 pikseļu krāsa	<ul style="list-style-type: none"> • Sliktāk nekā Nr. 1, kritums kvalitātē • „Mirguļošana” • Parādās nepamatoti koši laukumi 	1-
3	30/30 interpolācija	<ul style="list-style-type: none"> • Košs, agresīvas krāsas, pat traucējoši • Detalizācija augsta • Kopumā patīk 	2-
4	30/30 melnbalts	<ul style="list-style-type: none"> • Krāsu trūkums jūtams, traucē, nokauj ticamības momentu • Vienīgi tumšākās vietās palīdz uztvert, kur tumšs, kur gaišs 	1
5	100/100 interpolācija	<ul style="list-style-type: none"> • Lieli, pamanāmi krāsu bumbuļi, kas [traucējoši] piesaista uzmanību • Zemas detalizācijas vide (tuksnesis, piemēram) nav slikti, bet detalizētā vidē traucē 	1

Nr.	Konfigurācija (izmērs/attālums, režīms)	Komentāri	Vērtējums -1 līdz 3
6	5/5 lineārs sadalījums interpolācija	<ul style="list-style-type: none"> Izteikta telpiskuma sajūta Imersija 	2
7	5/5 kvadrātisks sadalījums melnbalts	<ul style="list-style-type: none"> Nesakarīga sajūta „Mirguļo” 	-1
8	5/5 eksponenciāls sadalījums interpolācija	<ul style="list-style-type: none"> Salīdzinot ar Nr. 6, samazinājusies imersija par aptuveni 50% Sajūta, ka būtu melns fons ar raibumiņiem 	1
9	5/5 kvadrātisks sadalījums interpolācija	<ul style="list-style-type: none"> Slikti nolasās forma Sajūta, ka būtu melns fons ar raibumiņiem Mazliet strukturētāks par Nr. 8 	1

Nr.	Konfigurācija (izmērs/attālums, režīms)	Komentāri	Vērtējums -1 līdz 3
10	5/5 lineārs sadalījums pikseļu krāsa	<ul style="list-style-type: none"> • Detalizētāks nekā iepriekšējais • Rerezentē formas 	2+
			

Neviens no konfigurācijas variantiem nesaņēma augstāko vērtējumu, tomēr lietotāja atsauksmes bija pozitīvas – papildus ekrāni, pat zemā izšķirtspējā – spēja uzlabot imersijas pakāpi, padarīja spēli telpiskāku, ne tik plakanu kā ar vienu monitoru. Augstāku novērtējumu, protams, galvenokārt izpelnījās konfigurācijas ar augstāku izšķirtspēju, bet ne vienmēr – piemēram, Nr. 1 lietotājam patika labāk nekā Nr. 3, lai gan pēdējais bija augstākā izšķirtspējā. Tāpat, izrādās krāsai ir liela nozīme – neviena no melnbaltajām versijām nešķita gana laba, drīzāk pat traucēja un, salīdzinot zemākas izšķirtspējas (20x11), bet krāsainu ar augstākas izšķirtspējas (70x40) melnbaltu, uzvarēja krāsa. Iespējams krāsa ir svarīga pārejas posmā no galvenā ekrāna uz virtuālo ekrānu – tuvāk redzes centram tai vajadzētu būt krāsainai, bet tālāk – iespējams – varētu būt arī melnbaltas diodes. Vai arī jāizvēlās cits melnbaltas krāsas veidošanas algoritms.

Vēl kritiku izpelnījās lielas, tumšas spraugas starp diodēm, jo tās ir uzkrītošas un pievērš uzmanību (uzvedas kā „viltus” diodes), bet nekādu informāciju nenes. Tieši otrādi, tās apgrūtina vizuālās informācijas uztveri, ieviešot jaunas, nepamatotas struktūras. Interesanti, ka tumšās malas, spraugas starp pikseļiem ir viena no retajām *OculusRift* vēltītajām kritikām [30] – acīmredzot šī ir nozīmīga un virtuālās realitātes sistēmās noteikti risināma problēma.

NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI

Rezultāti

Darba ietvaros autors ir padziļināti iepazinies ar diviem galvenajiem virtuālās vides realizācijas mehānismiem, to tehnoloģisko līmeni šobrīd, priekšrocībām un trūkumiem. Tāpat autors ir iepazinies ar cilvēka redzes lauka bioloģiskajām īpatnībām, uz kurām balstās virtuālā ekrāna darbības princips.

Balstoties uz šo informāciju, ir izstrādāta virtuālā ekrāna simulācijas iekārta, kas ļauj viegli un ātri modelēt virtuālo ekrānu to reāli fiziski neuzbūvējot. Šāda iekārta ļauj praktiski pārbaudīt dažādas potenciālā virtuālā ekrāna konfigurācijas, piemeklēt vislabākos parametrus un skaidri novērtēt tehniskās prasības, izmaksas. Vēl vairāk tā ļauj pētīt cilvēka perifēro redzi, tās īpašības un – teorētiski – var būt noderīgi arī citu disciplīnu pētniekiem.

Tāpat izveidota un attīstīta speciāla metodika, lai kvantitatīvi novērtētu virtuālā ekrāna efektivitāti, tādējādi ļaujot salīdzinoši objektīvi salīdzināt dažādas konfigurācijas un risinājumu kvalitāti.

Izstrādāti arī autonomi *Unity* moduļi, ar kuriem var salīdzinoši ērti un ātri pieslēgt virtuālā ekrāna simulācijas funkcionalitāti jebkurai tipiskai spēlei, kas veidota uz šīs platformas.

Galu galā veikti divi kvantitatīvi eksperimenti un viens kvalitatīvs pētījums, nomērot un analizējot vairāk nekā 20 dažādu virtuālā ekrāna konfigurāciju efektivitāti. Izstrādātas un pārbaudītas konceptuāli atšķirīgas, netriviālas virtuālā ekrāna vizualizācijas metodes.

Eksperimentu rezultātā iegūts pamatots priekšstats par to, kāda tehniskā specifikācija jāsapatavo, ņemot vērā reālu, fizisku virtuālā ekrāna prototipa izstrādes. Izkristalizējušās arī dažas likumsakarības, kas novērojamas virtuālajam ekrānam.

Optimālā virtuālā ekrāna konfigurācija

Izšķirtspēja

Eksperimentāli novērots, ka, kā jau sagaidāms, jo augstāks diožu blīvums, jo labāka kustības detektēšana perifērajā redzes laukā, kā arī augstāka imersijas sajūta. Taču – izrādās aptuveni 90-95% efektivitāti, salīdzinot ar pilnas izšķirtspējas monitoru, var sasniegt pat ar salīdzinoši rupju matricu!

Salīdzinot ar bioloģiskajām cilvēka acs spējām, virtuālais ekrāns, paredzami, nespēj piedāvāt nepieciešamo izšķirtspēju (vidēji zem viena *cpd*). Slikta redze skaitās 6/18 (pēc Snella skalas), t.i. 3x sliktāka nekā norma. Tas nozīmē, ka konfigurācijas, kur *cpdvērtības* ir zem aptuveni 0,3 (t.i. 0,8/3, kur 0,8 ir minimālā cilvēka redzes izšķirtspēja perifērijā) tīri praktiski nav lietojamas.

Diožu krāsas algoritms

Būtisks jautājums ir – kādu krāsu diodēm attēlot. Spriežot pēc kvalitatīvā pētījuma datiem, melnbaltais režīms nav vēlams. Vismaz ne ar šajā darbā izmantotajiem parametriem. Ņemt pikseļu krāsu ir labāka izvēle, katrā ziņā ātrāka apstrādē, taču šai metodei ir vairāki būtiski trūkumi – paaugstināta raibuma sajūta, nepamatota informācija un, iespējams, pārāk koša un tādēļ traucējoša vizualizācija. Tāpēc galu galā interpolācija ir optimālākā izvēle.

Diožu izkārtojums

Pēc darba ietvaros veiktajiem eksperimentiem, vienmērīgs diožu sadalījums ir rekomendējamākā izvēle.

Lineārs sadalījums ir alternatīva ar potenciālu, lai arī kvantitatīvajos mērījumos tas neuzrādīja labus rezultātus, subjektīvajā vērtējumā lineārais sadalījums izpelnījās vienu no augstākajiem novērtējumiem. Tāpat tam par labu runā arī atsevišķos avotos minētā lineārā redzes asuma izmaiņa attālinoties no centra.

Savukārt kvadrātiski vai eksponenciāli sadalījumi kopumā ir pārāk strauji un, līdz ar to nepiemēroti. Tomēr jebkurā gadījumā, nevienmērīgs sadalījumu labāk atbilst bioloģiskajai acs uzbūvei.

Grūtības darba izstrādē

Pikseļu informācijas iegūšana

Neskatoties uz šķietami vienkāršo uzbūvi un darbības principu, virtuālās vides simulācijas iekārtas izstrādē nācās atrisināt vairākas negaidītas un sarežģītas problēmas. Pirmais – izrādās nolasīt konkrēta pikseļa krāsu nav vienkārši un, pats galvenais, ātri.

Neskatoties uz to, ka „tas ir tepat uz ekrāna”, krāsas informācija atrodas video atmiņā, kurai piekļuve zīmēšanas laikā ir ierobežota, vai arī dramatiski ietekmē ātrdarbību.

Izstrādes sākumā tika mēģināts izmantot *AdobeFlashActionScript3* valodu un vidi – mūsdienās (un jau ilgu laiku pirms tam) tas ir viens no populārākajiem risinājumiem datorspēļu izstrādē. Lai arī sākumā galvenokārt 2D risinājums, tas neseni ieguva 3D API un spēju pilnvērtīgi izmantot videokarti; to uzreiz sāka plaši izmantot mobilās aplikācijas un daudzas tiešsaistes spēles. Neskatoties uz daudzu gadu vecajiem stereotipiem, 3D *Flash* aplikācijas ir pietiekami ātrdarbīgas.

Tomēr iegūt pikseļa krāsu izrādījās – vismaz šobrīd – pārāk nopietns slogs. Ātrdarbība bija zem katras kritikas – desmit punktus iegūstot pikseļa krāsu un uzzīmējot „diodi” ātrdarbība 3D aplikācijā nokrita no 60 kadriem sekundē līdz 1-2. Diezgan ilgi tika mēģināts atrast optimālāku pikseļu krāsas iegūšanas metodi (piemēram, nevis renderēt visu attēlu un tad izvēlēties pikseli, bet pēc izvēles renderēt tikai 1x1 lielus laukumus un uzreiz atmiņā), tomēr galu galā kļuva skaidrs, ka jāmaina platforma.

Meklējot optimālu alternatīvu, tika aplūkoti trīs dažādi varianti – *Java3D*, *OpenGL* un *Unity*.

Ar *Java3D* darba autors saskārās kursa „Datoru grafika” laikā un nolēma ar to iepazīties padziļināti, izstrādājot pilnvērtīgu 3D darbības spēli. Šī risinājuma pievilcība slēpjas trīsdimensionālās vides veidošanas principos – tiek izmantots hierarhisks grafs ar savstarpēji pakārtotiem objektiem, kas ļauj salīdzinoši viegli izveidot un manipulēt vēlamo vidi. Diemžēl procesā atklājās, ka ātrdarbība un citas problēmas apgrūtināja šī risinājuma izmantošanu darbā.

OpenGL ir sens un kopumā ātrdarbības ziņā neapstrīdams 3D API, taču pats par sevi tas ir diezgan zema līmeņa risinājums – lai radītu eksperimentiem nepieciešamo struktūru, vidi un funkcionalitāti, nepieciešams liels, tieši ar darba tēmu nesaistīts, darbs. Lai arī darba autoram ir praktiska pieredze, izstrādājot lietotnes ar *OpenGL*, tomēr – it īpaši, kad, veicot nelielu izpēti, atklājās daudzas sūdzības par ekrāna pikseļu iegūšanai kritiskas procedūras *glReadPixels* ātrdarbības problēmām, tika pieņemts lēmums meklēt citu risinājumu.

Unity, savukārt, izrādījās ļoti piemērots darba uzdevumiem. Pirmkārt, pēdējos gados tas ir kļuvis par ļoti iecienītu un populāru risinājumu 3D spēļu izstrādē – to labprāt izmanto gan lielas un nopietnas kompānijas, gan iesācēji amatieri, jo tas ir salīdzinoši vienkāršs un ērts. Otrkārt, *Unity* nāk kopā ar ļoti parocīgu izstrādes vidi, kurā iespējams vienkārši sagatavot un modificēt eksperimenta vidi un uzdevumus. Treškārt – pats svarīgākais – pēc ātra testa, noskaidrojās, ka pikseļu lasīšana un rezultātu zīmēšana ir ļoti efektīva. Tik efektīva, ka bija

iespējams pat izmantot interpolācijas algoritmu, kas nozīmē izmantot nevis vienu, bet piecas pikseļu vērtības uz katru punktu.

Lai arī virtuālā ekrāna modelēšana kopumā ievērojami noslogoja sistēmu, tomēr ātrdarbība saglabājās eksperimenta vajadzībām apmierinošā līmenī.

Trīs monitoru sistēma

Otra ievērojama problēma, ar ko nācās saskarties, bija trīs monitoru sistēmas izveidošana. Lai arī sākumā likās, ka tas būs salīdzinoši vienkārši – mūsdienās divi monitori nav greznība, bet drīzāk pat nepieciešamība – tomēr atklājās, ka trīs monitoru atbalsts ir pieejams reti kurai video kartei (*EyefinityADM/ATI* kartēm, *SurroundN* Vidiakartēm). Praktiski pieejamās videokartes bija ar trīs izejām – DSUB, DVI un HDMI, bet DVI un HDMI nevarēja strādāt vienlaicīgi, rezultātā ierobežojot maksimālu monitoru skaitu uz divi. Protams, iespējams pievienot vēl papildus videokarti, taču šeit atkal ierobežojums bija mātesplate, kurai bija tikai viena *PCI-Express16x* ligzda...

Galu galā atrisinājums tika panākts izmantojot divus skaitļotājus, kas saslēgti tīklā un sazinās izmantojot UDP protokolu. Lai arī šķietami neveikls risinājums, tas patiesībā palīdzēja risināt ātrdarbības problēmasadalot slodzi uz divām sistēmām. Vienīgās bažas bija par to, vai tīkls neradīs laika nobīdi, kas pat neliela, kameras kustībai būtu ļoti jūtama, tomēr praktiski, sūtot paketes 60 reizes sekundē, šī problēma atrisinājās (pie mazākas frekvences nobīde un kļūdas bija novērojamas). Tāpat tīkla lietotnes risinājums izmanto vienkāršas interpolācijas metodes, kas pie nelieliem zudumiem spēj labi rekonstruēt kustību.



8.1.att. Papildus ekrāns eksperimenta procesa uzraudzībai un vadībai

Tīkla izmantošanai bija arī neplānotas papildus priekšrocības – eksperimenta laikā varēja pieslēgt vēl vienu skaitļotāju (8.1. att.), kurā uzraudzīt procesu un, ja nepieciešams, attālināti nomainīt parametrus. Īpaši ērti tas bija kvalitatīvā eksperimenta laikā, kad lietotājam parametri jānomaina ātri un netraucējot spēles procesu.

Vienīgā problēma, ko neizdevās darba ietvaros atrisināt – laika trūkuma dēļ – spēlei jābūt pilnvērtīgi tīklā spēlējamai, pašreizējā iterācijā atsevišķās situācijās rodas neparedzētas kļūdas un neatbilstības. Tomēr vizualizācijai tās principā nav svarīgas.

Jāpiebilst, ka daudzmonitoru sistēma bija problēma ne tikai iekārtu līmenī, bet arī programmatūrai – atklājās, ka *Unity* noklusējot neatbalsta vairāk par vienu monitoru. Nācās rast risinājumu *Nvidia* konfigurācijas panelī ieviešot jaunu, viltus izšķirtspēju, kas ir divu monitoru platumā un tad veidot lietotni šajā izmērā.

Nepaveiktais un turpmākais darbs

Darba ietvaros izdevās pārbaudīt galvenās interesējošās konfigurācijas virtuālajam ekrānam, novērtēt parametru ietekmi uz vizualizācijas kvalitāti un pārliecināties par iekārtas lietojamību.

Tomēr gribētos rūpīgāk izpētīt tieši funkcionālo diožu sadalījumu efektivitāti, rūpīgāk pielasot saistošos parametrus, jo ir sajūta, ka tur varētu būt potenciāls iegūt augstāku ātrdarbību un zemāku diožu skaitu uz salīdzinoši līdzvērtīgu efektivitātes līmeni. Tāpat, sakarā ar to, ka iekārta ir diezgan sarežģīti konstruējama un komplektējama, bet sastāv no darba vietā pieejamās tehnikas, neizdevās notestēt virtuālā ekrāna efektivitāti uz gana plaša cilvēku loka. To pašu ierobežojumu dēļ neizdevās arī veikt pilnvērtīgu visu izmēru un konfigurāciju salīdzinājumu arī izvēloties krietni lielāku mērījumu skaitu (>30). Būtu svarīgi arī uzlabot kvantitatīvo eksperimentu, izmantojot dažādas formas, krāsas, izmēru un uzvedības objektus, lai novērotu kā tie saistās ar pamanīšanas efektivitāti.

Neizdevās gana dziļi iedziļināties ātrdarbības optimizācijas jautājumā – iespējams, ka šneideru tehnoloģijas varētu palīdzēt iegūt efektīvāku virtuālā ekrāna vizualizāciju.

Tāpat darba ietvaros praktiski netika aplūkota iespēja mainīt diodes attēlu – piemēram izmantot taisnstūri ar intensīvāku centru (pašu „diodi”) un mazāk intensīvu (caurspīdīgāku) fonu. Tādā veidā varētu simulēt atšķirīgu fizisko virtuālā ekrāna realizāciju – ar vai bez atstarojoša fona, piestikla utt. Ņemot vērā, ka lietotāji sūdzējās par tumšajām atstarpēm starp gaismas diodēm, tam varētu būt nozīme uz kopējo imersijas un klātesamības sajūtu.

Tomēr, iespējams, interesantākais un potenciāli vērtīgākais nākamais solis būtu virtuālā ekrāna kā *OculusRift* perifērās redzes lauku uzlabojoša papildinājuma izstrāde. Ideālā gadījumā darba autors labprāt tiktu pie šādas iekārtas un izveidotu reālu iekārtas prototipu, balstoties uz darbā gūtās informācijas un izstrādātajiem rīkiem.

PATEICĪBAS

Darba izstrādē palīdzēja daudzas personas, tomēr darba autors īpaši gribēja pateikties datorspēju izstrādes kompānijai SIA „NextLevel”, kas atvēlēja savu datortehniku un telpas virtuālā ekrāna simulācijas iekārtas izveidei un eksperimentiem. Ja nebūtu iespējams izmantot šo tehniku, būtu daudz sarežģītāk pārbaudīt praksē virtuālā ekrāna darbības principus un novērtēt to efektivitāti.

Tāpat gribētu pateikt paldies Andrejam Kļaviņam un Klāvam Dzelzs-Vaivaram par aktīvu līdzdalību eksperimentos un palīdzību sistēmas uzlabošanā.

Atsevišķs paldies Laurai Ceplei par fotoreportāžu un palīdzību iekārtas sagatavošanā un darba izstrādē.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] I. E. Sutherland *A head-mounted three dimensional display*. Salt Lake City, Utah : The University of Utah, 1968. Fall Joint Computer Conference. lpp. 757-764.
- [2] I. E. Sutherland *The Ultimate Display*. 1965. IFIP.
- [3] BBC News Technology. *BBC News*. [Tiešsaiste] BBC, 2012. gada 1. augusts. <http://www.bbc.co.uk/news/technology-19085967>.
- [4] M. Brown WIRED. [Tiešsaiste] 2012. gada 2. augusts. <http://www.wired.co.uk/news/archive/2012-08/02/oculus-rift-kickstarter>.
- [5] O. Welsh Eurogamer. [Tiešsaiste] 2012. gada 7. jūnijs. <http://www.eurogamer.net/articles/2012-06-07-john-carmack-and-the-virtual-reality-dream>.
- [6] T. Hatada, H. Sakata, H. Kusaka *Psychophysical analysis of the "sensation of reality" induced by a visual wide-field display*. bez viet. : SMPTE Journal, 1980. gada.
- [7] K. B. Pandolf, R. E. Burr. *Medical Aspects of Harsh Environments, Volume 2*. bez viet. : Government Printing Office, 2001.
- [8] Euro Gamer. *Digital Foundry: Hands-on with Oculus Rift*. [Tiešsaiste] [Citēts: 2013. gada 24. 05.] <http://www.eurogamer.net/articles/digitalfoundry-hands-on-with-oculus-rift>.
- [9] G. Vas The Oculus Rift Is Even More Amazing When You Can See Your Hands Move. *Kotaku*. [Tiešsaiste] GAWKER, 2013. gada 30. 04. [Citēts: 2013. gada 27. 05.] <http://kotaku.com/the-oculus-rift-is-even-more-amazing-when-you-can-see-y-485749449>.
- [10] Oculight LED hack gives the Oculus Rift a hint of peripheral vision. *Engadget*. [Tiešsaiste] 2013. gada 11. 04. [Citēts: 2013. gada 24. 05.] <http://www.engadget.com/2013/04/11/oculight-hack-gives-the-oculus-rift-a-hint-of-peripheral-vision/>.
- [11] [Tiešsaiste] 1997. gada. [Citēts: 2013. gada 19. 01.] http://www.me.psu.edu/sommer/me440/sp99/updates/IR_sim/simfinal.html.
- [12] C. Cruz-Neira, D. Sandin, T. DeFanti, R. Kenyon, J. Hart *The CAVE®: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment*. 6, 1992. gada 01. 06, Communications of the ACM, Sēj. 35, lpp. 65-72.
- [13] CAVE2: Next-Generation Virtual-Reality and Visualization Hybrid Environment for Immersive Simulation and Information Analysis. *Electronic Visualization Laboratory*. [Tiešsaiste] 2009. gada 05. 01. [Citēts: 2013. gada 27. 05.] <http://www.evl.uic.edu/core.php?mod=4&type=1&indi=424>.

- [14]B. Denby*The LAIR : Lightweight Affordable Immersion Room..* : Massachusetts Institute of Technology, 2009. gada, Sēj. Presence : Teleoperators & Virtual Environments, 18 (5): 409-411.
- [15] M.Czernuszenko, D. Pape, D. Sandin, T. DeFanti, G. Dawe, M. Brown*The ImmersaDesk and Infinity Wall Projection-Based Virtual Reality Displays*. Computer Graphics, 1997. gada.
- [16]M. Lancelle, V. Settgast, D. W. Fellner.*Definitely Affordable Virtual Enviroment*. Reno, Nevada : IEEE Virtual Reality, 2008.
- [17]Roman, Fernando, Maciel, Anderson, Nedel, Luciana*Desktop-CAVE for First Person Shooter Games*. Washington, DC : IEEE Computer Society Washington, 2010. ISBN: 978-0-7695-4359-8.
- [18] PARIS™ : Personal Augmented Reality Immersive System. [Tiešsaiste] Electronic Visualization Laboratory. [Citēts: 2013. gada 22. 05.] <http://www.evl.uic.edu/core.php?mod=4&type=1&indi=83>.
- [19]O. Hilliges, D. Kim, S. Izadi, M. Weiss, A. D. Wilson.*HoloDesk: Direct 3D Interactions with a Situated See-Through Display*. ACM, 2012.
- [20]B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek, A. D. Wilson.*IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences* . Redmond, WA : Microsoft Research.
- [21]B. R. Jones. Illumiroom. *DO COOL STUFF*. [Tiešsaiste] 2013. gada 28. 04. [Citēts: 2013. gada 27. 05.] <http://www.brettrjones.com/illumiroom/#more-464>.
- [22]Encyclopædia Britannica Online. s. v. "human eye". *Encyclopædia Britannica Online*. [Tiešsaiste] [Citēts: 2013. gada 22. janvāris.] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1688997/human-eye/64947/Fusion-of-retinal-images>.
- [23]Rajashekar, Umesh, Bovik, C. Alan, Cormack, K. Lawrence Natural Image Statistics and Human Eye Fixations. *Laboratory for Image & Video Engineering*. [Tiešsaiste] The University of Texas at Austin. [Citēts: 2013. gada 21. 5.] <http://live.ece.utexas.edu/research/eyefix/>.
- [24]B. Guenter, M. Finch, S. Drucker, D. Tan, J. Snyder.*Foveated 3D Graphics*. ACM SIGGRAPH Asia, 2012.
- [25]Findlay, J. M.,R. Walker.*A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition*. 22, Behavioral and Brain Sciences, 1992. gada.
- [26]Tomlinson, Bahra.*Combined eye-head gaze shifts in the primate. I. Metrics*. 56(6), J. Neurophysiol., 1986. gada.

- [27]W. R. Hendee, P. N. T. Wells.*The Perception of visual information*. Springer, 1997 . ISBN 0-387-94910-0.
- [28]L. Frisén, A. Glansholm.*Optical and neural resolution in peripheral vision*. 14(7), 1975 gada. PMID:1140911.
- [29]P. Seuntiens, I. Vogels, A. van Keersop.*Visual Experience of 3D-TV with pixelated Ambilight*. PRESENCE 2007.
- [30]*Doc-Ok.org*. [Tiešsaiste] 2013. gada 5. 4. [Citēts: 2013. gada 24. 5.] <http://doc-ok.org/?p=548>.
- [31]R. H. Fowler, M. D. Carrillo, R. A. Huerta, W. A. L. Fowler.*Designing a Low Cost Immersive Environment System*. Edinburg, TX, USA : Department of Computer Science, University of Texas.
- [32]J. Purcher. Patently Apple. [Tiešsaiste] 2012. gada 9. septembris. <http://www.patentlyapple.com/patently-apple/2012/09/microsoft-envisions-where-gaming-is-going-and-its-wild.html>.
- [33]J.D.Prothero, H.G. Hoffman*Widening the Field-of-View Increases the Sense of Presence in Immersive Virtual Environments*. Washington : Human Interface Technology Laboratory. TR-95-2.
- [34]Ishiguro, Yoshio un Rekimoto, Jun.*Peripheral vision annotation: noninterference information presentation method for mobile augmented reality* . NewYork : Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference, 2011. ISBN: 978-1-4503-0426-9.

Maģistra darbs: „REDZES LOKA PAPLAŠINĀŠANA, IZMANTOJOT VIRTUĀLU EKRĀNU”

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

Autors: _____

(Autora paraksts)

Ar savu parakstu apliecinu, ka esmu lasījis augstāk minēto maģistra darbu un atzīstu to par p i e m ē r o t u / n e p i e m ē r o t u (nevajadzīgo svītrot) aizstāvēšanai Latvijas Universitātes datorzinātņu maģistrantūrā.

Darba vadītājs(-ja): _____

(Vadītāja paraksts)

Darbs iesniegts maģistrantūras sekretariātā _____.

(Iesniegšanas datums)

Ar šo es apliecinu, ka darba elektroniskā versija ir augšupielādēta LU informatīvajā sistēmā.

Studiju metodiķe: _____.

(Metodiķes paraksts)

Recenzents: _____

(Akad.amats, zin.grāds, vārds, uzvārds)

Darbs aizstāvēts maģistra kursa darba gala pārbaudījuma komisijas sēdē

_____ prot. Nr. _____

(Darba aizstāvēšanas datums)

Komisijas sekretārs: _____

(Sekretāra paraksts)