

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte  
Lietišķo datorsistēmu institūts  
Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedra

**Ēvalds URTĀNS**  
Akadēmiskā maģistru studiju programma  
„Intelektuālās robotizētās sistēmas”  
(stud. apl. nr. 131RDM003)

**AKTĪVIE INFRASARKANIE MARKIERI  
PAPLAŠINĀTAJAI UN VIRTUĀLAI REALITĀTEI**

**Maģistra darbs**

Zinātniskais vadītājs:  
Dr.sc.ing., docents  
Agris NIKITENKO

**Rīga - 2015**

## DARBA IZPILDES UN NOVĒRTĒJUMA LAPA

Maģistra darbs izstrādāts ***Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedrā***. Ar parakstu apliecinu, ka visi izmantotie materiāli ir norādīti literatūras sarakstā un iesniegtais darbs ir oriģināls.

Darba autors:

stud. **Ē.Urtāns** .....  
(paraksts, datums)

Maģistra darbs ieteikts aizstāvēšanai:

Zinātniskais vadītājs:

Dr.sc.ing., docents. **A.Nikitenko** .....  
(paraksts, datums)

Maģistra darbs pielaists aizstāvēšanai:

Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras vadītājs:

Dr.habil.sc.ing., prof. **J.Grundspenķis** .....  
(paraksts, datums)

Maģistra darbs aizstāvēts mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras gala pārbaudījumu komisijas ..... gada ..... sēdē un novērtēts ar atzīmi ( ..... ) .....  
(gads) (datums, mēnesis)

Mākslīgā intelekta un sistēmu inženierijas katedras gala pārbaudījumu komisijas

sekretāre .....  
(paraksts, datums)

## ANOTĀCIJA

### VIRTUĀLĀ REALITĀTE, PAPLAŠINĀTĀ REALITĀTE, INFRASARKANIE MARķIERI, INFRASARKANĀ KAMERA, SIGNĀLU APSTRĀDE

Šajā pētījumā ir piedāvāta inovatīva sistēma un algoritmi, lai nodrošinātu cilvēkam neredzamu marķieru pozīciju atpazīšanu, izmantojot Leap Motion sensora augstas frekvences infrasarkano kameru un Arduino mikrokontroliera shēmu ar infrasarkanās gaismas diodēm. Iegūtās marķieru pozīcijas apraksta fizisku objektu atrašanās vietu un orientāciju, kura tiek attēlota, izmantojot Oculus Rift ekrāna iekārtu.

Pēc sistēmas izveides tika noskaidrots, ka tā ir stabila, tikai ar 1.5% klūdu datu pārraidē, un tā ir izmantojama reālā laikā ar 111 Hz frekvences kameru. Sistēmas veikspēja ir ierobežota tikai ar kameras attēlu frekvences ātrumu, un, izmantojot 300 Hz frekvences kameru, tā spētu darboties tādā pašā ātrumā kā tradicionālo kvadrātveida statisko marķieru sistēma. Piedāvātā sistēma var pārraidīt ne tikai marķiera identifikatora kodu, bet arī papildu informāciju par aprakstāmo objektu, kā, piemēram, lietotāja ievades interfeisa datus vai sensoru mēriņus.

Darba pamattekstā ir 72 lappuses, 58 attēli, 19 tabulas un 50 informācijas avoti.

## **ANNOTATION**

**VIRTUAL REALITY, AUGMENTED REALITY, INFRARED MARKERS,  
INFRARED TRACKER, SIGNAL PROCESSING**

This research is purposing synthesis of algorithms and methods to create system that can recognize positions and orientations of markers that are invisible to humans. It uses high frequency infrared camera of Leap Motion sensor and Arduino microcontroller that uses infrared light emitting diodes. Positions and orientation acquired by the algorithm are display as overlays over physical objects using Oculus Rift head mounted display.

After implementation of purposed system it was found that it is stable with only 1.5% of error in data transmission. It can be used in real time with Leap Motion's 111Hz frequency camera. Performance of system is limited only by the speed of infrared camera and it would preform as well as traditional rectangular marker systems using 300Hz frequency infrared camera. Purposed system can not only send identification of a marker, but also additional information like user interaction or data from sensors in object that has markers attached.

The volume of the Master Thesis is 72 pages, 58 figures, 19 tables and 50 bibliographical sources.

## АННОТАЦИЯ

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ, ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ,  
ИК МАРКЕРЫ, ИНФРАКРАСНАЯ КАМЕРА, ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Это исследование предполагала синтез алгоритмов и методов для того, чтобы создать систему, которая может распознавать позиции и ориентации маркеров, которые невидимы для человеческого глаза. Используя высокочастотную инфракрасную камеру Leap Motion и Arduino схему микроконтроллера с инфракрасными светодиодами. Используя Oculus Rift оборудование с экраном можно изобразить ориентацию и позицию физических объектов с помощью полученных позиций маркеров.

После создания системы было обнаружено, что она устойчива и в передаче данных имеет только 1,5% ошибку. Её можно использовать с Leap Motion 111Hz камерой в режиме реального времени.

Производительность системы ограничивается только скоростью инфракрасной камеры и она может работать так же как традиционные прямоугольные системы маркеров с использованием частотной 300Hz инфракрасной камерой.

Система может не только отправить идентификацию маркера, но и дополнительную информацию, например взаимодействия пользователя или данные от датчиков в объекте.

Объём магистрской работы 72 стр., 58 рис., 19 таблица и 50 источников литературы.

# SATURA RĀDĪTĀJS

<b>1. Ievads</b>	<b>6</b>
<b>2. Risinājumi virtuālai un paplašinātai realitātei</b>	<b>9</b>
2.1 Virtuālās un paplašinātās realitātes attēlošanas risinājumi . . . . .	17
2.2 Sensori virtuālai realitātei . . . . .	19
2.3 Sensori paplašinātai realitātei . . . . .	21
2.4 Redzamie markieri paplašinātajai realitātei . . . . .	22
2.5 Neredzamie markieri paplašinātajai realitātei . . . . .	25
<b>3. Algoritms neredzamu markieru sistēmai</b>	<b>29</b>
3.1 Infrasarkano markieru implementācija . . . . .	37
3.2 Infrasarkano markieru komunikācijas protokols . . . . .	43
3.3 Infrasarkano markieru pozicionēšana telpā . . . . .	53
<b>4. Markieru sistēmas novērtējums</b>	<b>58</b>
<b>5. Turpmākie pētījumi</b>	<b>64</b>
<b>6. Secinājumi</b>	<b>65</b>
<b>7. Terminu vārdnīca</b>	<b>67</b>
<b>8. Izmantotā literatūra</b>	<b>69</b>

# 1. IEVADS

Šī darba mērķis ir izveidot un izpētīt funkcionālu prototipu datorsistēmai, kura nodrošina, ka tās lietotājs var manipulēt ar fiziskiem objektiem virtuālajā un paplašinātajā realitātē bez cilvēkam redzamiem markieriem.

**Darba uzdevumi** definēti sekojoši:

1. Izpētīt pašreiz pieejamos risinājumus virtualās realitātes nodrošināšanai, kā arī Oculus Rift pielietojamību.
2. Izpētīt Leap Motion sensora pielietojamību virtualās un paplašinātās realitātes nodrošināšanai.
3. Izpētīt esošās markieru sistēmas virtuālajai un paplašinātajai realitātei.
4. Izpētīt signālu apstrādi, izmantojot redzamās un infrasarkanās gaismas kameras.
5. Implementēt infrasarkano markieru sistēmu, ievietojot to fiziskos objektos.
6. Novērtēt infrasarkano markieru sistēmas efektivitāti, priekšrocības un trūkumus.

Virtuālā realitāte (VR), kas tika popularizēta "Atpakaļ nākotnē" ("Back to the future") filmās astoņdesmitajos gados, jau vairākus gadus desmitus ir bijis zinātnieku un datorlietotāju sapnis, taču līdz šim neveiksmīgi implementācijas mēģinājumi kā, piemēram, Nintendo Virtual Boy ir mazinājuši šīs tehnoloģijas nozīmību mūsdienu pasaulei. Tā tas bija līdz 2012. gadam, kad Oculus Rift iekārtas radīšanai ar sabiedrības atbalstu caur finansēšanas platformu Kickstarter tika savākti 2.4 miljoni ASV dolāru [1]. Pēc tam 2013. gadā izstrādātājiem jau bija pieejami pirmie ierīces modeļi, un pašlaik tiek izstrādāti nākamās paaudzes modeļi, kas nodrošinās daudz augstāku attēla rezolūciju un precīzāku galvas kustību izsekošanu. Strauji attīstoties šim produktam, tirgū ir ienākušas vairākas līdzvērtīgas konkurentu iekārtas no Sony, Carl Zeiss, Razer, u.c [1]. Visām šim iekārtām ir līdzīgs princips - pie galvas piestiprināms ekrāns, kas nodrošina attēla projicēšanu acu priekšā vai uz acu tīklenes, radot ilūziju par virtuālo realitāti. Šī pētījuma lielākā vērtība ir tajā, ka fizisko objektu markieri nav redzami cilvēkam, tāpēc labākais pielietojums tai ir paplašinātajā realitātē, kur lietotājam pie redzamās pasaules objektiem tiek pievienota papildus funkcionalitāte un informācija. Viens no veidiem, kā var izveidot šādu datorsistēmu ir, izmantojot, Leap Motion sensoru, kas tiek piestiprināts acu vietā pie Oculus Rift ekrāna korpusa. Leap Motion sensorā ir iebūvētas divas infrasarkanās stereo kameras [2], kuras nodrošina fiziskās pasaules attēlojumu, kas nepieciešamas paplašinātās realitātes iegūšanai,

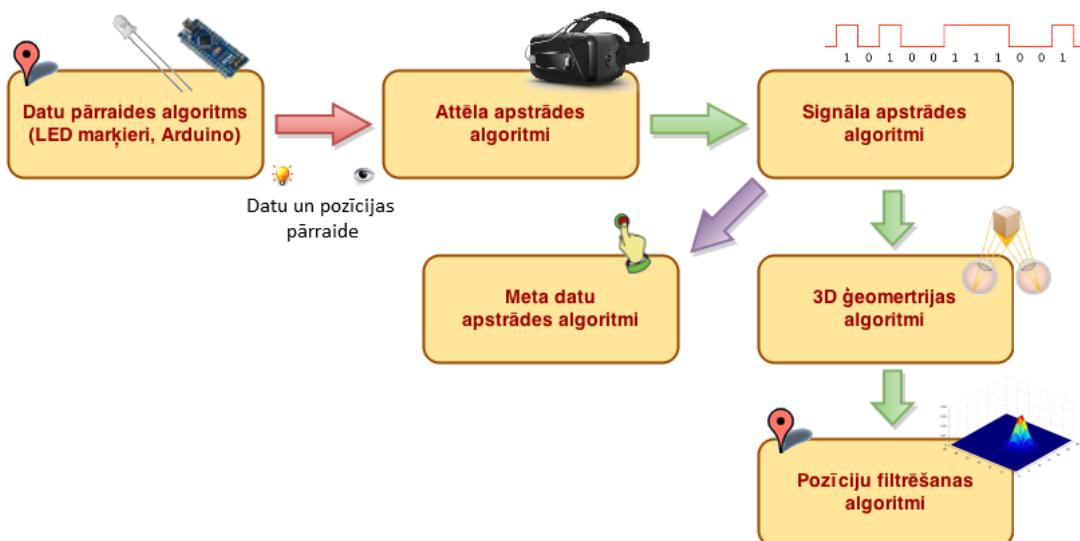
izmantojot katrai acij reālā laika video. Šo video pēc tam attēlo uz Oculus Rift ekrāna, kur, balstoties uz markieru pozīcijām, tiek pievienoti telpiski precīzi novietoti virtuāli

objekti. Izmantojot Oculus Rift iekārtu, ir tikuši veikti jau daudzi pētījumi gan akadēmiskajās, gan komerciālajās aprindās [3] [4]. Arī šī pētījuma vizuālo VR risinājumu nodrošinās Oculus Rift iekārtas 2014. gada versija.

Pēdējos gados, kopš par pircējiem pieejām cenām tirgū ir pieejami telpas dzīluma sensori, kā Microsoft Kinect, PrimeSense, u.c vairākos virtuālās realitātes pētījumos ir plaši pielietotas to sniegtās funkcijas [5] [6] [7]. Šie sensori arī ir izmantojami ar aktīvo infrasarkanā markieru tehnoloģiju, bet tiem pagaidām, nav pieejama stereo videokamera, kas ir vēlama paplašinātās realitātes nodrošināšanai, izmantojot Oculus Rift. Tāpēc svarīga šī pētījuma daļa ir Leap Motion infrasarkanās stereo videokameras implementācija, kura nodrošina datu iegūšanu no aktīvajiem infrasarkanajiem markieriem.

Leap Motion sensors parasti tiek izmantots, lai noteiktu pirkstu un roku atrašanās pozīcijas telpā.

Paši markieri ir implementēti, izmantojot Arduino platformu un 850nm infrasarkanās gaismas diodes, kuras pārraida digitālu informāciju, izmantojot protokolus, kuri aprakstīti šajā pētījumā.



1. attēls. Piedāvātās sistēmas darbību secību diagramma.

Līdz šim ir veikti dažādi mēģinājumi virtuālo attēlu saistīt ar fizisko pasauli, lai datorsistēmas lietotājs fiziski to varētu aizskart jeb iegūt haptisko atgriezenisko saiti. Nesenākā no šādām sistēmām ir MIT izstrādātā fiziski aizskaramu pikselu virsma inFORM, kur katrs pikselis var tikt izbīdīts uz āru, radot reljefu un objekta apveidus [8]. Pirms tam Walt Disney studijā izveidotā AIREAL sistēma, kas izmanto Microsoft Kinect tipa dzīluma sensoru, ir demonstrējusi skāriena imitāciju 3D telpā, izmantojot mērķētus tvaika burbuļus [?]. Un vēl pirms šī pētījuma MIT laboratorijā tika izstrādāta sistēma ZeroN [9], kas ar elektromagnētu palīdzību 3D telpā var stabili pozicionēt metāla lodīti, kuru lietotājs

var izmantot saskarnei ar datoru. MIT pētījumā plānotā sistēma, izmantojot helikopteru, arī sasniedz līdzīgus rezultātus, bet neliela helikoptera sistēma ir daudz lētāka un vieglāk adaptējama jau esošām darba vidēm. Kā arī helikoptera sistēma ir plānota darbībai tieši virtuālajā realitātē (VR), bet ZeroN, ir galvenokārt paredzēta fiziskai datora komunikācijai ar lietotāju bez atsevišķa vizuālā interfeisa. Līdzīgs risinājums ZeroN ir arī japāņu radītā 3D levitācijas metode, izmantojot skaņas viļņus [10], bet tā pašlaik nebūtu piemērota radīt pietiekami daudzveidīgu un precīzu taustes sajūtu virtuālās realitātes vajadzībām.

Citi risinājumi atgriezeniskās saites iegūšanai izmanto speciāli izveidotus robotizētus statīvus vai cimdus [?] [11]. Ir arī pētījumi, kuros analizētas iespējas radīt taustes sajūtu, izmantojot plašāk pieejamākas ierīces, kā,

piemēram, slēdžus [12], un pat veikti eksperimenti, imitējot citas formas virtuālus elementus, kas atšķiras no fiziski taustāmiem elementiem [13]. Šajā pētījumā piedāvātā sistēma virtuālajai realitātei nodrošina taustāmu atgriezenisko saiti jebkuram fiziskam objektam, pie kura ir pievienoti infrasarkanie markieri, kas atšķirībā no tradicionālajiem, paplašinātajā realitātē izmantotajiem, markieriem nav redzami cilvēka acij. Aktīvos infrasarkanos markierus var pievienot jebkuras formas un krāsas fiziskiem objektiem. Viena no interesantākajām implementācijām šādai sistēmai var tik izveidota, pievienojot šādus markierus fiziskā telpā kustīgiem objektiem, kuri var tikt izmantoti kā manipulatori virtuālajai realitātei, piemēram, mazai iekštelpu helikoptera platformai, kura reprezentē taustāmas virsmas virtuālajā realitātē jebkurā telpas vietā.

Galvenā priekšrocība infrasarkanajiem markieriem ir tieši paplašinātajā realitātē. Ar tiem var iegūt precīzu objekta atrašanās vietu telpā neatkarīgi no šī objekta vizuālā izskata vai formas. Ar to palīdzību ir iespējams atpazīt ātri objektus, kurus ir grūti vai neiespējami atpazīt ar tradicionālajiem redzamajiem markieriem. Piemēram, šos markierus ir iespējams ievietot rotāļlietās un tām piešķirt virtuālas īpašības paplašinātajā vai virtuālajā realitātē.

Infrasarkano markieru pielietojumi ir daudz plašāki par virtuālo realitāti. Tie var tikt iebūvēti ikdienā izmantojamos fiziskos objektos, piemēram, traukos, atvieglojot robotam to atpazīšanu, tādējādi tuvinot mūs soli tuvāk robotizētai virtuvei. Tos var izmantot arī dažādās industriālās ierīcēs, kuras var izmantot gan roboti, gan cilvēki, piemēram, svirās un vārstulos. Tie netraucē cilvēkam vizuāli uztvert fizisko objektu, bet palīdz datorsistēmai iegūt informāciju par šo objektu pozīciju un orientāciju telpā.

Vairākas nerēdzamu markieru sistēmas ir izveidotas medicīnas vai ražošanas aprīkojumam [14] [15]. Šajās sistēmās tiek izmantoti statistiski, bet nerēdzami markieri, kas veiksmīgi kontrolētā vidē nodrošina paplašinātās realitātes ilūziju.

## **2. RISINĀJUMI VIRTUĀLAI UN PAPLAŠINĀTAI REALITĀTEI**

Virtuālā un paplašinātā realitāte šajā darbā tika pētīta, izmantojot komerciālas, visiem pieejamas, pirmās paaudzes tehnoloģijas. Šīs iekārtas tiek sauktas par pirmās paaudzes tehnoloģijām, neskatoties uz to, ka pirms tam tās vairākus desmitus gadu tika izmantotas akadēmiskās laboratorijās, taču tām neizdevās piesaistīt vajadzīgo finansējumu un uzņēmumus, kuri spētu tehnoloģiju novest līdz tirgum. Pirmās paaudzes iekārtas nepiedāvā pilnu sensoro un saskarnes nodrošinājumu, lai būtu iespējams realizēt funkcionālu virtuālo vai paplašināto realitāti. Šobrīd pilnu risinājumu var nodrošināt, izveidojot komplektāciju no ievades ierīcēm, sensoriem, kamerām un pie galvas piestiprināmiem ekrāniem. Sakomplektējot kameras ar virtuālās realitātes ekrāniem ir iespējams iegūt arī paplašinātās realitātes risinājumu, jo pašlaik pieejami paplašinātās realitātes ekrāni nepiedāvā telpisku virtuālu objektu precīzu attēlojumu telpā.

Labākās, pašlaik komerciāli pieejamās pirmās paaudzes virtuālās realitātes ekrānu iekārtas:

- Oculus Rift**

Pie galvas piestiprināms ekrāns.

Ekrāna rezolūcija 1920x1080 pikseli (960x1080 px katrai acijai).

75 Hz frekvence attēla pārzīmēšanai.

100deg redzamības lauks (*FOV*).

6 brīvības pakāpes kustībai.

1000 Hz žiroskops, akselometrs, magnetometrs.

30 Hz infrasarkanā kamera pozīcijas noteikšanai.



*2. attēls. Pētījumā izmantotais Oculus Rift DK2 ekrāns ar piestiprinātu Leap Motion sensoru.*

- **Sony Morpheus**

Pie galvas piestiprināms ekrāns.

Tehniskie parametri tādi paši kā Oculus Rift, tikai ekrāna attēla pārzīmēšanas frekvence ir 120 Hz.

Šobrīd, 2015. gada jūnijā nav iespējams vēl šo ierīci iegādāties.



3. attēls. Sony Morpheus pie galvas piestiprināms ekrāns.

- **Razer Open-Source Virtual Reality (OSVR)**

Pie galvas piestiprināms ekrāns.

Ekrāna rezolūcija 1920x1080 pikseļi (960x540 px katrai acij).

60 Hz frekvence attēla pārzīmēšanai.

100deg redzamības lauks (FOV).

6 brīvības pakāpes kustībai.

Iekļauts žiroskops, akselometrs, magnetometrs.

30 Hz infrasarkanā kamera pozīcijas noteikšanai.

Šobrīd, 2015. gada jūnijā nav iespējams vēl šo ierīci iegādāties.



4. attēls. Razer OSVR pie galvas piestiprināms ekrāns.

- **Samsung Gear VR**

Pie galvas piestiprināms ekrāna turētājs.

Kā ekrāns tiek izmantots viedtālrunis Samsung Galaxy Note 4. Ekrāna rezolūcija  $2560 \times 1440$  pikseļi (1280x720 px katrai acij).

- 60 Hz frekvence attēla pārzīmēšanai.
- 96deg redzamības lauks (*FOV*).
- 3 brīvības pakāpes kustībai.
- 50 Hz žiroskops, akselometrs, magnetometrs.

Ar šo sistēmu nav iespējams precīzi noteikt kameras pārvietojumu telpā, jo netiek izmantots ārējs atskaites markieris, kā citās sistēmās. Priekšrocība šai iekārtai ir tajā, ka lietotājs nav piesaistīts pie datora ar vadību. Lai arī mazāku dimensiju ekrāns ar augstu rezolūciju caur optiskajām lēcām dod labāku rezultātu kā citas iekārtas, diemžēl viedtāruņa grafiskais procesors nevar dot pilnvērtīgu virtuālās realitātes attēlu kvalitāti.



5. attēls. Samsung Gear VR pie galvas piestiprināms ekrāna turētājs un lēcu sistēma.

#### • HTC SteamVR

- Pie galvas piestiprināms ekrāns.
- Ekrāna rezolūcija 2160x1200 pikseli (1080x600 px katrai acijai).
- 90 Hz frekvence attēla pārzīmēšanai.
- 100deg redzamības lauks (*FOV*).
- 6 brīvības pakāpes kustībai.
- Tiek izmantoti žiroskops, akselometrs, magnetometrs, un infrasarkanā kamera pozīcijas noteikšanai.
- Šobrīd, 2015. gada jūnijā nav iespējams vēl šo ierīci iegādāties.



6. attēls. HTC SteamVR pie galvas piestiprināms ekrāns.

Pašlaik pieejamās vai izstrādē esošās pirmās paaudzes paplašinātās realitātes ekrānu iekārtas:

- **Meta**

Dalēji caurspīdīga ekrāna rezolūcija 960x540 pikseli (480x540 px katrai acij) 23deg redzamības lauks (*FOV*).

Aktīvs dzīluma mērišanas sensors, izmantojot mazu infrasarkanās gaismas projektoru un 320x240 pikselu rezolūcijas infrasarkanās gaismas kameru. Iekārtai ir 3 brīvības pakāpes kustības noteikšanai, izmantojot žiroskopu, akselometru un magnetometru. Tā kā iekārta līdzīgi kā Samsung Gear VR nav pievienota personālajam datoram, tad jārēķinās, ka tai nebūs pietiekamu skaitļošanas resursu pārliecinošas paplašinātās realitātes iegūšanai. Arī šo iekārtu, šobrīd, 2015. gada jūnijā vēl nav iespējams iegādāties. Šo ierīci ierobežoti varētu būt iespējams izmantot šajā pētījumā piedāvātajā markēru sistēmā.



7. attēls. Meta brilles.

- **Google Glass**

Google Glass bija ierīce, kas tika izdota 2013. gadā un to bija iespējams iegādāties līdz 2015. gada janvārim. Līdzīgi kā Meta brilles arī šīs cieš no tām pašām un vēl vairākām tehniskajām problēmām. Iekārtai ir ļoti neliels, kvadrātveida ekrāns tikai vienai acij ar 640x360 pikselu rezolūciju. Tāpat iekārtai nav nekādu sensoru dzīluma noteikšanai telpā, un papildinātai realitātei nepieciešamās projekcijas nav piemērotas šādam ekrānam. Google Glass piedāvā paplašināto realitāti, dodot papildus grafisko informāciju par tuvumā esošiem objektiem, neizmantojot precīzas objektu atrašanās vietas telpā. Vēl šīm brillēm ir pievienot liela baterija, kura uzkarst un daudziem lietotājiem sagādā galvassāpes.



8. attēls. Google Glass brilles.

- **Microsoft Hololens**

Microsoft Hololens brilles vēl publiski nav iespējams iegādāties, bet ir jau pieejama ierobežota tehniskā specifikācija, un ir iespējams novērtēt šīs ierīces piemērotību paplašinātās realitātes markieru sistēmām. Brilles augšējā daļā ir ievietota Microsoft Kinect sensora tehnoloģija, bet pašas brillēs ir neliels taisnstūra veida puscaurspīdīgs ekrāns. Nemot vērā, ka iekārta, tāpat kā iepriekšējās izmanto ļoti nelielu iebūvētu datoru, var prognozēt, ka iekārtas rezultāts nedos pilnīgi saplūstošu papildinātās realitātes ilūziju, bet šī sistēma varētu tikt pielāgota arī šajā pētījumā izmantotajai markieru sistēmai. Šo iekārtu, šobrīd, 2015. gada jūnijā vēl nav iespējams iegādāties [1].



9. attēls. Microsoft Hololens brilles.

Labākie pašlaik pieejamie sensori un kameras virtuālās un paplašinātās realitātes sistēmām:

- **Leap Motion**

Sistēma, kas darbojas, izmantojot 2 infrasarkanā staru gaismas kameras, iegūstot stereo attēlus. Katra infrasarkanās gaismas kamera ir ar 640x240 pikselu rezolūciju. Uz platformas ir arī izvietotas 3 infrasarkanās gaismas diodes telpas apgaismošanai. Iekārta paredzēta novietošanai uz galda un roku un pirkstu pozīciju un orientāciju noteikšanai, izmantojot tikai 2 attēlus. Atšķirībā no Microsoft Kinect šī iekārta neprojicē nekādu rakstu uz telpā esošiem objektiem. Šī pētījuma ietvaros iekārta

tieki pievienota pie Oculus Rift displeja acu augstumā. Kamera ir unikāla un īpaši piemērota šim pētījumam, jo tās attēlu kadru frekvence ir 111 Hz. Darbības laiks šai iekārtai roku noteikšanai ir  $45\text{cm}^3$ . Detalizētaks ierīces apraksts dots 2.2.nodaļā.



10. attēls. Leap Motion stereo kamera.

#### • Microsoft Kinect V2

Microsoft piedāvātā Kinect V2 sistēma nosaka punktu dzīlumu telpā, izmantojot infrasarkanās gaismas speciāla raksta lāzera projekciju un infrasarkanās gaismas kameru. Sensoru sistēma Microsoft Kinect V2 ir pieejama un nav piemērota šajā pētījumā piedāvātajai markieru sistēmai, jo tā izmanto tikai vienu kameru un speciālu lēcu sistēmu, un no iegūtā attēla dzīluma attālumu nevar noteikt, izmantojot markiera diodes. Tā vietā dzīlums var tikt noteikts, izmantojot tikai Kinect projekcijas rakstu. Tāpat kameras attēla frekvence ir pārāk maza, lai varētu veikt datu pārraidi pieņemamā ātrumā.

Microsoft Kinect V2 parametri:

- 1920 x 1080 pikseļu redzamās gaismas kamera
- 512 x 424 pikseļu infrasarkanās gaismas kamera
- 30 Hz kameru attēlu frekvence
- 0.5-4.5 m darbības rādiuss



11. attēls. Microsoft Kinect V2 sensoru sistēma.

- **Creative Senz3d**

Creative Senz3d sensoru sistēma piedāvā tieši tās pašas funkcijas, kuras piedāvā Microsoft Kinect V2, taču iekārta ir kompaktāka un lētāka.

Creative Senz3d parametri:

- 1280 x 720 pikseļu redzamās gaismas kamera
- 320 x 240 pikseļu infrasarkanās gaismas kamera
- 30 Hz kameru attēlu frekvence
- 0.1-1.5 m darbības rādiuss



12. attēls. Creative Senz3d sensoru sistēma.

- **OVR vision**

OVR vision iekārta nodrošina paplašinātai realitātei nepieciešamos redzamos gaismas attēlus katrai acij, kuri tiek projicēti uz virtuālās realitātes ekrāna. Ar šo sistēmu nevar implementēt cilvēkam neredzamās gaismas markieru sistēmu, bet tā būtu labs papildinājums Leap Motion sensoru sistēmai, apslēpjot neredzamās gaismas datu pārraidi no redzamā attēla.

OVR vision parametri:

- 1280 x 480 pikselu redzamās gaismas kamera (640 x 480 pikseli katrai acij)
- 60 Hz kameru attēlu frekvence [1]



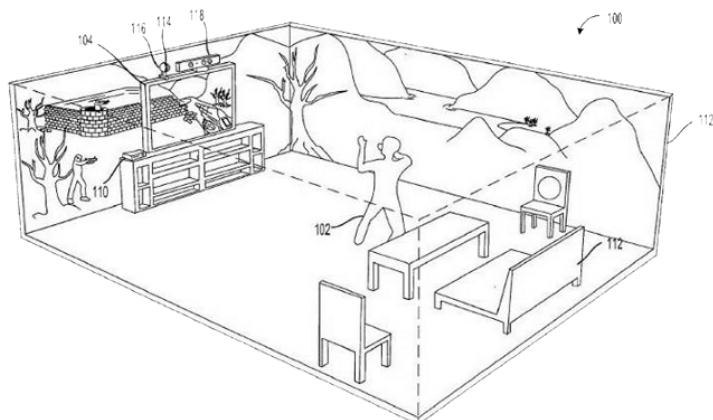
13. attēls. OVR vision stereo kameras sistēma, kura piestiprināta Oculus Rift DK2 iekārtas.

Vēl bez šiem sensoriem ir pieejama virkne tradicionālu ievades iekārtu, kas piemērotas virtuālas vai paplašinātās realitātes vajadzībām, kā piemēram, spēļu pultis, taču tās nav nepieciešamas sistēmas izstrādē, kas balstās uz infrasarkanās gaismas markieriem.

## 2.1 VIRTUĀLĀS UN PAPLAŠINĀTĀS REALITĀTES ATTĒLOŠANAS RISINĀJUMI

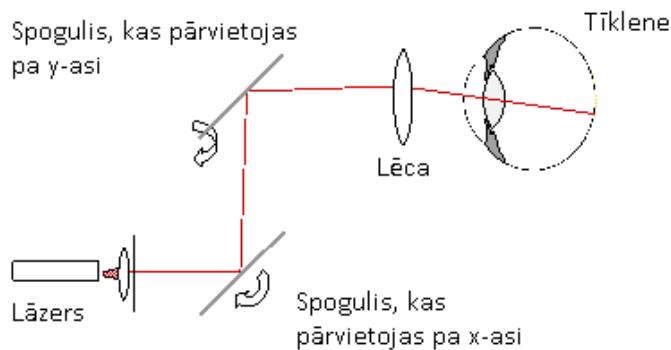
Virtuālai realitātei atšķirībā no 3D ekrāniem, anaglifiem, u.t.l. tehnoloģijām jānodrošina sajūtu, izmantojot redzi, ka lietotājs fiziski atrodas virtuālā telpā. Virtuālās realitātes ilūziju ir iespējams panākt vismaz 3 veidos:

- Alas sistēma (*cave*), kad lietotājs atrodas speciāli izveidotā telpā, kur uz visām sienu virsmām tiek projicēta virtuālā telpa. Šādas sistēmas ir ārkārtīgi neparocīgas, taču daži risinājumi var tikt implementēti arī ikdienā izmantojamās telpās, kā piemēram, Microsoft patentētā dzīvojamās istabas projekcija.



14. attēls. Microsoft izveidotā alas veida virtuālās realitātes projekcija (ASV patents nr.20120223885).

- Pie galvas piestiprināts ekrāns (*HMD*) ar lēcām. Katrai acij tiek projicēts sava attēls, kurš mainās atbilstoši galvas orientācijai un pārvietojumam, izmantojot papildus sensorus. Šī veida ekrāni tika izmantoti šajā pētījumā.
- Pie galvas piestiprināti projektori, kuri projicē attēlu tieši acs tīklenē. Priekšrocība šādam risinājumam ir tā, ka šī iekārta neaizsedz visu lietotāja redzamības lauku. Šobrīd pie šādas tehnoloģijas strādā Google uzņēmums Magic Leap [16] [17].



15. attēls. Tīklenes projekcijas sistēma VRD (Virtual Retina Display).

Pētījuma ietvaros tika noteiktāta Oculus Rift pirmā versija DK1 (2013.g.), kurai bija virkne nepilnību, kuru dēļ to nebija iespējams pilnvērtīgi lietot iecerētās sistēmas realizācijai. Galvenā problēma DK1 ir odometrijas klūdu akumulācija, kas rodas, aprēķinot pārvietojumu galvai, izmantojot tikai akselometru.

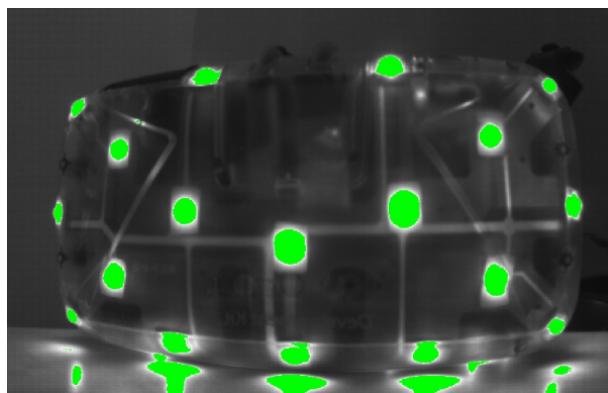
Lai to atrisinātu, Oculus Rift otrā versija DK2 (2014.g.) izmanto ārēju, stacionāru, infrasarkano kameru un infrasarkanos markierus, kuri izvietoti zem ekrāna korpusa, kas pieštiprināts pie galvas. Ar šādas sistēmas palīdzību ir iespējams iegūt precīzu relatīvu atrašanās vietu un orientāciju, kas ir svarīga, lai varētu strādāt ar fiziskiem markieriem telpā. Tieši Oculus Rift DK2 tika izmantota kā platforma piedāvātās sistēmas izveidē.

Pētījuma ietvaros netika izmantotas paplašinātās realitātes ekrānu iekārtas, jo to funkcionalitāte pagaidām neļauj realizēt fizisku markieru sasaisti ar virtuālo telpu precīzās pozīcijās un orientācijas.

Pat potenciāli labākais tirgū pieejamais risinājums, META brilles, piedāvā niecīgu attēla rezolūciju 480x540 px (vienai acij), salīdzinājumā ar Oculus Rift DK2 960x1080 px.

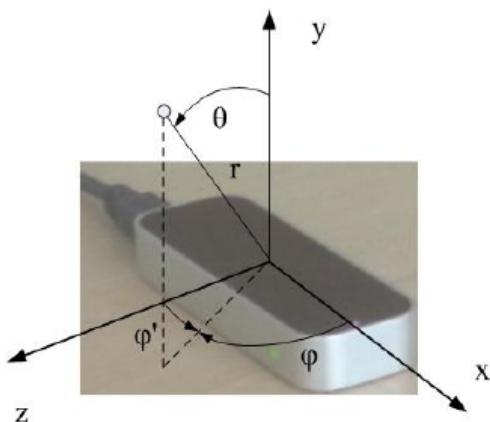
## 2.2 SENSORI VIRTUĀLAI REALITĀTEI

Virtuālās realitātes ilūzijas iegūšanai ārkārtīgi svarīgi ir iegūt precīzu galvas pozīciju un orientāciju, kuru nodrošina sensori, kas parasti ir izvietoti pie galvas piestiprinātajā ekrānā. Oculus Rift gadījumā orientācija tiek noteikta, izmantojot žiroskopu un magnetometru, savukārt pārvietojumu nosaka akselometrs un stacionāri novietota infrasarkanās gaismas kamera.



16. attēls. Infrasarkanās gaismas diodes zem Oculus Rift korpusa, kuras paredzētas iekārtas pozīcijas noteikšanai. Lai sinhronizētu diožu darbību ar kameras kadru laiku, tiek izmantots papildus vads starp šīm divām ierīcēm.

Lai nodrošinātu cilvēka roku un pirkstu pozīciju noteikšanu telpā, kuru var izmantot, lai to pēc tam rekonstruētu un attēlotu virtuālajā telpā, var izmantot virkni dažādu sensoru, kā iepriekš pieminētos PrimeSense, Kinect V2 vai Leap Motion. Leap Motion sensoram nav publiski pieejamas informācija par tajā izmantoto tehnoloģiju no tā ražotāja, taču to ir detalizēti izpētījuši slovēņu zinātnieki [2]. Tā darbības attālums ir no 2.5 cm līdz 60 cm, lai veiktu roku un pirkstu pozīciju atpazīšanu. Tas darbojas, izmantojot divas infrasarkano staru kameras ar 850nm filtru. Pētījumā tika noskaidrots, ka Leap Motion sensora precīzitāte ir ar nobīdi zem 0.5 mm. Mērījumu veikšana bija apgrūtināta arī dēļ nestabilas kameru attēlu filmēšanas frekvences, kas ietekmē arī šajā darbā piedāvātās infrasarkano markieru sistēmas darbību. Pētot publiski pieejamo informāciju no Leap Motion patentu dokumentiem (US2013/0182079, US2013/0182897, US2013/0182902), var secināt, ka iegūtie attēli neveido punktu mākonī, bet gan meklē pozīcijas tikai objektiem, kuri atgādina rokas vai pirkstus. Neskatoties uz to, ka no šī sensora nav iespējams iegūt punktu mākonī telpā, tas dod iespēju iegūt augstas frekvences (111Hz) infrasarkano attēlu, kuru var izmantot pēcapstrādē, lai iegūtu informāciju par infrasarkanajiem markieriem telpā.



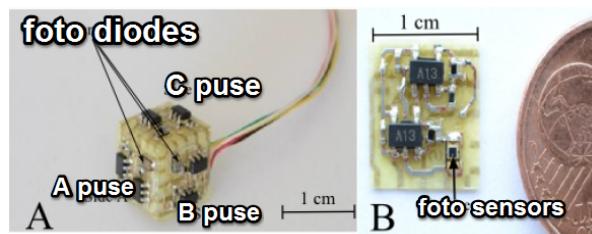
17. attēls. Leap Motion sensors ar tajā izmantoto koordinātu sistēmu.

Lai nodrošinātu pilnvērtīgu saskarni ar virtuālo realitāti, pie Oculus Rift var piestiprināt papildus sensorus vai kameras, lai uztvertu roku pozīcijas un apkārtējo vidi. Šajā darbā tika izmantots Leap Motion sensors, kas izmanto 2 infrasarkanās gaismas kameras, kuras darbojas ar 111Hz frekvenci. No iegūtajiem attēliem Leap Motion izrēķina roku pozīcijas pēc patentētiem algoritmiem. Pētījumā šie attēli tika izmantoti, lai nolasītu infrasarkano staru markieru pārraidītos datus, pēc kuriem, izmantojot ģeometrisku aprēķinu no stereo kamerām, tika aprēķinātas markieru pozīcijas telpā pret kameru. Tādu pašu implementāciju infrasarkaniem markieriem var realizēt arī bez stereo kameras, piemēram, izmantojot Kinect V2 sensoru, kam ir tikai viena infrasarkanā kamera (30 Hz). Šajā gadījumā markieru pozīciju var aprēķināt ar tuvinājumu vienādojumu sistēmas risināšanā (PnP problēma). Risinājumus var iegūt ar Levenberg-Marquardt optimizācijas algoritmu, X.S. Gao, X.-R. Hou, J. Tang, H.-F. Chang "perspektīvas trīs punktu" algoritmu vai F.Moreno-Noguer, V.Lepetit and P.Fua metodi kameras pozīcijas noteikšanai.

## 2.3 SENSORI PAPLAŠINĀTAI REALITĀTEI

Sensori, kas izmantojami virtuālai realitātei, ir piemēroti arī paplašinātās realitātes nodrošināšanai. Taču praktiskai pielietojamībai nosacījums šiem sensoriem ir tāds, ka tie var tikt ērti piestiprināmi pie paša lietotāja, lai to izmantojamība netiktu ierobežota stacionārā sistēmas konfigurācijā, kas nav problēma virtuālās realitātes gadījumā.

Sensori paplašinātās realitātes nodrošināšanai neaprobežojas tikai ar kamerām, bet var tikt izmantotas arī analogas gaismas diodes. Šādas diodes izmanto televīzijas tālvadības pultīs. Ja tās novietot iepriekš zināmā ģeometriskā konfigurācijā, tad no iegūtajiem datiem ir iespējams rekonstruēt pārraidošās gaismas diodes atrašanās vietu. Ar šādu sistēmu, izmantojot diodes, kuras izvietotas uz ģeometriskas kuba struktūras (18 attēls), veiksmīgi var tikt atrastas objektu pozīcijas reālā laikā, kā to ir demonstrējuši franču zinātnieki [18].



18. attēls. Infrasarkano diožu konfigurācija kuba formā, lai noteiktu pārraidītāja diodes pozīciju telpā.

## 2.4 REDZAMIE MARKIERI PAPLAŠINĀTAJAI REALITĀTEI

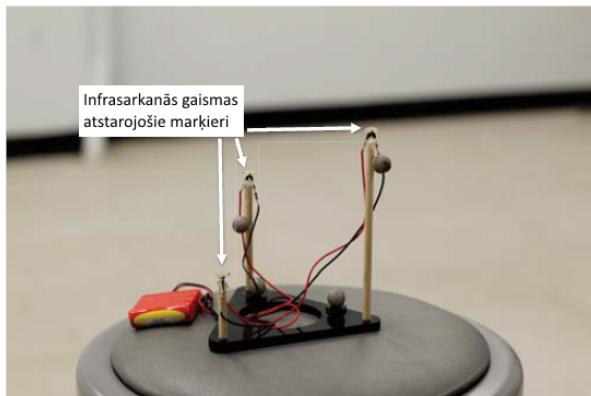
Pēdējos gados redzamo markieru tehnoloģija ir strauji attīstījusies no melnbaltiem kvadrātveida simboliem līdz jebkuras noteiktas formas plakanam attēlam vai virsmai.



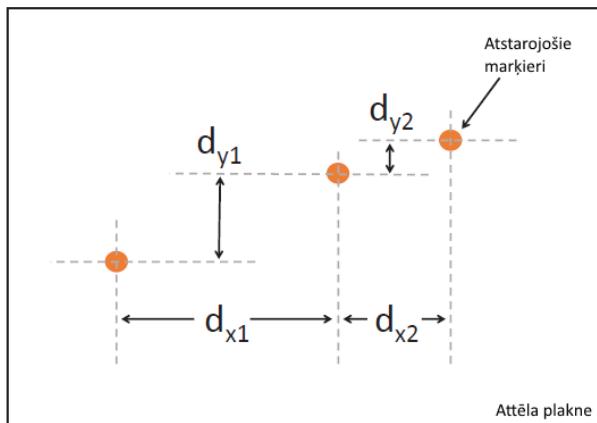
19. attēls. Taisnstūra attēls, kas tiek izmantots kā markieris paplašinātajai realitātei.

Neskatoties uz to, šo markieru funkcionalitāte nereti apgrūtina lietotāju, jo cilvēkam pielietojamu objektu virsmas ne vienmēr ir piemērotas markieru izvietošanai, kā arī tas nav praktiski telpiskam objektam visas šķautnes apdrukāt ar redzamiem markieriem.

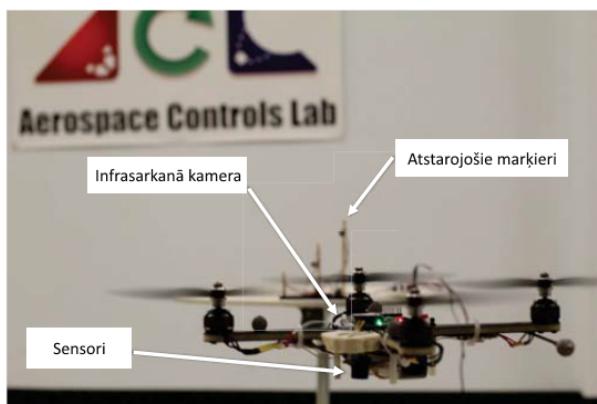
Vēl bieži tiek izmantotas redzamas retroflektīvu jeb atstarojošu markieru konfigurācijas. Nereti tā sastāv no nelielu, atstarojošu bumbiņu ģeometriskas konfigurācijas, kuru pozīcijas filmē ar vienu vai vairākām kamerām. Šie atstarojošie elementi var atstarot gaismu infrasarkanajā spektrā un pie kamerām var izvietot infrasarkano apgaismojumu. Izmantojot infrasarkano gaismas spektru un kameras filtrus, var mazināt kļūdu varbūtību, identificējot markierus kameras attēlos. Šādas sistēmas ir pat uzstādītas uz kvadrokoptieriem, lai nodrošinātu savstarpēju pozīciju koordināciju [19]. Dotajā piemērā tika izmantota 100Hz infrasarkanā kamera un 3 markieru konfiguracija. Problēma ar šādām vienkāršām markieru sistēmām ir tā, ka visi markieri izskatās vienādi no kameras iegūtajā attēlā, un, lai tos identificētu, tiek izmantotas ļoti ierobežotas ģeometriskas metodes. Piemēram, markieru secīgs attālums no kameras attēla augšējās daļas. Taču šāda metode nepareizi identificēs markierus, ja kamera tiks pagriezta lielā leņķī vai tā būs novietota uz sāniem. Tāpat šāda sistēma nav piemērota, lai to piestiprinātu ikdienā izmantojamiem priekšmetiem, kā arī tās darbība ir apgrūtināta, ja telpā atrodas vairākas šādas markieru konfigurācijas vienlaicīgi.



20. attēls. Infrasarkano markieru sistēma, izmantojot atstarojošos elementus.



21. attēls. Statisku markieru pozīcijas attēla plaknē. Markieri tiek identificēti pēc to attāluma no attēla plaknes augšējās daļas.



22. attēls. Statisko infrasarkano markieru sistēma, kas izvietota uz lidojošas kvadrokoptera platformas.

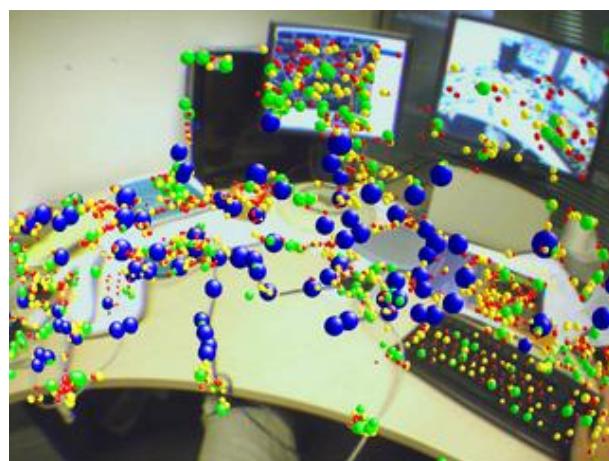
Šajā darbā piedāvātā infrasarkanās gaismas komunikācija nav saistīta ar Li-Fi, kas ir augstas frekvences datu pārraide, izmantojot redzamo vai neredzamo gaismu. Piedāvātajā sistēmā kā datu saņēmējs tiek izmantota infrasarkanā kamera, ar kuras palīdzību tiek

aprēķināta gaismas avota relatīvā pozīcija telpā attiecībā pret kameru. Savukārt Li-Fi un citos datu pārraides risinājumos, izmantojot gaismu, pārsvarā kā datu uztvērējs tiek lietota fotodiode [20] [21] [22]. Izmantojot LeapMotion kameru, markieru datu lasīšanas funkcija papildina šīs kameras pamatfunkciju, kas ir roku un pirkstu pozīciju noteikšana un attēla iegūšana paplašinātās realitātes iegūšanai no stereo kamerām, kuras piestiprinātas pie Oculus Rift. Datu pārraide, izmantojot redzamās gaismas markierus un kameru, ir implementēta Casio PicapiCamera, MIT NewsFlash un PureVLC produktos. Šīs sistēmas piedāvā ļoti lēnu datu pārraidi, kuru ierobežo telefona kameras kadru frekvence, apgaismojums un skaitlošanas resursi. Piemēram ar Casio PicapiCamera 8 bitu datu virknes ir jāpārraida vairākas sekundes.



23. attēls. Redzamās gaismas datu pārraide, izmantojot Casio PicapiCamera programmatūru.

Alternatīvs risinājums visām redzamām markieru sistēmām ir par markieriem izmantot jau telpā vai objektā esošās iezīmes [23] [24]. Iegūtie rezultāti, izmantojot pašlokalizācijas algoritmus, kā EKF-SLAM u.c [25] [26]. nodrošina augstu precizitāti, bet ir problemātiski interpretēt atrastos objektus, lai pie tiem pievienotu informāciju paplašinātajā realitātē. Šāda sistēma ir arī jūtīga pret objektu izkārtojuma izmaiņām telpā.



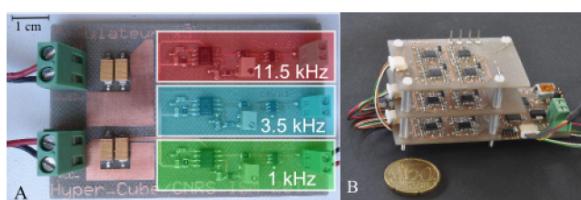
24. attēls. Marķieru sistēma, izmantojot apkārtējo objektu iezīmes un EKF-SLAM algoritmu.

## 2.5 NEREDZAMIE MARKIERI PAPLAŠINĀTAJAI REALITĀTEI

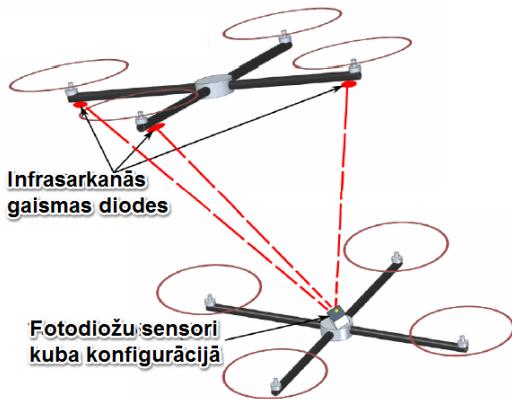
Neredzamo markieru sistēmas pārsvarā līdz šim ir tikušas izmantotas kinematogrāfijā, ierakstot aktieru kustības, sejas izteiksmes u.t.t. Nereti tiek izmantoti retroreflektīvie infrasarkanie markieri, kuri izveidoti no spoguļveidīga materiāla, kurš atstaro gaismu infrasarkanajā gaismas spektrā. Šī markieru sistēma darbojas, izmantojot infrasarkano kameru ar attēlu iegūšanas frekvenci līdz pat 1000 Hz. Salīdzinājumā infrasarkanā kamera, kas tika izmantota šajā pētījumā, spēj iegūt attēlus ar 111 Hz frekvenci, bet, piemēram, Microsoft Kinect kamera spēj iegūt infrasarkanos attēlus tikai ar 30 Hz frekvenci. Jo lielāka attēlu iegūšanas frekvence, jo precīzāk ir iespējams izsekot markiera pārvietojumu attiecībā pret kameru, novēršot vajadzību identificēt katru markieri pēc katra tā pārvietojuma. Kinematogrāfijā aktīvās infrasarkano markieru sistēmas identificē markierus, tikai uzsākot scēnas filmēšanu, bet pēc tam izseko tikai to pārvietojumam. Parasti kinematogrāfijā tiek lietotas pasīvas infrasarkano markieru sistēmas, kur mākslinieks pēc filmēšanas manuāli atzīmē katru markiera atsauces 3D modelēšanas programmatūrā.

Viena no aktīvo infrasarkano markieru priekšrocībām atšķirībā no visām citām datorredzē izmantotajām markieru sistēmām ir tā, ka tos ir iespējams paslēpt zem infrasarkano gaismu neabsorbējošiem materiāliem, piemēram, dažādu veidu plastmasas. Paslēpjot diodes zem objekta korpusa vai tā virsmas, tās būs redzamas infrasarkanās gaismas kamerai, bet ne cilvēka acij vai redzamās gaismas kamerai. Šādā veidā, novietojot diodes zem sarežģīta telpiska objekta virsmas, ir iespējams noteikt šī objekta pozīciju un orientāciju telpā, nemainot tā izskatu redzamajā gaismas spektrā.

Infrasarkano diožu pozīciju noteikšana telpā ir arī veiksmīgi tikusi realizēta, izmantojot diodes ar dažādām mirgošanas frekvencēm (11.5 kHz, 3.5 kHz, 1kHz) un ar analogām uztveršanas diožu shēmām (25., 26 attēli). Ar šādu sistēmu franču zinātniekiem ir izdevies veiksmīgi vadīt kvadrokopteru reāla laikā [18]. Šādas sistēmas priekšrocība ir implementācijas vienkāršībā, taču šāda sistēma nav pielietojama, ja telpā var atrasties dažādi objekti ar dažādiem infrasarkanās gaismas datu pārraides protokoliem, kuri arī izmanto infrasarkanos markierus pozīciju noteikšanai.

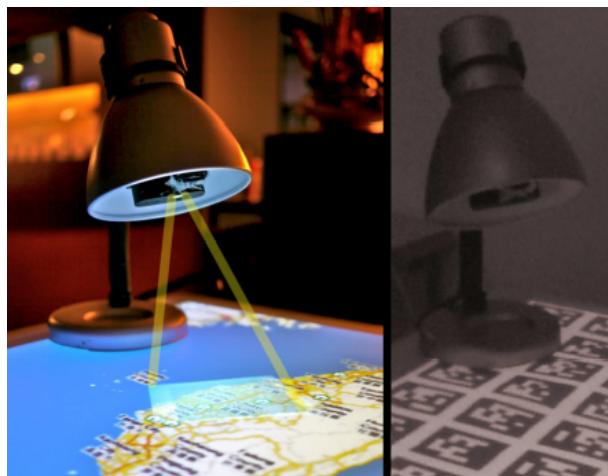


25. attēls. Infrasarkano diožu konfigurācija kvadrokoptera pozīcijas noteikšanai.



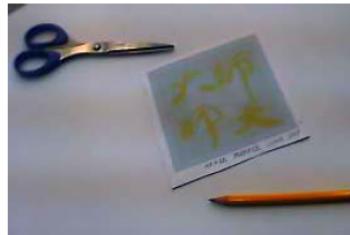
26. attēls. Kvadrokoptera sistēma balstoties uz 3 aktīviem infrasarkanajiem markieriem.

Cilvēkam neredzamus markierus objektu pozīcijai un orientācijai telpā var nodrošināt, izmantojot infrasarkanās gaismas projektoru. Šis projektors var attēlot tradicionālos kvadrātveida markierus, kuri ir redzami tikai infrasarkanās gaismas kamerām (27 attēls). Japāņu zinātnieku piedāvātajā risinājumā šis projektors var attēlot arī redzamās gaismas projekcijas, tā paplašinot attēla funkcionalitāti[27].

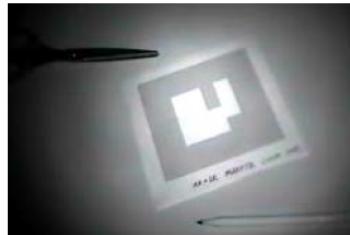


27. attēls. Infrasarkanās un redzamās gaismas projektors neredzamu markieru projekcijām.

Neredzamus infrasarkanos kvadrātveida markierus ir iespējams apslēpt arī vienkāršos, izdrukātos attēlos, izmantojot pelēkos pustoņus, kurus starp attēla pikseliem iejauc ar 3% koncentrāciju no visa attēla [28]. Diemžēl šādi markieri ir apslēpjami tikai gaišos attēlos, kā parādīts 28 attēlā.



Cilvēkam redzamais attēls



Infrasarkanās gaismas spektra attēls

28. attēls. Pustoņos paslēpts infrasarkanās gaismas markieris.



29. attēls. Infrasarkanās gaismas kvadrātveida markieri virtuāla objekta pozicionēšanai telpā.

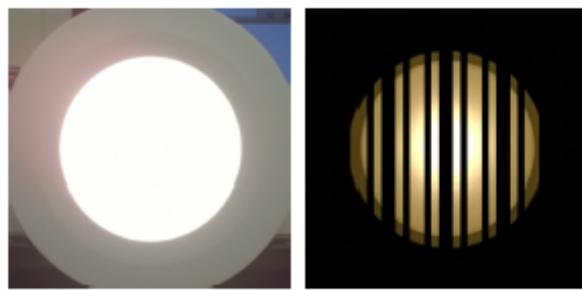
Vēl neredzamus kvadrātveida markierus var realizēt, izmantojot retroflektīvus markierus jeb spoguļveida markierus, kuri aktīvi neizstaro gaismu, bet atstaro uz tiem spīdošo gaismu, kas var būt arī infrasarkanajā gaismas spektrā, padarot to atrašanu neredzamu cilvēka acij [29]. Šāda markieru sistēma ir vienkārša un efektīva, taču nav adaptīva situācijām, kad telpā var būt dažādi objekti ar vienādu kvadrātveida markieri. Tāpat šie markieri nevar pārraidīt kamerali nekādu papildus dinamiski mainīgu informāciju.



30. attēls.

Alternatīva metode neredzamu vai gaismeklōs apslēptu markieru sistēmas izveidei var tikt izveidota, izmantojot kameras ekspozīcijas laiku un augstas frekvences (1-100 kHz)

mirgojošas diodes. Amerikā veiktā pētījumā šādi markieri tika apslēpti telpu gaismekļos, kuros cilvēka acs nepamana mirgošanas izmaiņas [30]. Interesanti, ka arī telefona kamera ar zemu kadru frekvenci (50 Hz) nespēj nolasīt visas mirgošanas izmaiņas, taču ir iespējams iegūt nepilnīgus attēlus atkarībā no kameras kadra ekspozīcijas laika, no kuriem var nolasīt datus. Tādējādi ar vienu kadru var nolasīt pat 8 un vairāk bitus. Diemžēl šādai sistēmai ir nepieciešams liels gaismu izstarojošais objekts vai augstas izšķirtspējas kamera. Šādu datu atkodēšana prasa arī lielākus skaitlošanas resursus. Pētījumā šī metode tika izmantota kameras pašlokalizācijas problēmas risināšanā, kur katrs gaismeklis pārraidīja savu identifikatoru.



31. attēls. Datu kodēšana markieros, izmantojot kameras kadra ekspozīcijas laiku. Pa kreisi acij redzamais attēls. Pa labi kameras kadra attēls, pārraidot datus ar 1 kHz frekvenci, bet filmējot objektu ar 50 Hz frekvenci.

### **3. ALGORITMS NEREDZAMU MARKIERU SISTĒMAI**

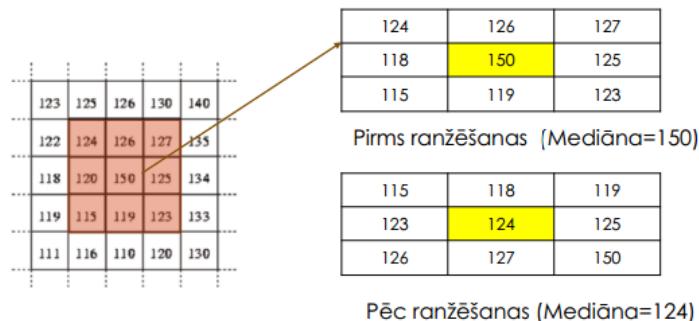
Šajā pētījumā piedāvātais risinājums fizisku objektu pozīciju noteikšanai telpā sastāv no infrasarkanās stereo kameras un aktīviem infrasarkaniem markieriem. Šie markieri ir implementēti kā LED infrasarkanās gaismas diodes, kuras izstaro gaismu 850nm gaismas vilņa garumā, kuru savukārt ir spējīga uztvert Leap Motion kamera, kura izmanto 850nm infrasarkanās gaismas filtru. Lai aprakstītu objekta atrašanās vietu, telpā ir nepieciešams iegūt attēlu abās stereo kamerās pusēs no vismaz vienas diodes. Savukārt, lai iegūtu objekta orientāciju telpā, ir nepieciešams iegūt vismaz 3 diožu vienlaicīgu attēlojumu abās kamerās. Neredzamās gaismas diožu intensitāti kontrolē Arduino mikro-kontrolieris, kas pārraida, ieslēdzot un izslēdzot gaismas diodes to identifikācijas numurus ar 37 Hz frekvenci.

Datu nolasīšanas algoritma izpildāmie soli:

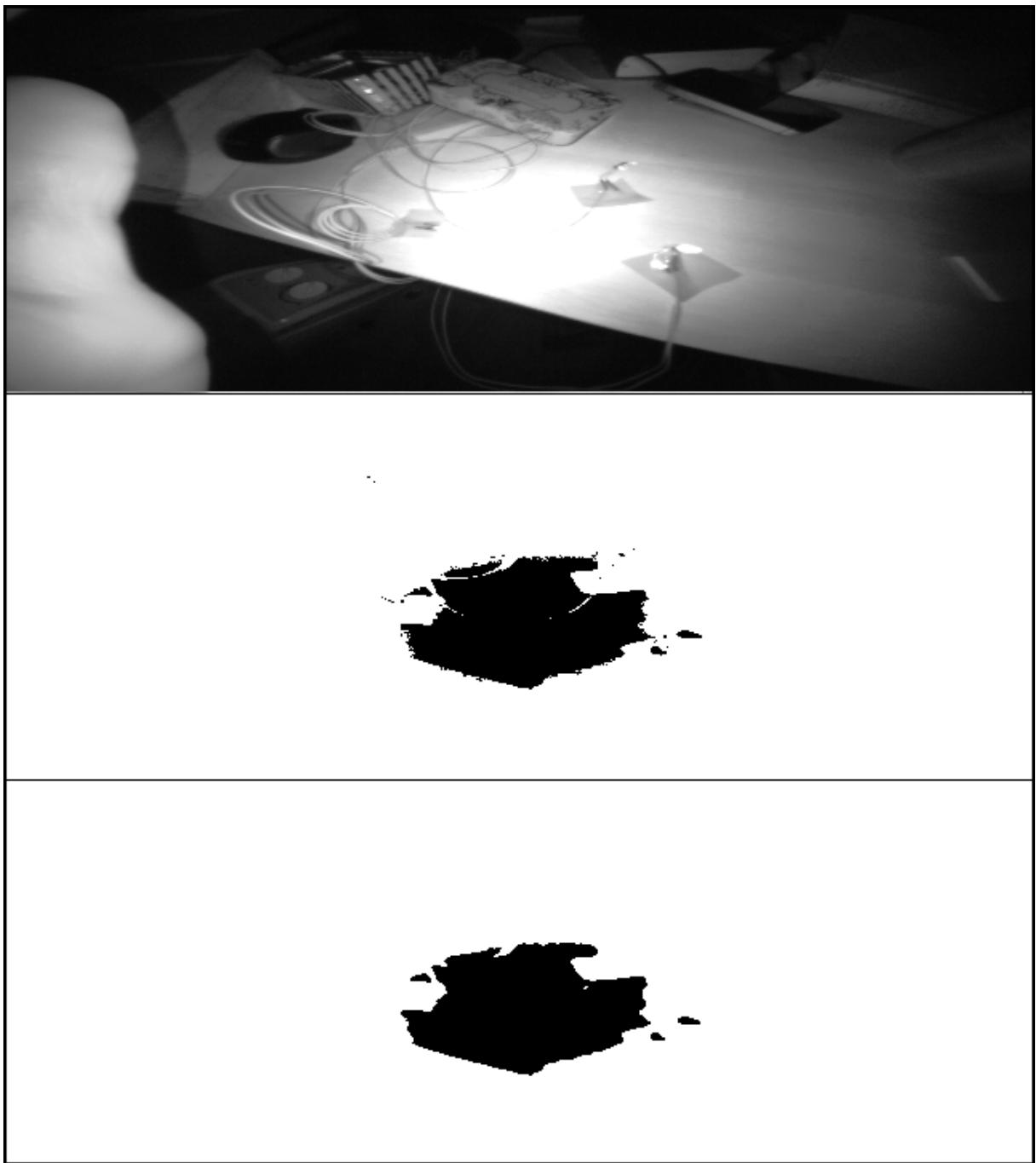
1. Katrai acij uzkrāt attēlu buferi no Leap Motion (izpildīt pavedienos jeb paralēlos procesos)
2. Samazināt attēla rezolūciju, lai nodrošinātu ātrdarbību (izpildīt pavedienos jeb paralēlos procesos)
3. Adaptīvi atrast mirgojošos punktus (izpildīt pavedienos jeb paralēlos procesos):
  - (a) Iteratīvi apskatīt intensitātes spektru katram attēlam, pa slāņiem, no 5 - 255 intensitātei ar 10 gradāciju soli, lai novērstu apgaismojuma ietekmi uz signāla pārraidi.
  - (b) Veikt attēla izpludināšanu, izmantojot Gausa sapludināšanas filtru.
  - (c) Veikt attēla filtrāciju ar Mediānas filtru.
  - (d) Atrast kontūras un apgabalus, kuri varētu būt gaismas diodes.
  - (e) Filtrēt kontūras pēc laukuma.
  - (f) Atrast kontūru centrus.
  - (g) Saglabāt kontūru statusu. Ja eksistē, tad bita vērtība ir 1, ja neeksistē, tad 0.
  - (h) Atkodēt datus, izmantojot Mančestras kodēšanu, kas nodrošina precīzam laikam nepiesaistītu datu pārraidi.
  - (i) Veikt datu atklūdošanu dažādus algoritmus, kuri aprakstīti 3.2.nodaļā.
4. Salīdzināt iegūtos digitālos identifikatorus un klasificēt kontūras.
5. Filtrēt klasificētās kontūras, izmantojot Kalmana vai dalīju filtrus.

6. Iegūt kontūru pozīcijas no kameras attēla plaknes 3 dimensiju telpas koordinātēs. Izmantotie algoritmi aprakstīti 3.3.nodaļā.
7. Pēc kameras pārvietojuma datu iegūšanas (odometrijas), projicēt 3D koordinātes uz 2D kameras attēla, lai uzlabotu precizitāti. Kameras odometrijas datus iegūst no Oculus Rift sensoriem un statiskās infrasarkanās gaismas kameras, kura nodrošina precīzu pārvietojuma noteikšanu tieši ekrānam, kas ir piestiprināts pie galvas un pie kura, savukārt, ir piestiprinātas Leap Motion kameras.

Attēla apstrāde tiek sākta ar mediānas filtra pielietošanu. Mediānas filtra algoritms parādīts 32. attēlā. Algoritms apskata definētu skaitu kaimiņu pikselus visos virzienos katram pikselim  $g(x, y)$  un sakārtot tos secīgi, lai tas saturētu centrālo vērtību. Mediānas algoritma apgabals tika izvēlēts 2 blakus esošo pikselu robežās.



32. attēls. Mediānas algoritma darbību piemērs.



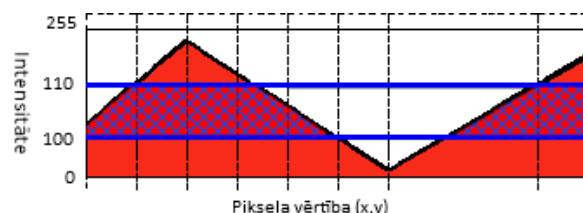
33. attēls. Augstākais no attēliem ir oriģinālais attēls, kas tiek iegūts no Leap Motion kreisās kameras. Otrs attēls ir binārais attēls ar intensitātes filtru bez mediānas filtra. Trešais attēls ir binārais attēls ar intensitātes filtru, izmantojot mediānas filtru pirms intensitātes robežas filtra.

Pēc tam attēla izmēri tika samazināti uz pusī. Samazināšanas koeficients tika izvēlēts eksperimentāli, tā, lai markieru izmēri 2 m attālumā aizņemtu vismaz vienu pikseli pēc attēla samazināšanas. Šis solis ir ārkārtīgi svarīgs, jo neskatoties uz to, ka katra attēla apstrāde notiek paralēlos procesos, tomēr pilna izmēra 640x240 pikseļu attēla apstrāde ar 111Hz frekvenci abām kamerām reālā laikā prasa pārāk daudz skaitļošanas resursu. Savukārt, izmantojot 320x120 pikseļu izmēra attēlu ir iespējams nodrošināt attēlu apstrādi un datu signālu apstrādi reālā laikā, izmantojot pētījumā pielietoto datortehniku.



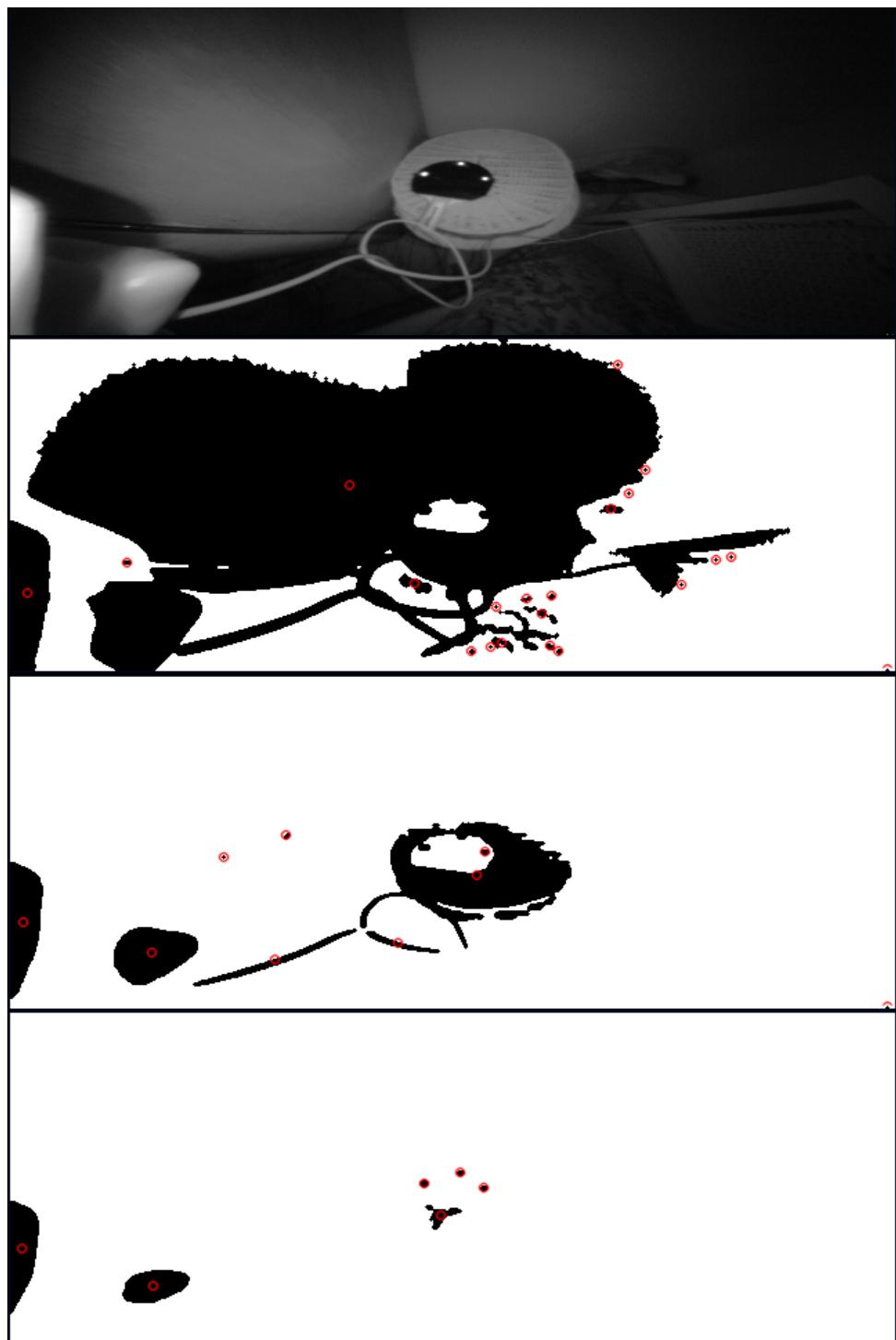
34. attēls. Kreisā pusē oriģinālā izmēra attēls, bet labajā pusē samazināta izmēra attēls, kurā arī iespējams saskatīt markiera pikselus.

Lai segmentētu attēlā redzamos infrasarkanos markierus, svarīga algoritma sastāvdaļa ir izslēgt vides apgaismojuma ietekmi uz datu pārraides kvalitāti. Apgaismojuma ietekmi var mazināt, saglabājot katrā iterācijā visus markieru kandidātus pa 10 gradāciju vērtību intensitātes slāņiem no 5-255 (krāsu intensitāte pieejama baita robežās). Intensitātes filtrs pikseliem, kuru vērtības ir lielākas par apakšējo gradācijas slieksni, bet mazākas par augšējo gradāciju slieksni, piešķir vērtību "1", bet pikseliem, kas ir zem šī sliekšņa, piešķir vērtību 0.



35. attēls. Binārais attēla filtrs ar intensitāšu gradāciju soļiem.

Ja markiera kandidāts konkrētajā slānī pārraida datus, tad tām jābūt redzamam, un šim kandidātam slānī jāpiešķir pilna bita vērtība, bet ja tas neraida datus, tad tam piešķir tukša bita vērtību. Kadra attēlu kadra kandidātu vērtības tiek saglabātas virknēs, kurās tālāk izmanto signālu apstrādē datu slāņa komunikācijas protokolā, kas aprakstīts 3.2.nodaļā.



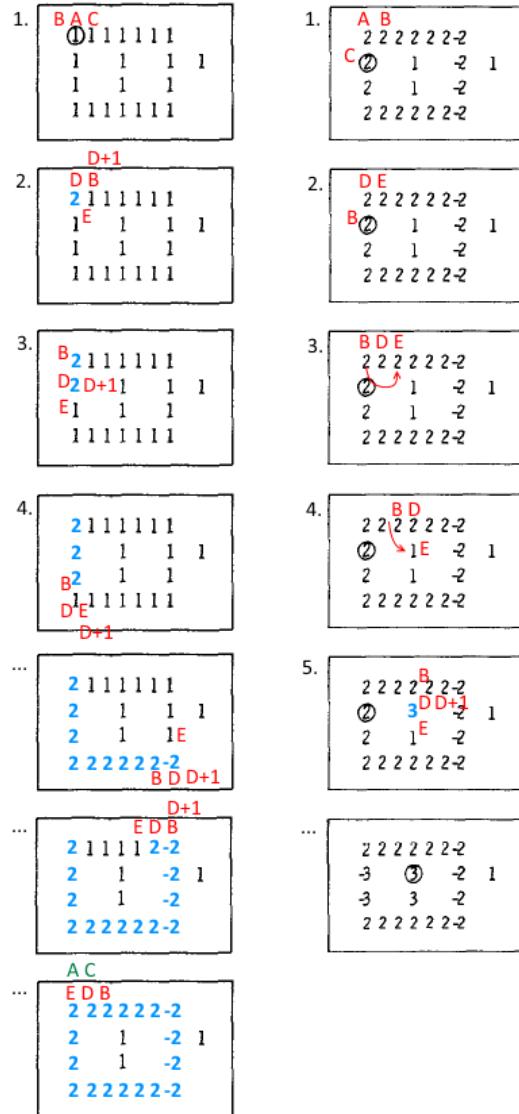
36. attēls. Pakāpeniska pikselu intensitātes filtrēšana pa 10 intensitāšu gradāciju vērtību slāniem.  
Attēlos ir atzīmēti visas atrastās kontūras.

Markieru kandidātu kontūru un to centru atrašanai tika pielietots S.Suzuki algoritms topoloģisku kontūru noteikšanai [31]. Tas tika izmantots, lai pārbaudītu vai diodes kontūra nesatur citas iekšējas kontūras, kas nevarētu tur atrasties diodes attēla gadījumā, kā arī šis algoritms ir implementēts OpenCV bibliotēkā, kas tika izmantota attēlu apstrādē.

Algoritma izpildāmie soli:

- 1 Tieka saņemts binārs attēls.
- 2 Kontūru skaitītājs uzstādīts  $N = 1$ .
- 3 Pārvieto kurSORU pa y rindāM uz leju un x asi pa labi, līdz iegūst attēla pikseli
  - 4.1 Ja  $f_{x,y} = 1$  un  $f_{x-1,y} = 0$ . Tieka palielināta  $N$  vērtība un tiek saglabāti punkti  $A_{x,y}$ ,  $B_{x-1,y}$ .
  - 4.2 Ja atrod jau apskatītu pikseli  $f_{x,y} \geq 1$  un  $f_{x+1,y} = 0$ , tad pieņem, ka ir atrasts apakš-kontūrs, kuram saglabā punktus  $A_{x,y}$  un  $B_{x+1,y}$  palielina  $N$  vērtību. Jauno vērtību reģistrē kontūru koka struktūrā kā apakškopu.
  - 5 Sākot no punkta  $A_{x,y}$ , seko kontūrai pa x un y asīM pēc nosacījumiem sekojošos soļos. Apejot kontūru, to var saglabāt hierarhijā atsevišķā struktūrā, jo kopējā pikselu matrica pēc algoritma izpildes nedos skaidru informāciju par kontūru robežām, bet no tās varēs iegūt informāciju tikai par iekšējo kontūru skaitu.
    - 6.1 Ap punktu  $A$  apskata 8 kaimiņu pikselus pulksteņrādītāja virzienā, sākot no pikseļa  $B$ . Pirmais pikselis, kura vērtība nav 0, tiek uzstādīts kā  $C$  ar atrasto pozīciju. Ja neviens pikselis nav atrasts, tad tā vērtību uzstāda kā  $-N$  un jādodas uz 3.soli.
    - 6.2  $B \leftarrow C$  un  $D \leftarrow A$
    - 6.3 Ap punktu  $D$  apskata 8 kaimiņu pikselus pretēji pulksteņrādītāja virzienam, sākot no pikseļa  $B$ . Pirmā pikseļa pozīcija, kas nav ar vērtību 0, tiek saglabāta kā  $E$ . Ir nepieciešams arī saglabāt apskatītos pikselus līdz  $E$ , kas būs nepieciešami nākamajos apakš-soļos.
      - 6.3.1 Ja  $D_{x+1,y}$  vērtība ir 0 un  $D_{x+1,y}$  tika apskatīts 6.3 solī līdz  $E$  pikselim, tad  $D_{x,y} = -N$
      - 6.3.2 Ja  $D_{x+1,y}$  vērtība nav 0 un  $D_{x+1,y}$  netika apskatīts 6.3 solī līdz  $E$  pikselim, tad  $D_{x,y} = N$
      - 6.3.3 Pretējā gadījumā kā 6.3.1 un 6.3.2  $D$  vērtība netiek mainīta.
    - 6.4 Ja  $E = A$  un  $D = C$  (nonākam sākumpunktā) tad reģistrēt kontūru un doties uz 3. soli. Pretējā gadījumā pozīcijas tiek mainītas uz  $B \leftarrow D$  un  $D \leftarrow E$ , un jādodas uz 6.1 soli.

7 Algoritms beidz darbu, sasniedzot attēla apakšējo labo stūri iterācijā, kura aprakstīta 3.solī.



37. attēls. Pirmās kontūras atrašana, izmantojot S.Suzuki algoritmu (pa kreisi). Pirmās apakš-kontūras atrašana (pa labi).

Algoritma princips ir secīgi pulksteņrādītāja virzienā apskatīt kaimiņu pikselus, tādējādi iegūstot kontūras un, izmantojot arī īpašību mainīt kustības virzienu, apskatot arī apakš-kontūras. Lai iegūtu vairākus apakš-kontūras tiek izmantota numerācijas metode, izmantojot algoritmā definētos nosacījumus.

①	1	1	1	1	1
1	1	1	1		
1	1	1			
1	1	1			

(a)

2	2	2	2	2	2	-2
②	1	-2	1			
2	1	-2				
2	2	2	2	2	2	-2

Kontūri  
/

N=2

(b)

2	2	2	2	2	2	-2
-3	③	-2	1			
-3	3	-2				
2	2	2	2	2	2	-2

Kontūri  
/

N=2

|

N=3

(c)

2	2	2	2	2	2	-2
-3	-4	-2	①			
-3	-4	-2				
2	2	2	2	2	2	-2

Kontūri  
/

N=2

|

N=3

|

N=4

(d)

2	2	2	2	2	2	-2
-3	-4	-2	①			
-3	-4	-2				
2	2	2	2	2	2	-2

Kontūri  
/

N=2

|

N=3

|

N=4

(e)

38. attēls. Iegūtās kontūras matrica un hierarhija, izmantojot S.Suzuki algoritmu.

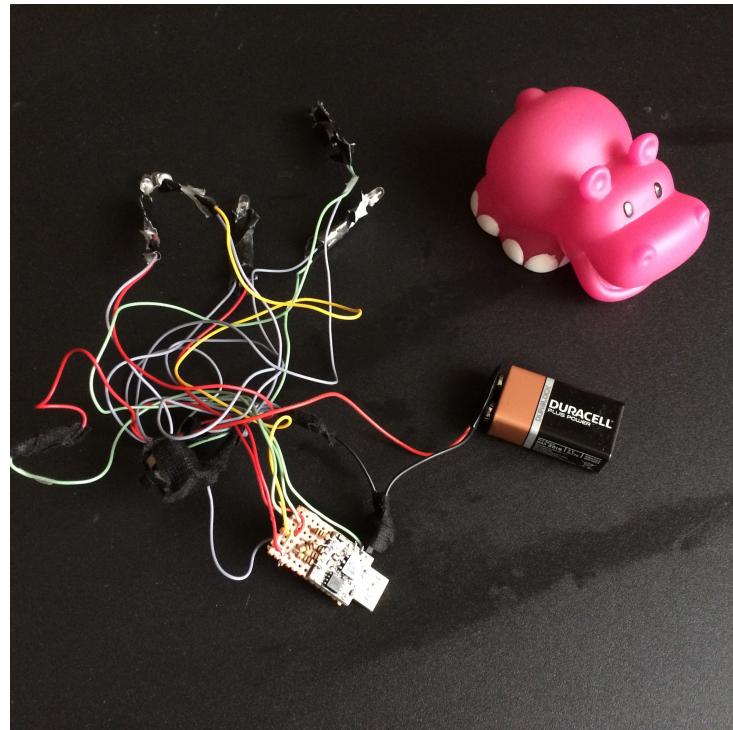
Vēl, bez pētījumā izmantotā algoritma, var pielietot virkni citu algoritmu kontūras un tās centra noteikšanai [32] [33] [34] [35]. Geometriskais centrs, kas tiek uzskatīts par markiera centru, tiek iegūts no aptverošā taisnstūra centra. Aptverošo taisnstūri veido kontūras tālāko stūru vektoru pozīcijas.

### 3.1 INFRASARKANO MARĶIERU IMPLEMENTĀCIJA

Infrasarkanie markieri tika izveidoti dažādās konfigurācijās atkarībā no testos izmantotā objekta ģeometriskajām īpašībām. Objekti, kā ēkas platforma (?? attēlā) vai galda tenisa rakete (44. attēlā) tika implementēti, izmantojot plakni, kuru definē 3 diožu pozīcijas telpā. Savukārt telpisks objekts, kā violetā rotāļlieta (41. attēla) tika implementēta, izmantojot 5 gaismas diodes, ņaujot atpazīt objekta pozīciju un orientāciju no jebkura leņķa, ja rotāļlieta ir novietota uz virsmas, kā parādīts attēlā.



39. attēls. Ēkas platformas pozīcija un orientācija paplašinātajā realitātē, izmantojot neredzamos infrasarkanos markierus .



40. attēls. Arduino shēma ar infrasarkanās gaismas diodēm.



41. attēls. Rotaļlieta ar infrasarkanajiem gaismas markieriem, kuri nav redzami RGB attēlā pa kreisi.

Atšķirībā no infrasarkanās gaismas tālvadības pultīm, kuras darbojas ar 33 - 40 kHz frekvencēm [36], šajā pētījumā piedāvātā sistēma ir ievērojami jūtīgāka pret datu pārraides traucējumiem. Šī iemesla dēļ komunikācijas protokols fiziskajā līmenī izveidots, lai iegūtie dati saturētu pēc iespējas mazāk kļūdu, un tos būtu iespējams izlabot. Vēl atšķirībā no televīzijas un citu ierīču tālvadības pultīm, kur tiek izmantotas pārsvārā 950nm vilņa garuma diodes, piedāvātajā sistēmā tika izmantotas 850nm vilņa garuma diodes, jo Leap Motion kamerām ir gaismas filtrs tieši šādai gaismas vilņa frekvencei.

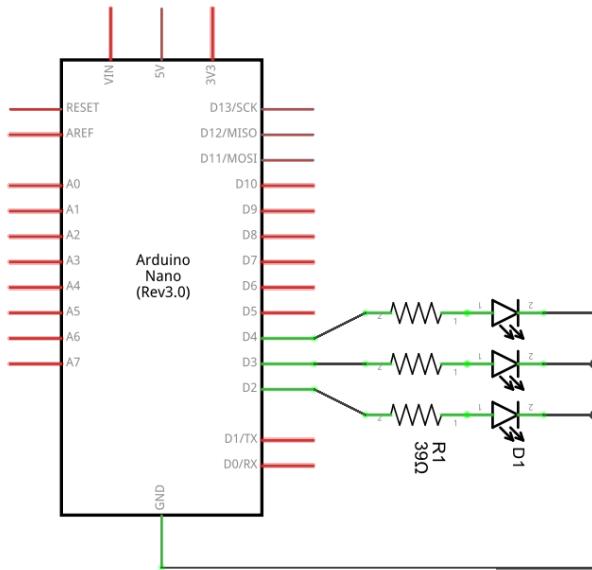
Implementējot markēru sistēmu, tika izmantota bezmaksas programmatūra un plaša patēriņa tirgū pieejami elektroniskie komponenti, kā parādīts 1., 2. tabulās.

Nosaukums	Apraksts	Skaits
Ardunio Nano ATmega328	16MHz, 5V	2
DigiSpark Digistump B	16.5MHz, 5V	1
Infrasarkānās gaismas diodes	850nm, 1.5V, 90mW, 50mA	3 * 2 + 5
Leap Motion	Infrasarkanās gaismas stereo kamera ar 850nm filtru	1
Oculus Rift DK2	Pie galvas piestiprināms virtuālās realitātes ekrāns ar pozicionešanas sistēmu	1
MacBook Pro	nVidia GTM750 2GB, 16GB DDR3 RAM, Intel i7 2.5 GHz (4 core)	1

1. tabula. Pētījumā izmantotā elektrotehnika.

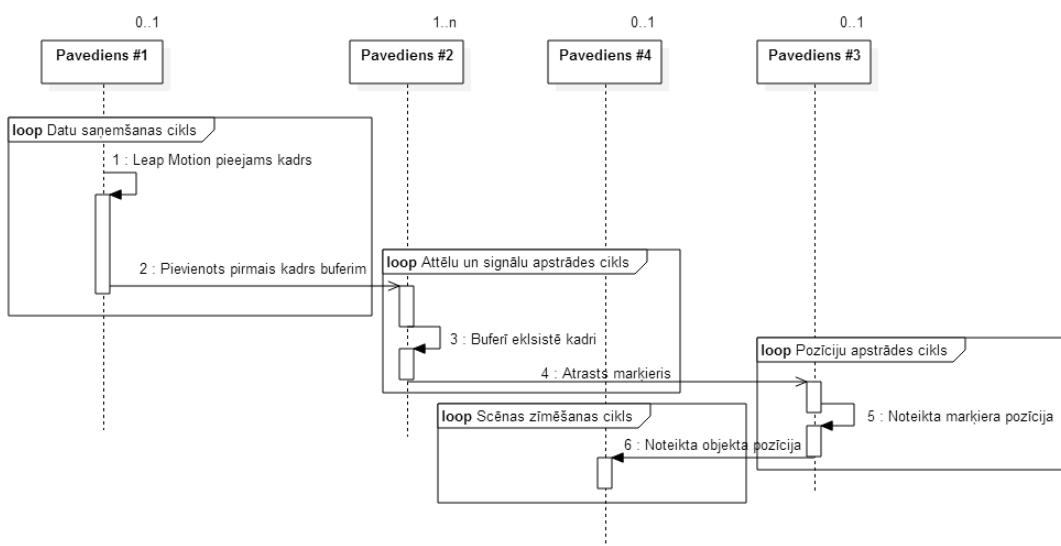
Nosaukums	Apraksts
Microsoft Windows 8.1	Operētāsistēma izstrādei un testešanai. Tika izvēlēta, jo Oculus Rift piedāvā paaugstinātas veikspējas dzini.
Unity 5	Grafiskais dzinis iegūtās scēnas attēlošanai.
MonoDevelop 5	Programmatūras izstrāde datu saņemšanai tika veikta, izmantojot C# valodu.
Ardunio IDE	Programmatūras izstrāde datu pārraidei tika veikta, izmantojot C valodu.
Emgu / OpenCV 2.4	Bibliotēka grafiskai apstrādei, izmantojot GPU.
Oculus Rift SDK	Oculus Rift iekārtas saskarnes bibliotēka.
Leap Motion SDK	Leap Motion iekārtas saskarnes bibliotēka.
nVidia CUDA SDK	Vispārīgo ēnotāju saskarnes bibliotēka, izmantojot GPU.
XZImg	Bibliotēka tradicionālo redzamo markēru pozīciju un orientācijas noteikšanai.

2. tabula. Pētījumā izmantotā programmatūra.



42. attēls. *Ardunio shēma, izmantojot infrasarkanās gaismas diodes markiera pozīcijas un orientācijas noteikšanai. Galda tenisa raketes shēma ar 3 diodēm.*

Markieru sistēmas atpazīšanas programma ir implementēta .net 3.5 satvarā C# valodā, izmantojot vairākus paralēlus pavedienus kā parādīts 43. attēlā. Attēlu un signālu apstrāde notiek pētījumā izmantotajos piemēros 2 paralēlos pavedienos jeb paralēlos procesos, katrai acij, taču to skaitu var palielināt atkarībā no pieejamo procesoru skaita. Attēlu apstrādes algoritmi tiek veikti, izmantojot OpenCV, kas kompilets ar nVidia CUDA atbalstu, lai nodrošinātu papildus pavedienu izmantošanu grafiskajā procesorā.

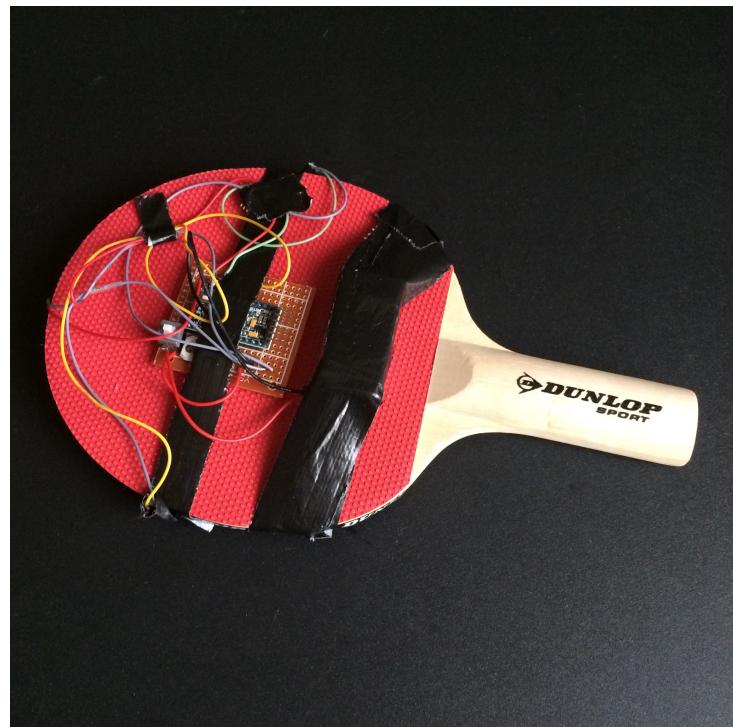


43. attēls. *Sistēmā izmantoto pavedienu jeb paralēlo procesu diagramma.*

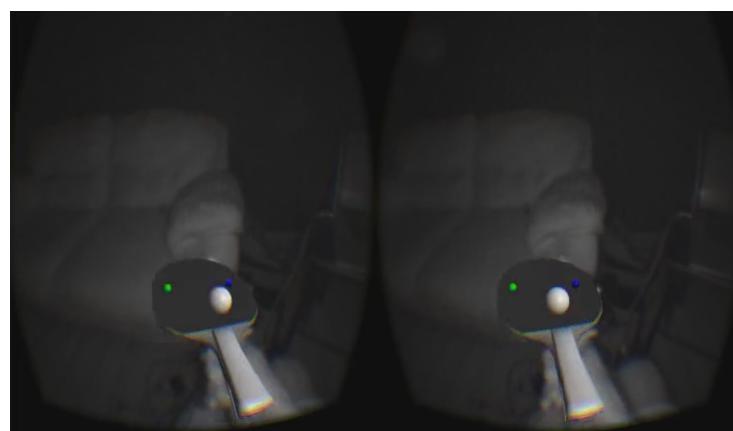
Pētījuma ietvaros tika izveidota interaktīvas spēles programma, izmantojot galda tenisa raketi un paplašināto realitāti. Spēlētāja virzienā lido galda tenisa bumbiņas, un tās spēlētājam ir jāatsit, izmantojot galda tenisa raketi, kura aprīkota ar aktīviem infrasarkaniem markieriem. Tā kā rakete strauji pārvietojas un maina orientāciju telpā, šī programma labi demonstrē markieru lokalizācijas veikspēju reālā laikā. Tenisa spēles un citu piemēru darbība ir iefilmēta video, kuri ir pieejami interneta vietnēs:

<http://tiny.cc/cp7myx>

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLEhOXo4NfxeVIWagwmKnIfyaVQdJqy8Xg>

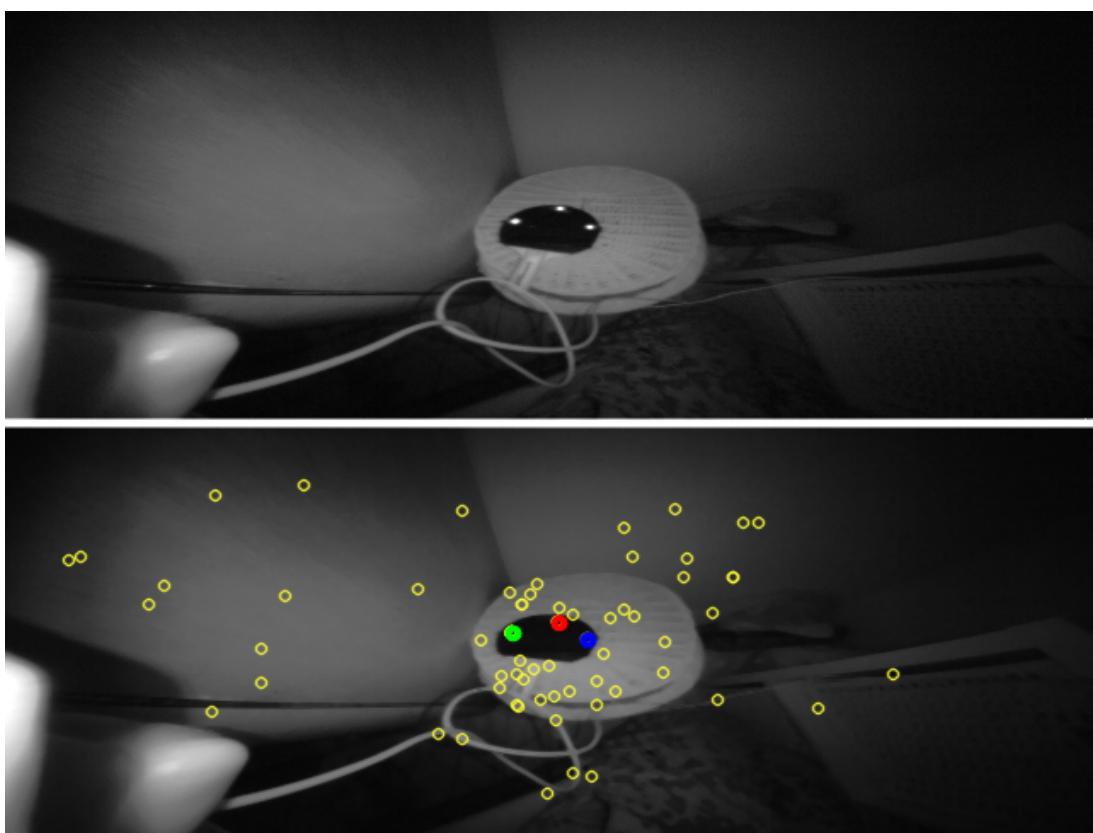


44. attēls. Galda tenisa rakete aprīkota ar infrasarkanajiem gaismas markieriem.



45. attēls. Galda tenisa raketes pozīcija iezīmēta paplašinātajā realitātē.

Viss šajā pētījumā izmantotais programmu primkods ir pieejams publiski pieejamā GIT repozitorijā interneta vietnē: <https://github.com/evaldsurtans/active-ir-markers>



46. attēls. Galda tenisa raketes pozīcija iezīmēta paplašinātajā realitātē.

## 3.2 INFRASARKANO MARĶIERU KOMUNIKĀCIJAS PROTOKOLS

Lai nodrošinātu marķieru identifikāciju, tika izveidots komunikācijas protokols, kas ir piemērots datu pārraidei, izmantojot relatīvi zemas frekvences infrasarkano kameru. Šajā gadījumā datu nolasīšanai tika izmantotas Leap Motion infrasarkanās kameras ar 111 Hz frekvenci, kura nav stabila, bet datu pārraide notika, mainot gaismas diodes intensitāti ar 37 Hz frekvenci.

Datu pārraide notiek, izmantojot signāla kadrus, kur 3 signāla kadri paredzēti 1 bita pārraidei. Šāds kadru sadalījums ļauj nolasītajos datos veikt ātru un efektīvu klūdu apstrādi, izslēdzot neiespējamus datu pārraides gadījumus. Šādu metodi nereti sauc arī par **FEC** algoritmu (*Forward Error Correction*).

Nolasītā kadru vērtība	Pārraidītā kadru vērtība	Datu bita vērtība
111	111	1
000	000	0
001	000	0
010	000	0
100	000	0
110	111	1
101	111	1
011	111	1

3. tabula. Iespējamās kadru vērtības un to labojumi izmantojot, 3 kadrus viena bita vērtībai.

Datu nolasīšana ar kameras attēliem diemžēl nenotiek stabili ar 111 Hz frekvenci, taču ir iespējams iegūt laika mērījumus starp katru iegūto attēlu. No šiem mērījumiem var aprēķināt, cik kadri ir izlaisti laika posmā kopš pēdējā apskatītā kadra. Izlaisto kadru dati katram potenciālajam marķieru punktam tiek saglabāti kā biti ar nenoteiktu vērtību, kas var būt 1 vai 0 datu pēcapstrādē. Piemēram, nolasot datu signālu no kadriem, kuri ierodas ar 9 ms (111 Hz) laika nobīdi, var iegūt precīzu informāciju par kadru vērtībām, taču regulāri kadri no kameras tiek iegūti ar dažādu laika nobīdi, kura var būt 18ms, 20ms, utt. Šādos gadījumos tiek saglabāta īpaša bita vērtība "?", kura var vienlaicīgi būt gan 1 vai 0 pēc nepieciešamības tālākajā datu apstrādē. Šādu vērtību visērtāk apstrādāt, ja tālākā atklūdošanā netiek izmantoti Haminga algoritmi, taču, izveidojot papildus kombināciju slāni, to var pielietot arī šajos atklūdošanas algoritmos. Šāda problēma ar nepastāvīgu laiku starp kadriem Leap Motion sensoram ir novērota arī citu pētnieku darbos [2].

Kadra laika nobīde	9ms	8ms	9ms	18ms	7ms	9ms
Punkta vērtība	1	0	1	1	?	1

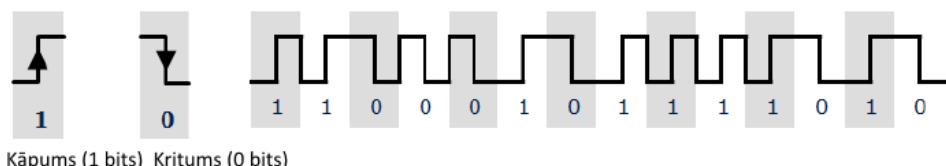
4. tabula. Neregulāras kameras kadru frekvences labojuma bitu piemērs.

Komunikācijas protokola izveidē tika apvienoti pētījumi par signālu apstrādi, kurus izmanto infrasarkanās gaismas komunikācijā, izmantojot analogās shēmas, piemēram,

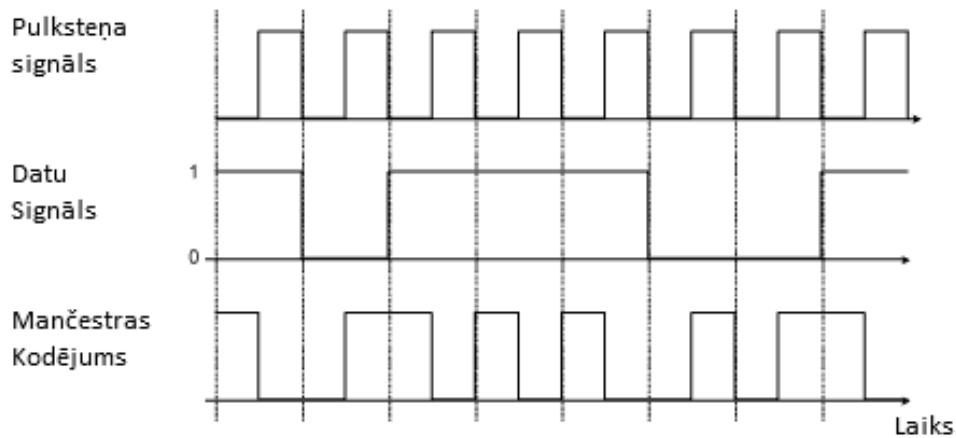
televīzijas un citās bezvadu pultīs. Iekārtu tālvadības pultīs, kas darbojas ar infrasarkano gaismu, pārsvarā izmanto 2 veidu fiziskā līmeņa protokolus [36]:

- Impulsa distances kodēšana, kur biti tiek iegūti mērot impulsa garumu laikā. Šādās shēmās nepieciešama laika sinhronizācija, izmantojot sinhronizētus pulksteņus. Oculus Rift infrasarkanā kamera izmanto speciālu papildus vadu no kameras līdz diodēm, lai panāktu šādu sinhronizāciju. Šāda metode nav piemērota, ja marķieri tiek iebūvēti ikdienas objektos, kuri nav savienoti ar vadiem, kā arī gadījumos, kad iebūvētajās shēmās nav stabilas takts frekvences vai pulkstenis.
- Mančestras kodēšana, kur biti tiek iegūti no signāla amplitūdas kāpuma un krituma bez laika sinhronizācijas. Šīs kodēšanas princips ir līdzīgs Morzes kodam, kur eksistē tikai gari vai īsi signāli, nemērot laiku starp signāliem. Atšķirībā no Morzes koda šī kodēšana nodrošina, ka netiek lieki aizņemts pārraides laiks un signāla amplitūdas mainās nepārtraukti ar vienādu frekvenci, bet pie bita maiņas maina tikai pārraides fāzi.

Piedāvātais komunikācijas protokols darbojas vienā virzienā - datu pārraidei no marķieriem uz infrasarkano kameru. Lai vienkāršotu un nesadārdzinātu digitālo datu pārraides shēmu, mikrokontrolieris neizmanto precīzu pulksteņa mehānismu, bet tikai takts frekvenci, kura nav pilnīgi stabila. Tā kā datu pārraidei netiek izmantots stabils pulkstenis, tad visi pārraidītie dati tiek kodēti, izmantojot Mančestras kodēšanas algoritmu, kas nodrošina datu pārraidi mainīga mikrokontroliera pulksteņa gadījumā. Mančestras kodējumā katrs intensitātes jeb amplitūdas pieaugums tiek uzskatīts kā pilns bits jeb 1, un katrs intensitātes kritums tiek uzskatīts kā tukšs bits jeb 0. Ja laika periods līdz nākamai intensitātes izmaiņai ir mazāks par pusi no datu kadra ilguma, tad saglabājas iepriekšējā bita vērtība [36].



47. attēls. Mančestras kodēšanas piemērs.



48. attēls. Mančestras kodēšana, izmantojot pārraidītāja pulksteni.

Pirms katra skaitļa pārraides tiek pārraidīts signāls datu pārraides sākšanai. Piedāvātajā protokolā tas ir 3 bitu ilgs zemas intensitātes signāls "0" un 1 bita augstas intensitātes signāls "1". Pārtraukuma signāls nevar sastāvēt tikai no "0" vai "1", jo paši datu signāli var sākties un beigties ar "0" un "1". Vēl jāņem vērā arī katra izvēlētā pārraidāmā identifikatora kodējums, jo, piemēram, Mančestras kodējumā ilgākais signāls var būt 2 biti, tāpēc pārtraukuma signālam jābūt garākam par 2 bitiem. Gadījumā, ja pārraidāmie dati vienmēr sākas vai beidzas ar "1", tad pārtraukuma signālā papildus bits nav nepieciešams, kā tas parādīts 8.tabulā. Gadījumos, kad identifikācijas kodi virknē nepārklājas, ir iespējams vispār nepārraidīt pārtraukuma kodu. Šāda implementācija nebūs universāli izmantojama, taču kontrolētā vidē tā var būt noderīga, lai samazinātu pārraidāmo datu apjomu.

Identifikācijas kods	Apraksts
10100	1. markķera identifikācijas kods
10101	2. markķera identifikācijas kods
11100	3. markķera identifikācijas kods
000	Pārtraukuma kods

1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0

1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

5. tabula. Markķieru identifikācijas kodi un pārtraukuma kods. Piemēri pārraidot datus virknē bez pārtraukuma koda, un, izmantojot pārtraukuma kodu.

Identifikācijas kods	Apraksts
00110	1. markēra identifikācijas kods
10101	2. markēra identifikācijas kods
11100	3. markēra identifikācijas kods
000	Pārtraukuma kods

6. tabula. Marķieru identifikācijas kodi un pārtraukuma kods gadījumā, kad pārraidāmie dati nav noteikti.

0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

7. tabula. Ja tiek izmantots pārtraukuma kods "000", tad rodas klūda 1. marķiera datu pārraide, jo pārtraukuma kods pārkājas ar pārraidāmo datu iespējamajiem kodiem.

0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1

8. tabula. Pareizi izvēlēts pārtraukuma signāla kods, lai varētu apstrādāt jebkādus datus, kuru bitu virknes nesastāv no vairāk nekā 2 vienādiem blakusesošiem bitiem, piemēram, Mančestras kodējumā.

Nodrošinot datu posma slāni, sūtītie dati tiek kodēti, izmantojot pāra bita algoritmu (*parity bit*), kas nodrošina datu klūdas labojumu, ja klūda ir konstatēta vienā no pārraidītā ciparu signāla bitiem. Šis kodējums tiek pielietots pārraidāmajiem datiem pirms Mančestras kodējuma. Pāra bitu algoritmā starp pārraidāmajiem bitiem katrā bita vietā, kura indekss ir  $2^k$  pakāpe tiek ievietots papildus bits, kurš tiek aprēķināts pēc sekojoša algoritma. Katrā atklūdošanas bita indekss  $k$  norāda uz šī bita aprēķina virknes skaitliem jeb bitiem. Piemēram, ja  $k = 1$ , tad, aprēķinot pārbaudes bitu, pozīcijā  $b_1$  tiek ņemts vērā pirmais bits, tad tiek viens izlaists, tad atkal tiek saglabāts viens bits, tad atkal tiek viens izlaists. Tā tiek saglabāti visi biti līdz rindas beigām. Ja  $k = 2$  tad tiek saglabāti pirmie 2 biti, tad 2 tiek izlaisti, tad atkal 2 tiek saglabāti. Tā atkal tiek saglabāta bitu virkne  $b_2$  līdz rindas beigām. Katrā bitu virkne tiek saglabāta sākot ar  $k$  bita indeksu no aprēķināma  $b_k$  bita. Ja ir sasniegtas bitu virknes beigas, tad vairāk biti netiek saglabāti virknē. Piemēram, 8 bitu virknē  $b_4$  un  $b_8$  būs tikai 4 bitu gara virkne. Kad ir iegūtas atklūdošanas bitu virknes, tad iegūtie biti tiek saskaitīti decimālajā sistēmā, un, ja summa ir pāra skaitlis, tad bita vērtība tiek piešķirta kā 0, bet ja tā ir nepāra skaitlis, tad bita vērtība tiek piešķirta kā vērtība "1".

Piemērā ir dots pāru bitu algoritma pielietojums 8 bitu datu pārraidei. Pārraidāmā datu virkne ir  $D$ , kas satur bitu vērtības, datu virkne ar pāru bitu atklūdošanas bitiem ir  $D'$ , bet  $b_1, b_2, b_4, b_8$  ir pāru jeb atklūdošanas biti.

$$D = \{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1\}$$

$$D' = \{b_1, b_2, 0, b_4, 1, 0, 0, b_8, 1, 1, 0, 1\} = \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1\}$$

$$b_1 \rightarrow \{b_1, 0, 1, 0, 1, 0\} \rightarrow 0 + 1 + 0 + 1 + 0 = 2 \rightarrow 2 \text{ MOD } 2 = 0$$

$$b_2 \rightarrow \{b_2, 0, 0, 0, 1, 0\} \rightarrow 0 + 0 + 0 + 1 + 0 = 1 \rightarrow 1 \text{ MOD } 2 = 1$$

$$b_4 \rightarrow \{b_4, 1, 0, 0, 1\} \rightarrow 1 + 0 + 0 + 1 = 2 \rightarrow 2 \text{ MOD } 2 = 0$$

$$b_8 \rightarrow \{b_8, 1, 1, 0, 1\} \rightarrow 1 + 1 + 0 + 1 = 3 \rightarrow 3 \text{ MOD } 2 = 1$$

Pēc datu saņemšanas pāru bitu tiek pārbaudīti un ir iespējams izlabot viena bita klūdu, neizmantojot nekādu papildus informāciju, kā tikai pāru bitu vērtības. Vispirms tiek saglabātas pāru bitu vērtības tieši tāpat kā pirms sūtīšanas, pēc tam tiek salīdzinātas  $b_k$  vērtības ar aprēķinātajām, un visbeidzot, visu kļūdaino  $b_k$  bitu pakāpju vērtības  $k$  tiek saskaitītas. Iegūtā summa norāda uz kļūdaino bitu, kurš jāmaina uz pretējo vērtību.

Pāru bitu algoritma atklūdošanas piemērs dots sekojošā aprēķinā, kur  $D''$  ir saņemtā bitu virkne ar kļūdu, bet  $D'$  ir iepriekš aprēķinātā bitu virkne bez kļūdas.

$$D'' = \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1\}$$

$$b_1 = 1 \rightarrow \{b_1, 0, 1, 0, 1, 1\} \rightarrow 0 + 1 + 0 + 1 + 1 = 3 \rightarrow 3 \text{ MOD } 2 \neq 0$$

$$b_2 = 1 \rightarrow \{b_2, 0, 0, 0, 1, 1\} \rightarrow 0 + 0 + 0 + 1 + 1 = 2 \rightarrow 2 \text{ MOD } 2 \neq 1$$

$$b_4 = 0 \rightarrow \{b_4, 1, 0, 0, 1\} \rightarrow 1 + 0 + 0 + 1 = 2 \rightarrow 2 \text{ MOD } 2 = 0$$

$$b_8 = 1 \rightarrow \{b_8, 1, 1, 1, 1\} \rightarrow 1 + 1 + 1 + 1 = 4 \rightarrow 4 \text{ MOD } 2 \neq 1$$

Kļūdas ir  $b_1, b_2$  un  $b_8$  bitos, kuriem nepieciešams saskaitīt pakāpju vērtības.

$$s = 1 + 2 + 8 = 11$$

Iegūtā vērtība  $s$  norāda uz bitu, kurš ir kļūdainšs. Kā redzams, nomainot  $D''$  kļūdainās virknes 11 bitu uz pretējo vērtību tā sakrīt ar sākotnējo  $D'$  bitu virkni. Lai iegūtu sākotnējo datu virkni nepieciešams vienkārši izņemt pāru bitus no  $D'$  virknes.

Haminga kodējuma algoritmu parasti implementē, izmantojot "izslēdzošo vai" operatoru (XOR). Izmantojot iepriekšējā piemērā doto bitu virkni, algoritma izpildāmie soļi ir sekojošie [37]:

$$D = \{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1\}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$b_1$	$b_2$	0	$b_4$	1	0	0	$b_8$	1	1	0	1

9. tabula. Bitu virkne ar indeksiem un pāru bitiem  $b_k$ .

Bitu indeksi ar vērtībām "1"	$b_8$	$b_4$	$b_2$	$b_1$
5 (decimālais skaitlis) = 0101 (binārais skaitlis)	0	1	0	1
9 = 1001	1	0	0	1
10 = 1010	1	0	1	0
12 = 1100	1	1	0	0
$b_k$ vērtība veicot XOR starp vērtībām	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

10. tabula. No bitu virknes, izmantojot XOR operatoru apvienot bitus, kas atbilst indeksu skaitļiem, pie kuriem virknē  $D'$  vērtības ir "1" jeb pilns bits.

Iegūtais  $D'$  sakrīt ar iepriekš apskatītajā piemērā iegūto ciparu virkni, izmantojot decimālo skaitīšanu.

$$D' = \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1\}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	<b>1</b>	0	<b>0</b>	1	0	0	<b>1</b>	1	1	0	1

11. tabula. Iegūtā bitu virkne  $D'$  ar Hamminga kodējumu.

Lai paskaidrotu datu atklūdošanu, izmantosim iepriekš apskatīto kļūdaino virkni  $D''$ , kur kļūdains ir 11 bits.

$$D'' = \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1\}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1

12. tabula. Kļūdainā virkne  $D''$  (11. bitā kļūda).

	$b_8$	$b_4$	$b_2$	$b_1$
Saņemtie pāru biti	1	0	1	0
Aprēķinātie pāru biti	0	0	0	1
Sindroma vērtība (XOR)	1	0	1	1
Sindroma vērtība	11			
Kļūdainā bita indekss	11			

13. tabula. Sindroma vērtības un kļūdainā bita indekss.

Hamminga kodējumā atklūdošanas XOR rezultātu sauc par sindromu, kurš norāda uz kļūdaino bitu. Šo algoritmu nereti sauc arī par SEC (*single error correcting*) Hamminga algoritmu.

Vēl sūtītajiem datiem tiek pievienots papildus bits, lai varētu veikt arī divu kļūdainu bitu labošanu, izmantojot paplašināto Haminga attāluma algoritmu (*Extended Hamming distance*). Šo algoritmu nereti sauc arī par SEC-DEC (*double error detecting*) Hamminga algoritmu.

Lai novērstu 2 bitu kļūdu, nepieciešams pievienot papildus bitu, kas ir visu pārejo bitu XOR kopējā vērtība [37]. Papildus pārbaudes bita vērtība  $b_{13}$  aprēķināta dotajā piemērā no sākotnējās virknes ar pāru bitiem  $D'$ .

$$b_{13} = 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0 \quad (1)$$

$$E' = \{0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0\}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0

14. tabula. Iegūtā virkne ar pareiziem pāru bitiem  $E'$ .

Papildinot iepriekšējo piemēru  $D''$  zemāk dota virkne  $E''$  ar 2 klūdām.

$$E'' = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0\}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0

15. tabula. Virkne  $E''$  ar 2 klūdām. Viena no klūdām ir pirmā līmeņa 2. pāra bitā.

Lai atklūdotu doto virknī, tiek pielietota sekojoša likumu kopa.

Likumi		Secinājumi										
Vai papildus bits sakrīt?	Sindroma vērtība	Klūdu skaits	Apraksts									
$b''_{13} = b'_{13}$	0	0	Nav klūdu									
$b''_{13} \neq b'_{13}$	0	1	Klūda ir $b_{13}$ bitā									
$b''_{13} \neq b'_{13}$	$\neq 0$	1	Sindroma vērtība norāda uz klūdu									
$b''_{13} = b'_{13}$	$\neq 0$	2	Nepieciešams pārbaudīt visas iespējamās kombinācijas mainot SEC bitu pusē $k=1..12$ mainot pa vienam bitam un pārbaudot dotos likumus									

16. tabula. Likumu kopa 2 bitu atklūdošanai 8 bitu datu pārraidei.

Dotajā piemērā pirmajā iterācijā tiks noskaidrots, ka  $E''$  satur 2 klūdas. Otrajā iterācijā  $b_1$  vērtība tiks nomainīta uz 1, un, atkārtojot likuma kopu, tiks noteikts, ka vēl joprojām ir vismaz 2 klūdas. Pēc tam  $b_2$  vērtība tiks nomainīta uz 1 un tiks noskaidrots, ka ir tikai viena klūda, kura atrodas 11. bitā, izmantojot sindroma vērtību.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0

17. tabula. Virkne  $E''$  pēc 1. iterācijas pārbaudot pirmo kombināciju.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0

18. tabula. Virkne  $E''$  pēc 2. iterācijas, pārbaudot pirmo kombināciju. Virknē paliek viena klūda, kuru atrisina, izmantojot sindroma vērtību.

Ja kombināciju pārbaudes laikā netiek atrasta tikai viena klūda, tad tiek pieņemts, ka virknē ir vairāk nekā 2 klūdas un tā nav labojama. Tāpat pastāv varbūtība, ka pie lielāka daudzuma klūdu atklūdotā vērtība arī var nebūt patiesa, bet, neskatoties uz to, ja signāla traucējumi ir nelieli šāda metode stabili atklūdo 2 bitu klūdas 13 bitu virknes pārraidē.

Lai veiktu 8 bitu atklūdošanu, izmantojot Haminga kodējumu 2 bitu atklūdošanai ir nepieciešams pievienot papildus 5 pāru atklūdošanas bitus. Nepieciešamo bitu skaitu var aprēķināt, izmantojot Haminga likumu (2).

$$2^m \geq m + k + 1 \quad (2)$$

Datu bitu skaits $k$	Papildu bitu skaits $m$ , viena bita atklūdošanai SEC	Papildu bitu skaits $m$ , divu bitu atklūdošanai SEC-DED
1	2	3
2 līdz 4	3	4
5 līdz 11	4	5
12 līdz 26	5	6
27 līdz 57	6	7
58 līdz 120	7	8
121 līdz 247	8	9
248 līdz 502	9	10

19. tabula. Nepieciešamais papildu bitu skaits  $m$  pārraidot datu virkni ar  $k$  bitiem, izmantojot SEC vai SEC-DED.

Datu pārraides datu posma līmeņa komunikācijas protokola izpildāmie soli:

- Tiek saņemts pārraidāmais 4 bitu garš skaitlis (var būt jebkāda garuma).
- Ievietot pāra bitus, izmantojot SEC algoritmu (pāru biti). Tiek iegūts 7 bitu garš skaitlis.
- Pievienot paplašināto Haminga bitu pēc SEC-DEC algoritma. Tiek iegūts 8 bitu skaitlis.
- Pievienot Mančestras kodējuma bitus. Tiek iegūts 16 bitu skaitlis.

5. Pievienot pārraides sākumā pārraides signāla 3 bitus. Tieki iegūts 19 bitu skaitlis.
6. Pārraidīt iegūtu skaitli ar 37 Hz frekvenci, izmantojot gaismas diodes. Divu klūdu gadījumā, nodrošina 486 ms datu pārraidi šim skaitlim.

Datu pārraides datu posma līmeņa komunikācijas protokola izpildāmie soli:

1. Tieki saņemts attēls no infrasarkanās kameras.
2. Tieki iegūts kadru saraksts, kur katri 3 kadri satur 1 bita vērtību.
3. Iztrūkstošo kadru vērtības tiek aizstātas ar nejaušu bitu vērtībām.
4. Tieki veikta kadru labošana izmantojot FEC algoritmu
5. Tieki atrasts datu pārraides sākuma signāls.
6. Tieki atkodēts Mančestras kodējums.
7. Ja tiek noteikta klūda, tiek veikts klūdu labojums, izmantojot Haminga bitu SEC-DEC (tieki pārbaudītas iespējamās kombinācijas)
8. Ja tiek noteikta klūda, tiek veikts klūdu labojums, izmantojot pāra bitus (*parity bit*) un sindroma vērtību.
9. Tieki iegūti pārraidīti dati, kas tiek nodoti datu pēcapstrādei augstākā komunikācijas protokola līmenī. Šajā pētījumā iegūtie dati tiek apstrādāti ar 3.3.nodaļā aprakstītajiem algoritmiem.

Lai novērstu pārraidīto signālu sadursmi un markieru identifikācijas problēmas, piedāvātā sistēma katram marķierim piešķir iepriekš zināmas nejaušu skaitļu virknes, gadījumā, ja telpā ir paredzēts izvietot vairākus objektus, kas izmanto šo komunikācijas protokolu. Skaitļu virknes nodrošina lielu varbūtību, ka marķieri savā starpā netiks sajaukti. Piemēram, trīs 4 bitu nejaušu ciparu secība nodrošina datu sadursmes varbūtību  $\frac{1}{16^3} = 0.02\%$ . Pie tam šādas sadursmes, lai arī maz ticamas, var tiktnofiltrētas datu pēcapstrādē, zinot marķieru konfigurāciju, interesējošam objektam. Problēma šādai protokola implementācijai ir tā, ka pie 37 Hz datu pārraides 4 bitu 3 ciparu virknei, īsākais identifikācijas laiks būs 1.46 sek., kas samazina šādas sistēmas praktisku pielietojamību.

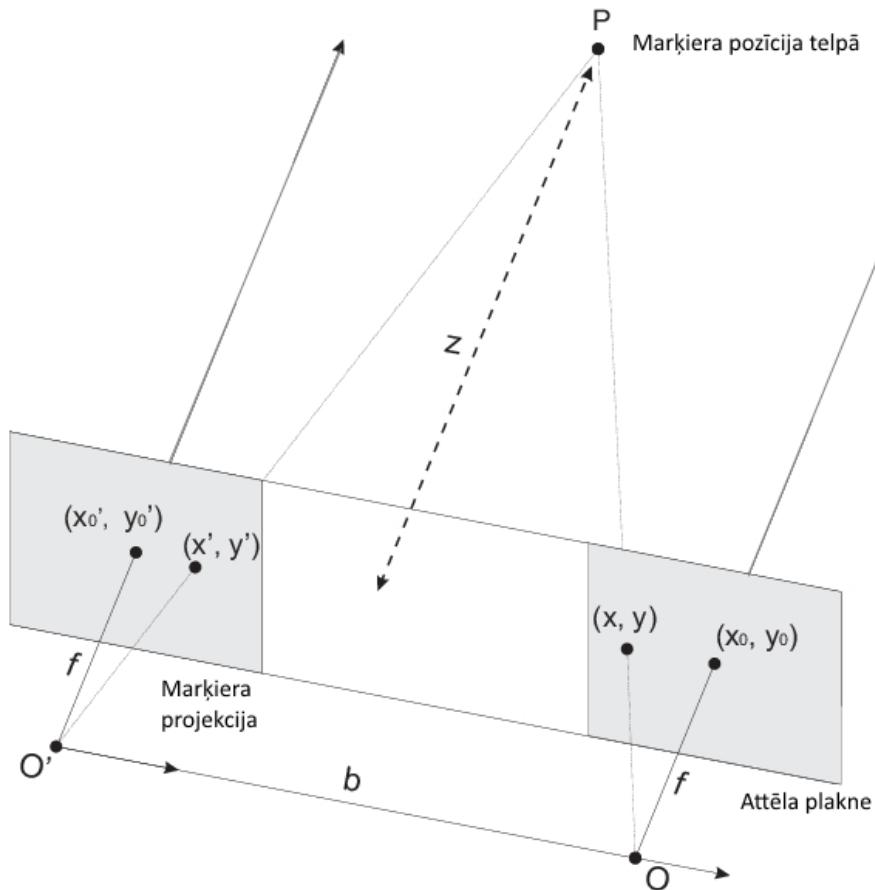
Alternatīva metode ir izmantot laika zīmoga identifikatorus, to sadursmju varbūtība būs atkarīga no šī laika zīmoga precizitātes un kodētās virknes garuma.

Piedāvātā sistēma var ne tikai pārraidīt identifikācijas datus katram no marķieriem, bet arī citu interaktīvu informāciju bez citu komunikācijas rīku pielietošanas. Piemēram, ja pie marķiera ir pievienota poga, tad šīs pogas nospiešanas signālu arī ir iespējams pārraidīt ar to pašu aktīvo marķieri, ar kuru tiek noteikta šī objekta identifikācija un atrašanās vieta telpā.

### 3.3 INFRASARKANO MARĶIERU POZICIONĒŠANA TELPĀ

Tiklīdz ir iegūta marķieru identifikācija, var iegūt to pozīcijas telpā, izmantojot projekcijas no Leap Motion stereo kamerām. Ja ir pieejami vismaz 3 vienam objektam piederoši punkti, tad ir iespējams arī iegūt objekta orientāciju telpā, izmantojot vektoriālo reizinājumu (*cross product*) pa pāriem, reizinot punktu vektorus.

Piemērā dotajā 49. attēlā parādīts situācijas zīmējums, kur  $f$  ir fokusa attālums, kas Leap Motion gadījumā ir 1.24 mm. Attālums starp kamerām  $b$ , kas Leap Motion gadījumā ir 40mm. Pozīcijas  $(x_0, y_0)$  ir attēla plaknes centri, bet pozīcijas  $(x, y)$  ir markiera  $P$  projekcijas uz attēla plaknes. Savukārt  $z$  ir attālums no kamerām līdz markierim.



49. attēls. Marķieru pozīciju atrašana 3 dimensiju telpā, izmantojot stereo attēlu projekcijas.

Uzdevums ir aprēķināt marķiera koordinātes telpā  $P_c = (x_c, y_c, z_c)$ . Lai aprēķinātu attālumu līdz marķierim  $z_c$ , tiek izmantota starpības vērtība  $d$  (*disparity*) [38].

$$d = x' - x \quad (3)$$

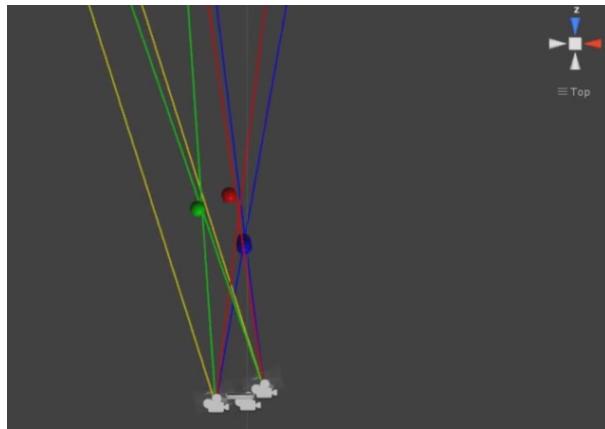
$$z_c = f \cdot \frac{b}{d} \quad (4)$$

$$x_c = z_c \cdot \frac{(x - x_0) + (x' - x'_0)}{2 \cdot f} \quad (5)$$

$$y_c = z_c \cdot \frac{(y - y_0) + (y' - y'_0)}{2 \cdot f} \quad (6)$$

Kad ir zināma  $P_c$  pozīcija attiecībā pret kameru, lai noteiktu markiera pozīciju telpā, nepieciešams izmantot no Oculus Rift iegūto kameras rotācijas matricu  $R$  un translācijas vektoru  $T$ .

$$P_w = R^T \cdot P_c + T \quad (7)$$



50. attēls. Piemērs no Unity 5 dzīļa markieru pozīciju atrašanai telpā. Attēla apakšējā daļā attēlotas Leap Motion kameras pozīcijas.

Teorētiski, izmantojot infrasarkanās gaismas intensitāti no aktīvajiem markieriem, kuru uztver kamera ar infrasarkanās gaismas filtru, var iegūt objekta pozīciju un orientāciju ar tikai 2 aktīviem markieriem, kā to ir demonstrējuši pētnieki no Korejas [39], izmantojot PlayStation 2 kameras. Šādai sistēmai ir nepieciešamas ātras darbības gaismas diodes, lai varētu ne tikai noteikt to attālumu, izmantojot intensitātes vērtības, bet arī būtu iespējams pārraidīt datus, ieslēdzot un izslēdzot tās.

Kad ir iegūtas markieru pozīcijas telpā, un tās identificētas pēc pārraidītā signāla, kas aprakstīts 3.2. nodaļā, tad ir nepieciešams veikt pozīciju filtrēšanu no trokšņiem jeb nobīdēm no patiesās pozīcijas. Šādu filtrēšanu ir nepieciešams veikt 2 slāņos. Vispirms jāfiltrē katras objekta markiera pozīcijas, lai tām nebūtu novērojama oscilācija, un pēc tam jāfiltrē arī katrs markieru kopums, kas apraksta fiziska objekta pozīciju un orientāciju telpā. Piemēram, galda tenisa raketes ierīcei nepieciešams filtrēt katras diodes pozīciju telpā, tad pašas raketes pozīciju telpā, kuru nosaka pēc 3 diožu pozīcijām, un visbeidzot raketes orientācijas filtrāciju, kuru nosaka ar Eilera lenķiem pret plakni, kuru veido 3 diožu pozīcijas.

Kalmana filtra algoritmu [40] diožu pozīcijām telpā var izveidot, izmantojot sekojošus iteratīvus aprēķinus. Vienādojumos ar **zaļu** krāsu iekrāsoti mainīgie, kuru vērtības ir svarīgas tikai algoritma iterācijas ietvaros, ar **zilu** krāsu iekrāsoti mainīgie, kuri tiek saņemti Kalmana filtra funkcijā, ar **sarkanu** krāsu iekrāsoti mainīgie, kuri ir rezultāts Kalmana filtra funkcijai, bet ar melnu **krāsu** iekrāsotas konstantes.

Algoritms sastāv no izpildāmiem soļiem:

1. Prognozēšanas solis.

Šajā aprēķinā  $x_n$  ir pašreizējās vērtības pozīcijai, jeb vektors  $x_n = \{x, y, z\}$ .  $x'_n$  ir prognozētā pozīcija, izmantot matemātisko modeli, kas šajā gadījumā balstās uz pārvietojuma ātrumu kopš iepriekšējā kadra  $u_n = \{vx, vy, vz\}$ .  $x_{n-1}$  ir iepriekšējā iterācijā noteiktā markiera pozīcija. Sākotnēji to pieņem kā pirmo mērījumu  $z_n$ . Savukārt konstante  $A$  ir stāvokļa pārvietojuma matrica, kas ir atkarīga tikai no  $x_n$  vērtībām un laika. Markieru pozīciju filtrācijā tās vērtība ir identitātes matrica, bet konstante  $B$  ir kontroles matrica, kura ir atkarīga tikai no laika un  $u_n$ . Šajā gadījumā  $B$  ir veikta ceļa aprēķins, zinot pēdējo zināmo pārvietošanās ātrumu un laika starpību

$$x'_n = A \textcolor{green}{x}_{n-1} + B \textcolor{blue}{u}_n \quad (8)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{pmatrix} \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \end{pmatrix} \quad (10)$$

Matrica  $Q$  ir prognozēšanas soļa kovariance jeb matrica, kas apraksta klūdas varbūtību 8 aprēķinā. Šīs matricas vērtību var noteikt eksperimentāli, kas šajā implementācijā tika pieņemta 10% robežās.

$$P'_n = A P_{n-1} A^T + Q \quad (11)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0.1t & 0 & 0 \\ 0 & 0.1t & 0 \\ 0 & 0 & 0.1t \end{pmatrix} \quad (12)$$

2. Novērojumu solis.

Šajā solī vienādojumos tiek iekļauta informācija par pašlaik novērotajām markiera

pozīcijām  $z_n = \{x, y, z\}$ . Ja markētā pozīcija īslaicīgi netiek novērota, tad par markētā pozīciju  $x_n$  var pieņemt  $x'_n$ . Matrica  $H$  apraksta korelāciju starp  $x_n$  un  $z_n$  jeb cik liela nobīde var būt starp mēriju mu un patieso pozīciju, ja mēriju mā nav klūdas. Šajā gadījumā situācijā  $H$  arī ir identitātes matrica, jo mēriju mi bez klūdām atbilst pozīcijai.

$$\textcolor{blue}{x''_n} = \textcolor{blue}{z_n} - H \textcolor{blue}{x'_n} \quad (13)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Matrica  $R$  ir mēriju klūdas matrica, kas tiek iegūta eksperimentāli, kur 25% gadījumu mēriju mi ir klūdaini. Aprēķinātā matrica  $S$  ir ir inovācijas kovariance, kura ir iekšējais mainīgais katrā iterācijā. Savukārt matrica  $K$  ir Kalmana pieauguma matrica, kura arī ir iekšējais mainīgais katrā iterācijā.

$$S = H \textcolor{blue}{P}'_n H^T + R \quad (15)$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.25t & 0 & 0 \\ 0 & 0.25t & 0 \\ 0 & 0 & 0.25t \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$K = \textcolor{blue}{P}'_n H^T S^{-1} \quad (17)$$

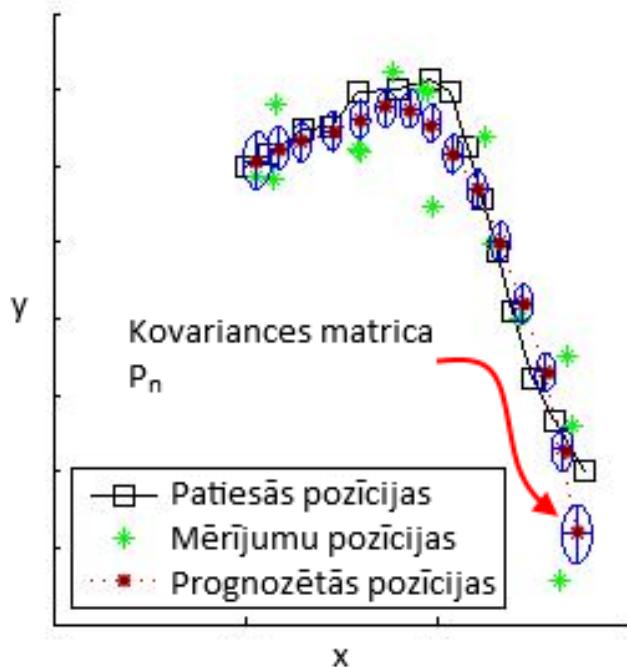
### 3. Atjaunināšanas solis.

Visbeidzot tiek aprēķināta filtrēta markētā pozīcija  $x_n$  un kovariances matrica. Abas šīs vērtības tiek nodotas līdz ar jauno mēriju mu  $z_{n+1}$  nākamajā iterācijā un filtrēšana atsākas no pirmā soļa. Vienādojumos zemāk  $I$  ir identitātes matrica.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\textcolor{red}{x}_n = \textcolor{blue}{x}'_n + K \textcolor{blue}{x}''_n \quad (19)$$

$$\textcolor{red}{P}_n = (I + K H) \textcolor{blue}{P}'_n \quad (20)$$



51. attēls. Kalmana filtra pielietojuma piemērs markiera izsekošanai 2D telpā.

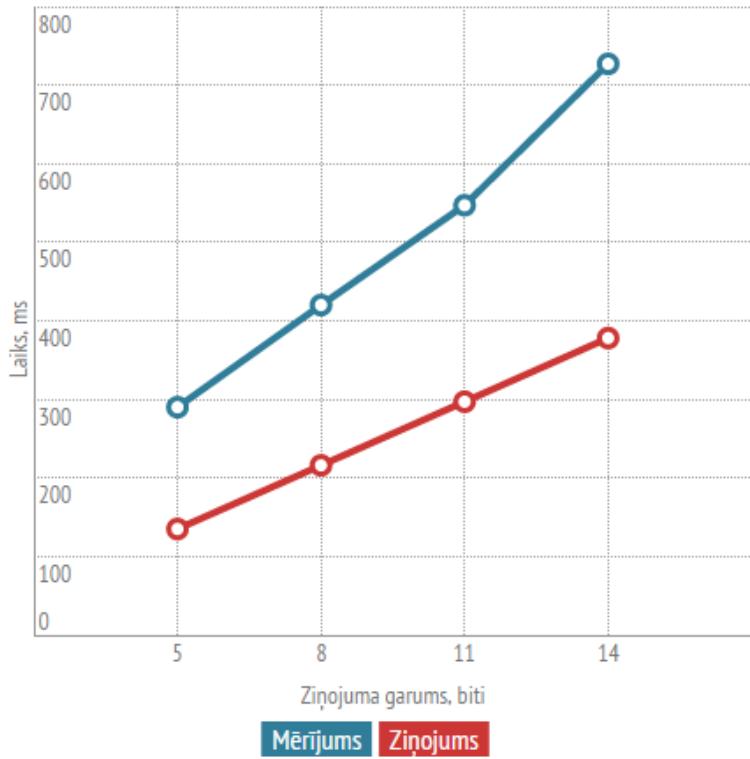
Izmantojot markieru pozīciju un orientācijas filtrāciju, tiek iegūta augstāka precizitāte un stabilitāte sistēmas lietotājam, pārvietojot galvu vai priekšmetu, pie kura piestiprināti markieri. Tā kā markieru pozīcijas tiek klasificētas pēc markiera sūtītā signāla, kurš nereti ir satur klūdas, tad ir nepieciešams projicēt punktus kameras attēla plaknē un pārbaudīt to identifikāciju paralēli to pārvietojuma aprēķinam. Šādā veidā ir iespējams iegūt pārraidītos datus pat tad, ja markieris tiek pārvietots starp kadriem. Alternatīvi Kalmana filtra algoritmam, ir iespējams pielietot Monte Carlo daļīnu filtro vai citu filtrēšanas metodi ar prognozēšanas funkcijām.

## 4. MARKIERU SISTĒMAS NOVĒRTĒJUMS

Šajā darbā izveidotā cilvēka acij neredzamo markieru sistēma ir spējīga iegūt objektu pozīcijas un to orientācijas reālā laikā ar aptuveni 290 ms laika intervālu no brīža, kad nav pieejama informācija par nekādām markieru pozīcijām telpā. Iegūstot sākotnējās markieru pozīcijas, to pārvietojuma izmaiņas var iegūt ātrāk, nekad nepārtraukti, ka no Oculus Rift ir iespējams iegūt kameras odometrijas datus, un 37 Hz datu pārraides frekvence nodrošina, ka pie ne pārāk straujiem pārvietojumiem ir iespējams izsekot markieru pozīcijām un prognozēt to pārvietojumu no kameras iegūtajiem attēliem. Tāpat arī Kalmana filtra implementācija, kura aprakstīta 3.3.nodalā, nodrošina sākotnēji iegūtā markiera pozīcijas nepazaudēšanu.

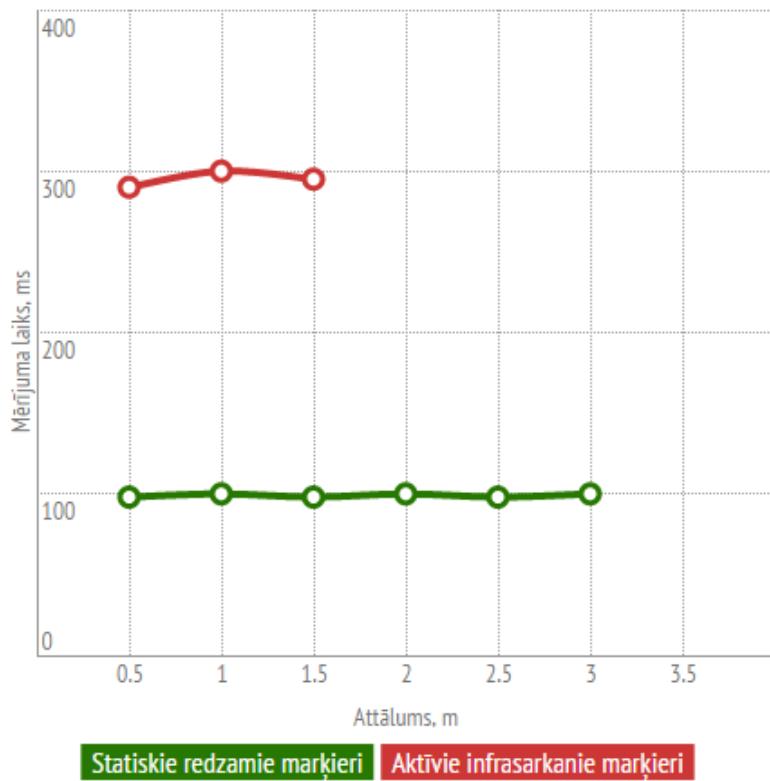
Sistēmas implementācijā izmantotie algoritmi tika izvēlēti atbilstoši, taču darba izstrādes laikā atklājās, ka signālu apstrādes algoritmu nozīme ir daudz mazāka kā sākotnēji tika plānots, jo markieriem tiešā redzamības zonā nav citu trokšņu kā vien attēla īslaicīga graudainība mainoties apgaismojumam ar kuru veiksmīgi tiek galā attēla apstrādes algoritmi.

Infrasarkanie aktīvie markieri jeb infrasarkanās gaismas diodes spēj veiksmīgi pārraidīt datus, kurus var nolasīt ar Leap Motion infrasarkano kameru. Datu pārraides stabilitāti pie dažādām intensitātēm nodrošina attēla apstrādes filtri, taču tā kā Leap Motion katram pikselim gaismas intensitāti apraksta baita vērtība (0-255), tad smalkāka gradācija par to nav pieejama, kas arī pasliktina datu kvalitāti. Neskatoties uz to, sistēma strādā ļoti stabili, un galvenais veikspēju ierobežojošais faktors ir kameras frekvence. No grafika 52. attēlā var redzēt, ka markiera identifikatora garumam ir tieša korelācija ar saņemtā mēriju laiku no brīža, kad nav informācijas par markieru pozīcijām līdz brīdim, kad tas ir tīcis atrasts. Saņemtais mēriju ienāk aptuveni pēc 2 reizes ilgāka laika kā ziņojuma pārraides laiks, jo pārraides sākuma brīdis nav zināms kamerai, kura vēro scēnu. Sinhronizācija notiek tikai pēc pirmā identifikatora iegūšanas, un markieris var tikt sākts lasīt, kad tas ir pārraidījis jau pusi datu, ja nav atrasts datu pārraides sākums. Ar šo sistēmu, izmantošanas laikā, videji markieru atpazišana notiks 2 reizes ilgākā laikā kā markiera pārraides laiks.



52. attēls. Infrasarkano markieru veikspēja atkarība no markiera identifikatora garuma bitos.

Lai salīdzinātu sistēmas veikspēju ar tradicionālām redzamo markieru sistēmām, tika izmantota komerciāla markieru bibliotēka XZImg, kura spējīga reālā laikā atrast markieru pozīcijas un orientācijas dažādos apgaismojumos. Tā izmanto cilvēka acij redzamus kvadrātveida divkrāsainus jeb bihromatiskus markierus.



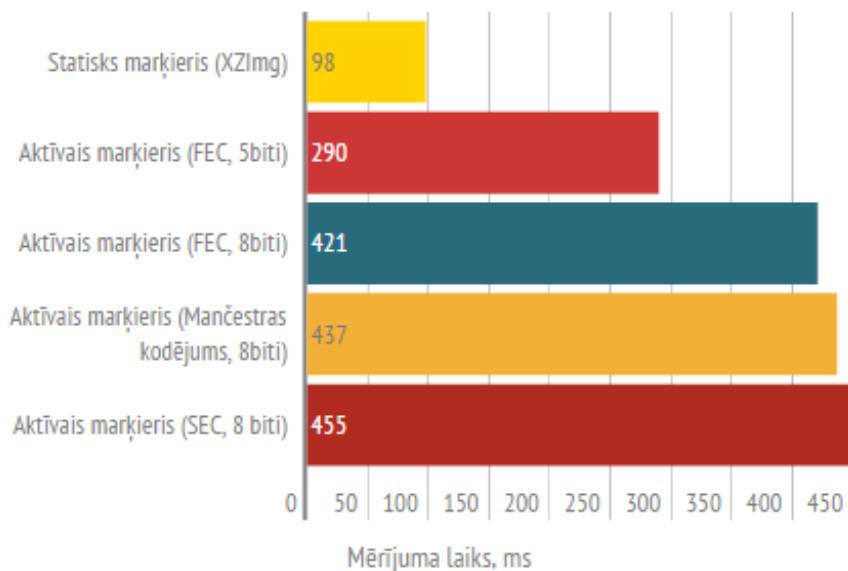
53. attēls. Markieru sistēmu salīdzinājums pēc to darbības attāluma.

Salīdzinot markieru sistēmas, tika noskaidrots, ka kvadrātveida redzamās gaismas markieru sistēma, izmantojot Leap Motion kamerai līdzvērtīgu 320 x 240 rezolūciju un 11 x 11 cm izmēra drukātu markieri, darbojas 2 reizes lielākā attālumā, taču jāņem vērā, ka infrasarkanās gaismas diodes ir neliela izmēra un Leap Motion kameru 640 x 240 rezolūcija arī nav liela. Lai iegūtu lielāku darbības attālumu, būtu nepieciešama augstākas izšķirtspējas infrasarkanā kamera. Vēl interesanti novērot, ka mēriju mu laiks ir neatkarīgs no attāluma, un to ietekmē tikai kameras rezolūcija. Atšķirībā no bezvadu komunikācijas, izmantojot radioviļņus, troksni ir iespējams pilnībānofiltrēt un attālums neietekmē signāla kvalitāti.



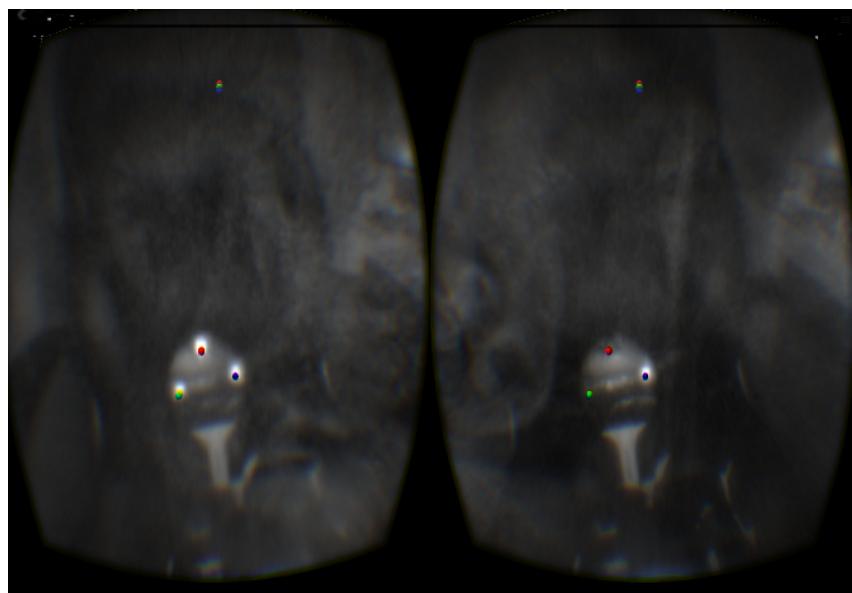
54. attēls. XZImg komerciālā kvadrātveida bīhromatiskā redzamo markieru implementācija.

Salīdzinot veikspēju starp tradicionālo markieru sistēmu un neredzamo infrasarkano markieru dažādiem kodējumiem, tika noskaidrots, ka piedāvātā markieru sistēma, izmantojot Leap Motion 111 Hz kameru ir vismaz 3 reizes lēnāka kā statisku markieru sistēma. Neskatoties uz to, piedāvātā infrasarkano markieru sistēma ir pielietojama reālā laikā, kā to parāda 3.1.nodaļā aprakstītā galda tenisa spēles implementācija. Lai iegūtu līdzvērtīgu markieru atpazīšanas ātrumu, būtu nepieciešama aptuveni 300 Hz frekvences kamera. Vēl interesanti novērot, ka Mančestras un pāru bitu kodējuma slāņi neuzlabo sistēmas ātrdarbību. Noteicošais faktors ir tikai pārraidāmā markiera identifikatora garums bitos. Atklūdošana nav nepieciešama, ja vidē nav kameru traucējoši faktori kā, piemēram, sniegs, migla vai putekļi. Iekštelpās kameras attēla troksni pilnībā likvidē 3..nodaļā aprakstītie algoritmi, tāpēc, lai uzlabotu sistēmas ātrdarbību vidē, kurā nav daudz traucēkļu, kuri aizsedz markieri, ieteicams neizmantot papildus signāla kodēšanas slāņus, kuri samazina sistēmas veikspēju, jo tiem nepieciešams lielāks pārraidāmo bitu apjoms. Neskatoties uz to, ir ieteicams izmantot FEC kodēšanu, jo Leap Motion kameras frekvence nav stabila un īslaicīgu kadru iztrūkumu gadījumā šis kodējums efektīvi palīdz novērst kļūdas.



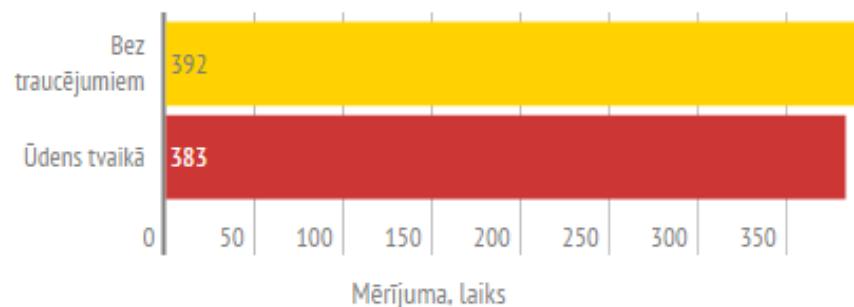
55. attēls. Infrasarkano markieru sistēmas slāņu veikspējas salīdzinājums ar kvadrātveida bihromatiskā markiera veikspēju.

Pētījuma ietvaros tika veikti testi, salīdzinot signāla atklūdošanas algoritmu darbību dažādās vidēs. Gadījumā, ja markiera attēlu aizsedza ūdens tvaiks, tā pārraides ātrums nemainījās, izmantojot pāru bitu atklūdošanu. Kā var redzēt 58. attēla grafikā, tad ūdens tvaiks ietekmēja saņemto datu kvalitāti, un pāru bitu algoritmam nācās labot datus 5 reizes biežāk nekā vidē bez ūdens tvaikiem. Šādās infrasarkano markieru sistēmās, ja ir pieejamas kameras ar augstāku frekvenci, būtu ieteicams implementēt visus atklūdošanas slāņus, lai nodrošinātu sistēmas stabilitāti jebkādos vides apstākļos.

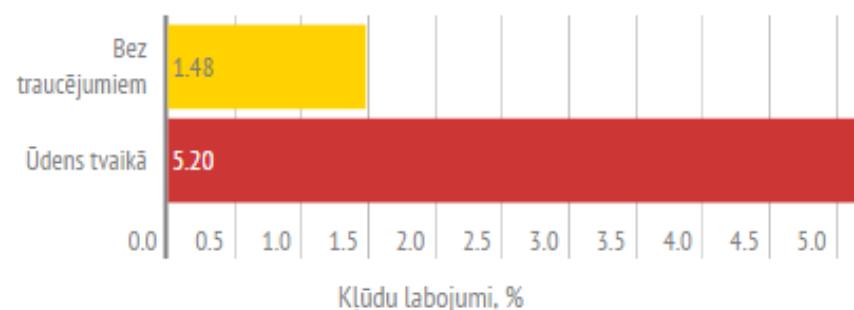


56. attēls. Markieru sistēmas testēšana, turot Leap Motion sensoru virs verdoša ūdens katla.

Pārraidot papildu informāciju no objekta, pie kura piestiprināti markieri, kā, piemēram, lietotāja saņemtās komandas vai sensoru mērījumus, tā ir jāpārraida, izmantojot Mančestras kodējumu vai arī jaizveido datu apstrādes slānis, kas nodrošinātu, ka pārraidāmie dati netiktu sajaukti ar pārtraukuma signālu, kas aprakstīts 3.2.nodaļā.



57. attēls. SEC (pāra bitu) atklādošanas pārraides ātrums gaisā un ūdens tvaikā.



58. attēls. SEC (pāra bitu) atklādošanas veikspēja gaisā un ūdens tvaikā.

## 5. TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Pētījumā tika izveidota infrasarkano markieru sistēma, izmantojot pašlaik komerciāli brīvi pieejamas datorsistēmu ierīces. Iegūtās sistēmas vājā vieta ir šo sistēmu piedāvātajās iespējās un veikspējā. Piemēram, Leap Motion stereo kamerai ir tikai 111 Hz attēla frekvence, kura regulāri kadrus filmē ar nobīdēm laikā, kuru dēļ nav iespējams palauties uz tās attēlu frekvenci. Tāpat šai kamerai rezolūcija ir tikai 640 x 240 pikseli un tās optika nav piemērota nelielu punktu izšķiršanai lielā attālumā. Kameru savstarpējais attālums arī neatbilst cilvēka acu attālumam, un galvenais Leap Motion kameru trūkums ir redzamās gaismas attēla neesamība. Drīzumā tirgū būs pieejamas šādas kameras arī ar redzamās gaismas attēlu, tāpēc būtu nepieciešams turpināt pētījumus ar jaunākām ierīcēm un izveidot programmas, kur sistēmas lietotājs nemaz nemana infrasarkano markieru klātesamību.

Alternatīvi infrasarkano markieru signālus, iespējams, varētu nolasīt, izmantojot arī citu veidu kameras, kā, piemēram, Microsoft Kinect, un šo markieru pozīcijas izrēķināt ar Solve PnP algoritmu palīdzību. Šādas implementācijas arī būtu nepieciešams atsevišķi pētīt un analizēt to veikspēju.

Šajā darbā maz tika pētīti izveidotās infrasarkano markieru sistēmas blakusprodukti, kā, piemēram, iespēja pārraidīt lietotāja ievades signālus un citus sensoru datus, izmantojot tos pašus markierus, kuri ir paredzēti pozīciju noteikšanai. Būtu nepieciešams veikt papildus pētījumus šādu funkciju veikspējai.

Vēl būtu nepieciešams veikt pētījumus ar dažādām diožu konfigurācijām, izmēriem un veidiem. Iespējams, gaismas izkliedējoši ietvari ap diodēm varētu palielināt markieru atpazīšanas attālumu.

## 6. SECINĀJUMI

Maģistra darba mērķis bija izveidot datorsistēmu, kura nodrošina, ka tas lietotājs var manipulēt ar fiziskiem objektiem virtuālajā un paplašinātajā realitātē, izmantojot infrasarkano markieru sistēmu. Darbā tika aplūkotas jau esošās metodes un pētījumi redzamo un neredzamo markieru sistēmām. Tika arī aplūkotas virtuālās un paplašinātās realitātes attēlošanas iespējas un izvēlēta platforma piedāvātās sistēmas implementācijai. Pētījuma ietvaros veiksmīgi tika izveidota praktiski izmantojama sistēma infrasarkano markieru pozīciju noteikšanai, izmantojot infrasarkanās gaismas diodes. Iegūtā sistēma ir spējīga darboties reālā laikā, ko pierāda galda tenisa sistēmas implementācija, kur objekta pozīcijas un orientācija strauji mainās atkarībā no raketes novietojuma.

Sistēmas darbību galvenokārt ietekmē Leap Motion infrasarkanās kameras kadru iegūšanas ātrums un konsistence. Ar pašreizējo Leap Motion kameras versiju ir iespējams iegūt sistēmu, kuras veikspēja ir 2 reizes sliktāka nekā tradicionālo markieru sistēmām, taču jāņem vērā, ka aktīvajai infrasarkano markieru sistēmai ir citas priekšrocības, kuras nav iespējamas tradicionālo markieru sistēmām. Aktīvo infrasarkano markieru sistēmu ir iespējams apslēpt zem fizisku objektu virsmas, kā to pierādīja Begemota rotālietas programmas implementācija. Pie tam fiziskā objekta virsmai var būt nenoteiktas formas. Tāpat ar piedāvāto markieru sistēmu ir iespējams pārraidīt papildus datus kā, piemēram, lietotāja darbību signālus vai sensoru mēriju datus.

Piedāvātā markieru sistēma efektīvi darbojas līdz 1.5 m attālumam. Lai iegūtu lielāku darbības rādiusu, ir nepieciešama augstākas izšķirtspējas kamera un labāka optiskā sistēma. Kameras iegūtajos attēlos visus trokšņus vairumā gadījumu ir iespējams attīrīt, izmantojot attēlu apstrādes algoritmus. Bet, ja sistēmu ir paredzēts izmantot vidēs, kur gaisā starp kamерu un markieri var būt traucēkļi kā, piemēram, sniegs vai migla, tad signālu apstrādes kļūdu labošanas algoritmi veiksmīgi var uzlabot signāla kvalitāti, neskatoties uz attēlā esošajiem trokšņiem.

Iegūtās objektu pozīcijas un orientācijas sakrīt ar reālā vidē esošo objektu pozīcijām. To parāda izveidotajās programmās fizisko objektu 3D repliku pārklājumu sakritība ar no Leap Motion stereo kamерām iegūto fona attēlu, kurā ir redzami šie fiziskie objekti. Neskatoties uz to, ka attālums starp Leap Motion kamерām nesakrīt ar attālumu starp cilvēka acīm, iegūtā paplašinātās realitātes ilūzija, kura tiek projicēta acu priekšā, izmantojot Oculus Rift DK2, ir ar pietiekami augstu ticamību, lai tās lietotājs varētu komfortabli izmantot šajā pētījumā izveidotās programmas.

Visi sistēmas izveidošanai nepieciešamie datorsistēmu un programmatūras komponenti ir brīvi pieejami tirgū, un to var pielietot ļoti dažādiem mērķiem. Galvenais pielietojums, kas tika notestēts ar izveidotajām programmām, ir paplašinātās realitātes nodrošināšanā, lai programmatūra varētu noteikt fizisku objektu atrašanās vietas. Diemžēl no šobrīd pieejamās Leap Motion stereo kameras ir iespējams iegūt tikai augstas frekvences

infrasarkano attēlu, taču tuvākajā laikā tirgū būs pieejami jaunāku versiju kameru modeļi, no kuriem būs iegūstams arī redzamās gaismas attēls. Izmantojot šādas iekārtas, būs iespējams pilnībā noslēpt markieru klātbūtni no sistēmas lietotāja redzamā attēla.

Vēl praktiski pielietojumi izveidotajai sistēmai būtu robotikā neregulāru priekšmetu pozīciju un orientāciju precīzākai noteikšanai. Atšķirībā no citām šajā pētījumā apskatītājam attēlu apstrādes metodēm, šajā pētījumā piedāvātā markieru sistēma iegūst viennozīmīgas markieru pozīcijas, kuras nevar sajaukt ar citiem punktiem dinamiskā vidē.

## 7. TERMINU VĀRDNĪCA

- **Aktīvais markieris** - markieris, kas var dinamiski mainīt pārraidāmos identifikācijas datus laikā bez ārējām fiziskām manipulācijām.
- **Haptiskā atgriezeniskā saite** – taustes sajūtu izraisošs datorsistēmas interfeiss.
- **DEC (Double bit Error Correction)** – **divu bitu automātiska atklūdošana** – Algoritms, kas paredzēts datu signāla virknes 2 kļūdainu bitu atklūdošanai bez papildus pieprasījumiem.
- **EKF-SLAM (Extended Kalman Filter - Simultaneous Localization And Mapping)** - algoritms, kas veic kartēšanu un pašlokalizāciju iepriekš nezināmās vidēs, izmantojot paplašināto Kalmana filtru.
- **HMD (Head Mounted Display)** – **pie galvas piestiprināts ekrāns** – iekārta, kura tiek piestiprināta pie galvas, aizklājot visu vai daļu no redzes lauka, kurā tiek katrai acij projicēts sava virtuāls attēls.
- **FEC (Forward Error Correction)** – **uz priekšu ejoša automātiska atklūdošana** – Datu signāla atklūdošanas algoritms, izmantojot papildus signāla dublikātu kadrus
- **FOV (Field of View)** – **redzes lauks** – redzes lauks no acij pa abscisu vai ordinātu asi, parasti tiek mērīts ar leņķi grādos
- **Infrasarkanā gaisma** – gaisma neredzamās gaismas spektrā ar vilņa garumu no 700 nm līdz 1 mm.
- **Li-Fi (Light Fidelity)** – datu apmaiņas sistēma, izmantojot redzamās vai neredzamās gaismas raidītājus un uztvērējus.
- **Markieris** - punkts telpā, kas pievienots objekta, un palīdz noteikt tā pozīciju. Vairāki markieri kopā palīdz noteikt arī šī objekta orientāciju telpā.
- **Monochromatic markers** – **monohromatiskie markieri** - **divkrāsaini markieri** – parasti melni kvadrātveida markieri, kas nodrukāti uz baltas lapas.
- **Odometrija** - sensoru dati par objekta pārvietojumu un orientāciju laikā.
- **Paplašinātā realitāte** - **Augmented reality** - Datorā veidota mākslīga 3D vide, kura tiek attēlota pāri cilvēkam redzamajai videi, saglabājot redzamu arī apkārtējo dabīgo vidi.
- **Pasīvais markieris** - markieris, kas var nevar mainīt savu identifikācijas informāciju laikā bez ārējām fiziskām manipulācijām.

- **Pavediens - thread** - paralēls izpildāmais process programmatūrā.
- **SEC (Single bit Error Correction) – viena bitu automātiska atklūdošana**  
– Algoritms, kas paredzēts datu signāla virknes viena klūdaina bita atklūdošanai bez papildus pieprasījumiem.
- **Solve PnP (Solve Perspective-n-Point problem) - Perspektīvas un punkta problēmas algoritms** – Algoritms, kas paredzēts, lai no viena 2D attēla iegūtu izdalītu un iepriekš zināmu ģeometrisku punktu konfigurāciju pozīciju un orientāciju 3D telpā. Standarta risinājumos ir nepieciešama vismaz 3 punktu konfigurācija.
- **Stereo kamera** - divas kameras, kurās pozicionētas vienā virzienā un atrodas vienā plaknē ar noteiktu attālumu.
- **VR (Virtuālā realitāte) - Virtual reality** - Datorā veidota mākslīga trīsdimensiju vide, kas rada realitātes ilūziju.
- **VRD (Virtual Retina Display) - Virtuālais tīklenes ekrāns** - sistēma, kas attēlu projicē tieši uz acs tīklenes, neizmantojot acij priekšā stāvošu field of ekrānu tehnoloģiju.
- **XOR** - izslēdzotās "vai" operators bitu aritmētikā.

## 8. IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Olivier Bau , Ivan Poupyrev, “REVEL: Tactile feedback technology for augmented reality,” 2013. <http://www.disneyresearch.com/project/aireal/>
- [2] Jože Guna, Grega Jakus, Matevž Pogačnik, Sašo Tomažič, , Jaka Sodnik, “An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking,” 2014, iSSN 1424-8220.
- [3] Mark Bolas, James Iliff, Perry Hoberman, Nate Burba, Ian McDowall, Thai Phan, Palmer Luckey, , David M. Krum, “Open virtual reality,” 2013.
- [4] Oliver Kreylos, “An eye-tracked oculus rift,” Feb. 2014. <http://doc-ok.org/?p=1021>
- [5] T. Whelan, John McDonald, Michael Kaess, Maurice Fallon, Hordur Johannsson, , John J. Leonard, “Kintinuous: Spatially extended KinectFusion,” 2012.
- [6] Richard A. Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim, Andrew J. Davison, Pushmeet Kohli, Jamie Shotton, Steve Hodges, , Andrew Fitzgibbon, “KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking,” 2011.
- [7] Andrea Colaco, Ahmed Kirmani, Hye Soo Yang, Nan-Wei Gong, Chris Schmandt, , Vivek K Goyal, “Mime: Compact, low-power 3d gesture sensing for interaction with head-mounted displays,” 2013, uIST ’13 Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology Pages 227-236.
- [8] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, , Hiroshi Ishii, “inFORM: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation,” 2013.
- [9] Jinha Lee, Rehmi Post, , Hiroshi Ishii, “ZeroN: Mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation,” 2011.
- [10] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, , Jun Rekimoto, “Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased array,” 2013.
- [11] Andrea F. Abate, Mariano Guida, Paolo Leoncini, Michele Nappi, , Stefano Ricciardi, “A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry,” 2009.
- [12] Monica Bordegoni, Giorgio Colombo, , Luca Formentini, “Haptic technologies for the conceptual and validation phases of product design,” 2006, computers & Graphics 30 (2006) 377–390.

- [13] Luv Kohli, "Warping virtual space for low-cost haptic feedback," 2013, i3D '13 Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games Pages 195-195.
- [14] Wei Liu , Andy Lim, "Marker-based surgical instrument tracking using dual kinect sensors," 2014, international Journal of Advanced Intelligence, Volume 3, Number 2, pp.255-267, July, 2011.
- [15] BMW Services, "BMW augmented reality in practice," 2014. [http://www.bmw.com/com/en/owners/service/augmented\\_reality\\_workshop\\_2.html](http://www.bmw.com/com/en/owners/service/augmented_reality_workshop_2.html)
- [16] "Google joins the VR war, invests in light field 'cinematic reality' company magic leap," Sebastian Anthony, 2014. <http://www.extremetech.com/extreme/191909-google-joins-the-vr-war-invests-in-light-field-cinematic-reality-company-magic-leap>
- [17] "CES debut for avegant glyph "virtual retinal display" headsets," Paul Ridden, 2013. <http://www.gizmag.com/avegant-glyph/30233/>
- [18] Thibaut Rahariaona, Paul Mignon, Raphael Juston, , Stephane Viollet, "A tiny lensless position sensing device for the tracking of active markers," 2013, hAL Id: hal-00910804.
- [19] Mark Cutler, Bernard Michini, , Jonathan P. How, "Lightweight infrared sensing for relative navigation of quadrotors," 2013, iCUAS.
- [20] Stefan Schmid, Stefan Mangold, Giorgio Corbellini, , Thomas R. Gross, "LED-to-LED visible light communication networks," 2013, aCM, MobiHoc'13.
- [21] Josef Ziegler, Stefan Schmid, Giorgio Corbellini, Thomas R. Gross, Manuela Hitz, Afroditi Psarra, , Stefan Mangold, "In-visible light communication: Combining illumination and communication," 2014, disney Research Zurich.
- [22] Stefan Mangold, Stefan Schmid, Giorgio Corbellini, , Thomas R. Gross, "Continuous synchronization for LED-to-LED visible light communication networks," 2013, aCM, MobiHoc'13.
- [23] Masayuki Kanbara, Naokazu Yokoya, , Haruo Takemura, "Registration for stereo vision-based augmented reality based on extendible tracking of markers and natural features," 2002, iEEE 1051-4651/02.
- [24] Georg Klein , David Murray, "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," 2007, iSMAR.
- [25] Montemerlo, Thrun, Kollar, Wegbreit, *FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem*, 2002.

- [26] Sebastian Thrun, *Probabilistic Robotics*, chapter 13.1-13.3 + 13.8.
- [27] Li-Wei Chan, Hsiang-Tao Wu, Hui-Shan Kao, Ju-Chun Ko, Home-Ru Lin, Mike Y. Chen, Jane Hsu, , Yi-Ping Hung, “Enabling BeyondSurface interactions for interactive surface with an invisible projection,” 2010, aCM, UIST’10, October 3–6, 2010, New York, New York, USA.
- [28] Hsi-Chun Wang, Wen-Hsin Liu, Chia-Long Chang, , Yi-Hui Chen, “Design of halftone-based AR markers under infrared detection,” 2008, iEEE, DOI 10.1109/CSSE.2008.1391.
- [29] Yusuke Nakazato, Masayuki Kanbara, , Naokazu Yokoya, “Discreet markers for user localization,” 2004, iEEE, ISWC’04.
- [30] Ye-Sheng Kuo, Pat Pannuto, Ko-Jen Hsiao, , Prabal Dutta, “Luxapose - indoor positioning with mobile phones and visible light,” 2014, aCM, MobiCom’14.
- [31] Satoshi Suzuki , Keiichi Abe, “Topological structural analysis of digitized binary images by border following,” 1985, cVGIP 30 1, pp 32-46.
- [32] Lingfei Zhang, Gang Chen, Dong Ye, , Rensheng Che, “A fast center of mass estimation algorithm for coordinates of IR markers,” 2008, iEEE, DOI 10.1109/ICYCS.2008.506.
- [33] Kesheng Wu, Ekow Otoo, , Arie Shoshani, “Optimizing connected component labeling algorithms,” 2005, lBNL-56864.
- [34] Yuhai Li, Kuizhi Me, , Peixiang Dong, “An efficient and low memory requirement algorithm for extracting image component information,” 2010, international Journal of Advanced Intelligence, Volume 3, Number 2, pp.255-267, July, 2011.
- [35] Victor M. A. Oliveira , Roberto A. Lotufo, “A study on connected components labeling algorithms using GPUs,” 2010, sIBGRAPI.
- [36] Thibaut Raharijaona, “Remote controls – radio frequency or infrared,” 2010, infineon Technologies AG.
- [37] Henry S. Warren, “ERROR CORRECTING CODES, chapter 15, hacker’s delight (2nd edition),” 2012, iSBN-13: 978-0321842688.
- [38] Anderson A. S. Souza, Rosiery Maia, , Luiz M. G. Gonçalves, “3d probabilistic occupancy grid to robotic mapping with stereo vision,” 2012, iSBN 978-953-51-0660-9.

- [39] ChangHo Han, Youngkee Ryu, , Choonsuk Oh, “A 3d coordinate estimation by using reformed two IR LED markers and PSD camera,” 2009, iCHIT’09, August 27–29, 2009, Daejeon, Korea.
- [40] Jiang Wan, “3d relative position and orientation estimation using kalman filter for robot control,” 1992, iEEE, 0-8186-2720-4.
- [41] Montemerlo,Thrun, *Simultaneous Localization and Mapping with Unknown Data Association Using FastSLAM*, 2003.
- [42] “Kalman filters,” Greg Czerniak, 2009. <http://greg.czerniak.info/guides/kalman1/>
- [43] T.J. Nugent , J.T. Kare, “Laser power for UAVs,” 2013.
- [44] Brent Griffin , Carrick Detweiler, “Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV,” 2012.
- [45] Thomas J. Nugent , Dr. Jordin T. Kare, “Laser power beaming for defense and security applications,” 2011, sPIE Proceedings Vol. 8045.
- [46] Anatole Lécuyer, Jean-Marie Burkhardt, Jildaz Le Biller, , Marco Congedo, “A4: A technique to improve perception of contacts with under-actuated haptic devices in virtual reality,” 2005.
- [47] Natalia Bogdan, Tovi Grossman, , George Fitzmaurice, “HybridSpace: Integrating 3d freehand input and stereo viewing into traditional desktop applications,” 2014, iEEE Symposium on 3D User Interfaces 2014.
- [48] Jos'e-Luis Rodr'iguez , Ramiro Vel'azquez, “Haptic rendering of virtual shapes with the novint falcon,” 2012.
- [49] “Fly like a bird with this epic oculus rift contraption,” Nov. 2014, gamespot. <http://www.gamespot.com/articles/fly-like-a-bird-with-this-epic-oculus-rift-contraption/1100-6419559/>
- [50] “OVRVision stereo camera for oculus rift,” Ltd Wizapply, 2015. <http://ovrvision.com/order-ovr1/>