

COMENIUS UNIVERSITY IN BRATISLAVA  
FACULTY OF MATHEMATICS, PHYSICS AND INFORMATICS



VYUŽITIE EYETRACKINGU VO VIRTUÁLNEJ  
TERAPII

BAKALÁRSKA PRÁCA

2025

ZUZANA MATÚŠKOVÁ



UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

VYUŽITIE EYETRACKINGU VO VIRTUÁLNEJ  
TERAPII

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program: Aplikovaná informatika  
Študijný odbor: Informatika  
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej informatiky  
Školiteľ: RNDr. Zuzana Berger Haladová, PhD.

Bratislava, 2025  
Zuzana Matúšková





Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

---

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Zuzana Matúšková  
**Študijný program:** aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** informatika  
**Typ záverečnej práce:** bakalárska  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický

**Názov:** Využitie eyetrackingu vo Virtuálnej terapii  
*Utilizing Eyetracking in Virtual Therapy*

**Anotácia:** Práca je zadávaná v spolupráci s FSEV UK. Pôjde o doplnenie funkcionality eyetrackingu do virtuálnej terapie, zber dát, analýzu dát a preskúmanie metód na vizualizáciu týchto dát pre spolupracujúce psychologičky.

**Vedúci:** RNDr. Zuzana Berger Haladová, PhD.  
**Katedra:** FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky  
**Vedúci katedry:** doc. RNDr. Tatiana Jajcayová, PhD.  
**Dátum zadania:** 12.09.2024

**Dátum schválenia:** 26.09.2024  
doc. RNDr. Damas Gruska, PhD.  
garant študijného programu

.....  
študent

.....  
vedúci práce

Čestne vyhlasujem, že celú bakalársku prácu na tému Využitie eyetrackingu vo Virtuálnej terapii, vrátane všetkých jej príloh a obrázkov, som vypracovala samostatne, a to s použitím literatúry uvedenej v priloženom zozname a nástrojov umelej inteligencie. Vyhlasujem, že nástroje umelej inteligencie som použila v súlade s príslušnými právnymi predpismi, akademickými právami a slobodami, etickými a morálnymi zásadami za súčasného dodržania akademickej integrity.

Bratislava, 2025

.....  
Zuzana Matúšková



**PodĎakovanie:** Touto cestou by som sa chcela poĎakovať mojej školiteľke RNDr. Zuzane Berger Haladovej, PhD., za odborné vedenie a cenné pripomienky počas celej realizácie práce.

Zároveň Ďakujem Mgr. Dagmar Szitás, psychologičke pracujúcej na projekte Virtuálnej terapie, za jej odbornú konzultáciu a prof. Mgr. Júlii Halamovovej, PhD za odborný dohľad.

## Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá zberom údajov zo sledovania očí (eye tracking) a monitora srdcovej frekvencie a ich následnou vizualizáciou pre potreby psychologičiek pracujúcich na experimente Virtuálnej terapie. Hlavným cieľom bolo vytvoriť funkčný nástroj, ktorý zabezpečí efektívne spracovanie a prehľadné zobrazenie údajov získaných počas experimentu a umožní tak analýzu vplyvu jednotlivých objektov v scéne na účastníkov. Výsledné vizualizácie sú navrhnuté tak, aby poskytovali intuitívny pohľad na pohyby očí účastníkov v kontexte fyziologických zmien. Práca zahŕňa zber dát z prostredia virtuálnej reality, úpravu výstupov, ako aj návrh a realizáciu vizualizačných techník. Zber údajov bol realizovaný pomocou prístroja HTC Vive Pro s technológiou Tobii vo virtuálnom prostredí vytvorenom v Unity. Výsledkom je systém, ktorý zjednodušuje prechod od surových dát k prakticky využiteľnej analýze v rámci psychologických experimentov.

**Kľúčové slová:** virtuálna realita, srdcová frekvencia, eyetracking

## Abstract

This bachelor thesis focuses on the collection of eye-tracking data and heart rate monitor data, and their subsequent visualization for the needs of psychologists working on a Virtual therapy experiment. The main goal was to develop a functional tool that ensures efficient processing and clear visualization of the data collected during the experiment, thus enabling the analysis of the impact of individual objects in the scene on participants. The resulting visualizations are designed to provide an intuitive view of participants' eye movements in the context of physiological changes. The thesis includes data collection in a virtual reality environment, output processing, as well as the design and implementation of visualization techniques. Data were collected using the HTC Vive Pro headset with Tobii eye-tracking technology in a Unity-based virtual reality environment. The outcome is a system that simplifies the transition from raw data to practically applicable analysis within psychological experiments.

**Keywords:** virtual reality, heart rate, eye-tracking



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretický základ</b>	<b>3</b>
1.1 Virtuálna realita . . . . .	3
1.2 Eyetracking . . . . .	3
1.3 Pohyb očí . . . . .	4
1.4 Srdcová frekvencia . . . . .	5
1.5 Virtuálna terapia . . . . .	5
1.6 Aktuálny stav projektu . . . . .	7
1.7 Ciele projektu . . . . .	8
<b>2 Špecifikácia</b>	<b>9</b>
2.1 Zber dát vo VR . . . . .	9
2.2 Snímanie tepovej frekvencie . . . . .	10
2.3 Vizualizácia . . . . .	11
2.3.1 Vizualizácia dát z eyetrackera . . . . .	11
2.3.2 Vizualizácia srdcovej frekvencie . . . . .	12
2.4 Analýza . . . . .	12
<b>3 Návrh</b>	<b>13</b>
3.1 Technológie . . . . .	13
3.1.1 Unity . . . . .	13
3.1.2 SteamVR . . . . .	14
3.1.3 HTC Vive Pro . . . . .	14
3.1.4 Tobii XR SDK . . . . .	14
3.1.5 SRainpal . . . . .	14
3.1.6 Polar H10 . . . . .	15
3.1.7 Python . . . . .	15
3.2 Komponenty . . . . .	15
3.3 Interná reprezentácia údajov . . . . .	18
3.3.1 Priečnik s grafickými údajmi . . . . .	18

3.3.2	Dátový model súboru pre textové eyetracking dáta . . . . .	19
3.3.3	Dátový model súboru pre HR dáta . . . . .	19
3.4	Procesy . . . . .	19
3.4.1	Inicializácia . . . . .	19
3.4.2	Zber dát . . . . .	20
3.4.3	Načítanie dát v python aplikácii . . . . .	21
3.4.4	Vizualizácia dát . . . . .	21
3.4.5	Analýza . . . . .	22
3.4.6	Riešenie technických problémov . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>27</b>
4.1	Naplnenie cieľov práce . . . . .	27
4.2	Test presnosti eyetrackera . . . . .	27
4.2.1	Test v systéme pre zber dát . . . . .	27
4.2.2	Test v systéme pre vizualizáciu dát . . . . .	29
4.3	Prezentácia výstupov systému . . . . .	32
4.4	Testovanie použiteľnosti . . . . .	34
4.4.1	Snénar a úlohy . . . . .	35
4.4.2	Výsledky . . . . .	35
4.4.3	Zhrnutie a odporúčania . . . . .	35
4.5	Využitie systému . . . . .	36
4.6	Obmedzenia riešenia . . . . .	36
	<b>Záver</b>	<b>37</b>
	<b>Príloha A</b>	<b>41</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Tréningová miestnosť projektu Virtuálna terapia [1] . . . . .	6
1.2	Scéna lesa z projektu Virtuálnej terapie [1] . . . . .	7
4.1	Snímka obrazovky v čase 01:15 pre každého účastníka testu . . . . .	28
4.2	Snímka obrazovky v čase 01:45 pre každého účastníka testu . . . . .	29
4.3	Snímka obrazovky v čase 02:15 pre každého účastníka testu . . . . .	29
4.4	Referenčná tabuľka pre vyhodnotenie výsledkov testu vizualizačnej aplikácie s farebným zvýraznením záznamov pre objekty fixácie . . . . .	30
4.5	Štruktúrované zobrazenie údajov pre každého účastníka . . . . .	31
4.6	Ukážka vizualizácie údajov v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre grafické zobrazenie, záložka Graph. . . . .	32
4.7	Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table. . . . .	33
4.8	Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa objektov. . . . .	33
4.9	Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa objektov a zoradená zostupne na základe stĺpca Heart Rate. . . . .	34
4.10	Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa označenia objektu ( <i>Tag</i> ). . . . .	34



# Zoznam tabuliek

3.1	Ukážka štruktúry CSV súboru so záznamom fixácie . . . . .	19
3.2	Ukážka štruktúry CSV súboru so záznamom o srdcovej frekvencii pou- žívateľa . . . . .	19
3.3	Porovnanie celkovej veľkosti súborov grafických dát pri rôznych rozlí- šeniach a intervaloch. . . . .	23
4.1	Časový harmonogram testu. Prvý stĺpec zodpovedá objektu alebo časti objektu, na ktorý sa používateľ mal pozerieť. Stĺpec s názvom čas zobra- zuje daný časový interval vo formáte <i>minúty:sekundy</i> . . . . .	28



# Úvod

Srdcová frekvencia je jeden zo základných fyziologických ukazovateľov stavu človeka. Okrem informácií o telesnej aktivite poskytuje aj cenné údaje o psychickom rozpoložení človeka. Na základe tepu možno určiť, či sa človek nachádza v pokoji, alebo či naopak reaguje na stresujúcu či emočne náročnú situáciu. Práve pre túto schopnosť odrážať vnútorné prežívanie nachádza srdcová frekvencia široké uplatnenie v psychologickom výskume a praxi.

Pojem virtuálna realita sa tradične nespája s psychológiou, ale skôr s oblasťou zábavného priemyslu, najmä s počítačovými hrami a interaktívnou zábavou.

Virtuálna terapia, čo je relatívne novodobý koncept, nám však ukázala, že spojenie virtuálnej reality a psychológie nie je len možné, ale môže byť v tejto oblasti veľkým prínosom. Ako názov naznačuje, tento typ terapie sa odohráva vo virtuálnej realite a v súčasnosti prebieha v tejto oblasti veľa rôznych projektov a výskumov. Virtuálna terapia môže mať rôzne formy a zamerania, my sa však budeme zaoberať jedným z aktuálnych projektov Virtuálnej terapie prebiehajúcim na fakulte FSEV Univerzity Komenského.

Tento prebiehajúci výskum sa zaoberá, mimo iné. porovnaním prostredí lesa a mesta, teda prírody a urbanistického prostredia. V projekte je momentálne zakomponovaný aj monitor na sledovanie srdcovej frekvencie, no tieto údaje momentálne nie sú používané na hlbšiu analýzu prostredia.

Namiesto analýzy celého prostredia sa vieme hlbšie zamerať na jednotlivé prvky v scéne a ako na človeka vplyvajú. Ktoré objekty sú pre neho zaujímavé či rušivé, kde jeho pohľad najčastejšie zotrva a aký majú tieto podnety vplyv na jeho fyziologickú reakciu.

V našom projekte teda spojíme sledovanie pohybu očí, tzv. *eyetracking* so srdcovou frekvenciou. Zameriame sa na získavanie dát z projektu Virtuálna terapia a ich následnú analýzu pre potreby psychologičiek pracujúcich na tomto projekte.

Tieto údaje pomôžu k hlbšiemu pochopeniu vplyvu prostredia na človeka, celkové vnímanie jednotlivých častí či konkrétny psychický stav účastníka experimentu. Môžu byť teda dôležitou zložkou pre ďalšiu analýzu a vylepšenie prostredia.

V nasledujúcich kapitolách si prejdeme dôležité informácie týkajúce sa projektu a samozrejme špecifikácie a návrh projektu. V kapitole Teoretický základ si predstavíme

základné prvky ako aj existujúci projekt Virtuálnej terapie a požiadavky na našu prácu. Kapitola Špecifikácia bude zameraná na podrobnejšie preskúmanie cieľov projektu a v kapitole Návrh sa pozrieme, ako tieto ciele dosiahnuť a aké technológie k tomu budeme potrebovať. Na záver zhodnotíme výsledky a funkčnosť systému v kapitole Výsledky.

# Kapitola 1

## Teoretický základ

V tejto kapitole si predstavíme základné technológie a terminológiu potrebnú k realizácii tohto projektu. Podrobné typy zariadení a ako sa budú jednotlivé časti teórie spájať, uvidíme v ďalšej kapitole. Na záver si ešte definujeme presné požiadavky a ciele tejto práce.

### 1.1 Virtuálna realita

Virtuálna realita (VR) nám dokáže sprostredkovať bežné aj nereálne zážitky. Vďaka hlavne zraku, no aj ostatným zmyslom, nás pár kúskov komplexnej technológie dokáže presvedčiť, že obraz, ktorý vidíme na obrazovke, nie je len zhluk pixelov, ale realita. Táto flexibilita preto umožňuje využitie VR v rôznych odvetviach od edukačného a výskumného až po zábavu či hry [2].

Hoci sú prístroje potrebné k napodobneniu reality často komplexné a drahé, táto technológia sa stáva čoraz dostupnejšou, čo iba posilňuje možnosti jej využitia. Náš systém virtuálnej reality sa bude skladať z *headsetu* s integrovaným *head-mounted displayom* (HMD), ktorý nám umožní stereoskopické zobrazenie a sledovanie pohybu hlavy v reálnom čase. Toto riešenie nám zabezpečí vysokú imerziu používateľa v prostredí. Pre ešte hlbšie vnorenie je v technickej zostave aj 7 HTC senzorov na trekovanie pohybu človeka, ktoré zabezpečujú správne zobrazenie avatara vo VR prostredí.

### 1.2 Eyetracking

*Eyetracking* je proces, pri ktorom zariadenie sleduje pohyb očí a dokáže tak detekovať smer pohľadu. Tento údaj nám priamo hovorí o tom, kam sa človek pozerá, a zariadenie potom mení tento neurčitý pojem na jednoznačné čísla. Na proces tohto výpočtu sa používa 3D vektor pohľadu zostrojený z oka subjektu v smere jeho pohľadu. Na výpočet hĺbky existujú rôzne prístupy. Výhodou 3D priestoru virtuálnej reality je, že eliminuje

potrebu tohto výpočtu, nakoľko všetky objekty v priestore majú definovanú presnú polohu a hĺbka pohľadu je tak jednoznačne určená bodom, kde sa vektor pohľadu pretne s objektom [3].

Existujú rôzne typy pohybu oka a preto sú tiež rôzne metódy na ich identifikáciu. Náš *headset* používa metódu *Video-oculography* (VOG). Tento spôsob je v dnešnej dobe najpoužívanejší a na určenie pohybu oka sleduje hlavne zreničku. *Headset*, ktorý je vybavený vsadenými kamerami, zaznamená video očí a analýzou jednotlivých snímok určí ich orientáciu. [4]

Vďaka týmto postupom nám systém pre *eyetracking* dokáže poskytnúť napríklad informácie ohľadom smeru pohľadu alebo objekt, na ktorý je používateľ v aktuálnom čase fixovaný. Existuje množstvo ďalších údajov, ktoré sa dajú pomocou tohto zariadenia získať, no tieto sú pre náš projekt najdôležitejšie.

### 1.3 Pohyb očí

Aby sme vedeli správne interpretovať údaje z *eyetrackera*, musíme zohľadniť rôzne typy pohybov očí. Článok „Eye Movement: Types and functions explained“ [5] ponúka krátke všeobecné zhrnutie tejto oblasti pre hlbšie porozumenie. My sa ale v tejto časti našej práce zameriame na hlavné typy, ktorými sú fixácie a sakády. Pohľad človeka sa skladá z neustáleho striedania týchto pohybov. Ako opisuje spomenutý článok, fixácia nastane, keď človek pozerá na jedno miesto a má relatívne ustálený pohľad. V tomto momente dochádza k získavaniu informácií zo zrakového vnemu. Sakáda je pohyb oka medzi fixáciami. Jej úlohou je dostať obraz na ústrednú jamku, *fovea centralis*, kde je pohľad najostrejší. Pri tomto pohybe je zrakové vnímanie potlačené. Smer sakády neurčuje len to, čo je vizuálne nápadné, ale hlavne, kde sa očakáva odmena. Užitočná informácia, ktorú mozog okrem iných faktorov vyhodnocuje aj na základe hladiny dopamínu v krvi [6].

Pre náš projekt budú dôležité hlavne fixácie. Pri tomto pohybe sa človek sústreďuje na konkrétny objekt a jeho vnímanie ho môže ovplyvniť. Práve to chceme vizualizovať a spojiť s údajmi srdcovej frekvencie, aby sme dostali komplexný obraz vplyvu objektov.

Ani pri fixácii ale nie je pohľad kompletne nehybný. Ako je napísané v už spomenutom článku, počas fixácie dochádza k pohybu oka nazývaného mikrosakáda. Je to krátky a veľmi rýchly pohyb očí, ktorý je normálnou a dôležitou súčasťou fungovania zraku. K mikrosakádam dochádza mimovoľne a neustále počas úmyselnej fixácie. Ich úlohou je udržiavať videnie ostré a aktívne [7].

Pre naše účely je ale zaznamenávanie mikrosakád zbytočné. Našou úlohou je zozbierať údaje pohľadu používateľa na základe objektov alebo ich častí. Pri mikrosakádach človek nevníma krátku odchýlku pohľadu a tento údaj tak nesúvisí so žiadnym

objektom. Keďže budeme vytvárať nástroj na vizualizáciu a analýzu pre odborníkov pracujúcich na projekte, záznamy ohľadom mikrosakád by boli máťúce a zbytočne by zahlcovali zozbierané údaje.

## 1.4 Srdcová frekvencia

Srdcová frekvencia (*heart rate*, v skratke HR) predstavuje počet úderov srdca za minútu a je základným ukazovateľom stavu kardiovaskulárneho systému. S HR úzko súvisí aj variabilita srdcovej frekvencie (*heart rate variability*, HRV), ktorá popisuje zmeny v časových intervaloch medzi jednotlivými údermi srdca. HRV je považovaná za citlivý ukazovateľ stavu nervového systému a odráža zmeny psychického stavu jedinca. Viaceré výskumy preukázali spojenie medzi mierou stresu a hodnotami HRV – nižšia variabilita srdcovej frekvencie býva spájaná so zvýšenou mierou stresu, zatiaľ čo vyššia HRV, teda dlhšie intervaly medzi údermi srdca, sú typické pre uvoľnený, pokojný stav organizmu [8]. Okrem bezprostredných podnetov je hodnota HRV ovplyvňovaná aj celkovým fyzickým a zdravotným stavom jednotlivca. Zahŕňa to jednak dlhodobé faktory, ako sú chronické ochorenia, výživa a úroveň fyzickej aktivity, ako aj krátkodobé vplyvy, napríklad kvalita spánku či psychická pohoda ovplyvnená medziľudskými vzťahmi [9].

## 1.5 Virtuálna terapia

Virtuálne prostredie môže mať dobrý vplyv na psychiku človeka. V posledných rokoch sa začal rozširovať pojem virtuálna terapia a bolo spravených viacero výskumov na efekt virtuálnej reality na človeka v oblasti psychologických zmien a jeho vnímanie virtuálneho sveta.

Virtuálny svet eliminuje hrozby toho skutočného a vytvára tak ideálne miesto pre ľudí s fóbiami. Práve interagovanie s virtuálnym svetom poskytuje ideálny základ pre expozičnú terapiu, keďže človek môže prísť do kontaktu so svojou fóbiou v bezpečnom virtuálnom svete [10].

Počas priebehu Virtuálnej terapie sa dajú jednoducho zaznamenávať rôzne fyziologické údaje, ako napríklad tep srdca, ktorý môže byť cennou informáciou pre terapeuta.

Okrem priamo merateľných hodnôt môže zaznamenávať aj reakcie pacienta. V tradičnej terapii sa musí psychológ spoliehať na slová pacienta a sám vyvodíť, čo ide pacientovi hlavou. Pri virtuálnej realite vie pozorovať jeho reakcie v čase, keď je vystavený virtuálnemu svetu a vie navigovať jeho správanie. Čo je obzvlášť dôležité pri liečbe fóbii [11].

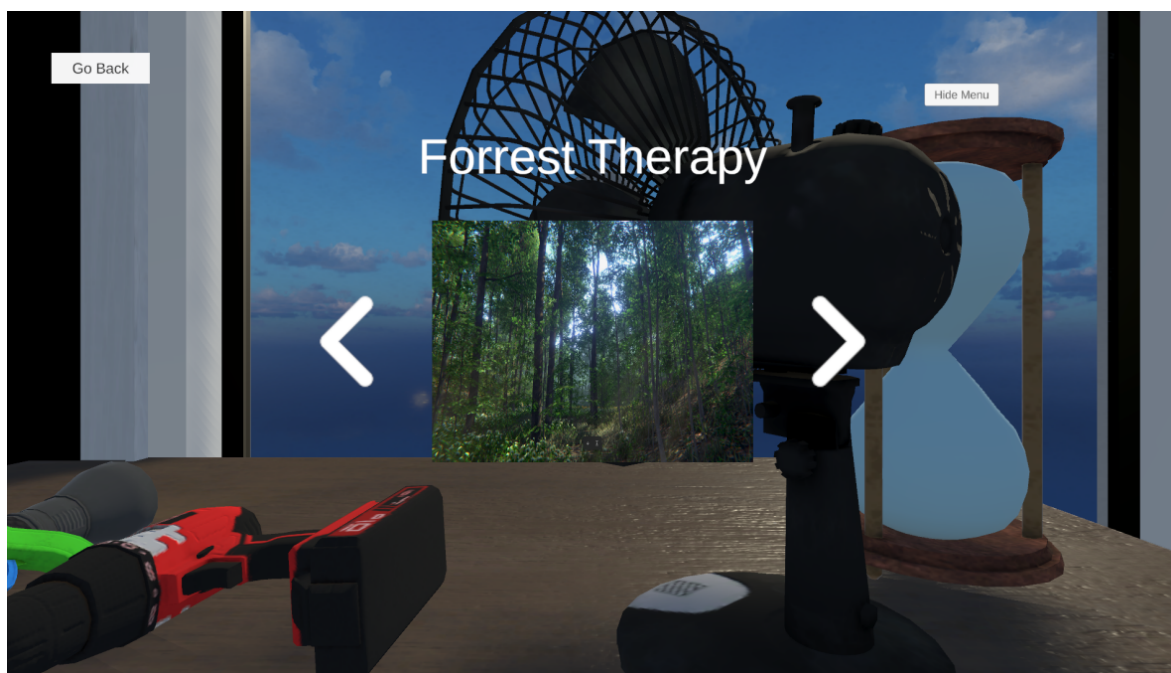
Naša virtuálna terapia prebieha v dvoch prostrediach. V lesnom prostredí, kde sa používateľ nachádza vo virtuálnom lese, a v mestskom prostredí, kde používateľ pozo-

ruje bežný ruch mesta. Obidve tieto prostredia boli taktiež predmetom výskumu „The effect of virtual reality forest and urban environments on physiological and psychological responses“ [12]. Výsledok tohto výskumu ukázal zmiernenie niektorých negatívnych pocitov v obidvoch týchto prostrediach.

Lesná terapia, ktorá je v popredí výskumov, má veľmi sľubné výsledky aj v oblasti depresívnych a úzkostných porúch. V článku [13], ktorý je prehľadom rôznych výskumov na túto tému, autori tvrdia, že lesná terapia má signifikantné výsledky na zlepšenie psychického stavu pacienta.

Ako sa píše v článku [14], ktorý sa zameria na celkový prehľad výskumov použitia VR terapie pre rôzne typy psychických porúch, tento prístup má sľubné výsledky aj v oblastiach, ktoré nie sú tak podrobne preskúvané, a preto sú ďalšie experimenty dôležitým krokom k úplnému pochopeniu výhod aj problémov spojených s týmto novým typom terapie.

Experiment Virtuálnej terapie na fakulte FSEV prebieha v samostatnej miestnosti, aby bol zážitok pre používateľa čo najmenej rušivý. Okrem potrebnej techniky je v miestnosti pre používateľa stolička, na ktorej počas priebehu virtuálnej terapie sedí. Zaručí sa tak jeho pohodlie aj správne zaobchádzanie s elektronikou, ktorú má počas celého procesu používateľ na sebe. Okrem hlavnej zložky výbavy, *headsetu* s displejom, na ktorom sa používateľovi premieta 3D virtuálne prostredie, je súčasťou aj 7 HTC *trackerov* pohybu a snímač tepovej frekvencie Polar H10. Snímač je cez Bluetooth pripojený k hlavnému zariadeniu, na ktorom je aplikácia pre VR spustená. Na obrázku 1.1 je ukážka úvodnej tréningovej miestnosti pre experiment.



Obr. 1.1: Tréningová miestnosť projektu Virtuálna terapia [1]

## 1.6 Aktuálny stav projektu

Keďže našou úlohou je doplniť existujúci projekt, využijeme už naprogramované aplikácie a pôvodnú techniku. Budeme pracovať s *headsetom* HTC Vive Pro a snímačom tepovej frekvencie Polar H10. Nakoľko celý systém využíva aj HTC *trackery* a ovládače, ktoré sme nemali k dispozícii, rozhodli sme sa naše riešenie integrovať do menšieho projektu zahŕňajúceho len scénu lesa na fakultnom *headsete*, ktorý je rovnaký model ako používajú pri experimente, bez *trackerov* a *ovládačov*. Do pôvodného systému sa naše riešenie bude implementovať až v budúcej práci, keď skončí aktuálne prebiehajúci výskum.

Využijeme ale Tobii *eyetracking*, ktorý je súčasťou HTC Vive Pro *headsetu*, no doteraz nebol spustený, nakoľko projekt nemal implementovanú funkciu *eyetrackingu*.

Základná scéna, s ktorou budeme pracovať, je scéna lesa (obrázok 1.2), navrhnutá v Unity. Rovnako teda budeme pokračovať v práci v tomto hernom engine a nakoľko to bude možné, budeme sa snažiť nemeniť pôvodný projekt, aby bola implementácia našej práce čo najjednoduchšia.



Obr. 1.2: Scéna lesa z projektu Virtuálnej terapie [1]

Okrem pôvodného projektu v Unity využijeme aj aplikáciu na pripojenie snímača tepovej frekvencie. Keďže sa zariadenie Polar H10 nevie priamo pripojiť k Unity, je nutné spraviť tento proces v externej aplikácii. Pre zjednodušenie práce a prirodzenejšiu implementáciu využijeme funkcie a Unity objekty existujúceho projektu pripravené pre spárovanie snímača.

## 1.7 Ciele projektu

Na záver tejto kapitoly predstavíme základnú úlohu, ktorú naša práca zohráva v rámci celého výskumu. Cieľom je poskytnúť psychologičkám zapojeným do projektu Virtuálnej terapie nástroj na hlbšiu analýzu a porozumenie vplyvu jednotlivých objektov v scéne na účastníkov experimentu. Výskum prezentovaný v článku [15] ukazuje, že ľudí upokojuje tečúca voda a sledovanie šumu stromov. V našej práci sa preto snažíme navrhnúť systém, ktorý tieto preferencie a ich účinky na človeka skúma podrobnejšie. Virtuálnu scénu nebudeme vnímať ako celok, ale rozdelíme ju na konkrétne objekty (napr. korunu stromu či veveričku), v súvislosti s ktorými budeme zaznamenávať údaje o pohľadoch účastníkov a ich srdcovej aktivite. Tieto dáta následne vizualizujeme tak, aby bolo možné analyzovať vplyv jednotlivých oblastí záujmu na fyziologické a pozorovacie správanie účastníkov.

# Kapitola 2

## Špecifikácia

Predtým ako sa pustíme do návrhu riešenia, je dôležité definovať ciele, ku ktorým má naša práca smerovať. Našou hlavnou úlohou je zber dát a následná vizualizácia so základnou analýzou údajov. Dáta budeme zbierať z dvoch zdrojov, ktorými sú *headset s eyetrackingom*, ktorý nám poskytne informácie ohľadom pohľadu používateľa, a snímač tepovej frekvencie, ktorý bude riadiť dáta týkajúce sa srdcovej funkcie. V procese analýzy sa zameriame na spojenie týchto údajov a extrakciu nových dátových záverov vzniknutých ich kombináciou.

Dôležitým medzi krokom je vizualizácia dát. Aplikácia by mala byť schopná ukázať niektoré súvislosti a uľahčiť tak prehľad a komplikovanosť surových dát, no jej hlavnou úlohou je odprezentovať získané dáta pre potreby psychologičiek pracujúcich na experimente. Komplexná analýza a výsledky vyplývajúce zo zozbieraných dát budú ponechané na strane experimentátora a sú nad rámec tejto práce.

### 2.1 Zber dát vo VR

V rámci virtuálneho prostredia vytvoreného v Unity bude realizovaný zber údajov o smere pohľadu používateľa pomocou zariadenia HTC Vive Pro s technológiou Tobii. Tieto údaje budú monitorované v dvoch formách:

- **Textové dáta** - Názvy objektov a k nim priradené tagy spolu s časovými údajmi. Objekt v kontexte našej práce vnímame ako oblasť záujmu (AOI). Sú to časti scény, ktoré chceme ďalej analyzovať, napr. koruna stromu, veverička, skupina motýľov. Časová značka nám umožní ich následné prepojenie s dátami zo snímača srdcovej frekvencie. Pri zaznamenávaní údajov o pohľade sa zameriavame na jednotlivé epizódy vizuálnej fixácie na objekty, pričom každá takáto epizóda je zaznamenaná iba raz – s definovaným časom začiatku a konca, a to v momente, keď sa objekt fixácie zmení. Nezaznamenávame každý jednotlivý *frame*,

počas ktorého sa pohľad nachádza na objekte, aby sa predišlo redundancii a nadmernému objemu dát. Tieto textové dáta budú uložené vo formáte CSV, ktorý umožní jednoduché spracovanie a ďalšiu prácu.

- **Vizuálne dáta** - Ide o obrazové výstupy vo forme snímok obrazovky (*screenshottov*) zachytávajúcích stav scény v danom čase s bodom, ktorý identifikuje pohľad očí. Tieto vizuálne dáta slúžia ako kontext k údajom o srdcovej frekvencii a umožňujú tak neskoršiu interpretáciu toho, ako scéna v danom momente vyzerala a čo sa v nej nachádzalo v zornom poli používateľa. Každý *screenshot* je uložený s presnou časovou značkou, čo umožňuje jeho prepojenie s HR dátami. Tieto údaje sú zaznamenávané v dostatočnom množstve, aby tvorili kompletný obraz používateľovej fixácie a dokázali jasne zobrazit časy, ktoré boli v rámci srdcovej frekvencie signifikantné, no zároveň musí byť objem všetkých vizuálnych dát dostatočne kompaktný, aby bolo možné uložit celé sedenie Virtuálnej terapie a súbor nezabral príliš veľké množstvo pamäte. Formát súboru bude tiež zodpovedať týmto požiadavkám.

Obidva typy údajov budú uložené v jednom súbore, prislúchajúcom k jednému sedeniu. S týmito dátami bude priamo pracovať aplikácia na vizualizáciu a analýzu dát. Je teda nutné zabezpečiť kompatibilitu medzi týmito typmi.

## 2.2 Snímanie tepovej frekvencie

Snímanie tepovej frekvencie prebieha prostredníctvom externej aplikácie, ktorá bola vytvorená v rámci pôvodného projektu. Táto aplikácia spáruje senzor Polar H10 pomocou bluetooth technológie k počítaču, na ktorom beží, a na štandardný výstup vypisuje údaje prijímané zo senzora, teda tep používateľa. Zmena, ktorú bolo nutné spraviť, bol identifikátor zariadenia, ktorý bol v programe zadaný ako textový údaj. Keďže sme pracovali s rovnakými modelmi, no nie rovnakými zariadeniami, identifikátor sme pre naše potreby zmenili na náš Polar H10.

V pôvodnom projekte bola táto aplikácia spustená rovno v Unity a údaje vypisovala na obrazovku v časti pre psychologičky. Súčasťou systému je tiež Unity skript na zapisovanie dát tepovej frekvencie do CSV súboru. Tieto dáta sú spárované s časovými údajmi, so systémovým časom aj časom od začiatku spustenia aplikácie. Na zníženie výpočtovej záťaže systému budeme využívať tieto existujúce skripty a pracovať s dátami vo formáte, aký nám ponúkajú. V našom projekte budú tieto údaje využité na synchronizáciu s údajmi o pohľade používateľa a vizuálnymi dátami, čím vznikne komplexný dataset umožňujúci analýzu súvislostí medzi fyziologickou reakciou a vizuálnym podnetom.

## 2.3 Vizualizácia

### 2.3.1 Vizualizácia dát z eyetrackera

Vizualizácia *eyetrackingových* dát je dôležitý nástroj na analýzu pozornosti používateľa. Táto téma je rozsiahla a poskytuje veľa rôznych metód, ktoré ponúkajú odlišné analytické možnosti. Výber spôsobu vizualizácie závisí od charakteru skúmaných podnetov aj informácií, ktoré z týchto dát potrebujeme získať. Článok „State-of-the-art of visualization for eye tracking data.“ [16], z ktorého budeme v tejto časti vychádzať, ponúka celkový prehľad tejto témy.

Údaje sa bežne interpretujú na základe bodov (*point-based*) alebo oblastí záujmu (*area of interest*, AOI-based). Point-based prístup zaznamenáva bod pohľadu a priebeh pohybu v čase a priestore. Neukladajú sa žiadne doplnujúce informácie o objekte či oblasti. AOI-based prístup sa naopak zameriava práve na tieto informácie. Pred zbieraním dát sa vyznačia zaujímavé oblasti a pri ukladaní údajov sa tak nezaznamenáva surová poloha bodu pohľadu, ale práve informácie ohľadom týchto oblastí. Ako dlho sa človek pozeral na konkrétnu oblasť a prechody medzi nimi.

V našom projekte budeme využívať dva rôzne spôsoby vizualizácie. Jeden bude na základe dát z HR monitora a druhý na základe dát z *eyetrackera*.

V prvom, použijeme *point-based* prístup. V praxi sa využívajú rôzne vizualizačné techniky, no jedny z najznámejších sú *heatmapy*, ktoré zobrazujú celkovo preferované miesta fixácie a trajektórie pohľadu (*gaze plots*), ktoré vedú sprostredkovať postupnosť pohybov očí [17]. Vzhľadom na charakter nášho 3D prostredia, ktoré má 360°, by boli *heatmapy* neefektívne. Rovnako by bolo spojenie týchto dát s HR údajmi zložité a vo výsledku ťažko čitateľné. Preto sme sa rozhodli pre vizualizáciu podobnú *gaze plots*, s istými úpravami pre lepšie spojenie s HR dátami. Nakoľko pre nás informácie o jednotlivých presunoch medzi fixáciami nie sú dôležité, budeme zobrazovať len jeden bod pohľadu a to na základe časovej značky. Budeme zobrazovať údaje vždy len z jedného konkrétneho času. Tento časový údaj bude prepojený s konkrétnym údajom z monitora srdcovej frekvencie. Na základe danej HR hodnoty sa bude dať zobrazit scéna orientovaná v smere pohľadu, teda pohľad používateľa, v čase, kedy bola táto hodnota nameraná. Na tomto obrázku bude vyznačený bod pohľadu.

Pri druhom spôsobe vizualizácie zameranom na údaje z *eyetrackera* budeme využívať *AIO-based* prístup. Budeme zbierať údaje ohľadom pohľadu na jednotlivé objekty v scéne. Kedy a ako dlho bol na ne používateľ fixovaný. Tento prístup, rovnako ako *point-based*, má rôzne typy vizualizácií. Pre našu potrebu spojenia údajov o pohľade s HR dátami nebudeme využívať žiadnu metódu spomenutú v článku. Použijeme ale podobný prístup ako pri technike *scraf plot* (vrstvomý časový graf), zameriame sa na objekty a čas, kedy bol na ne používateľ fixovaný. Miesto farebne zaznačených úsekov

budeme reprezentovať údaj o pohľade na objekt ako záznam v tabuľke. Toto zobrazenie nám umožní jednoduché prepojenie s dátami srdcovej frekvencie a teda pomôže s analýzou fyziologických reakcií používateľa v momentoch vizuálnej pozornosti na určité objekty.

### 2.3.2 Vizualizácia srdcovej frekvencie

Ako bolo spomenuté v predošlej sekcii, aplikácia bude mať dve hlavné časti:

- **Vizuálne zobrazenie** - Toto zobrazenie so *screenshotmi* bude mať jednoduchý interaktívny graf zobrazujúci fyziologické údaje. Jednotlivé hodnoty tepovej frekvencie budú namapované na časový záznam a umožnia tak jednoduché prepínanie medzi zábermi scény rozšírenými o údaje z *eyetrackera*.
- **Štruktúrované zobrazenie** - V tejto časti budú dáta srdcovej frekvencie zobrazované na základe údajov z *eyetrackera*. Ku každému záznamu z tabuľky budú spočítané príslušné hodnoty týkajúce sa fyziologických zmien na základe časového úseku, kedy bol používateľ fixovaný na daný objekt, prípadne typ objektu. Keďže budeme vykonávať aritmetické operácie nad zaznamenanými hodnotami, toto zobrazenie je limitované a môže strácať niektoré údaje, ako napríklad maximálnu hodnotu či rýchlosť nárastu. Tieto údaje ale zostanú zachované vo Vizuálnom zobrazení a v tabuľke sa zameriame na hlbšie súvislosti medzi objektami a základnú analýzu.

## 2.4 Analýza

Analýza bude prebiehať v rámci štruktúrovaného zobrazenia. Jednoduché výpočty nad údajmi zo senzora srdcovej frekvencie nám umožnia znázorniť rôzne aspekty fyziologických reakcií používateľa na jednotlivé objekty v scéne. Interpretácia výsledkov bude ponechaná na odborníkoch z oblasti psychológie, ktoré spolupracujú na projekte Virtuálnej terapie. Našou úlohou bude vizuálne zvýrazniť vzťahy medzi zozbieranými údajmi s cieľom sprístupniť prehľadnejšiu a rýchlejšiu analýzu scény a jej pôsobenie na účastníka. Hoci sú dáta prezentované v tabuľkovej podobe, niektoré stĺpce budú obsahovať odvodené hodnoty, ktoré zodpovedajú vlastnostiam priebehu grafu (napr. rýchlosť nárastu alebo lokálne maximum). Budeme sa zaoberať výlučne výpočtami, ktoré sú relevantné pre psychologickú oblasť.

# Kapitola 3

## Návrh

V tejto časti je popísaný návrh technického riešenia systému, ktorého hlavnou úlohou je zber, spracovanie a vizualizácia dát získaných počas interakcie používateľa s virtuálnym prostredím. Návrh nadväzuje na špecifikáciu a požiadavky opísané v predchádzajúcej kapitole a zameriava sa na popis architektúry systému, použitých technológií a spracovanie jednotlivých typov údajov. Rovnako v tejto časti popíšeme odôvodnenie pre kľúčové návrhové rozhodnutia a vysvetlíme, ako spolu jednotlivé komponenty projektu spolupracujú.

### 3.1 Technológia

Technológia tvorí kostru akéhokoľvek infromatického projektu. Od jej výberu záleží každý ďalší krok a mení čisto teoretické požiadavky a návrhy architektúry na uskutočniteľný plán práce.

V našom projekte sa opierame o komponenty ako vývojová platforma Unity, rozhranie SteamVR, *headset* pre virtuálnu realitu HTC Vive Pro spolu so systémom Tobii XR SDK a softvérový balík SRanipal. Z programovacích jazykov sme pracovali s C# a Python. V ďalších častiach si podrobnejšie predstavíme jednotlivé systémy a dôvody, prečo boli vybrané do našej práce.

#### 3.1.1 Unity

Unity je populárny herný engine, ktorý bol vytvorený na vytváranie hier naprieč rôznymi platformami. Projekt virtuálnej terapie využíva funkcie vytvárania a renderovania 3D prostredí a umožňuje nám tak prácu s virtuálnou realitou. Nám tento systém poskytol nástroje na ďalšiu prácu s vytvorenými scénami a spoluprácu medzi ostatnými využitými technológiami.

Dôležitým nástrojom pre našu prácu bol komponent **collider**. Collider slúži na definovanie fyzického tvaru primárne pre potreby kolízií medzi objektami v scéne. Sú to

neviditeľné hranice, ktoré definujú virtuálny priestor, ktorý objekt zaberá. Ich tvary môžu byť komplexné a dokonale kopírovať tvar modelu, tzv. *mesh collider* alebo jednoduchšie, ako sú základné geometrické tvary, teda napríklad *box collider* (kocka) alebo *capsule collider* (kapsula). Collider môže byť okrem detekcie fyzických zrážok použitý aj na sledovanie objektu, na ktorý sa používateľ pozerá - kolízia medzi *raycastom* pohľadu, lúčom zostrojeným z oka v smere pohľadu, a collidrom objektu.

Prostredie Unity používa programovací jazyk C#. C# skripty sa pripájajú k jednotlivým objektom v scéne ako komponenty a umožňujú riadiť ich správanie v reálnom čase. V rámci tohto projektu sme tento jazyk používali hlavne na získavanie a ukladanie dát.

### 3.1.2 SteamVR

SteamVR je softvérová a hardvérová platforma vyvinutá spoločnosťou Valve. Poskytuje nám rozhranie medzi *headsetom* a aplikáciou Unity, pričom inicializuje a spravuje pripojené zariadenia. Pomocou snímania pozície a rotácie zariadenia v priestore riadi interakciu používateľa s virtuálnym prostredím v reálnom čase.

### 3.1.3 HTC Vive Pro

HTC Vive Pro je *headset* pre virtuálnu realitu s vysokým rozlíšením a širokým zorným poľom, vďaka ktorému poskytuje používateľovi pohlcujúci zážitok z virtuálneho prostredia. Naš systém využíva rozšírenú verziu tohto zariadenia **HTC Vive Pro Eye**, ktorá je rozšírená o systém *eyetracking* od spoločnosti Tobii.

### 3.1.4 Tobii XR SDK

Tento softvérový vývojový balík od spoločnosti **Tobii** poskytuje údaje týkajúce sa polohy očí, smeru pohľadu a ďalších parametrov vizuálnej pozornosti používateľa. Pre Unity prostredie obsahuje tento balík aj tzv. *prefabs*, predpripravené komponenty, ktoré slúžia na jednoduchú integráciu *eyetrackingu*. V našom projekte sme využívali hlavne komponenty týkajúce sa *Gaze Interaction* - interakcie na základe pohľadu, ktorá funguje na princípe *raycastingu*, teda lúčov zostrojených z oka používateľa, ktoré pri kolízii s objektom detekujú pohľad na daný objekt.

### 3.1.5 SRainpal

SRainpal, softvérová knižnica od spoločnosti **HTC**, spracováva údaje zo senzorov integrovaných v *headsete* aj senzorov končatín a posúva ich systému na ďalšie spracovanie. Slúži tak ako sprostredkovateľ medzi hardvérom HTC Vive Pro a softvérovými

nástrojmi ako Tobii SDK. Pre správne fungovanie *eyetrackingu* je teda nutné, aby aplikácia **SRanipal Runtime** bola spustená v pozadí. Súčasťou tohto nástroja je aj kalibrácia, ktorá nastaví správne fungovanie systému pre každého užívateľa na základe charakteristík ich očí.

### 3.1.6 Polar H10

Polar H10 je hrudný snímač srdcovej frekvencie, ktorý patrí medzi spoľahlivé a presné zariadenia na monitorovanie HR. V porovnaní s optickými senzormi ponúka vyššiu presnosť vďaka elektrickému snímaniu srdcových impulzov pomocou elektródy, umiestnenej priamo na hrudi. Zariadenie komunikuje pomocou technológie Bluetooth, čím umožňuje jeho integráciu do rôznych nástrojov. Nastaviteľný a pružný hrudný pás je ideálny pre výskum Virtuálnej terapie, nakoľko tak ponúka komfort a správne snímanie funkcií účastníka. V našom projekte tento prístroj slúži na monitorovanie HR počas interakcie užívateľa s prostredím VR. Tieto údaje sa potom zaznamenávajú a tvoria dôležitú súčasť celkovej analýzy.

### 3.1.7 Python

Pre spracovanie a vizualizáciu dát bol vybraný vysoko-úrovňový programovací jazyk Python, a to predovšetkým pre jeho jednoduchosť, prehľadnosť a širokú podporu v oblasti dátovej analýzy. Okrem toho nám ponúka rozsiahle množstvo knižníc, ktoré nám umožnia pracovať bez nutnosti implementovať zložité funkcie od základov.

Na tvorbu užívateľského rozhrania sme využili knižnicu **PyQt**, ktorá je Python verzia populárneho frameworku Qt, rozsiahleho systému na tvorbu multiplatformových GUI aplikácií. Tento systém ponúka vysokú mieru prispôbitelnosti a okrem rozsiahleho súboru widgetov umožňuje definovať vlastné komponenty. PyQt dodalo užívateľskému rozhraniu našej aplikácie jednoduchý a moderný vzhľad a personalizáciu pre naše konkrétne potreby v rámci prepojenia jednotlivých objektov grafického rozhrania.

Základná knižnica **NumPy**, určená na prácu s viacrozmernými poľami a rozsiahlymi numerickými výpočtami, bola základným prvkom pre spracovanie dátových štruktúr a ich vizualizáciu.

## 3.2 Komponenty

V tejto časti si predstavíme nosné komponenty našej práce a ich funkciu v systéme. Tiež spomenieme ich základné prvky, dôvody ich výberu a ako spolu komunikujú závislé časti.

Hlavné komponenty v Unity aplikácii:

- **TobiiXR\_Initializer**

GameObject, ktorý je do scény vložený ako predpripravený komponent (*prefab*) zo softvérového balíka Tobii XR SDK, slúži ako inicializačný prvok *eyetrackingového* systému. Jeho úlohou je zabezpečiť správne spustenie a konfiguráciu potrebných nástrojov, ktoré umožňujú získavanie údajov o pohľade používateľa v reálnom čase.

- **EyetrackingDataExporter**

Tento komponent je GameObject v scéne, v ktorej prebieha *eyetracking*. Základným komponentom tohto objektu je skript **EyetrackingDataExportScript**, v ktorom prebieha proces zaznamenávania a ukladania dát z HTC Vive Pro pomocou TobiiXR. Tento systém nám poskytuje funkcie na detekciu kolízie pohľadu používateľa a objektov v scéne ako je ukázané vo funkcii 3.1.

---

```
bool GetGazeHitInformation(out RaycastHit hit)
{
    var gazeData = TobiiXR.GetEyeTrackingData(TobiiXR_TrackingSpace.World);
    Vector3 gazeDirection = gazeData.GazeRay.Direction;

    Vector3 gazeOrigin = GameCamera.transform.position;

    Ray gazeRay = new Ray(gazeOrigin, gazeDirection);

    return Physics.Raycast(
        gazeRay,
        out hit,
        raycastLength,
        LayerMask.GetMask("Default"),
        QueryTriggerInteraction.Collide
    );
}
```

---

Algoritmus 3.1: Získanie informácie o zasiahnutom objekte na základe pohľadu používateľa

Exportovanie grafických údajov - *screenshot* aktuálnej časti scény, ktorú používateľ vidí, prebieha v periodických intervaloch. Viac o nastavení dĺžky intervalov sa nachádza v časti 3.4.6. V každom intervale sa do renderovacej textúry, ktorá je do triedy predaná ako vstupný parameter prekopíruje obsah textúry kamery,

ktorá sa zobrazuje v *headsete*. Do tejto snímky je nasledne zaznamenaný užívateľov pohľad ako farebný bod a textúra je exportovaná do súboru „images“, ktorý sa nachádza v súbore zadanom vo forme cesty ako parameter `dataDirPath`. Ak tento súbor neexistuje alebo je prázdny, program ho vytvorí, prípadne vymaže jeho obsah.

Textové súbory sa pre jednoduchosť exportujú len ak sa informácia o fixácii pohľadu používateľa zmení. V momente ako funkcia *Physics.Raycast* vráti iný objekt ako bol uložený z predchádzajúceho *framu*, do textového súboru sa uloží nový záznam s názvom, tagom a začiatočným a konečným časom fixácie.

- **HRDataExporter**

Tento komponent zodpovedá za zbieranie a ukladanie dát z monitora srdcovej frekvencie. Zbieranie údajov prebieha v skripte `StreamExternalProcessOutput`, ktorý pomocou objektu triedy `Process` spúšťa externú aplikáciu na pripojenie HR monitora. Nasledne sleduje výstup a skript, ktorý spúšťa tento program, `UpdateLogText`, ukladá výsledok do komponentu typu `TextMeshProUGUI`. Odtiaľ si ho v periodických intervaloch zaznamenáva trieda v skripte `CSVWriter` a zapisuje dáta do súboru aj s časovými údajmi. Tento proces prebieha v pôvodnom projekte pre zobrazenie srdcovej frekvencie v časti pre psychologičky. Využijeme teda tento fungujúci proces a použijeme dáta, ktoré sa už zbierajú.

Skript `StreamExternalProcessOutput`, `UpdateLogText` a `CSVWriter` sú súčasťou pôvodného projektu.

Hlavné komponenty Python aplikácie:

- **FolderPickerApp**

Tento komponent je vlastným používateľským widgetom a dedí z triedy **QWidget**, základnej triedy všetkých grafických prvkov v knižnici `PyQt`. `FolderPickerApp` slúži ako úvodné okno používateľského rozhrania, kde je možné vybrať adresár s dátami na vizualizáciu. V tomto kroku tiež prebieha kontrola selektovaného adresára a všetkých potrebných súborov, ktoré musí obsahovať pre správny beh aplikácie.

- **data\_processing.py**

Tento súbor obsahuje dve triedy **MainDirClass** a **DataClass**, a je zameraný na načítanie a spracovanie údajov. Rovnako tak ponúka funkcie zamerané na extrakciu konkrétnych informácií alebo dát pre potreby ostatných súborov.

- **TableTab**

TableTab je trieda dediaci z **QWidget** a tvorí jednu z hlavných častí aplikácie, štruktúrované zobrazenie dát v rámci vizualizácie. Prezentuje údaje ako tabuľku s možnosťou pre rôzne usporiadanie alebo triedenie dát do konkrétnych skupín, ktorými sú *Objects* (zjednotí všetky záznamy podľa názvu objektu), *Tags* (zjednotenie na základe tagu) a *All* (zobrazenie všetkých údajov).

- **GraphTab**

Trieda GraphTab, druhá hlavná časť aplikácie, rovnako dedí z **QWidget** a obsahuje funkcie pre grafické zobrazenie zozbieraných údajov. Na ľavej strane okna zobrazujú HR dáta ako interagovateľný graf. Kvôli veľkému množstvu hodnôt sa vždy zobrazuje len časť grafu a posúvaním sa vie používateľ dostať k inému časovému úseku. Klikaním sa zas prepína aktuálne zobrazený čas záznamu - *screenshot* vyobrazený na pravej časti obrazovky. Pre lepšiu prehľadnosť sa okrem obrázka zobrazujú aj písomné informácie - *čas*, *srdcová frekvencia*, *objekt fixácie pohľadu*.

## 3.3 Interná reprezentácia údajov

### 3.3.1 Priechinok s grafickými údajmi

Hlavnou úlohou súborov v našom projekte je predanie dát z časti zberu údajov prebiehajúcej v Unity do aplikácie napísanej v Pythone, ktorá sa stará o spracovanie a vizualizáciu. Pre prehľadnosť a flexibilitu je priechinok pre tieto údaje zadávaný ako nastaviteľný parameter v oboch programoch, pričom v python aplikácii je možný výber cesty k súboru pre otvorenie počas behu programu.

Priechinok ukladá údaje vždy práve k jednému sedeniu Virtuálnej terapie. Tieto sedenia majú štandardne dĺžku 30 minút.

V priechinku images sú uložené všetky *screenshoty* vo formáte JPEG. Tento formát sa vzhľadom na požiadavky ukázal pre náš projekt ako najlepšia možnosť. Vzhľadom na charakter grafických záznamov scény nám nejde o najkvalitnejší obrázok. Psychologičky pracujúce na výskume tieto scény poznajú a detaily pre nás nie sú také podstatné ako udržanie množstva potrebnej pamäte na nižšej úrovni. Preto je pre nás vhodnejší formát JPEG, ktorý automaticky ukladá komprimovaný záznam.

Názov obrázkov je automaticky zadávaný podľa aktuálneho systémového času (formát h:mm:ss) pri ich exporte. Takto sa zaručí jedinečnosť názvov a správne spojenie s dátami srdcovej frekvencie.

### 3.3.2 Dátový model súboru pre textové eyetracking dáta

Textové záznamy z HTC Vive Pro, fixácie pohľadu používateľa sú zaznamenané v súbore "data". Štruktúru tohto súboru ukazuje tabuľka 3.1.

object_name	object_tag	start_time	end_time
Tree1	tree	09:05:38.02	09:06:04.38

Tabuľka 3.1: Ukážka štruktúry CSV súboru so záznamom fixácie

Nazov a tag objektu sú priamo zapísané hodnoty z GameObject v Unity. Časové značky *start\_time* a *end\_time* sú systémový čas vo formáte *hh:mm:ss.ff* pre správne párovanie s ostatnými dátami.

### 3.3.3 Dátový model súboru pre HR dáta

Textový záznam z monitora srdcovej frekvencie je uložený v súbore "hr\_data". Štruktúru tohto súboru zobrazuje tabuľka 3.2.

system_time	therapy_time	heart_rate
09:48:03	00:00:32	63

Tabuľka 3.2: Ukážka štruktúry CSV súboru so záznamom o srdcovej frekvencii používateľa

Každý záznam sa skladá zo *system\_time*, ktorý zaznamenáva systémový čas používaný na spojenie dát z *eyetrackera*, *therapy\_time*, označujúci čas od začiatku intervencie a *heart\_rate*, hodnota srdcovej frekvencie v danom čase.

Tento súbor je vytváraný programom z pôvodného projektu a jeho štruktúra bola zachovaná.

## 3.4 Procesy

V tejto časti si prejdeme celý proces našej práce a všetky jeho prvky. Jednotlivé procesy sú rozdelené do logických častí a budeme ich popisovať chronologicky pre zachovanie prehľadnosti.

### 3.4.1 Inicializácia

Prvým krokom celkového procesu je spustenie potrebných aplikácií. Aplikácie SteamVR a SRanipal musia byť spustené pred zapnutím projektu Virtuálnej terapie v programe

Unity. SteamVR sa automaticky spojí s pripojeným zariadením *headset*, v našom prípade HTC Vive Pro. Nepovinným, no odporúčaným krokom je kalibrácia *eyetrackera* na konkrétne črty používateľa, ktorá je prístupná z domovskej stránky aplikácie SteamVR.

Pri spustení VR dôjde k inicializácii *eyetrackingovej* časti *headsetu* pomocou komponentu Tobii, ktorý je popísaný v časti Komponenty. Systém by mal v tomto momente byť schopný registrovať polohu a natočenie hlavy užívateľa rovnako ako smer jeho pohľadu. Používateľ by mal vidieť scénu lesa natočenú podľa polohy svojej hlavy. *Eyetrackingová* súčasť programu sa v *headsete* nezobrazuje, aby nebolo v prostredí nič rušivé a používateľ sa mohol sústrediť na zážitok z virtuálnej reality.

Monitor srdcovej frekvencie Polar H10 je tiež spárovaný pri spustení Unity projektu, pomocou externej aplikácie **bluetoothHeartRate**. Ak tento proces prebehol bez problémov, v časti pre psychologičky sa zobrazí aktuálna hodnota HR. Keďže v našom projekte sme pracovali len so scénou lesa, tento údaj sa automaticky nezobrazí. Podmienkou fungovania sledovania HR je správne nasadenie senzora. Používateľ musí mať pás na hrudi správne nasadený.

### 3.4.2 Zber dát

**Datá z eyetrackera:** Pri behu VR sa aplikuje proces zberu dát. Komponent `EyetrackingDataExportet` v každom frame kontroluje, s akým objektom je pohľad používateľa v kolízii. Funkcia `Raycast` nám vráti `GameObject`, s ktorým sa lúč (*ray*) stretol ako s prvým, vynímajúc objekty, ktoré sú v predošlých krokoch nastavené ako ignorované. Ak sa tento objekt zhoduje s objektom, ktorý si program pamätá z minulého *framu*, funkcia skončí a pokračuje v normálnom behu bez ďalších dodatočných krokov. Ak sa tieto objekty nezhodujú, funkcia vytvorí a uloží záznam do súboru nastaveného formou cesty v parametre `dataDirPath`, podľa štruktúry opísanej v časti Dátový model súboru pre textové eyetracking dáta.

Pri zbieraní grafických dát sa tok funkcie riadi periodicky podľa času, aby tieto záznamy pokrývali celý chod sedenia a dodávali tak kompletné informácie ako kontext pre HR dáta. V každom intervale sa spustí funkcia, ktorá okopíruje pixely kamery používateľovej obrazovky a pomocou dát z *eyetrackera* sprostredkovaných systémom Tobii do obrázka farebne zaznačí pohľad používateľa. Následne sa táto textúra uloží ako obrázok vo formáte JPEG s názvom označujúcim systémový čas záberu.

**Datá z HR monitora:** Zároveň s procesom pre zber dát z *headsetu* beží aj zber dát z HR monitora. Skript v Unity scéne pripojí externú aplikáciu, ktorá sa cez technológiu bluetooth spáruje s HR monitorom Polar H10. Počas celého sedenia prebieha komunikácia medzi týmito aplikáciami a hodnoty sa zapisujú ako CSV súbor s časovými značkami.

Tento proces je súčasťou pôvodného projektu a kvôli zachovaniu kompatibility sme jeho fungovanie nemenili.

### 3.4.3 Načítanie dát v python aplikácii

Po skončení sedenia Virtuálnej terapie je náš systém schopný vizualizovať zozbierané dáta. Prvým krokom je spustenie python aplikácie a zvolenie správneho súboru. Aplikácia má funkciu zapamätania si cesty posledného otvoreného priečinku pre urýchlenie práce. Kontrola potrebných priečinkov a súborov rozhodne o možnosti pokračovania v ďalších krokoch. Pri nesplnení požiadaviek je užívateľ upozornený na chýbajúci alebo nesprávny obsah. V opačnom prípade sa dáta načítajú do triedy **DataClass**. Začiatok merania sa vypočíta ako najskorší čas spomedzi údajov z HR monitora a eyetrackera. Aplikácia potom zobrazuje všetky časové údaje ako relatívne vzhľadom na začiatok merania, čo zjednoduší čitateľnosť prezentovaných dát.

### 3.4.4 Vizualizácia dát

Finálnym krokom, ktorý odprezentuje výsledky našej práce, je vizualizácia dát. Ako bolo popísané v predchádzajúcich častiach, vizualizácia je rozdelená na dve zobrazenia. V tejto časti si podrobnejšie ukážeme proces každej z nich.

**Grafické zobrazenie:** V tomto zobrazení sa nachádza graf zobrazujúci HR dáta a príslušný *screenshot* k označenej hodnote. Túto hodnotu znázorňuje zvislá čiara v grafe a používateľ ju vie ľubovoľne presúvať podľa svojej potreby. Hlavným zámerom je vizualizovať dáta srdcovej frekvencie a umožniť rýchly prístup k jednotlivým zobrazeniam scény a pohľadu užívateľa v danom momente. Pre dôležité hodnoty akými sú napríklad maximá či prudké zmeny v srdcovej frekvencii je možné sa na ne ihneď pozrieť a získať grafický kontext pre ďalšiu analýzu a zhodnotenie pôsobenia jednotlivých prvkov prostredia.

Okrem zmeny zobrazovaného *screenshotu* sa na obrazovke vypíšu textové hodnoty. Z grafu sú to časová hodnota a hodnota HR a z obrázka je to názov objektu. Všetky tieto dáta sú už zobrazené graficky, tento údaj má byť len pre rýchly prístup k číslam a lepšie upresnenie pri nerozhodných či nečitateľných situáciách.

**Štruktúrované zobrazenie:** Toto zobrazenie prezentuje dáta v štruktúrovanej tabuľke. Umožňuje používateľovi usporiadanie podľa ktorejkoľvek stĺpca tabuľky a tri rôzne interpretácie dát. Pre usporiadanie slúži jednoduché kliknutie na stĺpec, ktorým chceme dáta usporiadať, a pre interpretáciu je prítomný box s výberom možností a tlačidlo pre jej aplikáciu. Dáta sa po prepnutí prepočítajú a zobrazia. Keďže výpočty

nie sú také komplexné a nie je predpoklad, že sa tieto prepočty budú musieť neustále vykonávať, výsledky sa neukladajú pre budúce použitie.

### 3.4.5 Analýza

Analýza dát prebieha pri spracovaní štruktúrovaného zobrazenia, kde pracujeme s číselnou reprezentáciou údajov. Zobrazenie má formu tabuľky, v ktorej sú uvedené názvy objektov, ich označenie (*Tag*) čas začiatku a konca pohľadu používateľa, celkový čas sledovania, priemerná srdcová frekvencia (HR), zmena HR oproti východiskovej hodnote (*baseline*), maximálna a minimálna HR počas sledovania daného objektu, rozsah HR (rozdiel medzi minimom a maximom) a počet pohľadov na daný objekt alebo objekty s daným označením (*tagom*). Posledný údaj — počet pohľadov — je relevantný najmä pri agregácii dát podľa objektov alebo ich *tagov*.

V rámci analýzy srdcovej frekvencie je zmena HR počítaná ako rozdiel medzi priemernou HR pri danom objekte a východiskovou (*baseline*) HR hodnotou daného používateľa, ktorá je vypočítaná ako priemer počas celého trvania sedenia:

$$HR_{\text{baseline}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HR_i$$

$$\Delta HR = HR_{\text{objekt}} - HR_{\text{baseline}}$$

Táto hodnota nám poskytuje informáciu o odchýlkach vo fyziologickom stave človeka počas sledovania konkrétnych objektov. Pozitívna zmena môže naznačovať zvýšenú emocionálnu odozvu, zatiaľ čo negatívna zmena môže poukazovať na uvoľnenie alebo zníženú mieru záujmu.

Maximálna a minimálna hodnota HR v konkrétnom zázname nám umožňuje identifikovať extrémne fyziologické reakcie a dopĺňa kontext k priemernej hodnote HR. Z týchto dvoch hodnôt sa ďalej vypočíta rozsah HR, ktorý reprezentuje stabilitu reakcií, ako jednoduchý rozdiel:

$$\text{Rozsah HR} = HR_{\text{max}} - HR_{\text{min}}$$

Počet pohľadov na objekt je dôležitý najmä pri agregovanej analýze, kde sa údaje zoskupujú podľa rovnakého objektu alebo spoločného tagu. Ukazuje, koľko krát sa používateľ na daný objekt alebo typ objektu pozrel a môže naznačovať jeho záujem a preferencie o jednotlivé prvky v scéne.

Vybrané parametre analýzy boli vybrané na základe konzultácie s odborníkmi z psychológie pracujúcimi na tomto výskume. Výpočty tak boli nastavené, aby vyhovovali ich požiadavkám a potrebám.

### 3.4.6 Riešenie technických problémov

V tejto časti si predstavíme niektoré problémy, na ktoré sme počas implementácie narazili, a ich riešenia.

**Výber vhodného intervalu a rozlíšenia pre zaznamenávanie grafických údajov:** Pri práci s grafickými výstupmi (*screenshots* obrazovky zaznamenávajúce pohľad používateľa) sme museli spraviť rozhodnutie ohľadom intervalov, v ktorých sa budú tieto dáta zaznamenávať. Príliš krátky časový úsek by viedol k nadmernému objemu dát, čo by spôsobilo neefektívne využitie úložného priestoru a výrazne by zaťažilo systém pri uchovávaní kompletného záznamu celého sedenia. Naopak, príliš krátke intervaly by dostatočne nepokryli sedenie a mohli by sme stratiť dôležité informácie. Nakoľko sa údaje prepájajú až v druhej časti projektu, vizualizačnej aplikácii v jazyku Python, je nutné zabezpečiť dostačujúce množstvo záznamov obrazovky, aby sme vedeli správne interpretovať oblasti záujmu medzi HR dátami.

Na množstvo uložených dát má okrem časového intervalu vplyv aj rozlíšenie generovaných obrázkov. Okrem dostatočného množstva záznamov je dôležité, aby boli tieto údaje čitateľné a správne reprezentovali pohľad používateľa. Musíme teda zvoliť najnižšie rozlíšenie, ktoré zabezpečí, že jednotlivé prvky scény budú jasne a prirodzene rozpoznateľné aj pri bežnom prezeraní výstupu.

Tabuľka 3.3 zobrazuje porovnanie celkovej veľkosti súboru s grafickými záznamami jednej intervencie v rôznych rozlíšeniach a intervaloch.

	Rozlíšenie	Interval (sek.)	Poč. súborov	Veľkosť	Veľkosť (30 min.)	Veľkosť jedného JPEG JPEG (priemer.)
A	2468x2740	1	30	49.6 MB	2976 MB	1.65 MB
B	2468x2741	2	15	23.7 MB	1422 MB	1.58 MB
C	1234x1370	2	15	7.07 MB	424.2 MB	0.47 MB
D	617x685	2	15	1.79 MB	107.4 MB	0.12 MB

Tabuľka 3.3: Porovnanie celkovej veľkosti súborov grafických dát pri rôznych rozlíšeniach a intervaloch.

Za daných podmienok sa nám pre naše požiadavky ukázala možnosť D ako optimálna. Rozlíšenie pre A a B je ideálna veľkosť odporúčaná systémom SteamVR, takže bolo zbytočné ísť nad tieto hodnoty. Pri týchto vyšších rozlíšeniach ale dochádzalo k viditeľnému zamrznutiu scény, zatiaľ čo prebiehalo ukladanie grafického záznamu. Preto sme skúmali nižšie rozlíšenia, ktoré by nezaťažovali systém na úkor behu VR, no stále mali dostatočnú kvalitu pre vizualizáciu. Nižšie rozlíšenie ako D sme už nezvažovali, aby sa zachovala prijateľná rozpoznateľnosť objektov v scéne.

Do projektu sme teda aplikovali parametre zaznamenané v riadku D. Intervaly záznamov sa vykonávajú v intervale 2 sekundy a obrázky sa ukladajú v rozlíšení 617x685. Tento prístup zabezpečí prijateľné množstvo dát vo vizuálne príjemnej kvalite. Nastavenie týchto parametrov sa dá v budúcnosti jednoducho zmeniť pre konkrétne potreby dostupnej technológie.

**Správna detekcia objektov:** Pri práci s pôvodným projektom sa vyskytol neočakávaný problém s detekciou objektov v scéne. Na správne fungovanie technológie *eyetracking* je nutné, aby boli jednotlivé časti scény, ktoré chceme detekovať, samostatnými objektami. Vzhľadom na to, že v pôvodnom projekte nebol tento systém implementovaný, scéna nebola zostrojená podľa jeho nárokov. Pri implementácii nášho riešenia pre zber dát sme zistili, že veľká časť scény, konkrétne všetky stromy a terén, sú súčasťou jedného Unity objektu. Neschopnosť detekovať jednotlivé vizuálne časti scény predstavovalo zásadné obmedzenie systému.

Do scény pôvodného projektu boli doplnené nové komponenty určené na spoľahlivú detekciu pohľadu používateľa. Išlo konkrétne o collidery, ktoré boli umiestnené na tie časti objektov, ktoré mali byť identifikované ako samostatné prvky. Tento prístup síce môže mierne komplikovať integráciu do pôvodnej scény, no priniesol aj niekoľko výhod. Pri menších objektoch sme zámerné použili mierne zväčšené collidery, čo viedlo k presnejšiemu zachyteniu pohľadu. Zároveň tento prístup umožnil zlučovať viacero objektov do jednej detekčnej jednotky, prípadne ich naopak rozdeľovať podľa významu. Napríklad skupina húb nemusí byť detekovaná jednotlivo, keďže takáto informácia by nebola analyticky prínosná. Naopak, rozlíšenie jednotlivých častí stromu – ako je kmeň a koruna – sa ukázalo ako dôležité, keďže vizuálne podnety ako pohyb listov môžu mať upokojujúci efekt, a detekciou pohľadu možno následne analyzovať, ako používateľ na tieto dynamické prvky reaguje.

**Viditeľnosť drobných objektov v screenshots scény:** Ďalším problémom bola nízka viditeľnosť objektov na vizuálnych výstupoch (*screenshotoch* obrazovky zobrazujúcich pohľad používateľa). V niektorých situáciách bolo náročné rozpoznať menšie objekty, na ktoré sa používateľ pozeral, najmä v dôsledku prekrytia grafickým bodom označujúcim pohľad. Keďže veľkosť objektov na obrazovke sa mení v závislosti od vzdialenosti kamery, zmenšenie tohto bodu by vyriešilo len časť problémových situácií. Preto bol do okna grafickej vizualizácie pridaný aj textový popis aktuálne sledovaného objektu, čím sa zvýšila prehľadnosť zobrazenia. Okrem samotného vizuálneho výstupu sú teda zároveň k dispozícii aj textové údaje, ktoré poskytujú doplnkové informácie pre lepšiu prehľadnosť. Ďalšou vyhovujúcou možnosťou by bol prázdny kruh, no pre lepšiu rozoznateľnosť bodu sme sa rozhodli pre predchádzajúce riešenie.

**Detekcia oblohy:** Funkcia pre zistenie prieniku objektu s pohľadom používateľa nedokáže pre implementáciu neba v systéme Unity jednoznačne určiť, či sa používateľ fixoval na oblohu. Obloha nie je samostatný objekt, s ktorým by došlo k prieniku. Aby sme vedeli zaznamenať aj túto fixáciu, nastavili sme pre *raycast* pohľadu maximálnu dĺžku, dostatočnú, aby pokryla všetky objekty, na ktoré sa môže používateľ pozrieť. Systém teda automaticky zaznamenáva oblohu, ak nedôjde k žiadnemu prieniku s iným objektom.

**Odstránenie mikrosakád z dát:** Ako bolo opísané v časti 1.3 Pohyb očí, aj pri fixáciách neustále dochádza k rýchlym a krátkym odchýlkam v pohľade. Tieto údaje sú pre nás zbytočné a snažili sme sa ich teda odfiltrovať. Toto bolo možné spraviť rovno pri zbere dát, no dochádzalo by tak k zbytočnej záťaži pre procesor, ktorú si kvôli nutnosti plynulého behu VR nemôžeme dovoliť. Zároveň by tak bola aplikácia na vizualizáciu obmedzená, nakoľko by nezobrazovala nevyfiltrované dáta správne. Preto prebieha tento proces až pri spracovaní údajov. Pri načítaní dát zo súborov aplikácia vyfiltruje nežiadúce údaje a vyhladí zostávajúce záznamy.

K filtrovaniu dochádza na základe času jednotlivých záznamov. Ak bol pohľad kratší ako 0.1 sekundy, je automaticky vyhodnený. Pri pohľade kratšom ako 0.5 sekundy sa zohľadňujú záznamy pred a po. V prípade, že sa ich objekty zhodujú, záznam pokladáme za mikrosakádu a vymažeme ho, inak je v dátach ponechaný.

Časové hranice boli nastavené podľa výskumu danej témy a analýzy zozbieraných dát. Podľa potreby sa dajú jednoducho upraviť.



# Kapitola 4

## Výsledky

V tejto časti uzavrieme náš projekt a zhodnotíme kvalitu a spoľahlivosť našej práce.

### 4.1 Naplnenie cieľov práce

Funkcionalita projektu spĺňa stanovené podmienky. Súčasť projektu pre zber dát dokáže úspešne uložiť všetky potrebné dáta a následne ich v oddelenej časti projektu vizualizovať v prehľadnom formáte. Program je tak vhodný ako nástroj pre hlbšiu analýzu vnímania prostredia VR účastníkmi výskumu.

### 4.2 Test presnosti eyetrackera

Pre overenie korektnosti nášho riešenia sme vykonali dva testy v kontrolovanom prostredí testovacej scény. Test slúži na overenie validity funkcií pre zber dát a vizualizačného systému. Testovacia Unity scéna sa skladá z troch kociek s odlišnými textúrami, roviny (objekt typu plane) a oblohy. Tri odlišné kocky boli zámerne zvolené ako zreteľne rozlíšiteľné objekty, vďaka ktorým vieme presne nasmerovať používateľa na konkrétny bod a následne overiť, či vizualizácia zodpovedá skutočnosti.

Detekovateľné objekty v scéne, naše oblasti záujmu, boli tri kocky a obloha. Používateľ bol vopred inštruovaný, na ktorý objekt sa má v danom čase pozerieť. Pre kontrolu výsledkov boli tieto časy a intervaly zaznamenané v tabuľke 4.1.

Počas celého testu mali účastníci nasadený senzor srdcovej frekvencie Polar H10.

Testu sa zúčastnili 3 účastníci (účastník A, B a C). Každý dostal počas testu rovnaké inštrukcie a bol informovaný, aby sa sústredil na presne stanovené objekty.

#### 4.2.1 Test v systéme pre zber dát

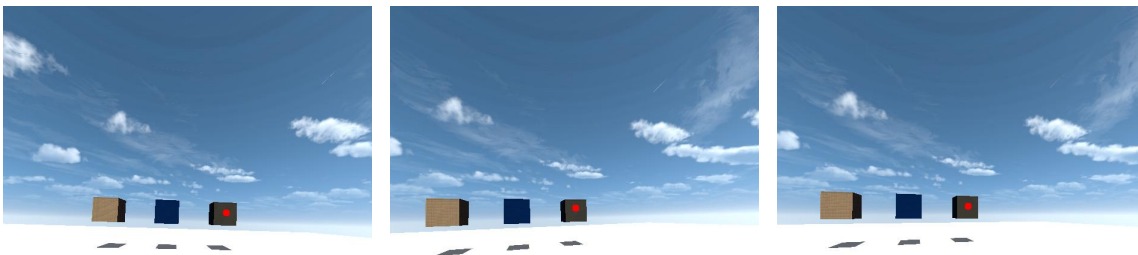
V prvom teste sme porovnali grafické výstupy z fázy zberu údajov vo VR prostredí naprieč všetkými účastníkmi a zhodnotili, či sa body fixácie v určenom čase zhodovali

Objekt	Interval	Čas
Cube1	00:00 - 01:00	01:00
Cube3 (stred)	01:00 - 01:30	00:30
Cube3 (horný pravý vrchol)	01:30 - 02:00	00:30
Cube3 (dolný ľavý vrchol)	02:00 - 02:30	00:30
Cube2	02:30 - 03:00	00:30
Sky	03:00 - 04:00	01:00

Tabuľka 4.1: Časový harmonogram testu. Prvý stĺpec zodpovedá objektu alebo časti objektu, na ktorý sa používateľ mal pozerieť. Stĺpec s názvom čas zobrazuje daný časový interval vo formáte *minúty:sekundy*.

s objektom, na ktorý boli účastníci požiadaní sa pozerieť. Časy, ktorých údaje sme porovnávali, boli 01:15, 01:45 a 2:15, tieto časové body spadajú pod intervaly pre objekty Cube3 (stred), Cube3 (horný pravý vrchol) a Cube3 (dolný ľavý vrchol) v uvedenom poradí. Tieto časové značky boli vybrané, lebo najpresnejšie označovali vizuálny bod zamerania.

Nasledujúce obrázky 4.1 zobrazujú snímky obrazovky zhotovené v čase 01:15 pre každého účastníka. Podľa tabuľky 4.1 vidíme, že tento čas patrí do intervalu, kedy sa mali účastníci pozerieť na stred tretej kocky (Cube3).



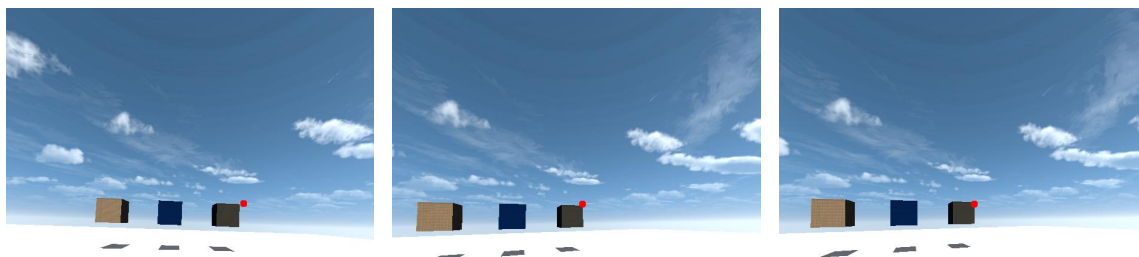
(a) Účastník A

(b) Účastník B

(c) Účastník C

Obr. 4.1: Snímka obrazovky v čase 01:15 pre každého účastníka testu

Obrázky 4.2 boli zaznamenané v čase 01:15, teda v intervale, kedy sa účastníci mali fixovať na horný pravý vrchol tretej kocky (Cube3).



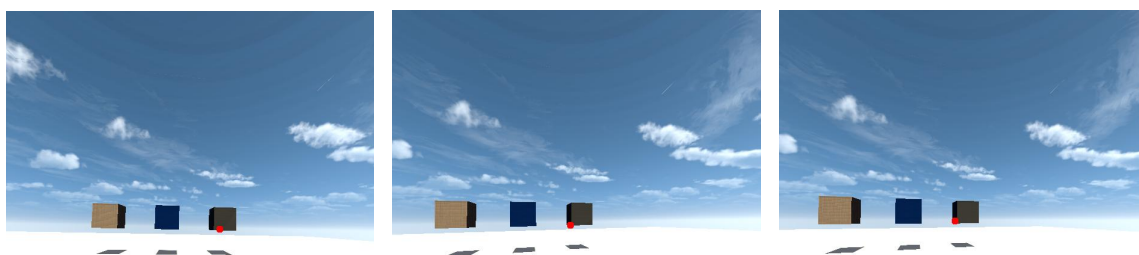
(a) Účastník A

(b) Účastník B

(c) Účastník C

Obr. 4.2: Snímka obrazovky v čase 01:45 pre každého účastníka testu

Obrázky 4.3 boli zaznamenané pri pohľade na dolný ľavý vrchol objektu Cube3, konkrétne v čase 02:15.



(a) Účastník A

(b) Účastník B

(c) Účastník C

Obr. 4.3: Snímka obrazovky v čase 02:15 pre každého účastníka testu

Z výsledkov vidíme, že nedochádza k žiadnej alebo len minimálnej odchýlke očakávaného miesta fixácie. Zozbierané údaje sú teda dostatočne presné na určenie oblasti a objektu zamerania.

#### 4.2.2 Test v systéme pre vizualizáciu dát

Po zbere dát boli následne zozbierané údaje otvorené v programe pre vizualizáciu. Pokyny boli pri teste zadávané v čase od 00:00 po 04:00, budeme teda sledovať len údaje v tomto časovom intervale. Tabuľka 4.4 zobrazuje očakávaný výsledok testu. Pre lepšiu čitateľnosť výsledkov sú jednotlivé záznamy označené farebne. Oproti tabuľke harmonogramu 4.1 bol časový interval pre tretiu kocku (Cube3) zjednotený, nakoľko nerozoznávame časti tohto objektu, ale detekujeme ho ako celok. Obrázky 4.5 obsahujú

štruktúrované zobrazenie údajov pre každého účastníka vyselektované len na sledovaný časový úsek.

Z výsledných tabuliek pre vizualizáciu dát budú z dôvodu prehľadnosti výsledkov vynechané slpce pre analýzu, ktoré nie sú predmetom testu.

Objekt	Interval	Čas
Cube1	00:00 - 01:00	01:00
Cube3	01:00 - 02:30	01:30
Cube2	02:30 - 03:00	00:30
Sky	03:00 - 04:00	01:00

Obr. 4.4: Referenčná tabuľka pre vyhodnotenie výsledkov testu vizualizačnej aplikácie s farebným zvýraznením záznamov pre objekty fixácie

Na základe výsledkov možno konštatovať, že všetky údaje sa — s miernymi odchýlkami — zhodujú s referenčnou tabuľkou 4.4. Odchýlka v čase (stĺpec *Time*) v žiadnom z analyzovaných záznamov nepresahuje 3 sekundy. Výraznejšie odchýlky sa vyskytujú najmä pri zaznamenaní začiatku a konca intervalu, čo pravdepodobne súvisí s časom potrebným na spracovanie inštrukcie a reakciu účastníka.

Vo výsledkoch, konkrétne v ukážkach 4.5a a 4.5c, možno pozorovať záznamy pohybu pohľadu medzi dvoma objektmi. Záznam 6 v ukážke 4.5a zaznamenáva prerušenie fixácie na objekt *Cube3*, čo môže byť dôsledkom vedomého presunu pohľadu alebo nevyfiltrovanj mikrosakády.

Tieto odchýlky od referenčných údajov sú však minimálne a primerane odrážajú skutočný pohyb pohľadu účastníkov. Aplikácia tak spoľahlivo vizualizuje textové dáta a efektívne eliminuje väčšinu mikrosakád.

	Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)
1	sky	sky	00:00:00.00	00:00:02.41	00:00:02.41	88
2	Cube2	cube	00:00:02.41	00:00:04.90	00:00:02.48	89
3	Cube1	cube	00:00:04.90	00:01:03.52	00:00:58.62	84
4	Cube2	cube	00:01:03.52	00:01:04.37	00:00:00.84	87
5	Cube3	cube	00:01:04.37	00:02:30.54	00:01:26.16	86
6	Cube2	cube	00:02:30.54	00:02:31.33	00:00:00.78	87
7	Cube3	cube	00:02:31.37	00:02:34.76	00:00:03.38	N/A
8	Cube2	cube	00:02:34.76	00:03:03.90	00:00:29.13	87
9	sky	sky	00:03:03.90	00:04:01.52	00:00:57.62	84

(a) Účastník A

	Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)
1	sky	sky	00:00:00.11	00:00:01.16	00:00:01.05	81
2	Cube2	cube	00:00:01.16	00:00:01.30	00:00:00.13	81
3	Cube3	cube	00:00:01.30	00:00:01.83	00:00:00.52	81
4	sky	sky	00:00:01.83	00:00:03.88	00:00:02.05	81
5	Cube3	cube	00:00:03.88	00:00:04.72	00:00:00.83	83
6	Cube2	cube	00:00:04.72	00:00:05.01	00:00:00.29	84
7	Cube1	cube	00:00:05.01	00:01:07.91	00:01:02.90	85
8	Cube3	cube	00:01:07.98	00:02:39.44	00:01:31.45	85
9	Cube2	cube	00:02:39.44	00:03:08.91	00:00:29.47	83
10	sky	sky	00:03:08.91	00:04:11.01	00:01:02.09	86

(b) Účastník B

	Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)
1	Cube2	cube	00:00:00.69	00:00:02.11	00:00:01.41	78
2	Cube1	cube	00:00:02.11	00:01:01.48	00:00:59.37	76
3	Cube2	cube	00:01:01.48	00:01:01.79	00:00:00.30	76
4	Cube3	cube	00:01:01.79	00:02:32.58	00:01:30.79	79
5	Cube2	cube	00:02:32.61	00:03:01.73	00:00:29.12	80
6	sky	sky	00:03:01.73	00:04:03.02	00:01:01.29	79

(c) Účastník C

Obr. 4.5: Štruktúrované zobrazenie údajov pre každého účastníka

### 4.3 Prezentácia výstupov systému

V tejto časti predstavujeme ukážku výstupu vizualizačnej aplikácie. Účastníkovi bol nasadený monitor srdcovej frekvencie a *headset* pre zobrazovanie VR. Následne bola spustená scéna lesa, v ktorej sa nachádzal po dobu 5 minút. Počas behu aplikácie sa zbierali údaje, ktoré sme následne otvorili v aplikácii na vizualizáciu.

Obrázok 4.6 zobrazuje grafické zobrazenie týchto dát. Ľavá strana ukazuje vizualizáciu srdcovej frekvencie vo forme grafu. Prerušovaná zvislá žltá čiara znázorňuje aktuálne zobrazený čas – v tomto prípade 00:02:58. Táto časová značka je uvedená v texte v hornej ľavej časti grafu, spolu so srdcovou frekvenciou (89 úderov za minútu) a názvom objektu „Stump root1“. Obrázkový záznam (*screenshot*) na pravej strane, ktorý aplikácia zobrazuje k tomuto časovému bodu, potvrdzuje, že pohľad používateľa v danom momente smeroval na daný objekt.



Obr. 4.6: Ukážka vizualizácie údajov v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre grafické zobrazenie, záložka Graph.

Obrázok 4.7 ukazuje pohľad na štruktúrované zobrazenie dát. Každý riadok zodpovedá informáciám o jednej fixácii.

Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)	ΔHR	min. HR	max. HR	HR range	view count
1 Sky	sky	00:00:00.00	00:00:11.20	00:00:11.20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1
2 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:00:11.20	00:00:13.12	00:00:01.91	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1
3 Sky	sky	00:00:13.12	00:00:19.33	00:00:06.20	93	↑ 1	90	102	13	1
4 Squirrel1	squirrel	00:00:19.33	00:00:24.06	00:00:04.73	87	↓ -4	87	91	5	1
5 Sky	sky	00:00:24.06	00:00:27.23	00:00:03.16	87	↓ -4	86	88	3	1
6 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:00:27.23	00:00:31.54	00:00:04.30	86	↓ -5	86	87	2	1
7 Sky	sky	00:00:31.54	00:00:42.31	00:00:10.77	90	↓ -1	87	93	7	1
8 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:00:42.31	00:00:43.09	00:00:00.77	91	↓ 0	91	92	2	1
9 Tree1 (leaves)	tree leaves	00:00:43.25	00:00:49.27	00:00:06.02	96	↑ 4	92	98	7	1
10 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:00:49.27	00:00:49.95	00:00:00.68	94	↑ 2	94	94	1	1
11 Sky	sky	00:00:50.05	00:00:50.85	00:00:00.80	94	↑ 2	94	94	1	1
12 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:00:50.85	00:00:54.12	00:00:03.26	91	↓ 0	90	94	5	1
13 Mushrooms1	mushrooms	00:00:54.12	00:00:56.59	00:00:02.47	91	↓ 0	91	93	3	1
14 Sky	sky	00:00:56.63	00:01:19.05	00:00:22.41	90	↓ -1	88	93	6	1
15 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:01:19.05	00:01:20.95	00:00:01.90	92	↓ 0	92	92	1	1
16 Sky	sky	00:01:20.95	00:01:21.52	00:00:00.56	92	↓ 0	92	93	2	1
17 Tree1 (trunk)	tree trunk	00:01:21.52	00:01:27.88	00:00:06.36	94	↑ 2	92	95	4	1

Obr. 4.7: Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table.

Obrázok 4.8 ukazuje štruktúrované zobrazenie dát zoskupené podľa objektov. Pre jednotlivý objekt je teda v tabuľke vždy len jeden riadok. Všetky záznamy daného objektu sú zrátané a spriemerované pre celkový prehľad informácií. Obrázok 4.9 zobrazuje túto tabuľku zoradenú zostupne podľa srdcovej frekvencie, stĺpec „Heart Rate(avg.)“. Môžeme tak vidieť, že prvý riadok, záznam pre objekt Squirrel1, má najnižšiu hodnotu, 87 úderov za minútu. Pri našich testovacích údajoch nie je ťažké túto hodnotu zistiť aj bez zoradenia, no pri dlhších záznamoch, ako sú sedenia vo Virtuálnej terapii, môže byť riadkov aj niekoľko desiatok či stoviek a ručné hľadanie signifikantných hodnôt by bolo príliš zdĺhavé.

Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)	ΔHR	min. HR	max. HR	HR range	view count
1 Sky	sky	-	-	00:03:27.38	92	↓ 0	86	104	18	30
2 Tree1 (trunk)	tree trunk	-	-	00:01:00.20	92	↓ 0	86	104	18	28
3 Squirrel1	squirrel	-	-	00:00:04.73	87	↓ -4	87	91	5	1
4 Tree1 (leaves)	tree leaves	-	-	00:00:09.34	95	↑ 3	90	98	8	4
5 Mushrooms1	mushrooms	-	-	00:00:15.98	93	↑ 1	88	104	16	10
6 Toadstools1	mushrooms	-	-	00:00:02.23	92	↓ 0	91	95	4	3
7 Stump root1	stump root	-	-	00:00:06.25	92	↓ 0	88	95	8	1

Obr. 4.8: Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa objektov.

Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)	ΔHR	min. HR	max. HR	HR range	view count
1 Squirrel1	squirrel	-	-	00:00:04.73	87	↓ -4	87	91	5	1
2 Sky	sky	-	-	00:03:27.38	92	↓ 0	86	104	18	30
3 Tree1 (trunk)	tree trunk	-	-	00:01:00.20	92	↓ 0	86	104	18	28
4 Toadstools1	mushrooms	-	-	00:00:02.23	92	↓ 0	91	95	4	3
5 Stump root1	stump root	-	-	00:00:06.25	92	↓ 0	88	95	8	1
6 Mushrooms1	mushrooms	-	-	00:00:15.98	93	↑ 1	88	104	16	10
7 Tree1 (leaves)	tree leaves	-	-	00:00:09.34	95	↑ 3	90	98	8	4

Obr. 4.9: Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa objektov a zoradená zostupne na základe stĺpca Heart Rate.

Obrázok 4.10 ukazuje tabuľku zoskupenú podľa označenia objektov (*Tag*). Jednotlivé záznamy obsahujú informácie ohľadom jedného typu objektu. Z tohto zobrazenia môžeme vidieť, že používateľ strávil najviac času sledovaním oblohy a najkratšie pozoroval veвериčky, pri ktorých mal zároveň najnižšiu srdcovú frekvenciu. Dlhší čas sledovania oblohy pravdepodobne súvisí s tým, že predstavovala najväčšiu detekovateľnú oblasť v zornom poli.

Object	Tag	From	To	Time	Heart Rate (avg.)	ΔHR	min. HR	max. HR	HR range	view count
1 -	sky	-	-	00:03:27.38	92	↓ 0	86	104	18	30
2 -	tree trunk	-	-	00:01:00.20	92	↓ 0	86	104	18	28
3 -	squirrel	-	-	00:00:04.73	87	↓ -4	87	91	5	1
4 -	tree leaves	-	-	00:00:09.34	95	↑ 3	90	98	8	4
5 -	mushrooms	-	-	00:00:18.21	93	↑ 1	88	104	16	13
6 -	stump root	-	-	00:00:06.25	92	↓ 0	88	95	8	1

Obr. 4.10: Ukážka vizualizácie údajov testu v aplikácii pre vizualizáciu v časti pre štruktúrované zobrazenie, záložka Table, zoskupené podľa označenia objektu (*Tag*).

## 4.4 Testovanie použiteľnosti

V rámci testovania systému bol vykonaný aj test použiteľnosti (Usability test) pre aplikáciu na vizualizáciu.

Cieľom testovania bolo vyhodnotiť intuitívnosť, prehľadnosť a efektivitu používateľského rozhrania aplikácie, najmä z hľadiska získavania konkrétnych dátových informácií.

### 4.4.1 Snénar a úlohy

Účastníci mali za úlohu splniť nasledujúce úlohy:

- Otvoriť určený priečinok v aplikácii.
- Zistiť čas, kedy sa používateľ pozeral na oblohu.
- Zistiť, na čo sa používateľ pozeral ako posledné.
- Zistiť, kedy sa začalo meranie srdcovej frekvencie.
- Spočítať celkový čas pozerania na oblohu.
- Zoradiť objekty podľa celkového času pozerania.
- Zistiť, ktorý tag mal najnižšiu srdcovú frekvenciu.
- Zistiť objekt s najvyšším nárastom srdcovej frekvencie oproti základnej hodnote.

### 4.4.2 Výsledky

#### Subjekt č. 1 (menej technicky zdatný)

Účastník nemal problém s otvorením priečinka a pochopil ovládacie prvky. Mal problémy s orientáciou v grafoch, neidentifikoval možnosť posúvania grafu bez nápovedy a ignoroval niektoré prvky rozhrania (napr. záložky, filtre). S pomocou dokázal splniť všetky úlohy. Navrhuje sa zvýrazniť možnosť posúvania grafu a ovládacie prvky.

#### Subjekt č. 2 (technicky zdatnejší)

Účastník sa v rozhraní orientoval dobre, pochopil základné funkcie a dokázal efektívne prepínať medzi zobrazeniami. Úlohy splnil správne, občas potreboval upresnenie požiadavky. Problémy sa vyskytli pri neintuitívnom posúvaní grafu a nejednoznačných názvoch stĺpcov. Navrhuje sa doplniť vysvetlivky a vizuálne zvýraznenie scrollovania.

### 4.4.3 Zhrnutie a odporúčania

Obaja účastníci úspešne dokončili všetky úlohy, pričom menej technicky zdatný účastník potreboval viac nápoved. Problémom bolo najmä neintuitívne scrollovanie grafu a nevýrazné interaktívne prvky. Odporúča sa pridať vizuálne indikátory pre scrollovanie, zvýrazniť ovládacie prvky a doplniť vysvetlivky pre stĺpce v tabuľkách.

Testovanie ukázalo, že aplikácia je použiteľná na svoj hlavný účel vizualizácie dát. Používatelia zvládli zadané úlohy, avšak niektoré funkcie neboli intuitívne. Keďže cieľovými používateľkami budú psychologičky pracujúce s VR technológiou, očakáva sa, že nebudú mať s aplikáciou väčšie problémy. Tieto vylepšenia však môžu zvýšiť používateľský komfort.

## 4.5 Využitie systému

Naša práca úspešne splňa zadané podmienky a je tak možné jej využitie ako nástroj pre analýzu vplyvu prostredia na používateľa. Systém ponúka zber dát a následnú vizualizáciu týchto údajov pre potreby psychologičiek pracujúcich na projekte. Okrem projektu, s ktorým sme pracovali je možné toto riešenie implementovať aj do iných výskumov pracujúcich s Virtuálnou realitou. Program pre vizualizáciu dát je úplne oddelený od prvej časti projektu, a preto je možné, pri zachovaní štruktúry potrebných súborov, ho využiť na vizualizáciu mimo pôvodného zamerania.

## 4.6 Obmedzenia riešenia

Hoci je systém funkčný a splňa požiadavky, treba na záver dodať jeho obmedzenia. Pre správny zber dát je nutné korektné rozdelenie objektov alebo ich častí, ktoré chceme detekovať. V prípade, že scéna je zostrojená inak, treba pridať kolízne sféry pre každý objekt/časť objektu. Toto obmedzenie nezavrhuje systém ako nefunkčný, no pracovnosť tejto fázy je určená charakterom scény.

Hoci to v momentálnom projekte netvorí prekážku, pre absenciu hlbšej analýzy mikrosakád, sa v budúcnosti môže vyskytnúť nepresné filtrovanie údajov ohľadom pohľadu používateľa. Téma pohybu oka je rozsiahla a presné určenie fixácie je komplexné a zložité. Táto analýza bola teda nad rámec tejto práce.

# Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť nástroj na zber a vizualizáciu údajov o vplyve jednotlivých častí VR prostredia na človeka, konkrétne kombináciou údajov zo systému na sledovanie pohľadu a snímača srdcovej frekvencie. Riešenie bolo navrhnuté ako rozšírenie existujúceho projektu vo VR.

V Unity bola implementovaná funkcionálna na zaznamenávanie textových údajov o pohľade pomocou HTC Vive Pro a súčasne ukladanie vizuálnych výstupov vo forme snímok obrazovky. Na objekty v scéne boli aplikované collidery na zabezpečenie presnejšej detekcie pohľadu a určenie oblasti záujmu. Súčasne boli získavané aj údaje o srdcovej frekvencii prostredníctvom zariadenia Polar H10. Následná vizualizácia a analýza týchto údajov prebieha v aplikácii vytvorenej v jazyku Python, ktorá poskytuje prehľadné zobrazenie fyziologických reakcií na sledované podnety v scéne.

V rámci kontroly správnosti systému boli realizované dva typy overovacích testov – test použiteľnosti (usability test), zameraný na použiteľnosť aplikácie z pohľadu používateľa, a test presnosti *eyetrackera*, ktorý hodnotil spoľahlivosť detekcie pohľadu pri rôznych smeroch.

Napriek istým technickým obmedzeniam – napríklad občasnej nepresnosti údajov o fixácií vzhľadom na pohyby oka – sa podarilo vytvoriť funkčné riešenie, ktoré je možné ďalej rozvíjať. Získané údaje sú spracované v čitateľnej forme, vhodnej na ďalšiu psychologickú interpretáciu odborníkmi spolupracujúcimi na projekte Virtuálnej terapie. Výsledná aplikácia tak predstavuje praktický nástroj, ktorý je využiteľný v experimente Virtuálnej terapie a môže slúžiť aj pri ďalších experimentoch zameraných na hodnotenie psychofyziologických reakcií vo virtuálnom prostredí.



# Literatúra

- [1] Yulian Rusyn. Vplyv virtuálnej reality na kognitívne spracovanie informácií. Diplomová práca, Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Bratislava, 2024.
- [2] Steven M LaValle. *Virtual reality*. Cambridge university press, 2023.
- [3] Viviane Clay, Peter König, and Sabine Koenig. Eye tracking in virtual reality. *Journal of eye movement research*, 12(1):10–16910, 2019.
- [4] Isayas Berhe Adhanom, Paul MacNeilage, and Eelke Folmer. Eye tracking in virtual reality: a broad review of applications and challenges. *Virtual Reality*, 27(2):1481–1505, 2023.
- [5] Ieva Miseviciute. Eye movement: Types and functions explained. <https://www.tobii.com/resource-center/learn-articles/types-of-eye-movements>, n.d. Accessed: 2025-05-29.
- [6] Mary Hayhoe and Dana Ballard. Eye movements in natural behavior. *Trends in cognitive sciences*, 9(4):188–194, 2005.
- [7] Susana Martinez-Conde, Stephen L Macknik, Xoana G Troncoso, and David H Hubel. Microsaccades: a neurophysiological analysis. *Trends in neurosciences*, 32(9):463–475, 2009.
- [8] Sarah Immanuel, Meseret N Teferra, Mathias Baumert, and Niranjana Bidargaddi. Heart rate variability for evaluating psychological stress changes in healthy adults: a scoping review. *Neuropsychobiology*, 82(4):187–202, 2023.
- [9] Harvard Health Publishing. Heart rate variability: A new way to track well-being, 2017. Accessed: 2024-05-02.
- [10] Anne C Lear. Virtual reality provides real therapy. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(4):16–20, 1997.
- [11] Max M North and Sarah M North. Virtual reality therapy. *Editors-in-Chief*, 2002.

- [12] Chia-Pin Yu, Hsiao-Yun Lee, and Xiang-Yi Luo. The effect of virtual reality forest and urban environments on physiological and psychological responses. *Urban forestry & urban greening*, 35:106–114, 2018.
- [13] Pung-Sik Yeon, Jin-Young Jeon, Myeong-Seo Jung, Gyeong-Min Min, Ga-Yeon Kim, Kyung-Mi Han, Min-Ja Shin, Seong-Hee Jo, Jin-Gun Kim, and Won-Sop Shin. Effect of forest therapy on depression and anxiety: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23):12685, 2021.
- [14] Paul MG Emmelkamp and Katharina Meyerbröker. Virtual reality therapy in mental health. *Annual review of clinical psychology*, 17(1):495–519, 2021.
- [15] Mathew White, Amanda Smith, Kelly Humphryes, Sabine Pahl, Deborah Snelling, and Michael Depledge. Blue space: The importance of water for preference, affect, and restorativeness ratings of natural and built scenes. *Journal of environmental psychology*, 30(4):482–493, 2010.
- [16] Tanja Blascheck, Kuno Kurzhals, Michael Raschke, Michael Burch, Daniel Weiskopf, and Thomas Ertl. State-of-the-art of visualization for eye tracking data. In *Eurovis (stars)*, page 29, 2014.
- [17] Veronica Sundstedt and Valeria Garro. A systematic review of visualization techniques and analysis tools for eye-tracking in 3d environments. *Frontiers in neuroergonomics*, 3:910019, 2022.

# Príloha A: obsah elektronickej prílohy

V elektronickej prílohe priloženej k práci sa nachádza zdrojový kód programu k aplikácii pre vizualizáciu údajov napísaný v jazyku Python, zdrojový kód je zverejnený aj na stránke [https://github.com/matuskova/bakalarska\\_praca](https://github.com/matuskova/bakalarska_praca) a skript napísaný v jazyku C# pre zber údajov z eyetrackera vo VR použitý v Unity projekte.

