

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačové grafiky a interakce

VR pro vyšetření genetické degenerativní oční vady

Jiří Šašek

Vedoucí: Ing. David Sedláček, Ph.D.
Obor: Otevřená informatika
Studijní program: Počítačové hry a grafika
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šašek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **507680**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra počítačové grafiky a interakce**
Studijní program: **Otevřená informatika**
Specializace: **Počítačové hry a grafika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

VR pro vyšetření genetické degenerativní oční vady

Název bakalářské práce anglicky:

VR for the Inherited Retinal Degenerations assesment

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte literaturu zabývající se vyšetřením degenerativní oční vady sítnice (IRD) [1, 2].
- 2) Seznamte se s VR aplikací Luna pro vyšetření degenerativní oční vady [3].
- 3) Navrhněte rozšíření aplikace např. těmito směry (ale i jinými): pokročilá detekce kolizí (celé tělo/torso, končetiny, délka kolize), kalibrace jasu (vzít v potaz použitý headset), úprava vizualizace, AR mód, sledování očí, rozšíření monitoringu (mobilní aplikace, vyhodnocení, logy, vzdálené ukládání logů, vizualizace dat), pohyblivé překážky, přizpůsobení výšce uživatele, příprava pro distribuci na jiná pracoviště, využití tzv. Meta Spatial Anchors.
- 4) Po dohodě s vedoucím implementujte a otestujte alespoň pět typů rozšíření, testování nemusí být s cílovou skupinou aplikace. Testy navrhněte dle daných rozšíření (např. pro test kolizního systému otestujte, zda si uživatelé myslí že do virtuální překážky narazili, pro test kontrolní aplikace proveďte testy použitelnosti).

Seznam doporučené literatury:

- 1] Aleman, T. S., et al (2021). A Virtual Reality Orientation and Mobility Test for Inherited Retinal Degenerations: Testing a Proof-of-Concept After Gene Therapy. *Clinical ophthalmology*
- 2] Kumaran, N., Ali, R. R., Tyler, N. A., Bainbridge, J. W. B., Michaelides, M., & Rubin, G. S. (2020). Validation of a Vision-Guided Mobility Assessment for RPE65-Associated Retinal Dystrophy. *Translational vision science & technology*, 9(10), 5.
- 3] <https://github.com/tomires/project-luna>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. David Sedláček, Ph.D. katedra počítačové grafiky a interakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. David Sedláček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji mojí babičce a rodičům, kteří mě po celou dobu studia usilovně podporovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 24. května 2024

Abstrakt

V této práci jsem se zabýval problematikou dědičných degenerativních poruch sítnice a využití virtuální reality pro testování úspěšnosti léčby genovou terapií. Nejprve jsem popsal proces fototransdukce, který bývá těmito chorobami často narušen. Dále jsem čtenáři předal detaily o prevalenci a symptomech konkrétní poruchy sítnice *Retinitis pigmentosa*, jakožto nejčastějšího zástupce těchto nemocí, a vysvětlil vliv mutace genu *RPE65* na vizuální cyklus. Poté jsem přešel k možné léčbě genovou terapií a poukázal na fakt, že testy orientace a mobility, které byly použity pro zhodnocení úspěšnosti léčby, je možné transformovat do virtuální reality. Následně jsem uvedl specifika VR, která s tvorbou takového testu souvisí, mezi která mimo jiné patřil vliv běžných očních vad na průchod testem, technické parametry VR headsetů a technologie eye tracking. V kapitole **Návrh řešení** jsem představil první verzi aplikace Luna, která měla sloužit k testům orientace a mobility a uvedl jsem návrhy rozšíření, které jsem následně v kapitole **Implementace řešení** zpracoval. Finální verzi aplikace Luna jsem otestoval na 8 subjektech a výsledky rozepsal v kapitole **Testování**.

Klíčová slova: Dědičná dystrofie sítnice, virtuální realita, test orientace a mobility

Vedoucí: Ing. David Sedláček, Ph.D.
DCGI,
Resslova 307/9,
Praha

Abstract

In this work, I addressed the issue of inherited degenerative retinal disorders and the utilization of virtual reality for testing the efficacy of gene therapy. Firstly, I described the process of phototransduction, often disrupted by these diseases. Subsequently, I provided the reader with details on the prevalence and symptoms of a specific retinal disorder, Retinitis pigmentosa, as the most common representative of these conditions, and explained the impact of the mutation in the RPE65 gene on the visual cycle. Then, I discussed the potential treatment by gene therapy and pointed out that orientation and mobility tests, used to evaluate treatment efficacy, can be transformed into virtual reality. Furthermore, I outlined the specifics of VR related to the creation of such a test, including the influence of common visual impairments on test performance, technical parameters of VR headsets, and eye tracking technology. In the **Solution Design** chapter, I introduced the initial version of the Luna application designed for orientation and mobility tests and presented proposals for extensions, which I subsequently implemented in the **Solution Implementation** chapter. I tested the final version of the Luna application on 8 subjects and elaborated on the results in the **Testing** chapter.

Keywords: Inherited retinal dystrophy, virtual reality, orientation and mobility test

Title translation: VR for the Inherited Retinal Degenerations assesment

Obsah

1 Úvod	1		
1.1 Vztah vizuálních funkcí a vizuálních úloh	2		
1.2 Sítňice	2		
1.3 Fototransdukce	3		
1.4 Dědičné degenerativní poruchy sítňice	4		
1.4.1 Retinitis pigmentosa	5		
1.4.2 Vliv genu RPE65 na vizuální cyklus	6		
1.4.3 Genová terapie	7		
2 Analýza	9		
2.1 Třetí fáze klinických testů Luxturny	9		
2.2 Využití VR v testech mobility	11		
2.2.1 Testy mobility	11		
2.2.2 Využití VR pro O&M testy	12		
2.2.3 VR-O&M Test	12		
2.3 Porovnání VR headsetů	14		
		2.3.1 Popis parametrů VR headsetů	14
		2.4 Specifika virtuální reality	16
		2.4.1 Světlo	16
		2.4.2 Eye tracking	17
		2.4.3 Náročnost přípravy a průběhu testování s VR	19
		2.4.4 Vliv běžných očních vad ve VR	20
		2.4.5 Nevolnost z virtuální reality	22
		3 Návrh řešení	25
		3.1 Pokročilá detekce kolizí	25
		Původní řešení	25
		Návrhy vylepšení	26
		3.2 Kalibrace jasů	28
		Původní řešení	28
		Návrhy vylepšení	28
		3.3 Úprava vizualizace	28
		Původní řešení	29
		Návrhy vylepšení	29

3.4 AR mód	30	4.6 Příprava na distribuci na jiná pracoviště.....	51
Původní řešení	31		
Návrhy vylepšení	31	5 Testování	53
3.5 Eye tracking	31	5.1 Scénář	54
Původní řešení	32	5.2 Výsledky dotazníků	55
Návrhy vylepšení	32	6 Závěr	57
3.6 Rozšíření monitoringu	32	6.1 Návrhy na budoucí vylepšení ...	57
Původní řešení	32	A Literatura	59
Návrhy vylepšení	33	B Dotazníky	65
3.7 Manuál a dokumentace	35	C Český uživatelský manuál	69
Původní řešení	35	D English User Manual	75
Návrhy vylepšení	35		
4 Implementace řešení	37		
4.1 Pokročilá detekce kolizí.....	38		
4.2 Supervisor	39		
4.3 Kalibrační fáze	46		
4.4 VR Logger	48		
4.5 Eye tracking	50		

Obrázky

1.1 Graf závislosti relativní citlivosti fotoreceptorů na vlnové délce [39].	3	3.3 GUI modulu Supervisor v původní verzi aplikace Luna.	33
1.2 "Činnost fotoreceptorů: a) iontové proudy a presynaptická aktivita u neosvětlené tyčinky; b) reakce tyčinky na osvětlení"[39].	4	4.1 Pohled uživatele VR headsetu na 3D prostředí.	37
1.3 (A) Snímek z optické koherentní tomografie sítnice s viditelnou hypofluorescenční oblastí maculy a hyperfluorescenčním kruhem okolo. (B) Detail maculy [7].	5	4.2 Vlevo je zeleně vyznačeno původní kolizní těleso ve tvaru koule, které nezaznamená srážku s nízkou překážkou. Vpravo je nové kolizní těleso ve tvaru kapsle.	39
1.4 Pozdější stádium nemoci <i>Retinitis pigmentosa</i> s viditelnými nánosy pigmentu [35].	6	4.3 Průvodce kalibrační fází testu na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor.	40
1.5 Přenos nového genu do sítnice [9].	8	4.4 Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s nastavením síťového připojení mezi zařízeními.	41
2.1 Horizontální a vertikální zorné pole člověka [4].	15	4.5 Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s nastavením výběru účastníka.	42
2.2 Ideální snímané zorné pole člověka [4].	17	4.6 Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s rozšířeným nastavením VR Loggeru a aplikace.	43
2.3 Znázornění normálního zdravého zraku, krátkozrakosti, dalekozrakosti a astigmatismu [6].	21	4.7 Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s výpisem uživatelských zpráv.	44
3.1 Kolizní těleso v původní verzi Luny.	26	4.8 Hlavní obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s probíhajícím testem. Na spodním pohledu je červeně označen eye tracking.	45
3.2 Grafické uživatelské rozhraní aplikace Luna Vizualizer.	30		

4.9 Pohled ze strany a pohled shora na průchod pacienta v modulu Supervisor.	46	D.1 The calibration process of the Luna application	76
4.10 POV pohled uživatele VR headsetu při nastavování offsetu prostředí.	47	D.2 Button names on the hand controllers. Image adapted with custom labels [43].	77
4.11 POV pohled pacienta při manuálním nastavování intenzity osvětlení.	48		
4.12 WebGL modul s přehrávající animací.	49		
5.1 Graf výsledků průchodů subjektů modulem TestSubject.	54		
5.2 Grafy odpovědí z dotazníků k modulu Supervisor.	55		
5.3 Grafy odpovědí z dotazníků k modulu TestSubject.	56		
B.1 Dotazník k modulu TestSubject z uživatelského testování.	66		
B.2 Dotazník k modulu Supervisor z uživatelského testování.	67		
C.1 Průběh kalibrace aplikace Luna	70		
C.2 Pojmenování tlačítek na ručních ovladačích. Převzatý obrázek s vlastními popisky [43].	71		

Tabulky

2.1 Srovnání VR headsetů [13].	14
5.1 Subjekty v uživatelském testování.	53
5.2 Výsledky uživatelského testování modulu Supervisor	55
5.3 Výsledky uživatelského testování modulu TestSubject.	56



Kapitola 1

Úvod

Ačkoli jsou dědičné degenerativní poruchy sítnice považovány za velmi vážné nemoci, při kterých ve většině případů dochází k silné degradaci vizuálních funkcí a slepotě, výzkum jejich léčby začal přinášet úspěchy až v posledních letech, kdy byla v prosinci roku 2017 v USA a posléze také v listopadu následujícího roku v Evropské unii schválena první genová terapie *Voretigene neparovec* obchodním názvem **Luxturna**. Vysoká cena terapie a relativně malé investice do výzkumu nových metod léčby jsou přímo spojené se sporadickou prevalencí přibližně jednoho nemocného na 1380 zdravých jedinců, tedy celkově pouze 0.0679% lidské populace [20]. Přestože jsme schopni přesně změřit například zrakovou ostrost při léčbě *myopie*, komplexní zhodnocení vlivu zhoršeného zraku jedince na jeho kvalitu života nemá laboratorně definovanou metriku.

Nemoci jako *pigmentová retinopatie* nebo *Leberova vrozená slepota*, způsobené mutací genu RPE65, jsou provázeny silnou šeroslepostí, a proto byl pro posouzení účinku terapie zvolen test pohybu pacienta labyrintem s různou intenzitou osvětlení, kde se měřilo několik veličin, jako je čas průchodu a počet nárazů do překážek. V této práci jsem se zabýval možností využití virtuální reality pro testy mobility a orientace, představil jsem vlastní prototyp aplikace pro tato měření s názvem **Luna** a nastínil budoucí směr, kterým by se vývoj **Luny** mohl ubírat.

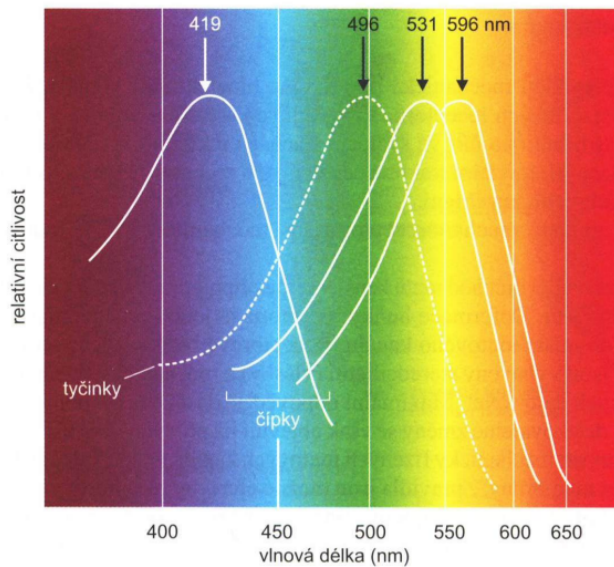
1.1 Vztah vizuálních funkcí a vizuálních úloh

Vizuální funkce popisují schopnost vnímat určitý vizuální stimul a měří se na základě změny konkrétního parametru, kde se hledá hraniční hodnota pro odpovídající vizuální úlohu, při které dojde u pacienta k neschopnosti úlohu správně vykonávat. Jednotlivé vizuální funkce, jako například ostrost vidění, kontrastní citlivost nebo barevná citlivost, jsou úzce spjaty s výkonností člověka při řešení vizuálních úloh, jako je kupříkladu čtení nebo prostorová orientace. Na základě zjištění určité poruchy vizuální funkce u pacienta lze předpokládat zhoršená výkonost při konkrétních vizuálních úlohách a stejně tak i obráceně. Kompletní analýza kvality zraku tak vyžaduje komplexní vyšetření, které zahrnuje zhodnocení toho, jak pacient zvládá každodenní, se zrakem spjaté, činnosti [21]. Vizuální úloha, kterou jsem se zabýval v této práci, je orientace v prostoru při chůzi.

1.2 Sítnice

Sítnice je část oka, která se rozprostírá na zadní straně oční bulvy. Obsahuje několik vrstev, mezi které mimo jiné patří vnější pigmentový epitel a vrstva tyčinek a čípků. Místo největší koncentrace těchto světločivých buněk se nazývá žlutá skvrna (*macula lutea*). Světlo dopadající do těchto míst nám poskytuje ostrý obraz, jelikož je ostrost obrazu spjatá s počtem fotoreceptorů. V centru žluté skvrny se nachází fovea (*fovea centralis*), v jejímž středu nejsou tyčinky a jedná se o místo nejostřejšího vidění. Část oka, kde oční nerv (*nervus opticus*) vstupuje do oční bulvy, se nazývá slepá skvrna (*papila nervi optici*). Na tomto místě se nenachází fotoreceptory a vytváří prázdnou oblast zorného pole, kterou si musí lidský mozek dopočítat [54].

Čípky rozeznávají jak intenzitu světla, tak i barvu, protože je během fototransdukce *11-cis retinal* kombinován s třemi druhy *opsinů*. Fungují lépe ve světlejším prostředí a jsou nejvíce koncentrovány ve fovee a směrem k periférii oka jejich počet klesá. Tyčinky na druhou stranu jsou mnohem početnější a starají se o noční vidění, kdy rozpoznávají pouze intenzitu světla bez barvy, jelikož je v nich pouze jeden druh *rhodopsinu*. Jsou více koncentrovány v periférii sítnice než čípky. Většina lidské populace má čípky rozdělené do tří kategorií podle vlnové délky světla na červenou, zelenou a modrou barvu a poskytují *trichromatickou vizi*. Výsledná barva je ale získána až integrálním výpočtem vjemů kvůli přesahu jednotlivých pásem vlnových délek [39].



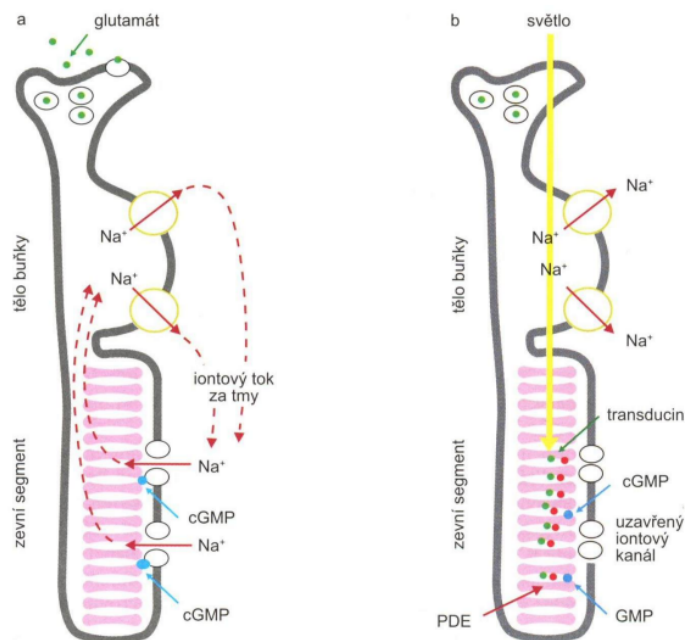
Obrázek 1.1: Graf závislosti relativní citlivosti fotoreceptorů na vlnové délce [39].

Pod nimi se nachází vrstva gangliových buněk, které získají informaci o světle ze světločivých buněk a propagují ji elektrochemickými signály do mozku. Tyto buňky jsou v centru sítnice v poměru 1 : 1 vůči fotoreceptorům, ale v periferii je poměr vyšší až do přibližně 7 : 1 a dochází ke smíšení informace z více zdrojů do jedné odpovědi. Toto rozvržení gangliových buněk má za následek nižší ostrost zraku v periferním vidění, než ve středu zorného pole a vliv na ostrost je vyšší než samotné rozprostření fotoreceptorů [42].

1.3 Fototransdukce

Fototransdukce je proces, při kterém dochází k vzniku nervového vzruchu v sítnici oka člověka a který začíná přijetím fotonu ve vnější vrstvě fotoreceptorů. Tento vjem aktivuje vizuální pigmenty v tyčinkách a čípcích. Obecně je citlivost receptorů na podnět logaritmická, tudíž jsou receptory nejcitlivější pro nejslabší podněty a pro intenzivnější podněty vytváří relativně slabší odpovědi. Ve tmě jsou membrány fotoreceptorů v depolarizovaném stavu s úrovní přibližně -40 mV a probíhá tok iontů K^+ skrz tělo fotoreceptoru, které ovlivňují množství vydávaného neurotransmiteru [39]. Při zasvěcení světla na tyčinku nebo čípek dochází k hyperpolarizaci a při postupném zvyšování intenzity světla se potenciál více posouvá do negativních hodnot až do svého nasycení přibližně v -65 mV a buněčná membrána se stává méně propustnou pro draslík [51]. Tím se koriguje receptorový potenciál, který je závislý na

počtu absorbovaných fotonů [39]. Vzruch se v sítnici šíří stupňovým potenciálem a skrze axon gangliové buňky poté do mozku [52]. Na této cestě se vzruch může ještě dále zpracovávat a být využit například pro pohyb akomodačních svalů [39].



Obrázek 1.2: "Činnost fotoreceptorů: a) iontové proudy a presynaptická aktivita u neosvětlené tyčinky; b) reakce tyčinky na osvětlení" [39].

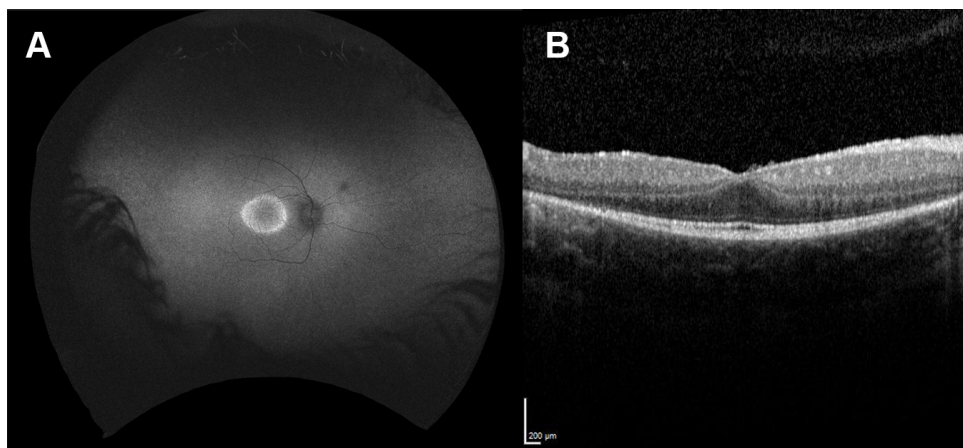
1.4 Dědičné degenerativní poruchy sítnice

Dědičné degenerativní poruchy sítnice, anglicky *inherited retinal dystrophies (IRDs)*, představují velmi různorodou skupinu očních onemocnění, která jsou přenášena z rodiče na potomka. Typ přenosu se dělí na recesivní, kde je zapotřebí aby potomek zdědil dvě kopie zmutovaného genu od každého z rodičů. Dále na dominantní, kde stačí pouze jedna kopie genu. A v neposlední řadě také na přenos vázaný na pohlavní chromozom. Člověk se rodí s 44 autosomy, tedy nepohlavními chromozomy, a 2 pohlavními chromozomy. Muži mají pohlavní chromozomy XY a ženy XX. Pokud se muž narodí s mutací genu vázaného na chromozom X, nemá druhý chromozom X, ze kterého by mohl převzít správnou verzi genu, a může se u něj začít projevovat nemoc. U žen je naopak zapotřebí dvou kopií zmutovaného genu na každém X chromozomu, a proto jsou muži více náchylní na nemoci s tímto typem dědičnosti. Existuje celá řada dalších typů dědičnosti. Mezi dědičné degenerativní poruchy sítnice patří, mimo jiné, *Retinitis pigmentosa*, *Stargardtova choroba* nebo *Leberova*

vrozená slepota. Bylo zmapováno 325 genů, které mají spojitost s IRDs, a identifikováno jich bylo 289 [8]. Jednotlivé nemoci mohou být často způsobeny mutacemi různých genů, a proto je diagnóza mnohdy složitá a případná léčba se může lišit mezi konkrétními pacienty.

1.4.1 Retinitis pigmentosa

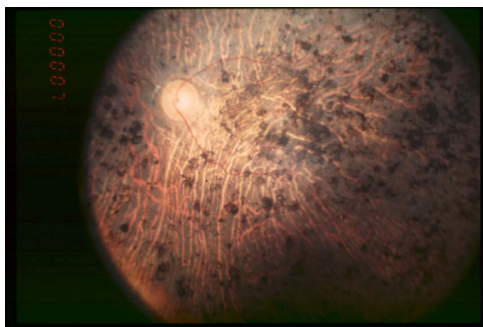
Retinitis pigmentosa zaštiťuje širokou škálu nemocí, které sdílejí podobné znaky a jedná se o nejčastější vrozenou degenerativní poruchu sítnice [27]. Projevuje se postupnou ztrátou fotoreceptorů, nejprve tyčinek a později i čípků. Jelikož jsou tyčinky zodpovědné za noční vidění, jeden z prvních příznaků bývá zhoršená viditelnost za tmy [56]. Dochází také ke zúžení zorného pole, jelikož tyčinky jsou více koncentrovány na periférii sítnice než čípky. V pokročilých stádiích nemoci dochází k degradaci centrálního zorného pole, tedy oblasti maculy. U dětí je mnohdy pozorovatelná dobrá ostrost zraku, která se ale s přibývajícím věkem zhoršuje. Na následujícím obrázku je vidět autofluorescenční snímek sítnice s abnormalitou v podobě světlého kruhu okolo maculy, což značí přebytek lupofuscinu. Tento fluorescenční pigment se hromadí v epitelových buňkách jako odpadní produkt buněčného metabolismu [7].



Obrázek 1.3: (A) Snímek z optické koherentní tomografie sítnice s viditelnou hypofluorescenční oblastí maculy a hyperfluorescenčním kruhem okolo. (B) Detail maculy [7].

Fyziologické projevy a symptomy se liší mezi pacienty a pro většinu případů dosud neexistuje léčba. Prevalence nemoci se liší podle studií a geografického rozložení. Nejvyšší incidence je v izolovaných oblastech s vysokým stupněm příbuzenských sňatků, kde je přibližně 1 nemocný na 750 zdravých jedinců.

Nižší incidence je pak v západní společnosti, kde se pohybuje mezi 3000 až 5000 zdravých na 1 nemocného. K dnešnímu dni byla schválena pouze jedna genová terapie, která vyžaduje u pacienta dostatek funkčních fotoreceptorů a mutaci v konkrétním genu *RPE65*. Kromě postupné degenerace světločivých buněk se pacienti trpící *Retinitis pigmentosa* často potýkají i s dalšími projevy narušené sítnice a oční bulvy, jako je katarakt nebo cystoidní makulární edém. V pozdějších stádiích nemoci bývají znatelné viditelné nánosy pigmentu primárně v periferii sítnice, avšak mohou být i lokalizované do určitých částí sítnice, nebo být rozmístěné po celé ploše, jako je to na následujícím obrázku.



Obrázek 1.4: Pozdější stádium nemoci *Retinitis pigmentosa* s viditelnými nánosy pigmentu [35].

■ USH2A

Mutace genu *USH2A* jsou nejčastější příčinou vzniku autosomálně recesivní choroby *Retinitis pigmentosa* a přisuzuje se jim 12% až 25% všech výskytů této nemoci. Jedná se také o nejčastější původce *Usherova syndromu*, který se projevuje jednak zrakovým postižením, ale také poruchou sluchu. *Usherův syndrom* se dělí na tři kategorie podle závažnosti, kde typ číslo dva se objevuje ve více jak 50% procentech případů [55]. Gen *USH2A* kóduje protein *usherin*, který je se nachází v bazálních membránách vnitřního ucha a v sítnici. Přesné vlivy mutací genu *USH2A* na vznik výše popsaných chorob jsou předmětem aktuálního výzkumu [48].

■ 1.4.2 Vliv genu *RPE65* na vizuální cyklus

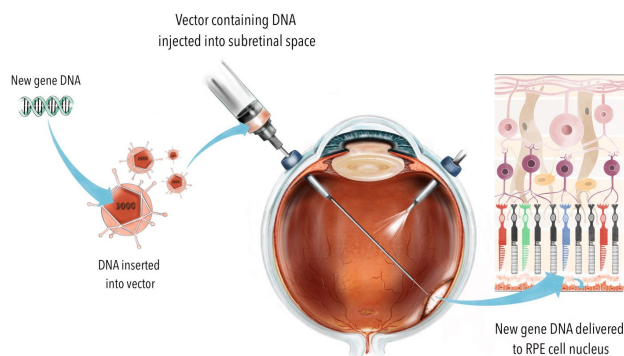
Gen *RPE65* kóduje protein *Retinoid isomerohydrolase RPE65*. Tento protein je produkován v retinálním pigmentovém epitelu (RPE). Tato vnější vrstva sítnice slouží jako ochrana vrstvy fotoreceptorů, zabraňuje zpětnému odrazu světla, které je patrné například u koček ve tmě, a je zodpovědná za vyživování

sítnice [23]. Enzym *RPE65* je nedílnou součástí vizuálního cyklu, kde katalyzuje proces přeměny *all-trans-retinal* na *11-cis-retinol*. Tato alkoholová forma vitamínu A je poté přeměněna na aldehydovou formu s názvem *11-cis-retinal*. Po absorpci fotonu vizuálním pigmentem na světločivých buňkách dochází k fotoisomeraci a po ní se vizuální pigment stává 'vyčerpaným' a není znovu schopen absorbovat další fotony. O jeho regeneraci se stará právě vizuální cyklus [18]. I přes to, že se vizuální cyklus pro tyčinky a čípky liší, je protein *RPE65* nezbytný pro životní cyklus obou druhů fotoreceptorů [25].

Více než 60 různých mutací genu *RPE65* bylo spojeno s několika druhy dědičných degenerativních poruch sítnice (IRDs). Chyby v genu *RPE65* zapříčiňují přibližně 2% výskytů autosomálně recesivní choroby *Retinitis pigmentosa* a 16% výskytů *Leberovy vrozené slepoty*. Tyto poruchy jsou nejčastěji spojeny se slepotou již v raném věku života a mnohdy už od narození. U pacientů s recesivní *Lebrovou vrozenou slepotou* je ale i přes brzký nástup slepoty pozorovatelná normální sítnicová lamina s definovanou strukturou světločivých buněk a normální průměr očního nervu. Toto pozorování bylo jedním z důvodů výzkumu možnosti léčby pomocí genových terapií [26]. Symptomy této nemoci jsou mimo jiné abnormality sítnicových pigmentů a optického disku, výrazně snížená ostrost vidění a zmenšení zorného pole, nystagmus nebo katarakta [16]. Každý pacient má průběh IRD subjektivní a jednotlivé symptomy i jejich závažnost se různí.

1.4.3 Genová terapie

Genová terapie se v kontextu výzkumu dědičných degenerativních poruch sítnice zdá jako účinný způsob léčby. Cílem terapie je oprava genu pomocí externě dodaného *wild-type* genu bez vytvoření nových chyb. V návaznosti na tento zákrok má dojít k znovuobnovení vizuálního cyklu, obecnému zlepšení zraku a zpomalení nebo zastavení degenerace sítnice. K dnešnímu datu (24. května 2024) je v Evropské unii jediná schválená genová terapie pro IRDs způsobené mutací genu *RPE65* s názvem *voretigene neparvovec-rzyl* s obchodním názvem **Luxturna**. Opravný gen je transportován pomocí adenovirového vektoru jednou injekcí přímo pod sítnici do obou očí v rozmezí alespoň šesti dní.



Obrázek 1.5: Přenos nového genu do sítnice [9].

Minimálně tři dny před první aplikací je potřeba nasadit léčiva na potlačení reakce imunitního systému, která by mohla zabránit správnému fungování terapie. Pro aplikaci **Luxturny** je nutné splnit více podmínek. Jednak aby byla choroba způsobena právě mutací genu *RPE65* a také aby měl pacient dostatek živých buněk v sítnici [3]. Je proto potřeba určit diagnózu a provést léčbu co nejdříve, ideálně již v dětském věku pacienta, dokud není sítnice ještě výrazně poničena.

■ Problémy spojené s genovou terapií

Výsledky genové terapie **Luxturna** jsou nekonzistentní, mají různou dlouhodobou účinnost a je složité správně zhodnotit fungování residuálních světločivých buněk. Tyto rozdíly jsou mimo jiné způsobeny různorodou imunitní reakcí vůči adenovirovým vektorům, které se používají pro transport nového genu do sítnice. Je také obtížné určit, zda je pacient vhodným kandidátem pro konkrétní genovou terapii, protože různé nemoci sdílejí podobné genetické charakteristiky a tudíž není přesná korelace genotypu a fenotypu mezi různými klinickými charakteristikami. Gen *RPE65*, v závislosti na typu jeho mutace, způsobuje celou řadu různých onemocnění, jelikož výsledný protein *Retinoid isomerhydrolase* má význam hned v několika bodech vizuálního cyklu [45]. Dalším problémem je cena, která je kvůli nákladům na výzkum a výrobu léčiv pro velmi vzácná onemocnění extrémně vysoká a pohybuje se okolo 850 000 \$ [37].

Kapitola 2

Analýza

2.1 Třetí fáze klinických testů Luxturny

Cílem testování bylo určit efektivitu voretigene neparovec-rzyl na léčbu *Leberovy vrozené slepoty*. Výsledky testů byly poprvé uveřejněny 12. ledna 2018.

Testování probíhalo nejprve přesným měřením ostroty zraku a rozsahu periferního vidění. Poté pacienti podstoupili *full-field sensitivity threshold testing (FST)*, kde se určovala citlivost na světlo v celém zorném poli podle toho, při jaké svítivosti pacient zaznamenal záblesk, a také *Multi-Luminance mobility test (MLMT)*, při kterém se zjišťovala schopnost zvládat každodenní aktivity spojené s pohybem. Tento MLMT test se prováděl v několika úrovních osvětlení a hledala se dolní hraniční úroveň, při které již nebude pacient schopen testem projít.

Pacienti museli splnit následující podmínky pro účast na genetické terapii: Být starší než tři roky, mít dostatek funkčních světločivých buněk v sítnici, mít mutaci v obou kopiích genu *RPE65* (je totiž recesivní), mít ostrot zraku rovnou nebo horší než 20/60 a periferní vidění rovné nebo menší než 20 stupňů a nakonec také být schopní testování MLMT bez schopnosti průchodu při nejnižší úrovni osvětlení.

Genové terapie pomocí Luxturny se ve výsledku zúčastnilo 29 pacientů

s věkem mezi 4 až 44 lety. Dva pacienti, které jsem do celkového počtu nezapočítal, z terapie odstoupili ze zdravotních důvodů.

Následující výsledky zohledňují pouze 20 pacientů, jelikož zbytek se řadí do kontrolní skupiny, které byla genová terapie Luxturna aplikována až za rok. Vážné nežádoucí účinky se ukázaly u dvou lidí a byly spojené s dalším onemocněním. Ostatní nežádoucí účinky se ukázaly u 13 pacientů a jednalo se především o zvýšený nitrooční tlak a katarakt.

Průměrná změna v úspěšnosti MLMT testu bylo 1.9 světelných úrovní a v FST testu se průměrně snížila hranice citlivosti na světlo o $-2.10 \log_{10} \text{cd} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ a v testu ostrosti zraku VA pomocí čtení písmen na určitou vzdálenost se průměrně ostrost zlepšila o $-0.16 \log_{\text{MAR}}$. Tyto průměry se po 4 letech po prvním testování snížily na 1.7 úrovní u MLMT testu, $-1.90 \log_{10} \text{cd} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ u FST testu a -0.003 u VA testu [44]. Tudíž je vidět, že léčba v tomto střednědobém měřítku stále relativně dobře funguje, avšak je znát určité zhoršení v určitých oblastech.

Testování intervenční a později také kontrolní skupiny (celkově 29 lidí) ukázalo, že 55% pacientů vykázalo zlepšení v průchodu MLMT testem o alespoň 2 světelné úrovně a 21 z 29 pacientů bylo schopno projít MLMT testem při nejnižší světelné úrovni [2].

■ Multi-Luminance Mobility Test (MLMT) během třetího klinického testu Luxturny

Jednalo se o pohybový test, jehož zkratkou bylo MLMT, který měl určit změnu ve funkčním zraku pacienta pomocí zhodnocení jeho schopnosti průchodu místností při různých úrovních osvětlení. Test zahrnoval sedm nebo více úrovní osvětlení, kde každá následující úroveň je méně osvětlená. Svítivost se pohybovala od 1 lux (odpovídá přibližně letní noci bez měsíce), přes 4 lux (parkoviště v noci), 10 lux (město hodinu po západu slunce), 50 lux (venkovní vlakové nádraží v noci), 125 lux (vnitřek vagónu vlaku v noci), 250 lux (vnitřek výtahu), až do 400 lux (světle osvětlená kancelář). Hodnocení bylo ve formě skóre za každou světelnou úroveň, kterou pacient úspěšně prošel. Pro úspěšný průchod úrovní bylo zapotřebí mít méně než čtyři nárazy a čas kratší než tři minuty [11]. Pokud došlo při opětovném testování po roce od aplikace genové terapie k lepším výsledkům v MLMT, lze usoudit zlepšení funkčního zraku ve vztahu k orientaci v prostoru [2].

■ 2.2 Využití VR v testech mobility

■ 2.2.1 Testy mobility

Funkční testování mobility a orientace pacientů bylo výhodné, jelikož z něj šlo usoudit, jak se výsledky testů projeví v reálných podmínkách chůze a orientace v každodenním životě. Využití fyzického MLMT testu proběhlo mimo jiné ve výzkumu týmu Russell et al. při práci s pacienty s IRDs v 3. fázi klinického testování voretigene neparovec-rzyl [2] a také ve výzkumu týmu Chung et al., který test vytvořil z původního testu od týmu Maguire et al. [41] a potvrdil, že se tímto testem dokáže rozeznat chorobný pacient od zdravého [29]. Dále byl MLMT test využit i týmem Roman et al., který našel korelaci mezi mobilitou a FST [53] a týmem Kumaran et al., který potvrdil, že rychlost průchodu úrovní v testu je měřítkem, které nejlépe rozlišuje pacienty s retinální dystrofií spojenou s RPE65 a pacienty zdravými. Dále také poukázal na statistické výsledky jeho testů, kdy tvrdí, že efekt naučitelnosti je obecně minimální, avšak výsledky nejsou konzistentní a vypočítal pro konkrétního pacienta i relativně vysoký koeficient opakovatelnosti 1.1 m/s. Dále potvrdil platnost konvergentní pro korelace průměrné citlivosti sítnice MS a velikosti zorného pole V_{TOT} na rychlosti průchodu s pravděpodobnostmi $P_{MS} = 0.022$ a $P_{V_{TOT}} = 0.022$. Kde P značí pravděpodobnost 2.2% kdy získáme data z tohoto výzkumu za platnosti nulové hypotézy, která tvrdí, že korelace neexistuje. Jelikož je v obou případech $P < 0.05$, tak se jedná o statisticky významnou předpověď rychlosti chůze. Následně také platnost diskriminační pro korelace ostrosti zraku VA a kontrastní citlivost CS na rychlosti průchodu s pravděpodobnostmi $P_{VA} = 0.340$ a $P_{CS} = 0.433$. Kde tentokrát P značí pravděpodobnost 34% a 43.3% že získáme data z tohoto výzkumu za platnosti nulové hypotézy, která tvrdí, že korelace neexistuje. Jelikož nyní je v obou případech $P > 0.05$, tak se nedá relevantně předpovědět rychlost chůze ze znalosti VA a CS. Dále také z dat naměřených týmem Kumaran et al. vyplývá, že se snižující se intenzitou osvětlení prostředí klesá u chorobných pacientů i průměrná rychlost chůze, zatímco u zdravých pacientů je ve všech úrovních intenzity osvětlení průměrná rychlost chůze vyrovnaná [41]. Je důležité poznamenat, že se tyto výsledky vztahovaly ke konkrétním pacientům a podmínkám testování a nelze je univerzálně aplikovat pro všechny budoucí testy.

■ 2.2.2 Využití VR pro O&M testy

Během 3. fáze klinických testů se začaly ukazovat limitující okolnosti, které souvisejí s původním MLMT testem. Jednalo se mimo jiné o to, jak provádět testy mobility a orientace v méně vhodném prostředí nemocnic a očních klinik, kde na rozdíl od laboratorních podmínek klinických testů nemusí být ideální stavět celý fyzický labyrint. Jde o problém, že fyzické testy potřebují ke svému fungování vyhrazený prostor, kde je kompletní kontrola nad osvětlením a je odstíněn od okolí. Dále také dostatek personálu a hardwaru. Přesná replikace minulého testu pro pacienta je složitá a také hrozí nebezpečí úrazu pacienta z důvodu reálných překážek v jeho cestě, což může působit na psychiku a strach pacienta. V neposlední řadě je ve fyzickém testu obtížné přizpůsobovat podmínky vůči různým typům očních vad, které se mohou lišit ve spoustě příznacích. Na tyto problémy reaguje *proof-of-concept* týmu Aleman et al., který byl publikován 20. listopadu 2020. Aleman et al. zde nastínil možný směr, kterým by se výzkum nových metod a zlepšování stávajících metod testování orientace a mobility O&M mohl ubrat. Pomocí vlastního software a za použití HTC VIVE headsetu vytváří nový typ O&M testu založený na virtuální realitě. Tato menší studie se ukázala jako přínosná a vyjádřila podporu dalšímu výzkumu v oblasti [19].

■ 2.2.3 VR-O&M Test

V lednu 2023 Aleman et al. vydává článek s dalšími poznatky z optimalizace pro využití VR při O&M testech. Této novější studie se zúčastnilo 20 zdravých lidí, kterým bylo mezi 14 až 67 let a 29 chorobných pacientů s vrozenými degenerativními vadami sítnice, kterým bylo mezi 15 až 63 lety. Výsledek byl, že VR-O&M dokázalo spolehlivě rozpoznat chorobné pacienty od zdravých a znovu podtrhl efektivitu využití virtuální reality pro testování. Jako hardware byl tentokrát použit Oculus Quest 2 s ovladači, které registrovaly pozice rukou. Headset se nasadil pacientovi po 20 minutách, které strávil ve tmě, aby se jeho oči adaptovaly a pod headsetem mohl mít nasazené brýle pro dosažení nejlepší ostrosti zraku. Oculus Quest 2 měl dva OLED displeje s rozlišením 1832×1920 s obnovovací frekvencí 90 Hz s velikostí zorného pole po horizontální ose přibližně 89° a po vertikální ose přibližně 93° . Každý display se mohl individuálně zapnout nebo vypnout, což umožňovalo binoculární i unioculární testování. Pro změření svítivosti headsetu bylo zapotřebí namíření radiometru na monochromatické prázdné pozadí osvětlené výstupem z Oculus Quest 2, kde se maximální svítivost rovnala $79.7 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a jednotlivé úrovně pro testování se určily jako $\{-0.65, -0.19, 0.39, 0.69\}$ s jednotkami $\text{phot} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Dalších 4 až 8 úrovní se dosáhlo přidáním filtry před obrazovkami v headsetu. 3D prostředí napodobovalo původní MLMT z 3. fáze klinických testů Luxturny

a bylo tvořeno 5×5 čtverci s celkovou plochou $3.9 \text{ m} \times 3.9 \text{ m}$. Pacient měl v první fázi VR-O&M testu za úkol chodit po šipkách, které byly červeně zobrazeny na čtvercích na zemi a dojít až do cíle, který byl označený dveřmi. Po dosažení dveří se rozmístění objektů v prostředí změnilo a začala další úroveň s nižší svítivostí. Tato první fáze sloužila k určení minimální hranice intenzity osvětlení, při které byl pacient schopen se v prostředí orientovat. Poté se spustila druhá fáze, kde se pacient snažil stále dojít po šipkách, které byly od toho momentu osvětleny pouze v 1. fázi zjištěnou hraniční hodnotou plus 1 log jednotky, do dveří, ale zároveň se musel vyhnout překážkám na cestě. Důležitou změna v tomto optimalizovaném testu byla nově pro nutnost pacienta překážku označit ovladačem, aby se potvrdilo, že ji zaregistroval a nedocházelo k nevyžádaným chybám, které jsou spojené s automatickým vyhodnocením kolize pomocí snímačů na ruku a nohu. Významné zjištění bylo, že pro zhodnocení efektivity pacienta při vykonávání vizuálních úloh byla vhodnější metrika tentokrát ne rychlost průchodu úrovní, ale přesnost při vyhýbání se překážkám. Aleman et al. poznamenal, že se tohoto testu nezúčastnili pacienti s nejvíce pokročilým stádiem degenerace sítnice. A že je tedy možné, že v budoucnu bude potřeba pro jejich testování přidat horní úroveň intenzity osvětlení [22].

2.3 Porovnání VR headsetů

Název	Meta Quest 3	Oculus Quest 2	Meta Quest Pro	Apple Vision Pro
Výrobce	Meta	Oculus (Meta)	Meta	Apple
Maximální jas	-	100 nits	-	-
Rozlišení	2064 x 2208	1832 x 1920	1800 x 1920	3660 x 3200
Obnovovací frekvence	120 Hz	120 Hz	72, 90 Hz	90, 96, 100 Hz
Nastavitelný diopter	Ne	Ne	Ne	Ne
Typ displaye	2x LCD	1x Fast switch LCD	2x QLED	2x Micro-OLED
Optika	Pancake lenses	Fresnel lenses	Pancake lenses	Pancake lenses
IPD rozsah	58 – 71 mm	58, 63 a 68 mm	55 – 75 mm	51 – 75 mm
Viditelný zorný úhel	110 horizontální, 95 vertikální	97 horizontální, 93 vertikální	106 horizontální, 95.57 vertikální	100 až 110 horizontální (předpoklad)[1]
Renderovaný zorný úhel	-	104 horizontální, 98 vertikální, 113.46 diagonální	108 horizontální, 95.57 vertikální, 111.24 diagonální	-
Hmotnost	515 g	503 g	722 g	600 – 650 g
Eye tracking	Ne	Ne	Ano	Ano
Hand tracking	Ano	Ano	Ano	Ano
Reproduktory	Ano	Ano	Ano	Ano
Mikrofon	Ano	Ano	Ano	Ano
Místo pro dioptrické brýle	Ano [12]	Ano [12]	Ano [12]	Ne [14]
Operační systém	Android	Android	Android	VisionOS

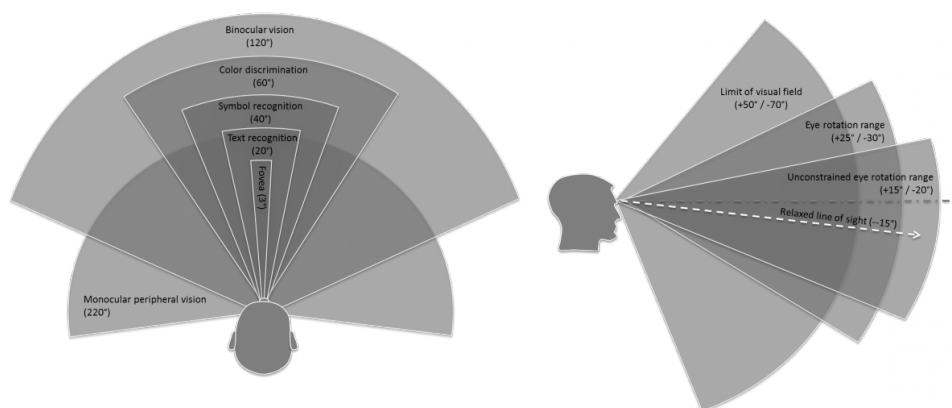
Tabulka 2.1: Srovnání VR headsetů [13].

Do porovnání jsem vybral Oculus Quest 2 a Meta Quest Pro z důvodu, že jsem je měl k dispozici v laboratoři a pracuji s nimi při vývoji aplikace Luna. Meta Quest 3 a Apple Vision Pro jsem vybral, jelikož se jednalo o relativně nové modely, které se ve VR komunitě velmi diskutují a zatím k nim nebyla zpracovaná studie pro použití v O&M testech.

2.3.1 Popis parametrů VR headsetů

U parametru rozlišení jsou výhodnější vyšší hodnoty, jelikož dávají předpoklad ostřejšímu obrazu z důvodu hustější koncentrace pixelů na obrazovce. Obnovovací frekvence zase popisuje, kolikrát za sekundu se obrazovka překreslí a můžeme očekávat silnější mozkové odpovědi při vyšší frekvenci. Nízká obnovovací frekvence může způsobit nevolnost a trhavý obraz zatímco frekvence vysoká poskytuje plynulejší obraz a rychlejší reakce člověka [38]. Ani jeden z

uvedených VR headsetů neposkytuje podporu pro nastavitelný diopter, který slouží ke korekci zraku lidí s krátkozrakostí, ale všechny headsety mají buď místo pro korekční brýle, nebo možnost připevnění dodatečných čoček pro korekci. Zorná pole u člověka mají své kategorie. Rozlišujeme binokulární vizi, tedy pohled obou očí současně a monokulární, tedy jednotlivých očí. Viditelné zorné pole VR headsetu by mělo zabrat co největší plochu reálného zorného pole očí, které je přibližně 120° horizontálně v binokulární vizi a až 220° v monokulární. V případě vertikálního pohybu očí jde je relaxovaný stav v přibližně -15° s možnou elevací do 15° a depresí -20° , která vytváří celkový zorný úhel až 120° [15]



Obrázek 2.1: Horizontální a vertikální zorné pole člověka [4].

LCD display funguje na principu svícení světla skrz několik vrstev. Přesněji vrstvu tekutých krystalů, polarizační vrstvu, barevný filtr obsahující červenou, zelenou a modrou barvu a několika dalších a změnou proudu se moduluje jeho průchod a vytváří se přesná barva.

OLED display je tvořen elektroluminescentními organickými materiály, které reagují na elektrický proud a vyzařují světlo s tím, že většina výrobců ještě přidává dodatečný RGB filtr. Nepotřebují tudíž spodní osvětlovací vrstvu a jsou méně prostorově náročné. Aktivní amOLED monitory navíc přidávají vrstvu kapacitorů, které dokáží uchovat stav jednotlivých subpixelů a jsou vhodnější pro VR a AR technologie [40].

Micro-OLED potom ještě přidávají silikonovou polovodičovou vrstvu a umožňují dosáhnout na vyšší pixel per inch PPI a tedy zvýšit maximální ostrost obrazu, avšak jejich životnost je nižší [47].

QLED display je založen na kvantových tečkách, což jsou nanokrystaly se schopností emitování světla při excitaci buď světlem, nebo elektrickým

proudem, a v tomto případě se jedná o modré světlo. Excitace zde znamená proces, při kterém elektron v kvantové tečce absorbuje energii, kterou následně uvolní ve formě světla. Barva pixelu pak závisí na vlnové délce emitovaného světla, které se mění s velikostí tečky [28].

■ 2.4 Specifika virtuální reality

Využití virtuální reality pro O&M testy přináší řadu výhod a nevýhod, které je třeba brát v potaz při vývoji testovacího software i hardware. Je důležité snažit se nevýhody co nejvíce potlačit a zároveň těžit z možností, které nám virtuální realita nabízí. Na následujících stranách jsem představil některá specifika, která se týkají VR v našem kontextu testování očních chorob.

■ 2.4.1 Světlo

U virtuální reality se používá více fyzikálních veličin k popisu vlastností světla. Mezi ně mimo jiné patří svítivost, značená jednotkou kandela (cd), která udává intenzitu světelného toku v daném směru. Dále světelný tok, značený jednotkou lumen (lm), který udává množství světelné energie přenesené za jednotku času. Dále intenzita osvětlení, neboli osvětlivost, značená jednotkou lux (lx), která je definovaná jako světelný tok dopadající na jednotku plochy. Důležité je také zmínit jednotku nit, což je odvozená jednotka jasů, která značí svítivost jeden kandela na jeden metr čtvereční.

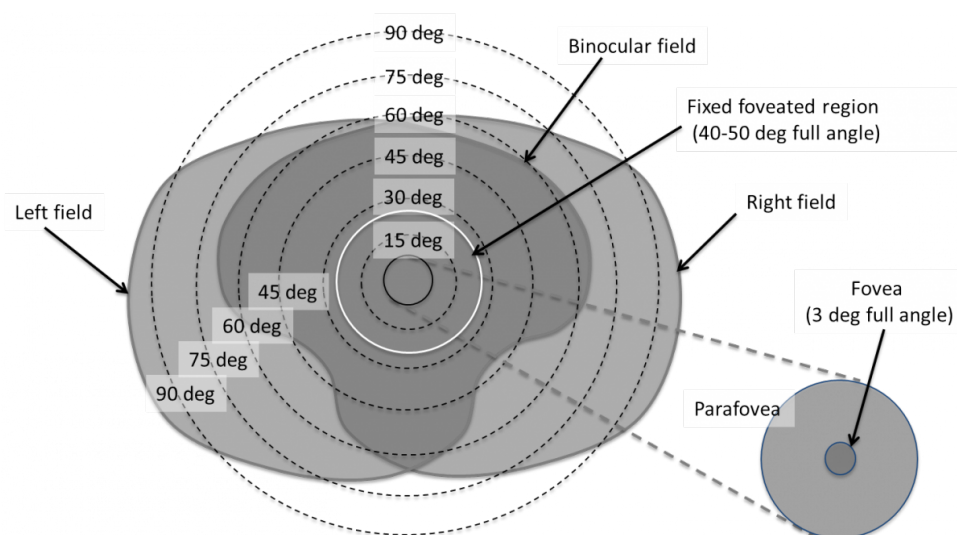
Současné komerčně prodávané VR headsety se bohužel svou maximální intenzitou osvětlení zdaleka nepřibližují kapacitám lidského oka, které je schopné rozlišit od téměř nuly do více než 1 milionu nits. Měření intenzity osvětlení v reálném prostředí je náročné a nestačí pouhé použití samotného spektrometru, který měří světlo v bodě. Intenzita osvětlení se tedy běžně získá jako odhad, který závisí na datech zaznamenaných zkalibrovanou RGB kamerou. Naopak měření intenzity osvětlení samotného VR headsetu probíhá často v centrálním bodě čočky pomocí spektrometru a jeho hodnota se poté uvádí v jednotkách nits.

Při určování hodnoty intenzity osvětlení prostředí ve virtuální realitě, kterou člověk subjektivně uzná jako dostatečnou pro realistický obraz skutečnosti, je nutno počítat s faktem, že preferovaná intenzita osvětlení prostředí lidí bývá ovlivněna startovací hodnotou. Pokud hodnotu osvětlivosti nejprve určíme

velkou a poté ji postupně snižujeme, průměrný člověk se rozhodne pro vyšší preferovanou hodnotu, než když bychom začali na nízké hodnotě a postupně ji zvyšovali. Dále se preferovaná hodnota také liší dle typu scény, kde si lidé u venkovních scén vybírají spíše vyšší hodnoty než u scén vnitřních [46].

2.4.2 Eye tracking

Eye tracking je technologie, která umožňuje zaznamenávat data o pohybech očí. Tyto informace mohou být velmi přínosné při pozdější analýze průchodu pacienta O&M testem. Okohybné svaly nasměrovávají oči určitým směrem z důvodu nutnosti člověka přecházet pohledem mezi předměty, protože nejostřejší pole vidění se nachází na středu sítnice na tzv. žluté skvrně. Zde je největší koncentrace světločivých buněk, která klesá ve směrech ke kraji sítnice. Data z eye trackingu jsou často vizualizována buď přímo na objektech, na které dopadá zrak, nebo jako tepelná mapa, která barevně zobrazuje četnost pohledu na dané místo na 2D ploše. Tato plocha může být buď samostatný objekt zájmu, jako je obrazovka počítače a vizualizace bodů zájmu na webové stránce pro následnou optimalizaci uživatelského průchodu stránkou, nebo jako virtuální plocha před obličejem uživatele, pomocí které můžeme vytvořit tepelnou mapu pohledu všemi směry, které nám umožňuje hardware VR headsetu. Tuto techniku více rozebírám v sekci návrh řešení pro eye tracking v aplikaci Luna.



Obrázek 2.2: Ideální snímané zorné pole člověka [4].

Jedním z typů očních pohybů jsou sakády. Tyto až 600 stupňů za sekundu rychlé trhavé pohyby, které trvají 30 až 120 milisekund, jsou určeny k prozkou-

mávání prostoru a zajištění ostrého vidění v širším zorném poli, než jen ve směru pohledu. Po nalezení bodu, na který se zrak začne zaostřovat, dochází ještě k lehkým fixačním driftům, které jsou opravovány mikro-sakádami. Oči tedy nejsou téměř nikdy nasměrované pouze na jeden bod, ale neustále se pohybují, aby vytvořily vhodný obraz. Z analýzy fixačních bodů sakád u člověka lze vypožorovat mimo jiné jeho soustředěnost na konkrétní předměty ve scéně [49].

Vestibulo-okulární reflex funguje tak, že kompenzuje pohyby hlavy, aby směr zraku zůstal fixovaný na preferovaný bod. Mimo jiné kvůli tomuto jevu není možné odhadovat směr zraku pacienta pouze z pohybů VR headsetu, ale je zapotřebí speciální eye tracking technologie, která snímá přímo oči uvnitř headsetu. Tyto a mnoho dalších pohybů očí mohou probíhat současně a je proto velmi náročné je odlišit od sebe. Je nutné analyzovat pohyby očí ve vztahu k okolnímu prostředí.

■ Elektrookulografie

Elektrookulografie (EOG) funguje na principu měření elektrického potenciálu pomocí elektrod umístěných na kůži kolem oka. Jelikož je rohovka nabitá pozitivně a sítnice negativně, jde relativně snadno určit pozice rotace oka. Díky tomuto způsobu měření se jedná o jedinou technologii využívanou ve VR, která dokáže určit směr oka i když je zavřené. EOG je schopné měřit sakády, fixace a směr pohledu, ale jedná se o méně přesnou metodu.

■ Videookulografie

V komerčně prodávaných VR headsetech se nejčastěji implementovaná metoda pro eye tracking nazývá videookulografie (VOG). Orientace očí se získává analýzou obrazu, který je snímán pomocí kamer ve VR headsetu. Přesný způsob analýzy obrazu bývá většinou patentovaný a liší se podle modelu headsetu [17]. Například v Meta Quest Pro jsou fotografie infračervené a jsou analyzovány ihned po pořízení a poté smazány, tudíž k nim uživatel nemůže získat přístup [5].

■ Sklerální vyhledávací cívky

Jedná se o nejpřesnější ze tří uvedených metod, která ale není běžnými uživateli VR headsetů používaná. Pro fungování sklerálních vyhledávacích cívek je nutné mít smyčky z kovových drátků na čočkách, které musí mít uživatel přímo na očích. Dále je potřeba speciálního VR headsetu, který obsahuje Helmholtzovy cívky vytvářející uniformní magnetické pole. Při pohybu oka se mění jeho orientace vůči magnetickému poli a tato změna způsobuje změnu magnetického toku skrz cívku na oku a indukuje napětí. Jelikož je rychlost změny magnetického toku přímo úměrná orientaci oka, lze tak kontinuálně měřit směr zraku [32].

■ 2.4.3 Náročnost přípravy a průběhu testování s VR

Oproti původnímu MLMT testu, kde bylo třeba postavit prostředí ručně, se náročnost na přípravu a průběh testování u VR velmi zjednodušuje. Není potřeba přestavovat každou úroveň zvlášť a tím se celý proces značně urychlí. Jelikož nejsme pak limitováni časovými prodlevami mezi každou úrovní, můžeme si dovolit stihnout více úrovní za stejný čas a tak nasbírat více dat pro následnou analýzu průchodu. V závislosti na implementaci software a využitého hardware pro O&M test se bude příprava různit, ale obecně lze říci, že bude dostupnější pro širší spektrum pracovišť.

Jednotlivé úrovně ve VR jsou předem připravené při vývoji aplikace. Lze je snadno přizpůsobit zadání a jednotlivé překážky umístit do prostoru bez vlivu gravitace. To značně ulehčí přesnou reprodukci minulého testu při opakovaném testování. Konkrétně pro moje řešení aplikace Luna stačí na pracoviště donést VR headset a ruční ovladače, monitorovací zařízení jako například mobilní telefon nebo tablet a síťový router. Poté je možné provést test na různých pracovištích s vysokou přesností reprodukce. Problém, který je ale potřeba řešit, je umístění 3D objektů scény do prostoru tak, aby nekolidovaly s reálnými objekty. Toho je dosaženo buď manuálním zasazením, nebo použitím technologie, jako například Meta Spatial Anchors, o které jsem psal v pozdější části této práce.

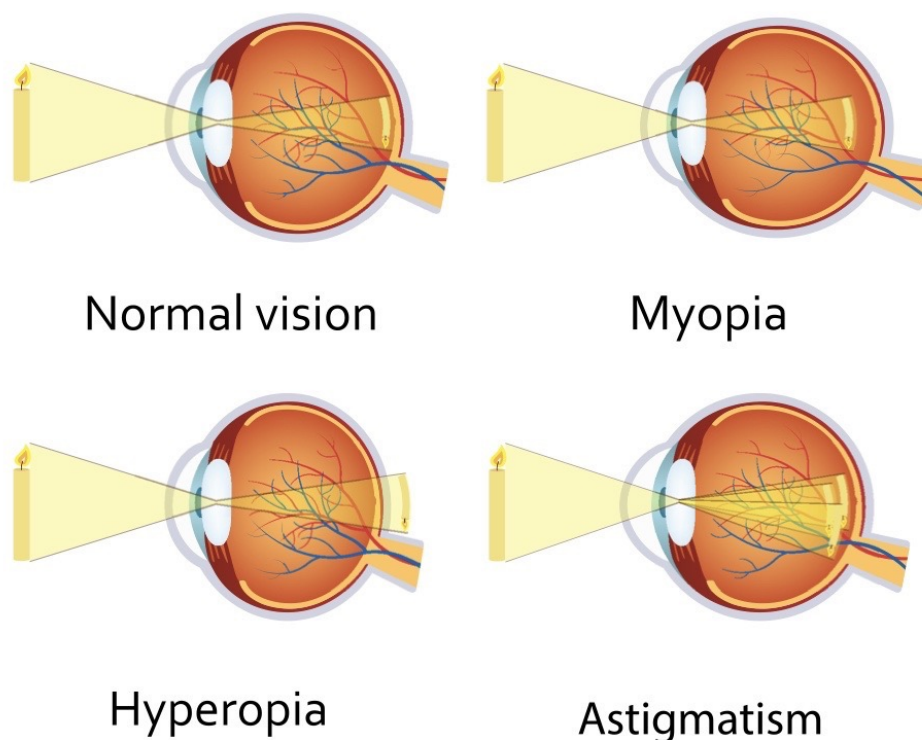
Většina práce na testu tedy probíhá předem a tím se i redukuje počet potřebného personálu při samotném testování.

■ 2.4.4 Vliv běžných očních vad ve VR

Mezi nejčastější oční vady v lidské populaci patří krátkozrakost, jejíž prevalence u dětí je 11.7% a u dospělých 26.5% [36]. Krátkozrakost může být způsobena vyšší lomivostí světla v optické soustavě oka. Paprsky světla z větší dálky se sbíhají již ve sklivci a ne až na sítnici. Čím je tento bod sběhu paprsků vzdálenější od sítnice, tím rozmazanější vidění nastane. Častěji je ale krátkozrakost způsobena přílišnou předozadní velikostí oční bulvy. Korekce se řeší rozptylkami v dioptrických brýlích nebo kontaktních čočkách.

Dále pak dalekozrakost, jejíž prevalence u dětí je 4.6% a u dospělých 30.9% [36], je způsobena naopak příliš malou předozadní velikostí oční bulvy, nebo méně často také malou lomivostí světla v optické soustavě oka a tudíž nedojde ke sběhu paprsků, ke kterému by teoreticky mělo dojít až v bodě nacházejícím se za sítnicí. Korekce se řeší spojnicovými čočkami v brýlích nebo kontaktních čočkách .

Řada dalších očních onemocnění postihuje velkou část populace. Mezi ně patří astigmatismus, který je způsoben pokřivenou optickou soustavou oka a tím pádem nerovnoměrným lomem světla, při kterém vzniká nejednotné vidění. Nebo stařecká vetchozrakost, která se projevuje slábnoucí akomodací oka z důvodu zmenšující se pružnosti oční čočky a slábnoucími akomodačními svaly [10].



Obrázek 2.3: Znázornění normálního zdravého zraku, krátkozrakosti, dalekozrakosti a astigmatismu [6].

Jelikož je rozlišení VR headsetů znatelně menší, než přirozené rozlišení lidského oka, vytváří VR headset pro člověka se zdravým zrakem takový obraz, který by se dal připodobnit k lehké oční vadě. Je pozorován znatelný rozdíl v ostrosti zraku mezi zdravým jedincem a jedincem trpícím krátkozrakostí při použití VR. Přesto je ale zrak krátkozrakého člověka většinou lepší při pohledu na scénu ve VR než na reálnou scénu, což je nejspíš způsobeno tím, že se člověk s VR headsetem dívá na všechny objekty s přesně danou zaostřovací vzdáleností, která bývá průměrně kratší, než by byla skutečná vzdálenost k předmětu v realitě. Toto se ale odvíjí právě od této vzdálenosti [50]. Samotný displej ve VR headsetu je sice vzdálený od očí jen pár centimetrů, avšak skrze vrstvu speciálních, často Fresnelových, čoček se zaostřovací vzdálenost přesouvá dál tak, aby odpovídala ideální pozici pro ostření u zdravého člověka [34]. Podobný princip je používán i v projekcích na sklo v autech nebo helmách stíhacích pilotů, kde je sice vidět obraz přímo na skle, ale ve skutečnosti světlo urazí mnohem delší vzdálenost od zdroje do oka, než jen od skla do oka a této vzdálenosti se docílí většinou soustavou několika zrcadel. Z těchto poznatků jsem odvodil závěr, že je žádoucí, aby pacient s refrakční vadou zraku při průchodu O&M testem měl na sobě pod VR headsetem ještě brýle,

které mu pomohou snížit vliv oční vady na jeho výkon. Jak jsem již uvedl v kapitole o srovnání VR headsetů, ne každý umožňuje nosit souběžně s VR headsetem i brýle, ale určitá část výrobců prodává kompatibilní přídavné čočky na korekci zraku. Další možností je využití algoritmického řešení na úrovni software pro optimalizaci barev tak, aby pro člověka s konkrétní refrakční vadou zraku optimalizovalo obraz a zajistilo tak simulaci ostřejšího vidění na úrovni software bez nutnosti využití další fyzické optiky. Toto řešení ale není běžně komerčně dostupné [34].

■ 2.4.5 Nevolnost z virtuální reality

Nevolnost z virtuální reality, tzv. *virtual reality sickness*, je způsobená rozdílem mezi očekávaným vjemem a jeho skutečným vnímáním. Určité vjemy, převážně dotek a vnímání vlastního pohybu a polohy vůči okolnímu prostředí, jsou ve virtuální realitě vnímány jinak než v reálném světě. Pokud očekáváme, že na nás bude určitý vjem nějak působit v závislosti na naší předchozí zkušenosti, ale skutečný vjem je nakonec rozdílný, může to způsobovat nevolnost. Když se nám udělá laicky řečeno špatně v autě, často je to způsobeno tím, že naše tělo skrze vestibulární systém ve vnitřím uchu vnímá pohyb auta, ale chybí nám zrakový stimul, který by s naším pohybem korespondoval a dojde k nerovnováze ve vnímání naší pozice vůči okolí a kinetóze, tedy nevolnosti z pohybu. Na podobném principu funguje i nevolnost z virtuální reality.

Mohlo by se zdát, že zlepšení displeje VR headsetu z hlediska ostrosti pomůže potlačit nevolnost z VR, jelikož tím docílíme lepšího obrazu reality, avšak několik studií tuto myšlenku zavrhlo a došlo k závěru, že ostřejší monitor nemusí nutně korelovat s lehčím či žádným průběhem nevolnosti z VR. Mezi tyto studie patří mimo jiné Bubka et al. [24] a Davis et al. [30]. K jinému závěru dochází ale například studie D'Amour et al. [31], podle níž je znatelná přiměřená korelace mezi silou příznaků nevolnosti a realističností obrazu. Z důvodu těchto protichůdných výsledků vznikla studie Byoungyun et al. [33]. Ta popsala domněnku, že tyto různorodé závěry jsou výsledkem rozličných přístupů k definici věrnosti prostředí. Proto si dala za cíl otestovat multimodální hypotézu věrnosti s demonstrací závěru metaanalýzou unimodálních a multimodálních studií na toto téma, kde modalitou jsou myšleny jednotlivé vjemy uživatele při testování, jako například pohyb, zrak a sluch. Výsledek této metaanalýzy byl, že zvyšování věrnosti prostředí vede k lehčím příznakům nevolnosti pouze v případě, kdy na člověka působí více synchronních modalit současně. Je tedy nutné minimalizovat asymetrii mezi vjemy jednotlivých smyslových orgánů, jelikož se nevolnost z VR ukázala jako související s mezismyslovým konfliktem, ne intersmyslovým.

Konflikt vergence a akomodace očí může způsobovat rozdvojené vidění, rozostřený pohled a v důsledku také nevolnost. Vergence se stará o vzájemnou nezávislou rotaci obou očí tak, aby se dostaly do polohy, kdy světlo dopadá přesně na žlutou skvrnu na sítnici a dosáhne se tak nejostřejšího obrazu a jednotlivého vnímání objektů. Pohyb směrem dovnitř se nazývá konvergence, pohyb směrem ven divergence a změna elevace očí dipvergence. Při použití VR brýlí by neměla být divergence vyšší než pár stupňů a dipvergence by měla být maximálně 5' až 10' [15]. Špatné zaměření očí na objekt z důvodu chybné vergence způsobuje rozdvojený obraz. Akomodace zase slouží k ostření, kdy se samovolně mění optická mohutnost oční čočky díky zvětšování zakřivení přední plochy čočky a změně její tloušťky. Zdravé oko nemusí běžně na vzdálenější objekty akomodovat a zůstává v relativně relaxovaném stavu, zatímco na objekty bližší se už akomodovat musí vždy a jedná se o namáhavou činnost, která oči unavuje. Jelikož se ve virtuální realitě člověk zaměřuje vždy na stejnou vzdálenost, tak i oční čočky akomodují pokaždé na stejnou vzdálenost, ale vergence očí stále probíhá a proto dochází k nesouladu mezi těmito dvěma jevy, které jsou v běžném vidění v reálném prostředí v rovnováze. Jedná se o nejběžnější příčinu nevolnosti z virtuální reality a řešením by byla proměnlivá ostřicí vzdálenost při sledování digitálního světa, avšak komerčně prodávané VR headsety mají ostřicí vzdálenost pevně danou.

Mezi praktické způsoby, jak při vývoji VR-O&M testů můžeme minimalizovat nevolnost z virtuální reality, patří především zajištění dostatečně vysoké snímkové frekvence a zamezení zásekům programu. Dále také správné nastavení vzdálenosti čoček, aby souhlasily se vzdáleností zornic uživatele. Tyto rady je vhodné aplikovat i v software pro O&M testy. Jiné obecné rady, které ale z principu toho, jak jsou O&M testy nastaveny, nelze nebo je náročné implementovat, jsou například využití stabilního horizontu, který slouží podobně jako horizont v reálném prostředí k tomu, aby se na jeho pozici a orientaci mohl člověk spolehnout a pokud zrovna potřebuje, mohl se dle něj zorientovat. Rovněž omezení či zamezení fyzického pohybu uživatele a využití vizuálních ukazatelů může pomoci předejít nevolnosti z VR, avšak je složité je do O&M testu zakomponovat bez nutnosti měnit jeho podstatu.

Kapitola 3

Návrh řešení

První verze projektu Luna byla dokončena v roce 2023 na Katedře grafiky a počítačové interakce ČVUT FEL. V zimním semestru 2023 jsem projekt převzal já a v rámci předmětu Semestrální projekt a později bakalářské práce jsem začal pracovat na několika rozšířeních. Jelikož jsem neměl k dispozici žádnou dokumentaci, má práce nejprve spočívala v reverzním inženýrství, kdy jsem si vytkl za cíl pochopit strukturu Unity projektu, veškeré myšlenky, třídy a funkce. Projekt jsem pravidelně zálohoval ve verzovacím systému Gitlab a celý ho vyvíjel ve školní laboratoři VR lab. Nyní představím původní řešení některých částí projektu s mými návrhy vylepšení a následně výsledná řešení, která jsem zvolil a implementoval.

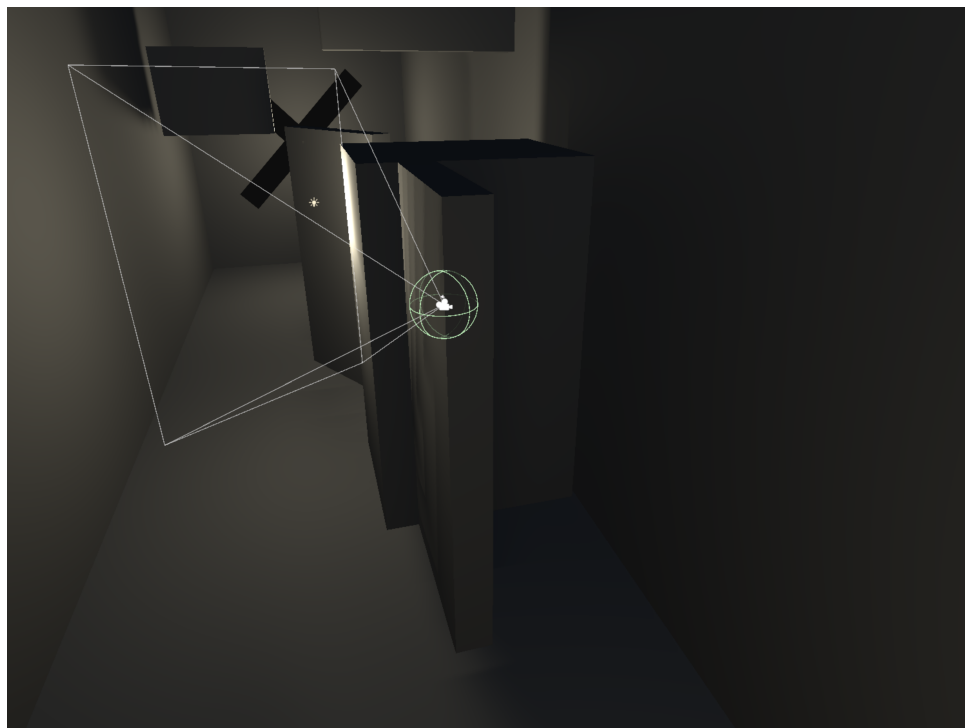
3.1 Pokročilá detekce kolizí

Tato funkcionality slouží ke sběru informací o nárazech uživatele do překážek během jeho průchodu testem. Informace o kolizích slouží k pozdější analýze výsledků.

Původní řešení

Překážky byly rozmístěny v každé úrovni na takových místech, aby nebylo potřeba vyvinout nadměrný fyzický výkon pro vyhnutí se překážkám. Chod-

bou šlo pokaždé projít bez nutnosti se shýbat. Překážky byly různě velké a vždy ve tvaru kvádrů. Od nízkých na zemi, přes které bylo možno vidět, až po malé na stropě, pod kterými šlo projít. Detekce kolizí byla řešena pomocí 3D kolizních těles. Každá překážka měla kolizní těleso odpovídající velikostí jeho grafickému modelu a uživatel měl kolizní těleso ve tvaru koule, které bylo vždy na stejné pozici, jako hlava uživatele, a pohybovalo se společně s ním. Náraz byl zaznamenáván jako událost (event), která byla odchycena třídou Collision Handler, a která byla vyvolána průnikem kolizních těles uživatele a překážky.



Obrázek 3.1: Kolizní těleso v původní verzi Luny.

Informace o kolizi se dále propagovala do třídy State a následně Supervisor. Kolize se počítaly celkově za celý test a vytvářely na klientovi oranžové 3D koule, které označovaly místa nárazů pro vizualizaci modulem Playback.

■ Návrhy vylepšení

Mezi největší nedostatky původního kolizního systému patřilo kolizní těleso uživatele, které nedokázalo věrně reprezentovat pohyb celého těla a nárazy do překážek, které byly nižší než hlava uživatele. Dále také různá výška lidí,

kteřá způsobovala, že nízký člověk mohl projít pod určitou překážkou bez problému, zatímco vysoký člověk by do překážky narazil hlavou. Rovněž informace o nárazech byly obecné a nebylo možno z nich poznat, kterou částí těla uživatel narazil.

■ Adaptivní přizpůsobení výšky prostředí

Problém s různou výškou uživatelů jsem navrhl vyřešit pomocí adaptivního přizpůsobení výšky prostředí. Výšku uživatele bych mohl změřit buď ještě před začátkem testu pomocí metru, nebo až při začátku testu pomocí výšky headsetu nad zemí, který v té chvíli již bude mít uživatel nasazený na hlavě. Překážky bych mohl rozdělit do více kategorií podle toho, zda s nimi budu mít v plánu pohybovat nebo je škálovat, či nikoliv. Tyto označené překážky poté v každé úrovni přemístím a zvětším tak, aby představovaly pro každého uživatele stejně náročné prostředí pro pohyb a orientaci. V návaznosti na to by se daly jednotlivé kategorie překážek využít pro jednoduché třídění kolizí do skupin podle částí těla.

■ Změna kolizního tělesa

Primitivní kolizní těleso ve tvaru koule jsem navrhl zaměnit buď za těleso ve tvaru kapsle, které se bude opět pohybovat v závislosti na změně pozice VR headsetu, ale tentokrát bude adaptivně měnit svojí výšku v závislosti na aktuální výšce VR headsetu a jeho spodní bod bude vždy ukotvený na podlaze, nebo za sofistikovanější těleso ve tvaru modelu samotného uživatele, či za více složených těles v případě využití více snímačů, jako například snímače v ruce a na nohou. První zmiňovaný návrh je nejjednodušší na implementaci, nejméně výpočetně náročný a nepotřebuje žádný dodatečný hardware pro snímání pozice těla. Druhý z návrhů, model těla uživatele, by vyžadoval buď aproximaci pozice těla, kterou si pro naše O&M testy nemůžeme dovolit, nebo celotělový snímací oblek, který ale naše katedra nevlastní. Poslední z návrhů také není výpočetně náročný a umožnil by navíc registrovat kolize rukou a nohou a zároveň i možnost překračovat překážky, což první návrh neumožňuje.

3.2 Kalibrace jasu

Před spuštěním samotného testu je nutné nastavit jas prostředí. Jak jsem již uvedl v části VR-O&M Test, některé z dosavadních řešení pro osvětlení prostředí byla implementována způsobem, kdy se krokově během testu snižovalo osvětlení po předem přesně určených hodnotách, nebo se prvně osvětlení kalibrovalo na míru pacientovi a po nalezení určité hranice světla se krokově sestupovalo od této hranice, která se mohla lišit mezi více pacienty. V každém případě je zde nutnost mít možnost intenzitu osvětlení ručně nastavit z pozice testujícího pro přesnou replikaci podmínek prvního testu při opětovném testování po genové terapii.

Původní řešení

Původní řešení spočívalo v manuálním nastavení minimální a maximální intenzity osvětlení samotným uživatelem, tedy pacientem. Uživatel pomocí joysticku na pravém ovladači nejprve zvyšoval hranici světla pro nalezení minimální intenzity a posléze také maximální. Poté se mu zobrazila první kondiční úroveň, ve které byla intenzita vysoká a poté se snížila na minimální stanovenou intenzitu a krokově se zvyšovala po každé úrovni k maximální intenzitě.

Návrhy vylepšení

Předně jsem chtěl nalézt způsob, jak uživateli vysvětlit, co se po něm v testu bude chtít a to za co nejmenší intervence personálu z důvodu zachování co nejmenšího vlivu okolí na test. Dále také vyřešit způsob, jak se bude moci minimální a maximální intenzita nastavit přesně z pozice personálu při opakování testu.

3.3 Úprava vizualizace

Vizualizace, jakožto nedílná součást testovacího procesu, představuje zobrazení nasbíraných dat z testu v obrazové podobě.

■ Původní řešení

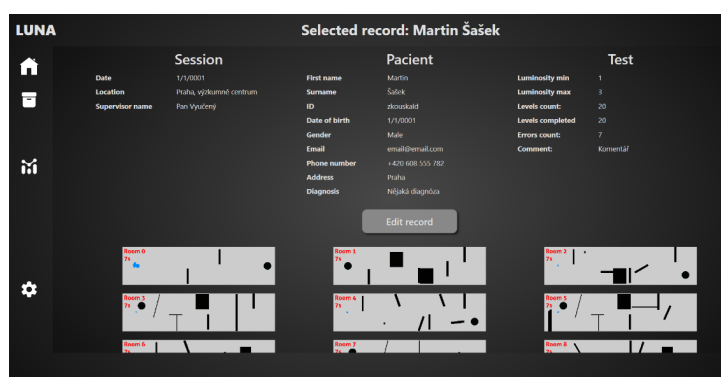
Původní implementace vizualizace dat byla řešena pomocí třetího modulu aplikace Luna s názvem Playback. Tento modul bylo možné vyexportovat z Unity jako spustitelnou desktopovou aplikaci, která načetla log z VR headsetu a vytvořila PNG obrázek s mapami jednotlivých úrovní, kde byla modře vyznačena trasa uživatele a oranžově jeho kolize. Log byl vytvářen pomocí třídy Logger, která zapisovala jednotlivé události v aplikaci, čas, pozici uživatele a další údaje do vlastního formátu LUNA (.luna).

■ Návrhy vylepšení

Nevýhodou tohoto původního způsobu implementace byl ve skutečnosti právě tento formát, který byl pevně vázaný na strukturu aplikace Luna a neumožňoval flexibilní využití v dalších procesech mimo aplikaci. Další nevýhodou byla jednoduchost vizualizace skrz PNG obrázek a nevyužití plného potenciálu sběru různorodých dat, který nám moderní VR headsety umožňují.

■ Luna Vizualizer

Nejprve jsem navrhl vytvoření samostatné desktopové aplikace s názvem Luna Vizualizer. Aplikaci jsem vytvořil a mezi její funkcionality patřilo využití již fungujícího modulu Playback způsobem, že nejprve Luna Vizualizer nahrál LUNA záznamový soubor z VR headsetu, poté nechal Playback vyexportovat PNG soubor s mapami, které následně rozřezal na jednotlivé mapy a umožnil jejich detailnější analýzu. Přidal jsem také vícejazyčné nastavení aplikace a možnost zaevidovat dodatečné informace o testu, jako jméno pacienta, detaily o prostředí a jiné důležité parametry. Tato celková data o testu jsem ukládal ve vlastním formátu a bylo předpřipravené připojení k vzdálené databázi pro ukládání online. Aplikaci jsem vytvořil v .NET 6 frameworku v jazyce C# v rámci předmětu Implementace uživatelských rozhraní jako semestrální projekt s vidinou využití v bakalářské práci. Luna Vizualizer jsem se ale po konzultaci s vedoucím mé bakalářské práce ve finále rozhodl nevyužít z důvodu upřednostnění druhého návrhu vizualizace dat.



Obrázek 3.2: Grafické uživatelské rozhraní aplikace Luna Vizualizer.

VR Logger

VR Logger vznikl jako diplomová práce Ing. Leoše Řeháčka. Sloužil ke sjednocení logovacích záznamů VR aplikací na Katedře počítačové grafiky a interakce na ČVUT Fakultě elektrotechnické. VR Logger byla webová aplikace s veřejným API pro posílání logovacích dat na server a posílání požadavků na informace o jednotlivých účastnících testování, organizacích a aplikacích. Návrh tedy zněl tento systém naimplementovat i do Luny se zachováním stávajícího logovacího systému s modulem Playback jakožto zálohou, která může fungovat i bez připojení k internetu. VR Logger poskytuje instalační balíček do Unity, který obsahuje potřebné skripty pro napojení na stávající aplikaci. Tento balíček jsem se rozhodl přidat do projektu a zakomponovat ho. Webová aplikace VR Dashboard poskytovala uživatelské rozhraní pro vizualizaci dat sesbíraných pomocí VR Loggeru a byla zde možnost nahrání vlastního WebGL modulu implementovaného skrze Unity. Tento modul jsem se také rozhodl v projektu Luna vytvořit a umožnit 3D vhléd do průchodu pacienta skrz jednotlivé úrovně testu pomocí animace.

3.4 AR mód

AR mód, neboli *augmented reality*, tedy rozšířená realita, je způsob zkombinování 3D objektů a reálného světa. Funguje na principu tzv. passthrough funkcionality VR headsetu, která umožňuje zaznamenávat kamerami okolní svět a simulovat ho jako rekonstruované prostředí uživateli. Některé VR headsety umožňují pouze černobílý passthrough, jako třeba Oculus Quest 2 a jiné, jako například Meta Quest Pro, umožňují i obraz barevný.

■ Původní řešení

Původní aplikace Luna AR mód vůbec neobsahovala a nebyla k němu jakkoli uzpůsobena. Očekávalo se, že se bude uživatel pohybovat pouze uvnitř uzavřené chodby s vlastním osvětlením.

■ Návrhy vylepšení

Nabízela se možnost převést celou aplikaci do AR módu, což by znamenalo tomu uzpůsobit všechny úrovně testu. Bylo by třeba odstranit zdi a strop a využít prostředí reálné místnosti, do které by se pouze přidaly modely jednotlivých překážek. Na jednu stranu by to mohlo pomoci přiblížit se více MLMT testu a navázat na již existující výzkum fyzických testů mobility. Avšak vyskytl by se problém s nerovnoměrným osvětlením okolního reálného prostředí a přidaných 3D překážek. Tento nepoměr osvětlení by se musel řešit přesnou kalibrací headsetu a přišli bychom o několik výhod testování ve VR, jako jednoduchost zavedení na nových pracovištích, snadnou přípravu a jistotu stabilního osvětlení i při opakovaném testování.

■ Kalibrační fáze

Smysluplného využití by se ale AR módu mohlo naskytnout v kalibrační fázi aplikace. Jednalo by se o fázi, kdy by se mimo nastavení intenzity osvětlení také musel nastavit offset 3D prostředí, aby korespondovalo s reálnou místností a uživatel se mohl bez problému pohybovat. Při tomto nastavování offsetu bylo dříve nutné hledět do brýlí VR headsetu, aby člověk viděl 3D chodbu a zároveň s tím si brýle sundávat, aby dokázal chodbu správně zasadit do reálné místnosti. Jednalo se o nepraktický přístup, který by se mohl značně zjednodušit využitím passthrough v této fázi.

■ 3.5 Eye tracking

Jak jsem již popsal v sekci o Eye trackingu, jedná se o technologii pro sběr dat týkajících se rotace očí. Tato data nám mohou poskytnout vhled do toho, kam se uživatel dívá při průchodu testem.

■ Původní řešení

V původní aplikaci opět nebyla tato funkcionality zavedena.

■ Návrhy vylepšení

Navrhl jsem implementovat eye tracking pomocí vestavěné funkcionality Meta Quest Pro headsetu, který používá technologii videookulografie pro sledování pohybů očí.

■ Tepelná mapa

Tepelná mapa, anglicky heat map, je grafový koncept využívaný k vizualizaci rozmístění dat na ploše s různou číselnou hodnotou. V mém případě by šlo o kreslení tepelné mapy, která by ukazovala čas strávený pohledem v každém bodě zorného pole uživatele. Mapa by se mohla vytvořit na základě protnutí paprsků vystřelených z obou očí metodou *ray cast* skrze plochu, která by udržovala svojí konstantní vzdálenost a polohu vůči kameře uživatele v 3D prostředí virtuální reality.

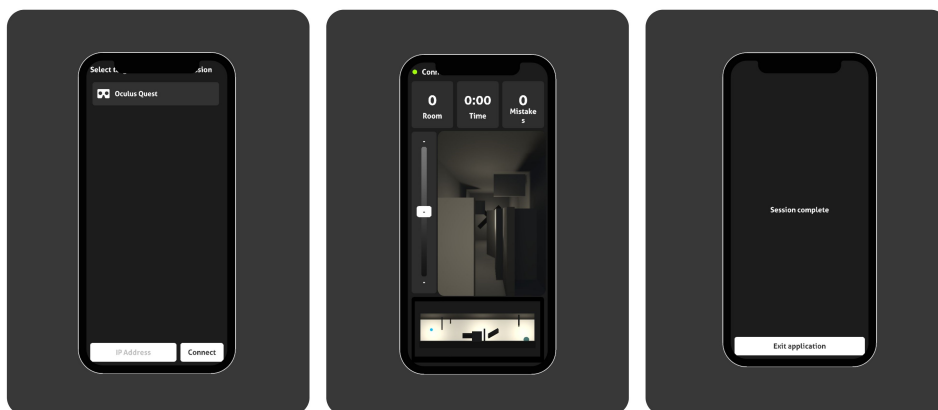
■ 3.6 Rozšíření monitoringu

Monitoring představuje způsob, kterým může personál testovacího centra dohlížet na probíhající experiment a zároveň ho i řídit. Personál by měl být schopný řešit co nejvíce úkonů na dálku a během experimentu by mělo docházet k co nejmenšímu rušení z venku, aby byly výsledky testu co nejpřesnější a test bylo možné přesně opakovat.

■ Původní řešení

V původní verzi aplikace Luna byl projekt rozdělen do tří modulů s pracovními názvy Test Subject, Supervisor a Playback. Test Subject sloužil jako 3D

prostředí samotného testu, kterým pacient procházel a který se nahrával do VR headsetu. Další modul Supervisor se nahrával do telefonu a pomocí knihovny Mirror komunikoval s Test Subject skrze spojení v lokální síti a sloužil právě pro zmíněný monitoring. Poslední z modulů Playback pak vytvářel PNG soubory z vlastního záznamu testu (log). Supervisor byl rozdělen do tří fází. První fáze byla obrazovka pro připojení k VR headsetu, kde šlo buď manuálně zadat IP adresu, nebo vyčkat na automatické nalezení vhodného zařízení pomocí třídy NetworkDiscovery. V druhé fázi pak šlo sledovat samotný průběh testu díky dvěma kamerám, kde jedna kopírovala aktuální zorné pole pacienta a druhá byla umístěna nad 3D prostředí úrovní ve směru dolů a sledovala pohyb pacienta zobrazený jako postupně se kreslící modrá křivka s oranžově vyznačenými kolizemi. Dále šlo sledovat inkrementující se statistiku uplynulého času, počtu kolizí a aktuální úrovně a intenzity osvětlení s grafickým ukazatelem. Ve třetí fázi pak bylo pouze nefunkční tlačítko na ukončení aplikace na telefonu.



Obrázek 3.3: GUI modulu Supervisor v původní verzi aplikace Luna.

■ Návrhy vylepšení

Mimo již zmíněné návrhy v předchozích sekcích, jako například tepelnou mapu, jsem se rozhodl zaměřit zároveň na vizuální stránku, ale i funkční stránku modulu Supervisor. Navrhl jsem rozšíření v několika směrech pro zvýšení uživatelské přívětivosti a schopnosti personálu ovládat testovací relaci.

■ Design

Rozhodl jsem se kompletně změnit design mobilní aplikace a orientovat její použití spíše na tablet. Pro změnu designu bych vybral moderní paletu barev a font Open Sans od společnosti Google. Bylo by potřeba využít kotvy a různé typy zobrazení pro škálovatelnost mezi vícero poměry rozlišení displejů, aby šlo grafické uživatelské rozhraní správně zobrazovat jak na tabletu, tak i na telefonu. Vytvořil bych kvalitnější prostředí, ve kterém by byla strmější křivka učení a vycházelo by z novodobého rozložení UI prvků, které odpovídá současným standardům pro intuitivní průchod aplikací.

■ Kamery, světla a statistika

Navrhl jsem zavést kontrolu nad monitorovacími kamerami. Tedy zavést možnost přepínat mezi více pohledy a zároveň měnit světlo prostředí, aby šlo sledovat pohledovou kameru s přesnou intenzitou osvětlení, kterou má pacient k dispozici, a nebo uměle dodaným monitorovacím světlem viditelným pouze v modulu Supervisor. Také bych umožnil sledování více statistik, jako například jednotlivé typy kolizí podle dotčené části těla.

■ Nastavení testu

Do modulu Supervisor bych přidal možnost nastavit veškeré potřebné parametry pro chod testu tak, aby nebylo nutné měnit tyto parametry ve zdrojovém kódu aplikace Luna. Bude se jednat o intenzitu osvětlení, parametry spojené s VR Loggerem, výběr pacienta a další.

■ Ovládání testu

Přidal bych možnosti ovládání testu v reálném čase z pozice personálu pomocí modulu Supervisor na mobilním zařízení nebo tabletu. Personál by měl mít primárně možnost ovládat prvotní kalibraci testu a jeho ukončení.

■ Automatický asistent

Pro první absolvování testu pacientem bych přidal automatického audio asistenta, který pacienta provede kalibrační fází nastavení minimální a maximální intenzity světla a vysvětlí mu průběh testu. Jelikož bude mít každý pacient tuto část testu stejnou, zamezíme interferenci z pozice personálu.

■ 3.7 Manuál a dokumentace

■ Původní řešení

Původní aplikace Luna neobsahovala ani dokumentaci, ani uživatelský manuál, což značně ztížilo samotnou práci na jednotlivých vylepšeních, jelikož už původní verze Luny byla relativně komplexní, včetně několika scén, síťové komunikace a tří rozdílných modulů. Jelikož jsem počítal s tím, že po dokončení mých prací na projektu Lunu převezme jiný student, bylo by vhodné vypracovat dokumentaci zdrojových kódů, které usnadní pochopení principů a vztahů mezi jednotlivými třídami a metodami v aplikaci.

■ Návrhy vylepšení

Uživatelský manuál bych vypracoval v textové podobě s obrázky pro lepší přehlednost. Jednalo by se o popis funkcionalit a doporučený průchod aplikací, včetně popisu jednotlivých nastavení. Tento manuál by poskytl budoucím studentům vzhled do zamýšleného způsobu fungování aplikace a poskytl by příručku jejího použití. Dokumentaci bych vytvořil v XML formátu přímo ve zdrojovém kódu aplikace, aby mohla být použita editačními nástroji pro zobrazení tooltipů a poskytla vhodné vysvětlení funkcionality a logiky metod tam, kde by to bylo potřeba.

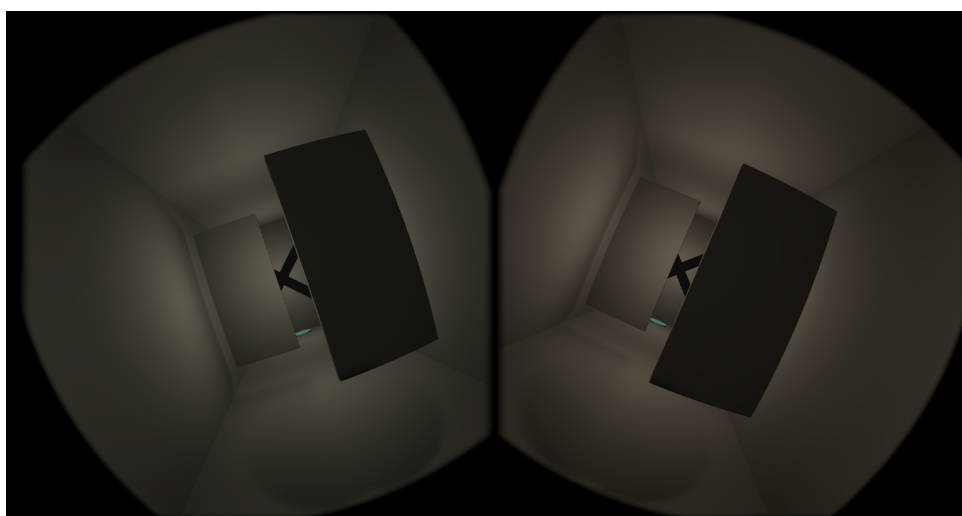
■ Příprava na distribuci na jiná pracoviště

Příprava na distribuci na jiná pracoviště znamená umožnění použití aplikace Luna i v podmínkách mimo laboratoř, kde projekt vzniká. Zahrnovala by mimo jiné už zmíněný manuál použití, ale také repozitář s projektem na online úložišti, jako je například GitHub, nebo GitLab a také celkové zjednodušení použití tak, aby nebylo potřeba pro testování nijak zasahovat do zdrojových kódů.

Kapitola 4

Implementace řešení

Původní verze Unity projektu Luna obsahovala 20 skriptů s celkem 1224 řádkami kódu o 35680 znacích a 5 scén. Moje aktuální verze obsahovala 6 scén a přes 33 skriptů s více než 5169 řádkami kódu o minimálně 171803 znacích. Na implementaci jsem strávil přes 300 hodin, do kterých není započítán čas věnovaný konzultacím a tvorba bakalářské práce, a pracoval na ni od září 2023 do května 2024. Vylepšil jsem některé aspekty původní aplikace, mezi které mimo jiné patřil kolizní a kalibrační systém a grafické uživatelské rozhraní modulu Supervisor a také přidal nové funkcionality, jako body tracking, eye tracking, vzdálené logování pomocí VR Loggeru a další. Aplikaci jsem otestoval s 8 subjekty, vypracoval analýzu a provedl konkrétní kroky k vyřešení nejpálčivějších problémů zjištěných během testování.



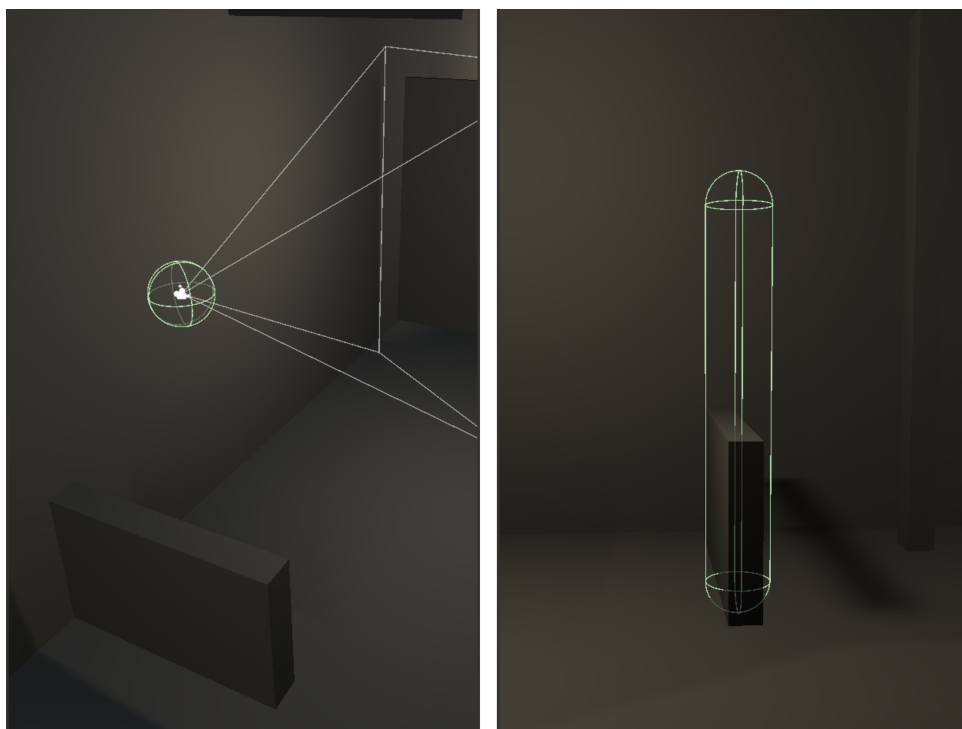
Obrázek 4.1: Pohled uživatele VR headsetu na 3D prostředí.

Dále jsem sepsal uživatelský manuál v českém a anglickém jazyce a zdokumentoval veškerý kód pomocí XML komentářů, ze kterého jsem následně vygeneroval HTML stránku pomocí Doxygen. V průběhu roku jsem práci konzultoval s mým vedoucím Ing. Davidem Sedláčkem, Ph.D., kolegou a lektorem na fakultě Elektrotechnické, 1. lékařské fakultě Univerzity Karlovy a Fakultě zdravotnických studií Univerzity Jana Evangelisty Purkyně. Nejprve jsem začal migrací projektu na verzi Unity 2022.3.11f1 s dlouhodobou podporou. Mnohé části aplikace jsem musel řešit s ohledem na síťovou komunikaci, jelikož byla nutná synchronizace prostředí, hráče, osvětlení, eventů a dalších aspektů mezi VR headsetem a monitorovacím zařízením. Na následujících stranách jsem rozebral implementaci jednotlivých částí projektu.

4.1 Pokročilá detekce kolizí

Jednotlivé překážky v úrovních jsem rozdělil na čtyři druhy a přiřadil jim odpovídající tag: *HeadLevel*, *BodyLevel*, *FootLevel* a *StaticLevel*. Každá kategorie odpovídá části těla, kterou nejpravděpodobněji pacient narazí do překážky. *StaticLevel* pak odpovídá zdím, stropu a překážkám na stropě, které jsou natolik vysoko, že do nich pacient nenarazí. Rozdělení kolizí jsem tedy vyřešil na úrovni samotných překážek a ne na úrovni hráče, jelikož jsem vybral pro kolizní těleso hráče jednoduchý tvar kapsle, kterým by nešlo určit část těla. Toto těleso jsem zvolil proto, že po konzultaci s vedoucím práce jsme došli k závěru, že by pacient neměl mít v ruce během testu ovladače a tím pádem by nešlo přesně snímat polohu rukou. Dále nebyly k dispozici přídatné snímače na nohy nebo jiná místa, a proto by jakékoli snímání pozice těla mimo hlavu vycházelo pouze z odhadů pomocí záznamu z kamer VR headsetu a nezískal bych dostatečnou přesnost kolizí.

Dále jsem přidal do kalibrační fáze funkci, která zaznamená výšku pacienta a poté v každé úrovni adaptuje na tuto výšku prostředí. Překážky typu *HeadLevel* se posunou přesně do úrovně hlavy a překážky *BodyLevel* se prodlouží do výšky natolik, aby přes ně pacient neviděl. Tím se docílí stejných podmínek pro různě vysoké pacienty. Dále jsem přidal funkcionalitu, která v reálném čase mění výšku a střed kolizního tělesa hráče tak, aby se mohl sehnout pod *HeadLevel* překážkou a nebyla zaznamenána kolize. Výška prostředí se tedy adaptuje na základě pevně určené hodnoty na začátku testu a výška a střed kolizního tělesa podle aktuální výšky VR headsetu nad zemí. Každá kolize se také loguje do VR Loggeru.



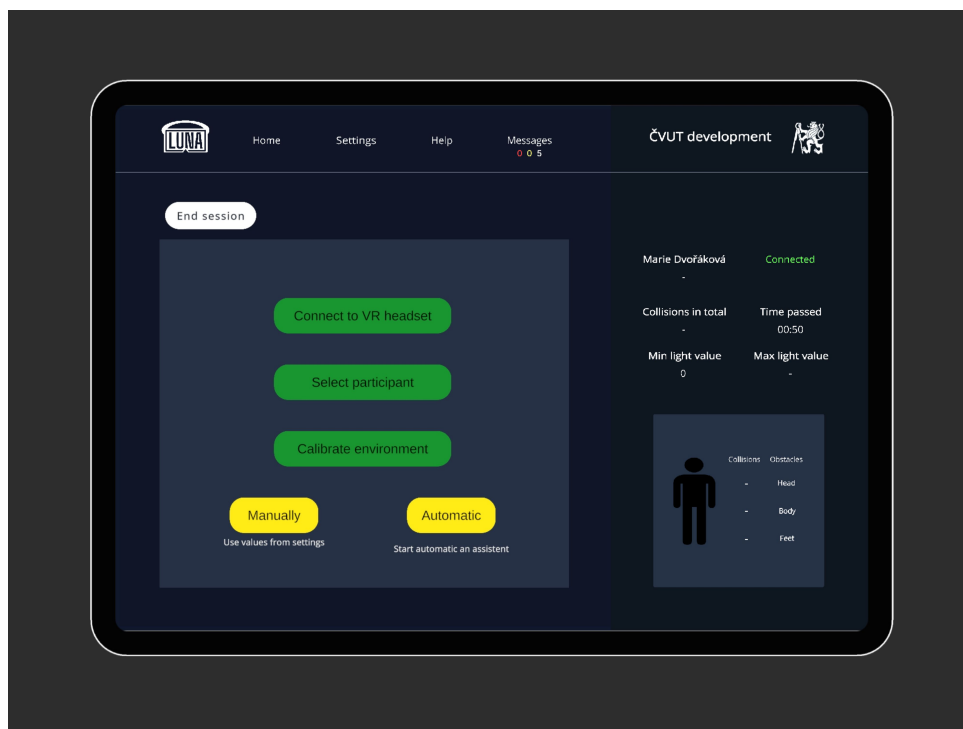
Obrázek 4.2: Vlevo je zeleně vyznačeno původní kolizní těleso ve tvaru koule, které nezaznamená srážku s nízkou překážkou. Vpravo je nové kolizní těleso ve tvaru kapsle.

O kolizní systém se stará převážně skript s názvem Collision Handler, který také provádí translaci a transformaci kolizního tělesa hráče. Adaptace prostředí na výšku pacienta je řešena ve skriptech Calibrator a Environment Switcher a provádí se odděleně na serveru pro TestSubject a klientovi, tedy Supervisoru.

■ 4.2 Supervisor

Rozhodl jsem se pro výrazné přepracování monitorovacího systému Supervisor. Původní modul měl tři obrazovky, mezi kterými nešlo přepínat a aplikace mezi nimi přecházela automaticky v závislosti na fázi testu. Přepracoval jsem grafické uživatelské prostředí tak, aby bylo vhodné jak pro mobilní zařízení, tak i tablet, který je pro tento účel vhodnější, kvůli větší obrazovce. Na hlavní stránce se nyní po zapnutí aplikace zobrazí průvodce kalibrací. Ten vizuálně ukazuje jednotlivé kroky, které je nutné před zahájením testu provést. Během testu by měl personál co nejméně interagovat s pacientem,

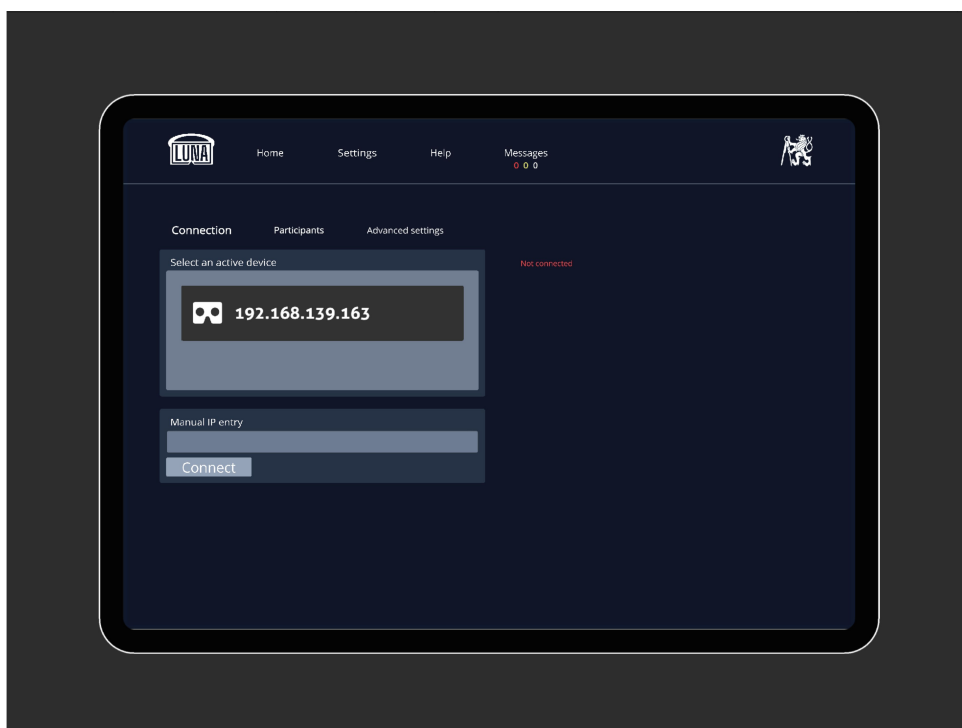
proto jsem naimplementoval funkcionality tak, aby šlo řízení a monitoring testu co nejvíce odstínit od vzájemné interakce v realitě a test šel nastavovat a ovládat skrze monitorovací zařízení.



Obrázek 4.3: Průvodce kalibrační fází testu na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor.

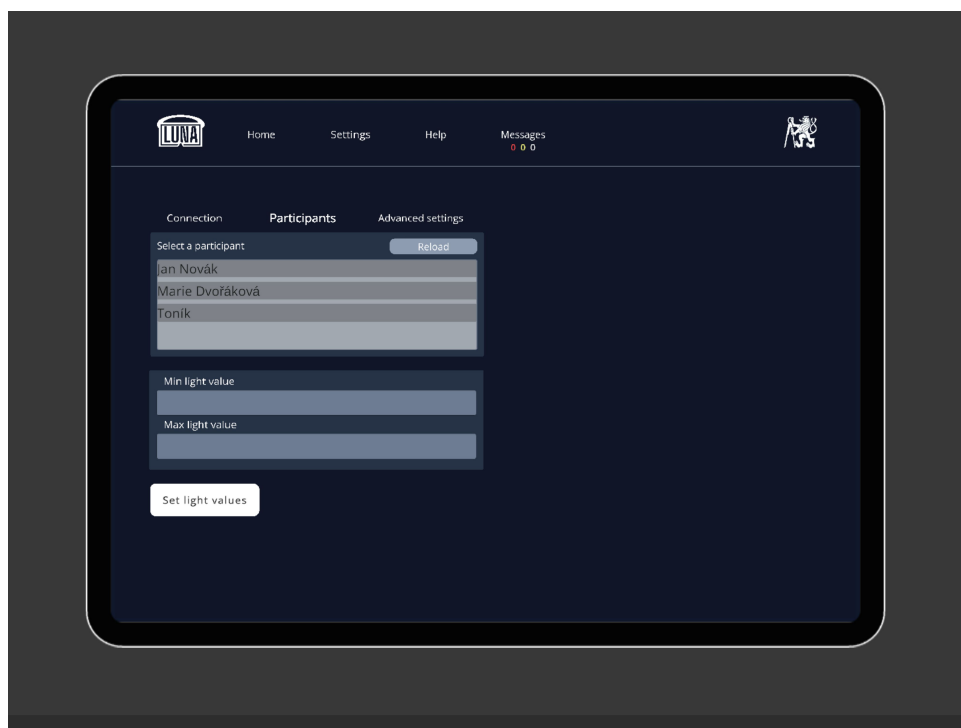
Kalibrační fáze

Nejprve se přes žlutě blikající tlačítko *Connect to VR headset*, oznamující potřebu síťového spojení zařízení, uživatel dostane do nastavení, kde se mu umožní buď manuálně zadat IP adresu VR headsetu, nebo pomocí Mirror Discovery automaticky VR headset najít na lokální síti a přes instanciovaný prefab tlačítka se připojit.



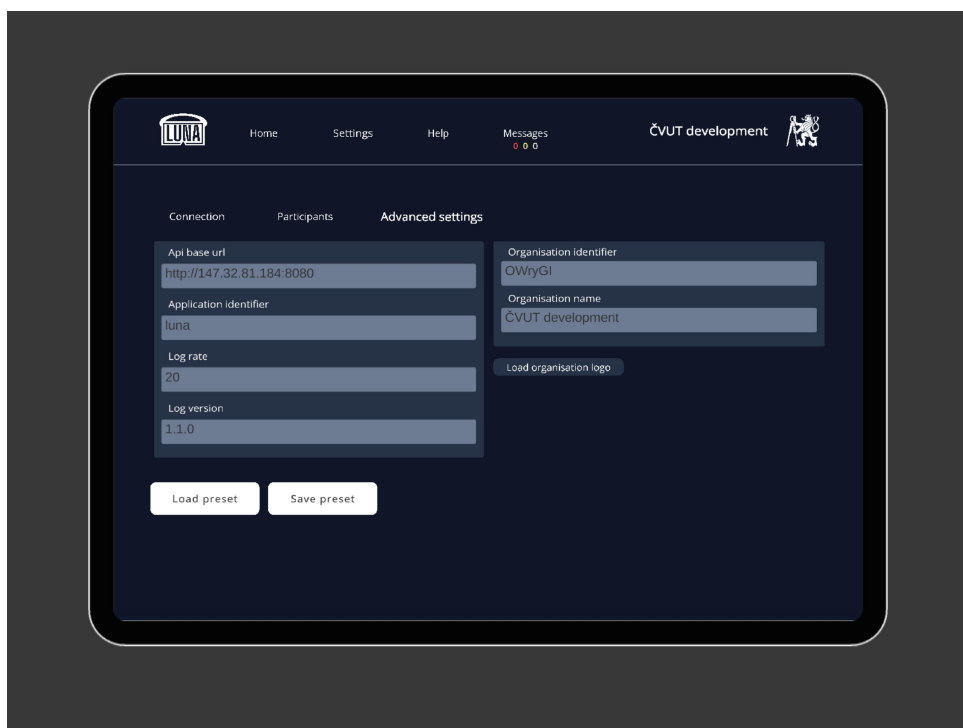
Obrázek 4.4: Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s nastavením síťového připojení mezi zařízeními.

Poté začne blikat žlutě tlačítko *Select participant*, které tentokrát uživatele přesměruje do nastavení výběru participanta. Participant je profil člověka v aplikaci VR Dashboard. Pomocí GET dotazu si ze serveru Supervisor dotáhne seznam všech participantů v JSON formátu, rozloží je na jednotlivé profily a ty si uloží do instancí třídy ParticipantValues. Všechny tyto profily jsou poté instanciovány na obrazovce a uživatel si může zvolit požadovaného participanta. Pro komunikaci s VR Loggerem jsem vytvořil skript s názvem NewLogger, který se stará o propagaci dat do VR Loggeru, jejich zpracování a přechodné uchovávání. Poté je pro opakované testování pacientů možné zadat minimální a maximální intenzitu světla, pokud chce uživatel replikovat minulé nastavení.



Obrázek 4.5: Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s nastavením výběru participanta.

Konfigurace připojení k VR Logger serveru je řešena v záložce *Advanced settings*, kde je možné zadat informace pro plugin VR Logger, který umožňuje logování na vzdálený server a následnou vizualizaci přes VR Dashboard. Tato nastavení může uživatel buď manuálně zadat, nebo použít přednastavený preset. Pokud není žádný preset uložený, použijí se hodnoty z třídy Constants, tedy ze zdrojového kódu. Pokud si uživatel přeje nastavení změnit, může tak učinit a poté preset uložit do persistentní paměti zařízení. Dále je v nastavení možné určit název organizace a ten se poté napíše na horní panel obrazovky. Stejně tak lze načíst vlastní obrázek, který se na horní panel přidá jako logo. Tento obrázek se načte s pomocí balíčku Runtime File Browser, který umožňuje práci se soubory i na novějších verzích operačního systému Android.



Obrázek 4.6: Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s rozšířeným nastavením VR Loggeru a aplikace.

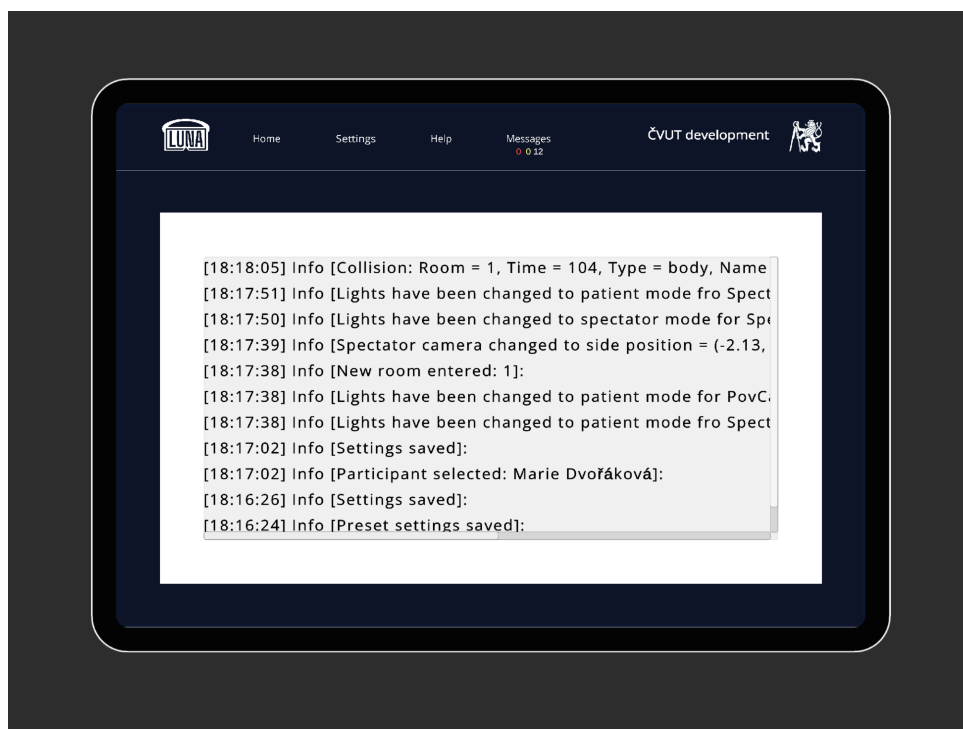
Po nastavení aplikace se uživatel vrátí na hlavní obrazovku, kde bude blikat žlutě tentokrát tlačítko *Set environment position*. Po stisknutí se pozice a rotace 3D prostředí nastaví na hodnoty uložené prostorové kotvy. Pokud není kotva nastavená, prostředí se nastaví na počátek souřadnicové soustavy s nulovou rotací. Princip fungování prostorových kotev vysvětlují v sekci o kalibrační fázi. Jako poslední se aktivuje tlačítko *Set luminance values*. To dá uživateli na výběr mezi manuálním nastavením a spuštěním automatického audio asistenta. Manuální nastavení převezme hodnoty zapsané v nastavení aplikace a použije je pro osvětlení prostředí. To je vhodné na testování aplikace, nebo pro opakované testy pacientů, kdy je potřeba nastavit přesné hodnoty osvětlení pro následné porovnání výsledků mezi sebou. V případě výběru automatického audio asistenta, se pacientovi do uší začne přehrávat audio, které vysvětluje průběh testu a dává pacientovi pokyny, dle kterých si on sám nastaví minimální a pak maximální intenzitu osvětlení.

Poté se dá pacientovi pokyn, aby zvedl ruku s ovladačem před sebe a personál mu ovladač odebral. Zároveň s tím se na monitorovacím zařízení ukazuje, že probíhá automatický asistent a v momentě, kdy je potřeba ovladač pacientovi odebrat, se to právě zde také oznámí. Po odebrání ovladače se stiskne potvrzovací tlačítko na Supervisoru a tím začne samotný test. Tato procedura je řízena v korutině třídy Supervisor, která čeká na oznámení o

ukončení jednotlivých fází a adekvátně reaguje. Příkazy a data jsou neustále synchronizována po síti mezi zařízeními pomocí SyncVar proměnných, low level zpráv posílaných skrze broadcast na klienty, nebo skrze unicast na server a callback funkcemi, které reagují na změny v proměnných a na dokončené běhy jednotlivých funkcí.

Zprávy

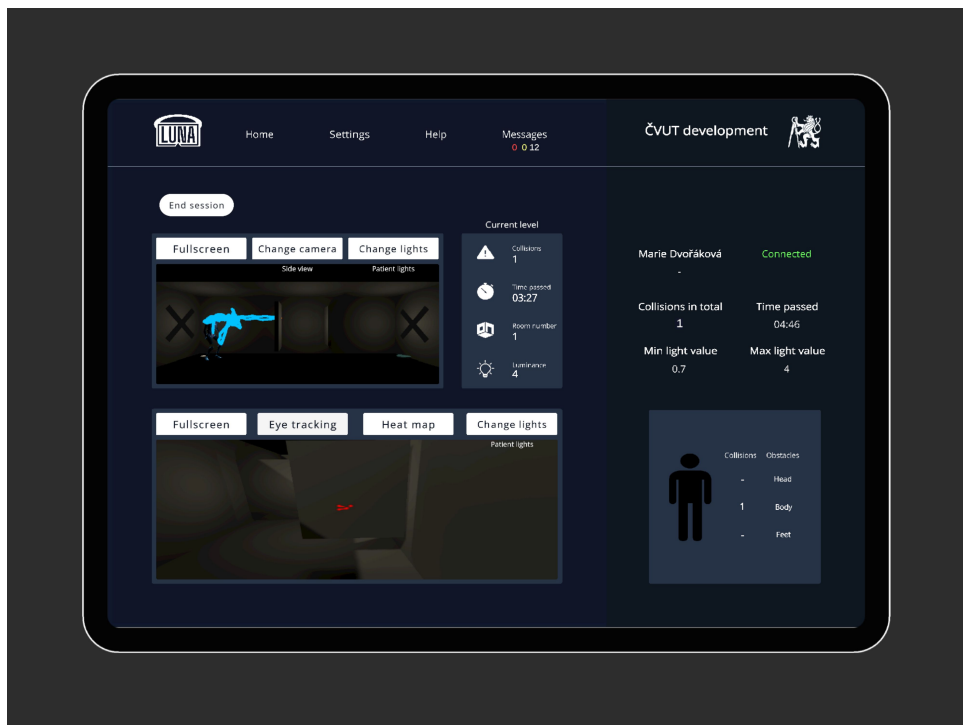
Vytvořil jsem obrazovku, kam se zapisují zprávy z aplikace. Lze ji otevřít tlačítkem *Messages* na horní liště. Zde se vypisují hlášky, které jsou rozdělené barevně podle závažnosti na *info*, *warning* a *error*. Rozdíl oproti klasické vývojářské konzoli je, že zde se vypisují pouze informace relevantní pro uživatele monitorovacího zařízení. Například si zde lze ověřit, že se uložilo nastavení, nebo že se změnila úroveň a podobně. V případě chybného nastavení aplikace se zde vypíše chybová hláška.



Obrázek 4.7: Obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s výpisem uživatelských zpráv.

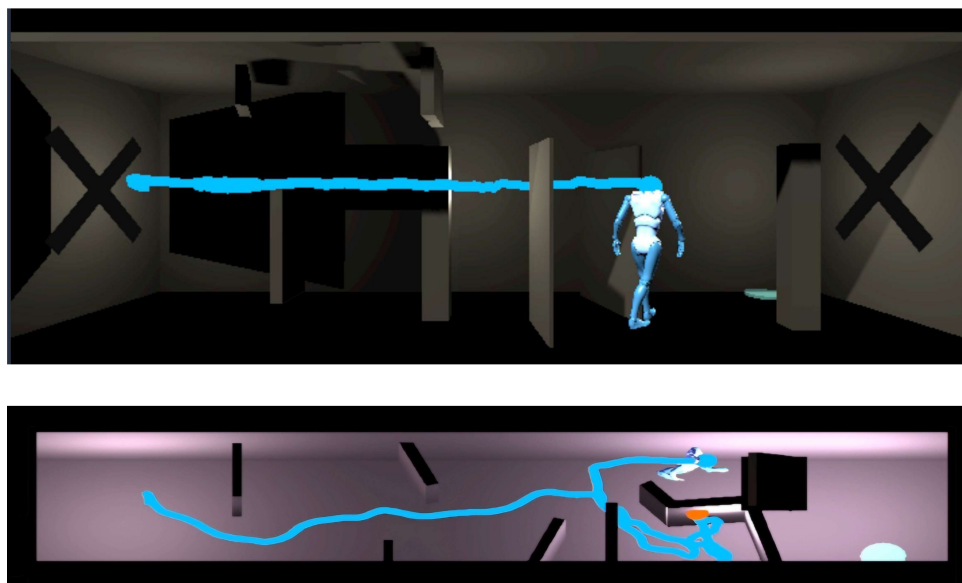
■ Monitorovací prostředí

Během testu jsou na hlavní stránce monitorovacího zařízení vidět dva pohledy do virtuální reality. První je pohled z třetí osoby na celou úroveň. V úrovni je pacient znázorněn pomocí modelu postavy, který je řízen technologií body tracking. Pokud má pacient ruce viditelné pro kamery VR headsetu, jsou relativně přesně snímány, hlava je vždy snímána přesně. Spodní polovina těla je dopočítávána algoritmicky a její pohyb je pouze aproximace očekávaného pohybu. Pacient za sebou v místnosti zanechává modrou linii, která znázorňuje jeho průchod a oranžové koule, které ukazují kolize. Tyto barevné indikace se po každé úrovni vymažou. U pohledu je možnost zobrazení na celou obrazovku, změna kamery na pohled ze shora dolů a na pohled ze strany a přepnutí mezi světly, která pacient reálně vidí a těmi, které jsou uměle přidány do prostředí viditelného pouze na monitorovacím zařízení. Na spodním pohledu je poté vidět POV, neboli *point of view*, pacienta, tedy jeho pohled z první osoby. I zde je možné si obrazovku zvětšit a přepínat mezi světly, která jsou pro oba pohledy oddělené. Takže mohou sledovat pacienta z třetího pohledu s přidaným světlem a zároveň s tím vidět jeho reálný pohled v tmavém světle prostředí.



Obrázek 4.8: Hlavní obrazovka na monitorovacím zařízení s modulem Supervisor s probíhajícím testem. Na spodním pohledu je červeně označen eye tracking.

U POV pohledu jsem také přidal zobrazení tepelné mapy, která barevně vizualizuje pohled očí pacienta během celého testu, a děle také eye tracking, který ukazuje pohled pacienta v reálném čase. Implementaci eye trackingu více rozebírám v části eye tracking. Test se ukončí buď automaticky po dokončení všech úrovní, nebo ho lze skončit i manuálně tlačítkem *End session*. Poté se zobrazí okno vysvětlující stav aplikace a tlačítko pro přesun do VR Logger Dashboardu pro analýzu výsledků a statistik.



Obrázek 4.9: Pohled ze strany a pohled shora na průchod pacienta v modulu Supervisor.

4.3 Kalibrační fáze

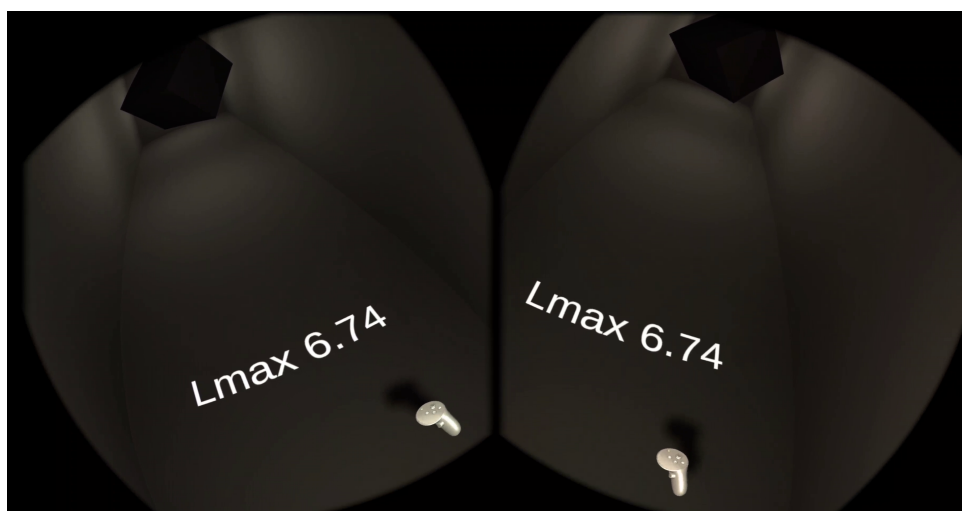
Kalibrační fáze je rozdělena do tří částí. Připojení VR headsetu a monitorovacího zařízení přes síť, nastavení offsetu prostředí a nastavení minimální a maximální intenzity osvětlení prostředí. Kalibrace je z větší části řízena z pozice personálu u monitorovacího zařízení, avšak některé kroky se musí provést i mimo. Do aplikace jsem přidal funkcionalitu *passthrough*, která umožňuje uživateli VR headsetu vidět rekonstruovaný obraz okolního prostředí zároveň, do kterého lze zasadit virtuální objekty. Pro přesnější nalezení a uložení pozice 3D chodby vůči reálnému světu, jsem přidal oranžový kvádr, který označuje oblast, kam bude posléze chodba umístěna. Před zahájením

testu si tedy personál nasadí VR headset a pomocí ručních snímačů, kterým jsem upravil ovládání pro pohodlnější manipulaci, najde vhodnou pozici a rotaci chodby a uloží ji pomocí prostorové kotvy, neboli *spatial anchor*, což je znázorněno obarvením kvádrů na modro. Tato kotva v sobě nese informaci o pozici a rotaci v reálném světě a ukládám ji do persistentní paměti zařízení, takže i při opětovném vypnutí a zapnutí zařízení se tato kotva vždy načte na stejné místo. Kotvu lze načíst buď na ovladači, což se hodí pro vývoj, tak i na Supervisoru, což je očekávaný styl použití.



Obrázek 4.10: POV pohled uživatele VR headsetu při nastavování offsetu prostředí.

Dále jsem upravil fázi nastavení osvětlení prostředí. Změnil jsem informační okno s hodnotami, kostku pro porovnání světla a také styl, jakým se vypočítává světlo pro jednotlivé úrovně. Nyní se intenzita osvětlení první úrovně nastaví na maximální zadanou intenzitu a po jednotlivých krocích klesá až pod minimální intenzitu. Odstranil jsem speciální první místnost, kde se intenzita skokově zvedla za účelem seznámení se s prostředím a zadal nové koeficienty kroků. Minimální a maximální intenzitu osvětlení lze nyní nastavit dvěma způsoby. Buď manuálně personálem z monitorovacího zařízení, kde se dají zapsat přesné hodnoty například pro opakovaný test a také samotným pacientem za pomoci automatického audio asistenta. Pokud se zvolí tato druhá možnost, pacientovi se do uší začne přehrávat předem nahrané audio nahrávky, které mu vysvětlí princip testu a dávají mu instrukce, jak si minimální a maximální intenzitu osvětlení může sám nastavit. Osvětlení v každé úrovni je poté vypočteno následovně: Mějme maximální intenzitu světla L_{\max} a minimální intenzitu světla L_{\min} . Mějme varianci V rovnou $L_{\max} - L_{\min}$. Intenzita osvětlení úrovně L_{env} se řídí výpočtem $L_{\max} - V \cdot I_i$, kde I_i je z množiny $\{0, 0.02, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.65, 0.7, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1, 1.05, 1.10, 1.15\}$ a index i je pořadí úrovně. První úroveň má tedy intenzity osvětlení přesně L_{\max} . Poslední úroveň má pak $L_{\max} - V \cdot 1.15$.



Obrázek 4.11: POV pohled pacienta při manuálním nastavování intenzity osvětlení.

Po nastavení se ozve instrukce, aby pacient zvedl ruku s ovladačem před sebe a personál mu ovladač odebere, ten poté odebrání potvrdí na monitorovacím zařízení a tím se přehraje zbytek instrukcí a test začne. Díky tomu lze nyní projít kalibrační fází, aniž by musel personál na pacienta promluvit. Audio asistent pacientovi mimo jiné vysvětlí, jak pozná že narazil do překážky, nebo že došel na teleport na konci chodby a ujistí ho o bezpečnosti testu.

4.4 VR Logger

Vedle již existujícího logovacího systému pro Lunu s názvem Playback jsem naimplementoval systém druhý s názvem VR Logger od autora Ing. Leoše Řeháčka. Ten mi poskytl Unity balíček, který obsahoval několik skriptů poskytující podporu pro posílání dat na vzdálený VR Logger Server přes API. Pan Řeháček během mé práce párkrát balíček aktualizoval a já jsem tomu přizpůsoboval implementaci a zároveň mu dával zpětnou vazbu na fungování. Pro komunikaci s VR Loggerem jsem vytvořil dva skripty, první funguje pro odesílání dat během testu a druhý pro příjem dat ve WebGL modulu, jenž popisují v další sekci. Loguji pozici a rotaci hlavy, obou rukou a obou očí. Data o rukou je nutné brát jako nepřesná, jelikož jsou získaná díky body trackingu aproximací obrazů kamer z VR headsetu. Dále posílám data o intenzitě osvětlení, různých typech kolizí a offsetu prostředí, pro která jsem musel vytvořit jednotný JSON, který předávám jako *custom data*. Nejprve jsem logování prováděl na straně serveru přímo z VR headsetu, ale nakonec

jsem umístění VR Loggeru změnil do prostředí Supervisoru pro rychlejší síťový provoz.

■ WebGL modul

Vytvořil jsem novou scénu WebGL, do které načítám i scénu Environment a pomocí dat získaných z API VR Loggeru zpracuji prostředí tak, aby odpovídalo konkrétní úrovni. Dále si stahuji veškeré logy, které se k úrovni vážou a zpětně z nich vypočítám dráhu pacienta. Výsledek je animace hlavy, rukou a očí, díky které lze zanalyzovat průchod. Vizualizuji zde také přesné pohyby očí pomocí eye trackingu. Samotné prostředí zesvětluji tak, aby šla postava pacienta dobře rozpoznat. Při implementaci jsem musel brát zřetel na správný souběh asynchronních operací, které se chovají v prostředí webového prohlížeče jinak než v Unity editoru. Stejně tak se chová jinak i systém načítání a aktivace herních objektů.



Obrázek 4.12: WebGL modul s přehrávající animací.

Pro build bylo potřeba zamezit vynucování použití mikrofону, čehož jsem docílil zakomentováním podmínky pod komentářem `"// Get mic from audio buffer & set sample rate"` ve zdrojovém skriptu `VoiceLipSyncMic.cs` balíčku `com.meta.xr.sdk.voice@63.0.0` zakomentovaná. Tento skript se běžně nachází v umístění Unity editoru viz. `.../packages.unity.com/com.meta.xr.sdk.voice@63.0.0/Lib/Wit.ai/Scripts/Runtime/Utilities`, a je třeba aktualizovat obraz stejného skriptu v umístění samotného projektu viz. `.../com.meta.xr.sdk.voice@63.0.0/Lib/Wit.ai/Scripts/Runtime/Utilities`.

4.5 Eye tracking

Pro získání hodnot rotací očí v každém snímku jsem využil balíčku Meta XR All-in-one SDK. Ten mi umožňuje pomocí API na Meta Quest Pro získávat data z videookulografického systému sledování očí, avšak neumožňuje mi přístup k samotným infračerveným snímkům. Pro vizualizaci jsem zvolil tři metody. První spočívá v napojení komponenty line renderer na herní objekt, který ztělesňuje oko. Díky němu mohu kreslit do prostoru barevnou čáru, jež ukazuje směr zraku v aktuálním momentě. Tuto metodu využívám ve WebGL modulu. Pro další dvě metody bylo zapotřebí vymyslet způsob, jak promítnout zrak na 2D plochu a tím na monitorovacím zařízení ukazovat v reálném čase směr zraku pacienta na POV kameře. Plochu N jsem umístil do vzdálenosti

$$d$$

od kamery a bude měla velikost

$$m \times n,$$

která odpovídala velikosti viditelného zorného pole VR headsetu po aproximaci. Délku strany

$$m$$

jsem tedy vyjádřil jako

$$m = d \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

a délku strany

$$n$$

jako

$$n = d \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

Tedy v případě Meta Quest Pro se uváděl horizontální úhel

$$\alpha = 106^\circ$$

a vertikální úhel

$$\beta = 95,57^\circ$$

a pokud jsem zvolil vzdálenost od kamery

$$d = 0,35 \text{ u},$$

tak byla velikost plochy rovna

$$m \approx 0,464466 \text{ u}$$

a

$$n \approx 0,385793 \text{ u},$$

kde u je jednotka velikosti definovaná uživatelem v programu Unity. Díky knihovně Movement SDK jsem mohl z VR headsetu získat informace o aktuálním horizontálním

$$\alpha$$

a vertikálním

$$\beta$$

úhlu otočení oka vůči nulové pozici. Pro výpočet texturové souřadnice pozice aktuálního pohledu na oddělené ploše, která sloužila pro vizualizaci tepelné mapy, jsem potřeboval zjistit texturové souřadnice bodu P na snímané ploše N před kamerou, kde snímanou plochu protnul paprsek vyslaný z oka. Tyto souřadnice bodu P jsem získal jako součet vektorů x a y , kde vektor x představoval projekci bodu P na osu m a vektor y projekci na osu n . Jelikož byla plocha N ortogonální k vektoru a začínajícím v oku a končícím ve středu plochy N , tak vektor q vytvořený paprskem z oka do kteréhokoli bodu na ploše N vytvářel pravoúhlý trojúhelník s odvěsnou o velikosti $\|x\|$ případně $\|y\|$, druhou odvěsnou o velikosti $\|a\|$ a přeponou o velikosti $\|q\|$ a úhlem α případně β mezi vektory a a q . Proto jsem mohl souřadnice bodu $P(m_i, n_i)$ vyjádřit jako

$$m_i = d \times \cos(\alpha)$$

a

$$n_i = d \times \cos(\beta).$$

Texturovou souřadnici vzdálené plochy pro vizualizaci tepelné mapy jsem pak získával škálováním původní souřadnice poměrem velikostí obou ploch. V praxi jsem texturovou souřadnici na ploše N získal pomocí funkce Raycast z knihovny Physics, která je součástí Unity. Paprsky z očí jsem snímal s určitou frekvencí a mapoval je skrze již zmíněný výpočet na dvoudimenzionální matici, kde každý prvek matice představoval diskrétní souřadnici plochy podobné s plochou N a hodnota prvku matice vyjadřovala počet pohledů oka na toto místo. Díky této matici jsem mohl v reálném čase vykreslovat tepelnou mapu, jelikož jsem hodnoty prvků matice převáděl do barevné intenzity pixelu na obrázku a zároveň byl schopen poskytnout matici pro pozdější numerickou analýzu.

4.6 Příprava na distribuci na jiná pracoviště

Tento bod pro mě zahrnoval několik kroků. Nejprve jsem veškerý kód zdokumentoval pomocí XML stylu komentářů a následně skrze aplikaci Doxygen vygeneroval souhrnné HTML obsahující dokumentaci kódu, která se bude hodit budoucímu programátorovi, jenž se pokusí na Luně dále pracovat. Dále

jsem sepsal uživatelské manuály v českém a anglickém jazyce, které jsou součástí této práce jako dodatky. Následně jsem práci podrobil uživatelskému testování, abych zjistil možné problémy s využitím aplikace a některé tyto problémy opravil. Mimo jiné se jednalo o úpravu ovládání kalibrace světla, namontování přídavných krytů na Meta Quest Pro pro izolaci očí od okolního světla, opravu sesílání stínů v prostředí objekty, které by neměly mít na světlo vliv, jako je například model postavy hráče, nebo modely ovladačů. Projekt jsem umístil na webový repozitář zdrojových kódů.

Kapitola 5

Testování

Provedl jsem uživatelské testování modulu *Supervisor* a *TestSubject* s poslední verzí aplikace Luna. Použitým hardwarem byl VR headset Meta Quest Pro a mobilní telefon Samsung S21 s operačním systémem Android 14. Celkem se testování zúčastnilo 8 lidí, z toho 1 žena a 7 mužů. Každému subjektu jsem přiřadil unikátní ID, díky kterému jsem anonymizoval jeho totožnost.

ID subjektu	Z1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Pohlaví	Žena	Muž	Muž	Muž	Muž	Muž	Muž	Muž
Věk	52	52	16	51	22	16	16	16
Dalekozrakost	L(-1.75), R(-1.55)	L(10.5), R(10.5)	Ne	L(1.5), R(1.5)	Ne	L(4.25), R(4.0)	Ne	L(1.0), R(0.5)
Krátkozrakost	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Astigmatismus	L(0.5), R(0.7)	L(0.5), R(0.75)	Ne	L(0.5), R(0.5)	Ne	Ne	Ne	Ne
Jiné oční choroby	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Předchozí zkušenost s VR	Ne	Ne	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano	Ne
Nejvyšší dosažené vzdělání	VŠ (Mgr.)	VŠ (Phd.)	ZŠ	VOŠ	SŠ	ZŠ	ZŠ	ZŠ
Datum testu	3. 5. 2024	3. 5. 2024	6. 5. 2024	6. 5. 2024	6. 5. 2024	6. 5. 2024	6. 5. 2024	6. 5. 2024
Minimální intenzita osvětlení	0.3423781	0.8693742	15.66227	1.564636	0.7671051	0.3043438	0.7443196	1.99981
Maximální intenzita osvětlení	4.258839	8.324968	17.83507	17.46173	6.444498	19.00669	18.6015	12.98273
Čas průchodu	17:14	15:13	10:04	8:50	6:42	14:50	12:32	8:18
Počet kolizí	18	7	0	12	8	15	10	4

Tabulka 5.1: Subjekty v uživatelském testování.

5.1 Scénář

Subjektům jsem v náhodném pořadí určil buď roli pacienta, nebo roli doktora. Pacientovi jsem na hlavu umístil VR headset, umístil ho na předem určené místo a nechal ho zapnout modul TestSubject. Doktorovi jsem dal přečíst český uživatelský manuál a poté jsem mu dal mobilní telefon se zapnutým modulem Supervisor. Poté jsem již se subjekty interagoval pouze prostřednictvím jejich otázek a do testu jsem nijak nezasahoval. Po skončení testu subjekty vyplnily dotazník, který se vztahoval k jejich roli a poté si role vyměnili a test probíhal stejným způsobem.

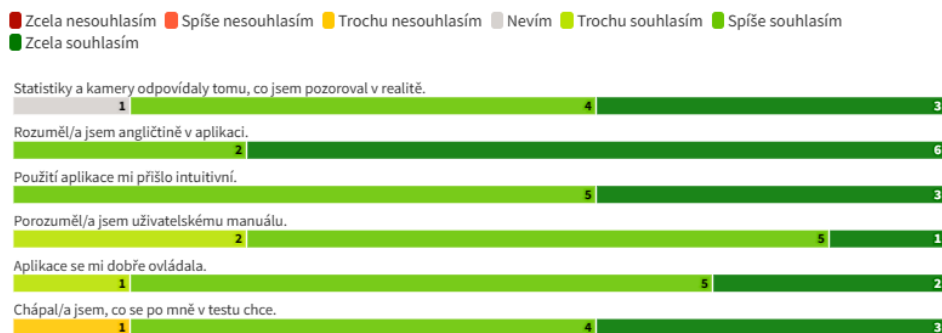


Obrázek 5.1: Graf výsledků průchodů subjektů modulem TestSubject.

5.2 Výsledky dotazníků

ID subjektu	Z1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Chápal/a jsem, co se po mně v testu chce.	Trochu nesouhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím
Aplikace se mi dobře ovládala.	Zcela souhlasím	Trochu souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím
Porozuměl/a jsem uživatelskému manuálu.	Trochu souhlasím	Trochu souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím
Použití aplikace mi přišlo intuitivní.	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím
Rozuměl/a jsem angličtině v aplikaci.	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím
Statistiky a kamery odpovídaly tomu, co jsem pozoroval v realitě.	Nevím	Spíše souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím

Tabulka 5.2: Výsledky uživatelského testování modulu Supervisor

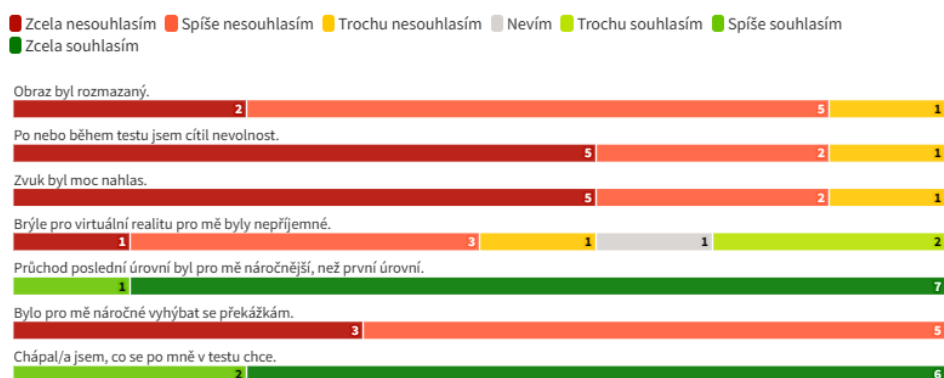


Obrázek 5.2: Grafy odpovědí z dotazníků k modulu Supervisor.

5. Testování

ID subjektu	Z1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Chápal/a jsem, co se po mně v testu chce.	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím
Bylo pro mě náročné vyhybat se překážkám.	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Spíše souhlasím	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Zcela nesouhlasím
Průchod poslední úrovní byl pro mě náročnější, než první úrovní.	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím	Zcela souhlasím
Brýle pro virtuální realitu pro mě byly nepříjemné.	Zcela nesouhlasím	Nevím	Spíše nesouhlasím	Trochu souhlasím	Trochu souhlasím	Spíše nesouhlasím	Trochu nesouhlasím	Spíše nesouhlasím
Zvuk byl moc nahlas.	Zcela nesouhlasím	Trochu nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím
Po nebo během testu jsem cítil nevolnost.	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Trochu souhlasím	Zcela nesouhlasím
Obraz byl rozmazaný.	Spíše nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Zcela nesouhlasím	Trochu souhlasím	Spíše souhlasím	Spíše nesouhlasím

Tabulka 5.3: Výsledky uživatelského testování modulu TestSubject.



Obrázek 5.3: Grafy odpovědí z dotazníků k modulu TestSubject.

Kapitola 6

Závěr

V této bakalářské práci představuji problematiku vrozených degenerativních vad sítnice, popisuji dosavadní stav vědění v otázce testování genových terapií pomocí virtuální reality. Představit projekt Luna, díky kterému lze provádět O&M testování pacientů. Práce na tomto projektu Luna byla moje první zkušenost s tvorbou aplikace ve virtuální realitě. Musel jsem se naučit specifika VR, brát zřetel na omezení daná hardwarem Meta Quest Pro, uvažovat dvojí cílovou uživatelskou skupinou ve formě pacientů a lékařů. Během implementace jsem řešil souběh asynchronních operací ve třech různých typech zařízení, síťové spojení se synchronizací herních objektů v reálném čase, reversní inženýrství veškerého původního kódu a práci s mnohými novými technologiemi, které ještě nemají dostatečnou dokumentaci a vysvětlené příklady využití. Do teoretické části bakalářské práce jsem zahrnul fyziologii optické soustavy člověka, biochemické procesy v sítnici, technické aspekty VR headsetů, historii O&M testování a spojitosti očí s různými specifiky virtuální reality. I přes složitost tématu se mi podařilo dosáhnout stanovených cílů. Věřím, že tento projekt má potenciál být nadále rozvíjen a veden k budoucímu využití v praxi.

6.1 Návrhy na budoucí vylepšení

Aplikace Luna je po vylepšeních, která jsem provedl, připravená k testování s reálnými pacienty. Pro budoucí využití by bylo vhodné toto testování provést a také projekt konzultovat s odborníky z praxe, aby se mohl nadále ubírat správným směrem.

■ Snímání těla

Jedna z možných změn by mohla být celkové snímání pozice těla. Toho by se dalo dosáhnout buď dodatečnými snímači, nebo několika kamerami rozmístěnými okolo testovací plochy, které by snímaly pacienta a vytvářely jeho přesnější 3D model, než zajišťuje aktuální aproximace pomocí kamer z VR headsetu. Díky tomu by se získávala přesnější data o kolizích a umožnila by se lepší zpětná analýza průchodu pacienta.

■ Rozšíření pro eye tracking

Technologii eye tracking jsem v této práci již představil a popsal, jakým způsobem jsem ji do aplikace Luna implementoval. Navrhl bych rozšíření systému vizualizace dat, která získáváme o rotaci očí, například znázorněním přímo na samotných překážkách v 3D prostředí nebo renderováním POV videa s ukazatelem pohledu pro pozdější přehrání.

■ 3D prostředí

Aktuální podoba chodeb, kterými pacient prochází, je velmi strohá a jednoduchá. Je možné, že nedostatečně napodobuje reálné prostředí, ve kterém se pacient každodenně pohybuje. Toto rozšíření by bylo potřeba konzultovat s odborníkem z praxe a zanalyzovat efekt barev a kontrastů na vnímání hloubky a jednotlivých předmětů v okolí člověka. Dále by bylo také dobré optimalizovat osvětlení ve virtuální realitě, které kvůli vysokým výpočetním nárokům může zpomalovat běh aplikace, pokud se použije nesprávně, a které nyní neposkytuje dostatečně realistickou podobu fyzikálního osvětlení z přirozených zdrojů světla.



Příloha A

Literatura

- [1] Apple VP Optics insights | HyperVision — hypervision.ai. <https://www.hypervision.ai/apple-vp-optics-insights>. [Accessed 02-04-2024].
- [2] ClinicalTrials.gov — clinicaltrials.gov. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT00999609>. [Accessed 02-04-2024].
- [3] How does LUXTURNA work? — luxturna.com. <https://luxturna.com/how-does-luxturna-work/>. [Accessed 02-04-2024].
- [4] Meeting the optical design challenges of mixed reality | Electro Optics — electrooptics.com. <https://www.electrooptics.com/analysis-opinion/meeting-optical-design-challenges-mixed-reality>. [Accessed 21-04-2024].
- [5] Meta Work Manager Shared Mode Eye Tracking Privacy Notice — forwork.meta.com. <https://forwork.meta.com/legal/shared-mode-eye-tracking-privacy-notice/>. [Accessed 06-04-2024].
- [6] Myopia Control - Burnett Hodd & Tam Optometry — bhoptometry.com. <https://bhoptometry.com/eye-care/myopia-control/>. [Accessed 21-04-2024].
- [7] Retinitis pigmentosa: for professionals - Gene Vision — gene.vision. <https://gene.vision/knowledge-base/retinitis-pigmentosa-for-doctors/>. [Accessed 02-05-2024].
- [8] Retnet, the retinal information network. <https://web.sph.uth.edu/RetNet/sum-dis.htm?csrt=14000350403989609563#B-diseases>. [Accessed 28-04-2024].

- [21] Christopher R Bennett, Peter J Bex, Corinna M Bauer, and Lotfi B Merabet. The assessment of visual function and functional vision. *Semin Pediatr Neurol*, 31:30–40, May 2019.
- [22] Jean Bennett, Elena M. Aleman, Katherine H. Maguire, Jennifer Nadelmann, Mariejel L. Weber, William M. Maguire, Ayodele Maja, Erin C. O’Neil, Albert M. Maguire, Alexander J. Miller, and Tomas S. Aleman. Optimization and Validation of a Virtual Reality Orientation and Mobility Test for Inherited Retinal Degenerations. *Translational Vision Science Technology*, 12(1):28–28, 01 2023.
- [23] M Boulton and P Dayhaw-Barker. The role of the retinal pigment epithelium: topographical variation and ageing changes. *Eye (Lond)*, 15(Pt 3):384–389, June 2001.
- [24] Andrea Bubka, Frederick Bonato, and Stephen Palmisano. Expanding and contracting optical flow patterns and simulator sickness. *Aviat Space Environ Med*, 78(4):383–386, April 2007.
- [25] Xue Cai, Shannon M Conley, and Muna I Naash. RPE65: role in the visual cycle, human retinal disease, and gene therapy. *Ophthalmic Genet*, 30(2):57–62, June 2009.
- [26] Xue Cai, Shannon M Conley, and Muna I Naash. RPE65: role in the visual cycle, human retinal disease, and gene therapy. *Ophthalmic Genet*, 30(2):57–62, June 2009.
- [27] Harshika Chawla and Vishal Vohra. *Retinal Dystrophies*. StatPearls Publishing, March 2023.
- [28] Zinan Chen, Haotao Li, Cuixia Yuan, Peili Gao, Qiang Su, and Shuming Chen. Color revolution: Prospects and challenges of quantum-dot light-emitting diode display technologies. *Small Methods*, 8(2):2300359, 2024.
- [29] Daniel C Chung, Sarah McCague, Zi-Fan Yu, Satha Thill, Julie DiStefano-Pappas, Jean Bennett, Dominique Cross, Kathleen Marshall, Jennifer Wellman, and Katherine A High. Novel mobility test to assess functional vision in patients with inherited retinal dystrophies. *Clin Exp Ophthalmol*, 46(3):247–259, August 2017.
- [30] Simon Davis, Keith Nesbitt, Eugene Nalivaiko, et al. Comparing the onset of cybersickness using the oculus rift and two virtual roller coasters. In *Proceedings of the 11th Australasian conference on interactive entertainment (IE 2015)*, volume 27, page 30. Australian Computing Society Sydney, Australia, 2015.
- [31] Sarah D’Amour, Jelte E Bos, and Behrang Keshavarz. The efficacy of airflow and seat vibration on reducing visually induced motion sickness. *Experimental brain research*, 235:2811–2820, 2017.

- [44] Albert Maguire, Stephen Russell, Daniel Chung, Zi-Fan Yu, Amy Tillman, Arlene Drack, Francesca Simonelli, Bart Leroy, Kathleen Reape, Katherine High, and Jean Bennett. Durability of voretigene neparvovec for biallelic rpe65-mediated inherited retinal disease: Phase 3 results at 3 years and 4 years. *Ophthalmology*, 128, 03 2021.
- [45] Mariaelena Malvasi, Lorenzo Casillo, Filippo Avogaro, Alessandro Abbouda, and Enzo Maria Vingolo. Gene therapy in hereditary retinal dystrophies: The usefulness of diagnostic tools in candidate patient selections. *Int J Mol Sci*, 24(18), September 2023.
- [46] Nathan Matsuda, Alexandre Chapiro, Yang Zhao, Romain Bachy, and Douglas Lanman. Realistic luminance in vr. In *ACM SIGGRAPH Asia 2022 Conference Proceedings*, pages 1–8, 2022.
- [47] Wen-Chien Miao, Fu-He Hsiao, Yujia Sheng, Tzu-Yi Lee, Yu-Heng Hong, Chun-Wei Tsai, Hung-Lung Chen, Zhaojun Liu, Chun-Liang Lin, Ren-Jei Chung, Zhi-Ting Ye, Ray-Hua Horng, Shih-Chen Chen, Hao-Chung Kuo, and Jr-Hau He. Microdisplays: Mini-led, micro-oled, and micro-led. *Advanced Optical Materials*, 12(7):2300112, 2024.
- [48] MedlinePlus [Internet]. Bethesda (MD): National Library of Medicine (US). USH2A gene: MedlinePlus Genetics — medlineplus.gov. <https://medlineplus.gov/genetics/gene/ush2a/#conditions>, 2016. [Accessed 28-04-2024].
- [49] Jorge Otero-Millan, Stephen L. Macknik, and Susana Martinez-Conde. Fixational eye movements and binocular vision. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8, 2014.
- [50] Lara Panfili, Michael Wimmer, and Katharina Krösl. Myopia in head-worn virtual reality. In *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pages 629–630, 2021.
- [51] Dale Purves. *Neuroscience*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, 2 edition, January 2001.
- [52] Lee Ann Remington. Chapter 4 - retina. In Lee Ann Remington, editor, *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System (Third Edition)*, pages 61–92. Butterworth-Heinemann, Saint Louis, third edition edition, 2012.
- [53] Alejandro J Roman, Artur V Cideciyan, Vivian Wu, Abraham A Mascio, Arun K Krishnan, Alexandra V Garafalo, and Samuel G Jacobson. Mobility test to assess functional vision in dark-adapted patients with leber congenital amaurosis. *BMC Ophthalmology*, 22(1):266, June 2022.
- [54] Deoye Tonade and Timothy S. Kern. Photoreceptor cells and rpe contribute to the development of diabetic retinopathy. *Progress in Retinal and Eye Research*, 83:100919, 2021.

A. *Literatura*

- [55] Lyes Toualbi, Maria Toms, and Mariya Moosajee. Ush2a-retinopathy: From genetics to therapeutics. *Experimental Eye Research*, 201:108330, 2020.
- [56] Sanne K Verbakel, Ramon A C van Huet, Camiel J F Boon, Anneke I den Hollander, Rob W J Collin, Caroline C W Klaver, Carel B Hoyng, Ronald Roepman, and B Jeroen Klevering. Non-syndromic retinitis pigmentosa. *Prog. Retin. Eye Res.*, 66:157–186, September 2018.



Příloha B

Dotazníky

B. Dotazníky

Test subject
Dotazník uživatelského testování projektu Luna

ID: _____ **Nejvyšší dosažené vzdělání:** _____
Jméno: _____ **Předchozí zkušenost s VR:** _____
Příjmení: _____ **Věk:** _____
Datum: _____

Zakroužkujte odpovědi, případně odpovzte slovy:

Trpíte krátkozrakostí? **ANO / NE** *Pokud ano, kolik máte dioptrií?* **Levé oko:** _____ **Pravé oko:** _____
Trpíte dalekozrakostí? **ANO / NE** *Pokud ano, kolik máte dioptrií?* **Levé oko:** _____ **Pravé oko:** _____
Trpíte astigmatismem? **ANO / NE** *Pokud ano, kolik máte cylindrů?* **Levé oko:** _____ **Pravé oko:** _____
Máte jiné oční choroby? **ANO / NE** *Pokud ano, jaké?* _____

	Zaškrtněte odpovídající pole podle toho, do jaké míry s tvrzením souhlasíte.						
	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Trochu nesouhlasím	Nevím	Trochu souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím
<i>Chápal/a jsem, co se po mně v testu chce.</i>							
<i>Bylo pro mě náročné vyhábat se překážkám.</i>							
<i>Průchod poslední úrovní byl pro mě náročnější, než první úrovní.</i>							
<i>Brýle pro virtuální realitu pro mě byly nepříjemné.</i>							
<i>Zvuk byl moc nahlas.</i>							
<i>Po nebo během testu jsem cítil nevolnost.</i>							
<i>Obraz byl rozmazaný.</i>							

Napiště Vaše dojmy z průchodu testem.

Obrázek B.1: Dotazník k modulu TestSubject z uživatelského testování.

Supervisor
Dotazník uživatelského testování projektu Luna

ID:
Jméno:
Příjmení:
Datum:

	Zaškrtněte odpovídající pole podle toho, do jaké míry s tvrzením souhlasíte.						
	Zcela nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Trochu nesouhlasím	Nevím	Trochu souhlasím	Spíše souhlasím	Zcela souhlasím
<i>Chápal/a jsem, co se po mně v testu chce.</i>							
<i>Aplikace se mi dobře ovládala.</i>							
<i>Porozumně/a jsem uživatelskému manuálu.</i>							
<i>Použití aplikace mi přišlo intuitivní.</i>							
<i>Rozumně/a jsem angličtině v aplikaci.</i>							
<i>Statistiky a kamery odpovídaly tomu, co jsem pozoroval v realitě.</i>							

<i>Napište Vaše dojmy z použití aplikace.</i>	
<i>Změnil/a byste na aplikaci něco?</i>	
<i>Všim/a jste si, že by něco nefungovalo tak, jak jste očekával/a?</i>	

Obrázek B.2: Dotazník k modulu Supervisor z uživatelského testování.

Příloha C

Český uživatelský manuál

V tomto manuálu se dozvíte jak používat aplikaci Luna pro testování schopnosti orientace a mobility ve virtuální realitě. V manuálu budu referovat k vám jako uživateli monitorovacího zařízení a k testovanému člověku jako pacientovi. Během testu prochází pacient dvaceti úrovněmi ve virtuální realitě. Počítají se mu časy průchodů a počty nárazů do překážek. Každá po sobě následující úroveň má jinou snižující se intenzitu osvětlení. Veřejný repozitář obsahující zdrojové soubory projektu se nachází na adrese <https://gitlab.com/sasekji1/luna-dev>.

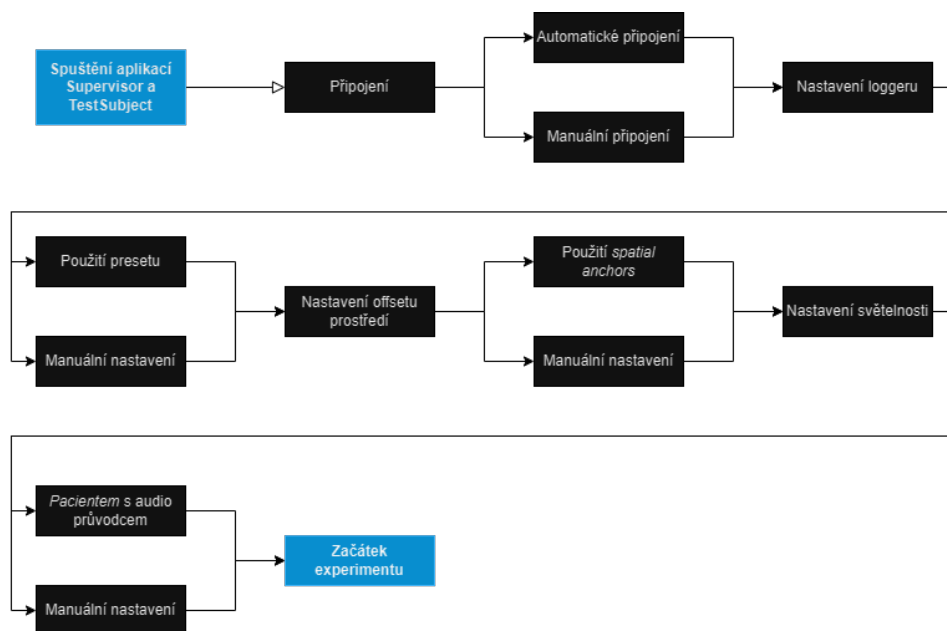
■ Průběh testování

Testování začíná přípravou samotného testu včetně kontroly prostředí, připojení zařízení, nastavení aplikace a nastavení minimální a maximální intenzity světla. Tyto dvě hodnoty intenzity slouží k výpočtu intenzit osvětlení v jednotlivých úrovních testu.

■ Příprava

Pro použití budete potřebovat nainstalovat aktuální verzi modulů aplikace Luna. Modul s názvem Supervisor nainstalujte do mobilního zařízení či tabletu, dále jen monitorovacího zařízení, s operačním systémem Android,

nebo iOS. Modul s názvem Test Subject nainstalujte do VR headsetu s podporou technologie eye tracking, hand tracking a Unity balíčku Meta XR SDK. Aplikace byla testována na Meta Quest Pro, funkčnost s jiným modelem či značkou brýlí pro virtuální realitu není zaručena. Obě zařízení připojte bezdrátově ke stejné lokální síti. Na VR headsetu nastavte *room guardian* tak, aby bezpečně oraničil místnost a ujistěte se, že v oblasti, kde se bude pohybovat uživatel, nejsou žádné předměty, do kterých by mohl narazit. Nebo je také možné *room guardian* kompletně vypnout. Dále povolte v nastavení VR headsetu eye tracking a hand tracking a ujistěte se, že je dostatečně nabitý, jelikož v případě náhlého vypnutí aplikace nebo odpojení sítě nedojde k odeslání logu a bude nutné testování opakovat. Pokud po instalaci aplikaci nevidíte, zkontrolujte filtr pro zobrazení externě získaných aplikací. Pro spuštění testu je nutné nastavit připojení k webové aplikaci VR Logger. V ní musíte mít nastavenou organizaci a aplikaci.

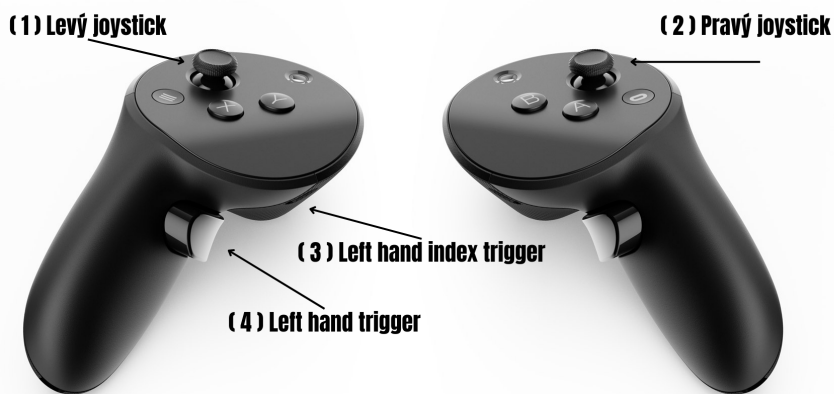


Obrázek C.1: Průběh kalibrace aplikace Luna

■ Prvotní nastavení offsetu prostředí

Při prvním zapnutí modulu Test Subject v nových prostorech budete muset nastavit offset 3D chodby, kterou bude uživatel procházet tak, aby seděla s reálným prostředím místnosti. Zapněte aplikaci Luna ve VR headsetu a mějte v ruce oba ovladače. Po zapnutí uvidíte oranžový kvádr, který představuje oblast, kam se umístí chodba. **Pravým joystickem (1)** kvádr natáčejte a **levým joystickem (2)** s ním pohybujte tak, aby seděl s prostorem v reálné místnosti. Až budete spokojeni s pozicí kvádru, stiskněte primary **left hand**

index trigger (3) na levém ovladači a tím ji uložíte pro příští použití a můžete aplikaci ukončit, nebo předat VR headset pacientovi. Uložení kvádru indikuje změna jeho barvy na modrou. V případě, že byste chtěl/a kvádr vrátit na poslední uloženou pozici, stiskněte **primary left hand trigger (4)** na levém ovladači. Startovní pozice pacienta je označena na kvádru šedým kruhem.



Obrázek C.2: Pojmenování tlačítek na ručních ovladačích. Převzatý obrázek s vlastními popisky [43].

■ Připojení zařízení

Před začátkem testu je nutné připojit k sobě monitorovací zařízení a VR headset. Po spuštění modulu Test Subject se automaticky vytvoří server a zpřístupní se pro připojení. Po spuštění modulu Supervisor spatříte několik kroků kterými budete muset projít před tím, než začne samotný test. Nejprve stiskněte tlačítko **Connect device** a tím se přesunete na obrazovku připojení. Následně by měla být vidět v okně automatického vyhledávání IP adresa VR headsetu. Na některých sítích se VR headset automaticky nevyhledá a je proto potřeba manuálně zadat jeho IP adresu. Ta se zobrazuje na kalibračním kvádru. Po připojení zařízení se vraťte na hlavní stránku Supervisoru.

■ Nastavení aplikace

Dále klikněte na tlačítko **Select participant** a dostanete se na stránku výběru pacienta. Zde vyberte konkrétního pacienta a pokud si přejete nastavit přesné hodnoty minimální a maximální intenzity osvětlení, můžete tak učinit a posléze hodnoty uložit tlačítkem *Set light values*. Pokud nevidíte svého pacienta, budete ho muset přidat ve webové aplikaci VR Logger. Kliknutím na jméno pacienta ho vyberete a poté se vraťte na hlavní obrazovku.

■ Rozšířené nastavení

V záložce *Nastavení* se nachází oblast *Advanced settings*. Zde není potřeba nic nastavovat a hodnoty se přednastaví automaticky. Konkrétně jde o nastavení připojení k serveru VR Logger a přizpůsobení aplikace. Pokud se rozhodnete nastavení změnit, můžete ho poté tlačítkem *Save preset* uložit a tlačítkem *Load preset* příště opět načíst.

■ Načtení uloženého offsetu prostředí

V tento moment byste už měli dát pacientovi na hlavu VR headset a říct mu, ať se narovná, jelikož aplikace zaznamená jeho výšku a ať vyčká na další instrukce. Poté klikněte na tlačítko **Calibrate environment** a tím načtete uloženou polohu 3D prostředí. Jak si nastavit přesnou polohu prostředí jste se dozvěděli v sekci prvotní nastavení offsetu prostředí.

■ Nastavení intenzity osvětlení

Maximální a minimální intenzitu osvětlení lze nastavit buď ze strany uživatele v nastavení aplikace, nebo pacientem s automatickým audio průvodcem. Klikněte na tlačítko **Set luminance**. Pro první testování pacienta mu vložte do pravé ruky pravý ovladač a upozorněte ho, ať zatím nic nemačká a zvolte možnost **Automatic**, pro načtení světelných hodnot z nastavení zvolte možnost **Manually** a ovladač pacientovi nedávejte. Pokud jste zvolili manuální nastavení, tak se po chvíli zapne test a uživatel by už neměl do konce testu s pacientem nijak interagovat a pouze kontrolovat, aby nenarazil do případných

překážek v místnosti. Pokud jste zvolili možnost audio asistenta, pak se pacientovi přehrají audio nahrávky v češtině, které mu vysvětlí, jak si nastavit minimální a maximální intenzitu světla a jak bude probíhat test. Vy sledujte monitorovací zařízení a až se vám zobrazí hláška vyžadující odebrání ovladače pacientovi, přejděte k pacientovi, odeberte mu ovladač z ruky a poté stiskněte tlačítko potvrzení na monitorovacím zařízení. Pak začne test.

■ Průběh testování

Během samotného testu by neměl být pacient vyrušován. Vy můžete průběh testu sledovat na monitorovacím zařízení. Na hlavní stránce je vidět POV kamera pacienta, tedy jeho přesný pohled. Tlačítkem **Eye tracking** zapnete zobrazení aktuálního pohledu pacienta a tlačítkem **Heat map** zobrazíte tepelnou mapu eye trackingu za celý test. O trochu výše je zobrazena další kamera z třetího pohledu, kterou lze přepnout na pohled ze shora a pohled ze strany. Dále můžete obě kamery přepnout do zobrazení na celou obrazovku a také vybrat možnost osvětlení prostředí mezi osvětlením, které vidí pacient a nebo přidaným osvětlením, které se nijak nepromítne pacientovi do jeho pohledu a vidíte ho pouze vy v monitorovacím zařízení. Na pravé straně jsou vidět statistiky jako nastavené intenzity osvětlení, kolize pacienta s překážkami, čas a aktuální úroveň. Po dokončení testu se modul **Test Subject** ve VR headsetu pacienta automaticky ukončí a vám se v modulu **Supervisor** ukáže okno s možností prokliknutí do webové aplikace VR Logger, kde si můžete zobrazit výsledky testu. Test můžete také ukončit předčasně tlačítkem **End session** a dosud sesbíraná data se odešlou do VR Loggeru.



Příloha D

English User Manual

In this manual, you will learn how to use the Luna application to test orientation and mobility skills in virtual reality. In this manual, I will refer to you as the monitoring device user and to the person being tested as the patient. During the test, the patient will go through twenty levels in virtual reality. Their passage times and the number of collisions with obstacles are recorded. Each successive level has a different decreasing light intensity. Gitlab repository of this project is located at <https://gitlab.com/sasekji1/luna-dev>.

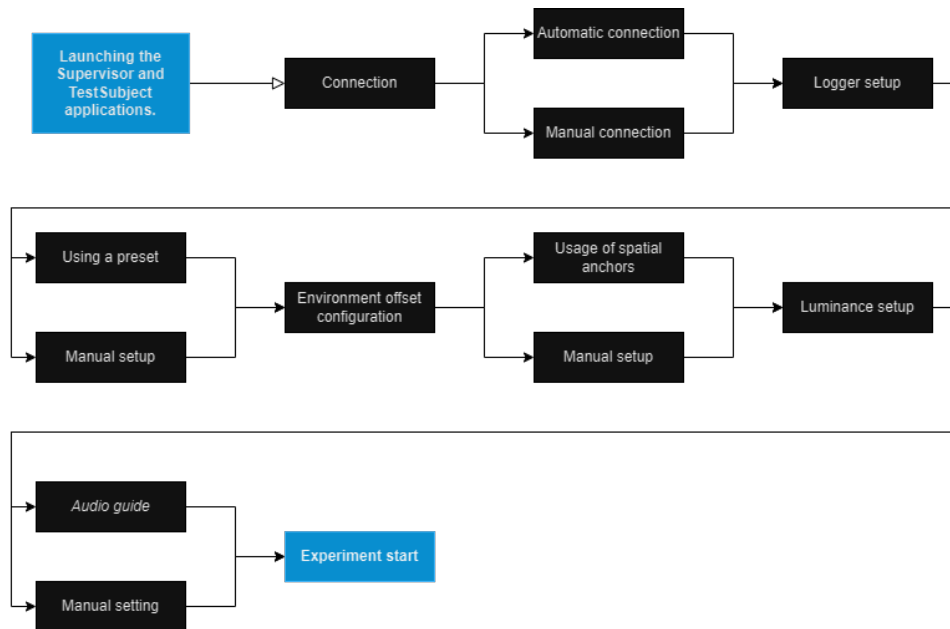
■ Testing Procedure

The testing begins with the preparation of the test itself, including environmental checks, device connection, application setup, and setting the minimum and maximum light intensity. These two intensity values are used to calculate the light intensities in the individual test levels.

■ Preparation

To use the system, you'll need to install the latest version of the Luna application modules. Install the Supervisor module on a mobile device or tablet, which will serve as the monitoring device, running either the Android or iOS operating system. Install the Test Subject module on a VR headset that

supports eye tracking, hand tracking, and the Unity Meta XR SDK package. The application has been tested on the Meta Quest Pro; compatibility with other VR headset models or brands is not guaranteed. Connect both devices wirelessly to the same local network. On the VR headset, set up the room guardian to safely define the room boundaries, ensuring there are no objects in the user’s movement area that they could collide with. Alternatively, you can disable the room guardian entirely. Additionally, enable eye tracking and hand tracking in the VR headset settings and ensure it is sufficiently charged. In case of sudden application shutdown or network disconnection, make sure the device can still send logs; otherwise, testing will need to be repeated. If you don’t see the application after installation, check the filter for displaying externally acquired applications. To initiate the test, it is necessary to set up a connection to the VR Logger web application, where you must have your organization and application configured.

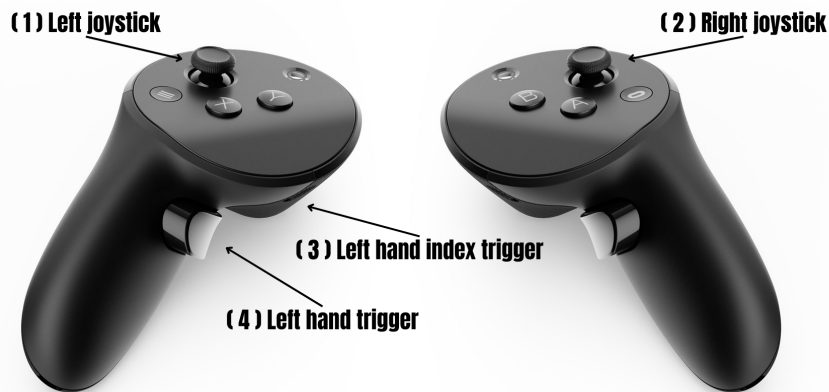


Obrázek D.1: The calibration process of the Luna application

Initial Environment Offset Setup

When initializing the Test Subject module in new spaces, you’ll need to set the offset for the 3D corridor that the user will navigate to align with the real-world room environment. Turn on the Luna application on the VR headset and hold both controllers. Upon activation, you will see an orange cube representing the area where the corridor will be placed. Use the **right joystick (1)** to rotate the cube and the **left joystick (2)** to move it until it aligns with the space in the real room. Once you are satisfied with the

cube's position, press the primary **left-hand index trigger (3)** on the left controller to save it for future use. You can then exit the application or hand over the VR headset to the patient. Saving the cube will be indicated by a change in its color to blue. If you wish to return the cube to the last saved position, press the **primary left-hand trigger (4)** on the left controller. The starting position for the patient is marked on the cube by a gray circle.



Obrázek D.2: Button names on the hand controllers. Image adapted with custom labels [43].

■ Device Connection

Before starting the test, it is necessary to connect the monitoring device and VR headset. Upon launching the Test Subject module, a server will be automatically created and made accessible for connection. When launching the Supervisor module, you will see several steps you need to go through before the actual test begins. First, press the **Connect device** button, which will take you to the connection screen. Subsequently, the IP address of the VR headset should appear in the automatic search window. On some networks, the VR headset may not be automatically detected, so it may be necessary to manually enter its IP address, which is displayed on the calibration cube. After connecting the device, return to the main Supervisor screen.

■ Application Setup

Next, click on the **Select participant** button, which will take you to the participant selection page. Here, choose a specific patient, and if you wish to set precise values for the minimum and maximum light intensity, you can do so and save the values with the *Set light values* button. If you do not see your patient listed, you will need to add them in the VR Logger web application. Click on the patient's name to select them, then return to the main screen.

■ Advanced Settings

In the *Settings* tab, you will find the *Advanced settings* area. There is no need to adjust anything here as the values are pre-set automatically. Specifically, this involves the connection settings to the VR Logger server and application customization. If you decide to modify the settings, you can save them with the *Save preset* button and reload them later with the *Load preset* button.

■ Loading Saved Environment Offset

At this point, you should have the VR headset placed on the patient's head and instruct them to stand straight as the application records their height and wait for further instructions. Then, click on the **Calibrate environment** button to load the saved 3D environment position. Instructions on how to set the precise environment position were provided in the initial environment offset setup section.

■ Setting Light Intensity

The maximum and minimum light intensity can be set either by the user in the application settings or by the patient with the automatic audio guide. Click on the **Set luminance** button. For the initial patient testing, place the right controller in the patient's right hand and instruct them not to press anything yet. Choose the **Automatic** option. To load light values from the settings, select the **Manually** option and do not give the controller to the patient. If you have chosen manual settings, the test will start after a while,

and the user should not interact with the patient until the end of the test, only ensuring they do not encounter any obstacles in the room. If you have selected the audio assistant option, the patient will listen to audio recordings in Czech, explaining how to set the minimum and maximum light intensity and how the test will proceed. Monitor the monitoring device, and when a message appears instructing you to remove the controller from the patient, approach the patient, take the controller from their hand, and then press the confirmation button on the monitoring device. The test will then begin.

■ Testing Process

During the actual test, the patient should not be disturbed. You can monitor the test progress on the monitoring device. On the main page, you can see the patient's POV camera, i.e., their exact view. By clicking the **Eye tracking** button, you can display the patient's current view, and by clicking the **Heat map** button, you can display the eye tracking heatmap for the entire test. A little higher is another camera view from a third-person perspective, which can be switched to a top-down view and a side view. You can also switch both cameras to full-screen view and select the environment lighting option between the lighting seen by the patient and the additional lighting that does not affect the patient's view and is only visible to you on the monitoring device. On the right side, you can see statistics such as set light intensities, collisions of the patient with obstacles, time, and the current level. After completing the test, the Test Subject module in the VR headset will automatically close, and you will be shown a window in the Supervisor module with an option to navigate to the VR Logger web application, where you can view the test results. You can also prematurely end the test by clicking the **End session** button, and the collected data will be sent to the VR Logger.