

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Bakalářská práce

Sada testů pro zkoumání chyb směrového slyšení ve virtuálním
akustickém prostoru

A Collection of Tests for Researching Spatial Hearing Errors in
Virtual Acoustic Space

Autor: Vojtěch Ledvina

Vedoucí práce: Ing. Martin Novotný

Studijní program: Elektronika a komunikace

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ledvina** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **499261**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sada testů pro zkoumání chyb směrového slyšení ve virtuálním akustickém prostoru

Název bakalářské práce anglicky:

A Collection of Tests for Researching Spatial Hearing Errors in Virtual Acoustic Space

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se se základními koncepty směrového slyšení a nejtypičtějším chybami lokalizace zvukového zdroje. Na základě této rešerše rozšířte dostupnou aplikaci na určování polohy zdroje zvuku ve virtuálním akustickém prostoru (viz [1]) o nové testy, které umožní dané chyby blíže studovat. S vytvořenými testy proveďte subjektivní měření na skupině posluchačů. Získaná data základním způsobem vyhodnoťte a diskutujte výstupy ze subjektivního měření s předpokládanými výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] JAROLÍMEK, Viktor. Virtual Acoustic Space Test using HMD [online]. Praha, 2019. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/82888>. Diplomová práce. FEL ČVUT. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [2] BAUMGARTNER, Robert. Modeling Sound Localization in Sagittal Planes for Human Listeners. Graz, 2015. Doctoral Thesis. Kunst-Universität Graz.
- [3] PAUKNER, Philipp, Martin ROTHBUCHER a Klaus DIEPOLD. Sound Localization Performance Comparison of Different HRTF-Individualization Methods [online]. Dostupné z: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1207048/744102.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Novotný katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.09.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

Ing. Martin Novotný
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24.05.2024

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinovi Novotnému za odborné vedení, technickou podporu při modifikacích aplikace a za čas, který mi při zpracování práce věnoval.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním chyb přesnosti lokalizace zdroje zvuku ve VR systémech. Zaměřuje se především na lokální chyby a front-back chyby směrového slyšení. V práci jsou nejprve stručně uvedeny základní principy směrového slyšení, využití HRTF ve VR systémech a stručné seznámení s tvorbou obsahu pro VR. Následně je popsáno VR pracoviště na katedře radioelektroniky FEL ČVUT v Praze a jeho vybavení. V další části je čtenář seznámen s prací v engine Unity a nově realizovanými úpravami aplikace pro testování lokalizace zdroje zvuku ve VR. V poslední části práce je popsáno provedené subjektivní měření prostorové lokalizace zdroje zvuku a celkové shrnutí výsledků jednotlivých testů.

Klíčová slova: směrové slyšení, HRTF, VR systémy, C#, Unity

Abstract

This bachelor's thesis deals with investigation of sound localisation errors in VR systems. Thesis mainly focuses on local errors and front-back errors of spatial hearing. Firstly, the thesis briefly summarizes key concepts of spatial hearing, the use of HRTF in VR systems, and creating content for VR in Unity engine. Then the VR workplace located on the Department of Radioelectronics, FEE CTU is described to reader together with its equipment. In the next section, the working with Unity engine is briefly described to reader along with new adjustments made to sound localisation application for VR. The last section of the thesis describes the execution of subjective measurement of the sound source spatial localisation. The results of this measurement are briefly summarized and discussed.

Keywords: spatial hearing, HRTF, VR systems, C#, Unity

Seznam obrázků

Obrázek 1: Znázornění Kartézského a Sférického souřadného systému.....	3
Obrázek 2: Anatomické roviny rozdělující lidské tělo	4
Obrázek 3: Dopad zvukové vlny na model hlavy	5
Obrázek 4: Znázornění Cone of confusion	6
Obrázek 5: Základní princip zpracování signálu prostřednictvím LTI systému v časové a frekvenční oblasti	7
Obrázek 6: Popis objektů měřicího aparátu definovaných v SOFA	10
Obrázek 7: Srovnání AR, VR a Mixed reality	12
Obrázek 8: Přehled využití VR	14
Obrázek 9: Příklad mobilního HMD od Google	15
Obrázek 10: Zastoupení VR headsetů pro rok 2025	16
Obrázek 11: VR headset Oculus Quest.....	19
Obrázek 12: Přehled VR headsetů používaných uživateli platformy Steam v roce 2022	19
Obrázek 13: Unity engine visual scripting	21
Obrázek 14: Unreal Engine visual scripting	21
Obrázek 15: Přehled enginů preferovaných vývojáři.....	22
Obrázek 16: Headset HTC Vive Pro Eye.....	25
Obrázek 17: Přehled portů HTC Vive Link box	26
Obrázek 18: Schéma zapojení HTC Vive Link box.....	26
Obrázek 19: Jednoduché schéma zapojení Base Station.....	27
Obrázek 20: HTC Vive controller.....	27
Obrázek 21: Vizuální vzhled jedno z testů	29
Obrázek 22: Příklad ukládání výsledků testování	30
Obrázek 23: Unity UI	31
Obrázek 24: Příklad struktury jednoho z testů v Unity	32
Obrázek 25: Ukázka přiřazení nového tagu	34
Obrázek 26: Input field pro zadání požadovaného počtu testů	35
Obrázek 27: Tutoriálové testy v rozhraní Unity	36
Obrázek 28: Příklad jednoho z nových testů.....	37
Obrázek 29: Příklad jednoho z plně prostorových testů s distraktory.....	38
Obrázek 30: Počet respondentů a jejich správných odpovědí v průběhu celého testování	48
Obrázek 31: Čas potřebný k dokončení celého testování	48
Obrázek 32: Struktura testu 01 v Unity	54
Obrázek 33: Vizualizace výsledků testu 01	54
Obrázek 34: Struktura testu 02 v Unity	55
Obrázek 35: Vizualizace výsledků testu 02	55
Obrázek 36: Struktura testu 03 v Unity	56

Obrázek 37: Vizualizace výsledků testu 03	56
Obrázek 38: Struktura testu 04 v Unity	57
Obrázek 39: Vizualizace výsledků testu 04	57
Obrázek 40: Struktura testu 05 v Unity	58
Obrázek 41: Vizualizace výsledků testu 05	58
Obrázek 42: Struktura testu 06 v Unity	59
Obrázek 43: Vizualizace výsledků testu 06	59
Obrázek 44: Struktura testu 07 v Unity	60
Obrázek 45: Vizualizace výsledků testu 07	60
Obrázek 46: Struktura testu 08 v Unity	61
Obrázek 47: Vizualizace výsledků testu 08	61
Obrázek 48: Struktura testu 09 v Unity	62
Obrázek 49: Vizualizace výsledků testu 09	62
Obrázek 50: Struktura testu 10 v Unity	63
Obrázek 51: Vizualizace výsledků testu 10	63
Obrázek 52: Struktura testu 11 v Unity	64
Obrázek 53: Vizualizace výsledků testu 11	64
Obrázek 54: Struktura testu 12 v Unity	65
Obrázek 55: Vizualizace výsledků testu 12	65
Obrázek 56: Struktura testu 13 v Unity	66
Obrázek 57: Vizualizace výsledků testu 13	66
Obrázek 58: Struktura testu 14 v Unity	67
Obrázek 59: Vizualizace výsledků testu 14	67
Obrázek 60: Struktura testu 15 v Unity	68
Obrázek 61: Vizualizace výsledků testu 15	68
Obrázek 62: Struktura testu 16 v Unity	69
Obrázek 63: Vizualizace výsledků testu 16	69
Obrázek 64: Distraktor 1 - Veverka rotující kolem uživatele	70
Obrázek 65: Distraktor 2 - Želva rotující kolem uživatele.....	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Minimální systémové požadavky pro HTC Vive Pro Eye	23
Tabulka 2: Přehled základních parametrů HMD HTC Vive Pro Eye	24
Tabulka 3: Hardwarové specifikace počítače dostupného v laboratoři.....	28

Obsah

Úvod	1
1. Teoretický rozbor	2
1.1 Směrové slyšení	2
1.1.1 Souřadné systémy.....	2
1.1.2 Určování polohy zdroje zvuku	3
1.1.3 Chyby při určování polohy zdroje zvuku	5
1.2 HRTF	7
1.2.1 Měření HRTF	8
1.2.2 SOFA standard	9
1.2.3 VAS (Virtual Auditory Space).....	10
2. Virtuální realita	12
2.1 Typy VR	13
2.1.1 Non-immersive VR systémy	13
2.1.2 Semi-immersive VR systémy	13
2.1.3 Fully-immersive VR systémy.....	13
2.2 Oblasti využití VR	14
2.3 Head mounted display (HMD).....	14
2.3.1 Constellation systém	16
2.3.2 PlayStation VR systém.....	16
2.3.3 SteamVR Lighthouse	17
2.3.4 SLAM/Inside-Out systém	17
2.3.5 Výrobci HMD	18
2.4 Tvorba obsahu pro VR.....	20
3. Struktura pracoviště a použitá zařízení	23
3.1 HTC Vive Pro Eye	23
3.1.1 Headset.....	24
3.1.2 Link box	25
3.1.3 Base station	26
3.1.4 Vive controllers.....	27
3.2 Počítačová stanice	28
3.3 Aplikace pro testování lokalizace zdroje zvuku.....	28

4. Modifikace stávající aplikace a přidání nových testovacích sekvencí.....	31
4.1 Práce s Unity	31
4.2 Randomizace pořadí testů a zdroje zvuku.....	32
4.2.1 Randomizace pořadí testů	32
4.2.2 Randomizace zdroje zvuku	33
4.3 Input field pro zadání počtu testů.....	34
4.4 Vytvoření tutoriálové sekvence.....	35
4.5 Rozšíření aplikace o nové testy	36
5. Realizace měření a vyhodnocení získaných dat	39
5.1 Realizace měření v laboratoři.....	39
5.2 Struktura naměřených dat	39
5.3 Zpracování dat získaných měřením	40
5.4 Rozbor výsledků jednotlivých testů	40
5.5 Celkové shrnutí výsledků.....	47
Závěr	49
Použitá literatura	51
Příloha A – Struktura elektronické přílohy	53
Příloha B – Vizualizace testů a jejich vyhodnocení.....	54
B.1 Test 01.....	54
B.2 Test 02.....	55
B.3 Test 03.....	56
B.4 Test 04.....	57
B.5 Test 05.....	58
B.6 Test 06.....	59
B.7 Test 07.....	60
B.8 Test 08.....	61
B.9 Test 09.....	62
B.10 Test 10.....	63
B.11 Test 11.....	64

B.12	Test 12.....	65
B.13	Test 13.....	66
B.14	Test 14.....	67
B.15	Test 15.....	68
B.16	Test 16.....	69
B.17	Příklady distraktorů.....	70

Úvod

Bakalářská práce se zabývá směrovým slyšením a jeho využitím ve VR (Virtual Reality). Jedná se o velmi komplexní jev, který umožňuje lokalizovat polohu zvukového zdroje na základě přijatých zvukových signálů z obou uší a našich zkušenostech. Pro přenesení tohoto jevu do VAS (Virtual Auditory Space) je nutné využití HRTF (Head Related Transfer Function), která nese informace o tom, jak je signál emitovaný zdrojem zvuku upraven, než je reprodukován a následně zpracován lidským uchem. S využitím této funkce je možné dosáhnout efektivní simulace polohy zdroje zvuku právě ve VR systémech, i při využití sluchátek k reprodukci zvuku.

Při určování polohy zdroje zvuku (lokalizaci) může dojít k různým chybám. Tyto chyby dělíme do dvou základních kategorií – lokální chyby a front-back chyby. Těchto chyb se můžeme dopustit např. špatným vyhodnocením meziušních rozdílů, nebo pro front-back chyby zmatením (cone of confusion), kdy dojde ke špatnému vyhodnocení azimutu, protože jsou kvůli anatomii hlavy na obou místech stejné hodnoty meziušních rozdílů. Cílem této práce je vytvoření nové sady testů pro zkoumání zmíněných chyb směrového slyšení ve VAS, a následně provedení subjektivního měření s využitím těchto poslechových testů pro ověření výskytu chyb. Aby bylo možné zachytit více těchto chyb, byla navíc také implementována randomizace zdroje zvuku napříč všemi testy. Cílem vyhodnocení výsledků měření je zjistit, v jaké míře se respondenti chyb dopouštějí, zda je možné tyto chyby minimalizovat, a zda bude možné chyby spojit s rychlostí jejich reakce při jednotlivých testech.

Práce je rozdělena do 5 kapitol. V první kapitole je čtenář stručně seznámen s teorií směrového slyšení, s funkcí HRTF, jejím měřením a následném využití ve VAS. Druhá kapitola obsahuje informace o VR systémech, konkrétně jejich dělení, využití a princip funkce, a dále stručně informuje o tvorbě obsahu pro VR. Třetí kapitola popisuje pracoviště na Katedře radioelektroniky na FEL ČVUT, která byla využita pro realizaci bakalářské práce. Čtvrtá kapitola se zabývá úpravou zdrojového kódu aplikace a jejími modifikacemi. Pátá kapitola je věnována samotné realizaci měření, zpracování a vyhodnocení získaných dat.

1. Teoretický rozbor

1.1 Směrové slyšení

Směrové slyšení nám umožňuje s využitím dvou nezávislých signálů z obou uší a našich zkušeností lokalizovat zdroje zvuku v 3D prostoru. Vjem směrového slyšení je pro každého individuální, jelikož závisí na rozměrech hlavy, velikosti a tvaru ušního boltce a dalších faktorech. Pro simulaci prostorového zvuku ve VR se využívá HRTF (Head Related Transfer Function), která charakterizuje, jakým způsobem přijímá ucho zvuk od zdroje umístěného v prostoru. HRTF je závislá na azimutu, elevaci a vzdálenosti. Proto je nutné zvolit vhodný souřadný systém.

1.1.1 Souřadné systémy

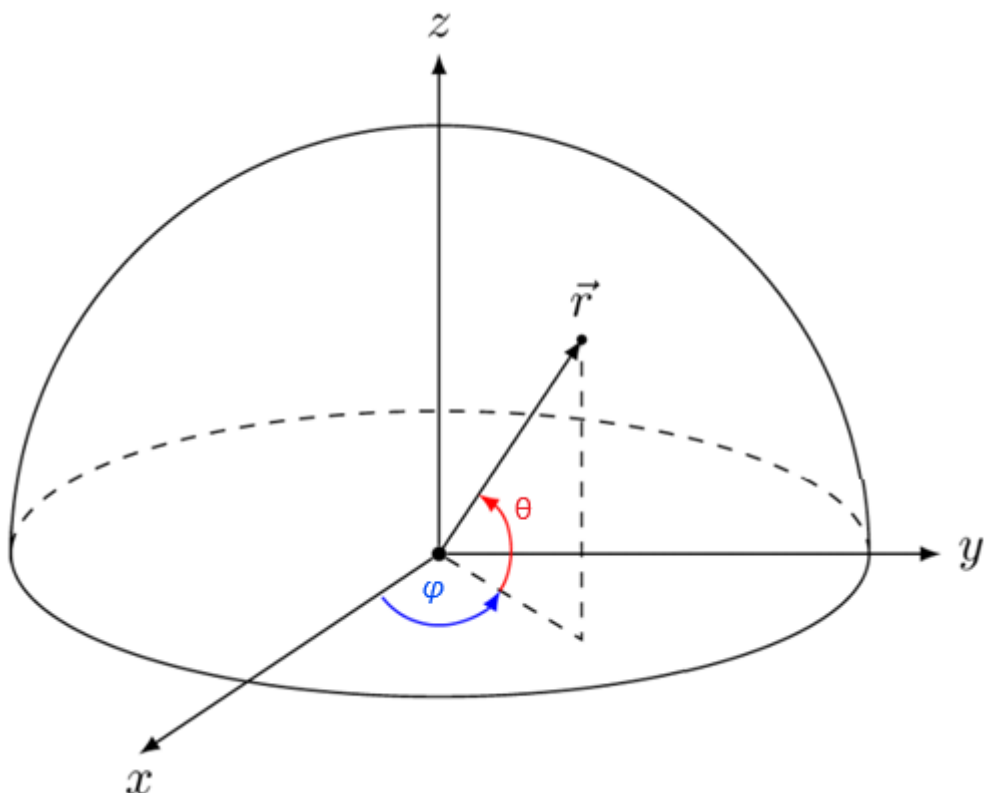
Každý předmět umístěný v prostoru má jednoznačně určenou svoji pozici. Pozice předmětu v prostoru je dána kombinací souřadnic, které se mohou lišit dle použitého souřadného systému. V akustice se běžně setkáváme se dvěma typy souřadných systémů, a to Kartézským souřadným systémem a Sférickým souřadným systémem.

- a) **Kartézský souřadný systém** – pozice předmětu je definována prostřednictvím uspořádané trojice souřadnic (x, y, z) , kde každá ze souřadnic reprezentuje vzdálenost předmětu v dané souřadné ose.

- b) **Sférický souřadný systém** – pozice předmětu je definována prostřednictvím uspořádané trojice souřadnic (φ, θ, r) , kde φ ($\varphi \in [0^\circ; 360^\circ]$) reprezentuje úhel v horizontální rovině, také označovaný jako azimut, θ ($\theta \in [-90^\circ; 90^\circ]$) reprezentuje úhel ve vertikální rovině, označovaný jako elevace a r udává vzdálenost předmětu od počátku souřadného systému [2].

Na obrázku 1 je srovnání obou souřadných systémů. Pro měření povahy lokalizace zdrojů zvuku při prostorovém slyšení se nejčastěji využívá sférický souřadný systém. Posluchače do souřadného systému umístíme tak, že směr jeho pohledu bude souhlasit s azimutem $\varphi = 0^\circ$ (ve směru kladné části osy x) a elevací $\theta = 0^\circ$. Kladný směr úhlu φ je proti směru hodinových ručiček a kladný směr elevace odpovídá směru nad posluchačem. Toto umístění posluchače odpovídá definici standardu SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics) [8].

V některých případech je také možné se setkat při popisu prostorové lokalizace s anatomickým popisem, který využívá tři základní anatomické roviny, mediální rovinu (sagittal plane), frontální rovinu (coronal plane) a transverzální rovinu (transverse plane), jak je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 1: Znázornění Kartézského a Sférického souřadného systému

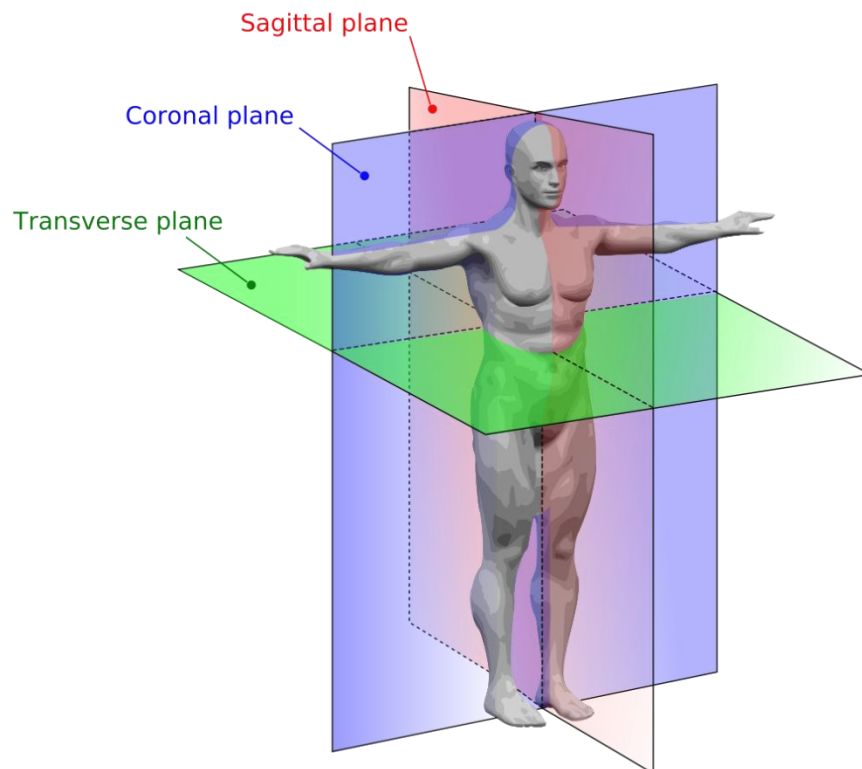
1.1.2 Určování polohy zdroje zvuku

Jak je uvedeno v [1], [2], [3], směrové slyšení je založeno na schopnosti člověka vnímat směr, ze kterého zvuk přichází, s pomocí tzv. meziušních rozdílů (binaural cues) a spektrálních vlastností ucha (monaural nebo také spectral cues). Proces směrového slyšení je velmi komplexní a závisí na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří například anatomie hlavy člověka, její tvar a velikost, tvar ušního boltce a další. Dále je směrové slyšení ovlivněno elevací a azimutem zvukového zdroje, frekvencí dopadajícího zvuku, a v neposlední řadě také osobní zkušeností daného posluchače.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro měření povahy prostorového slyšení se nejčastěji používá sférický souřadný systém. Pro určení polohy zdroje zvuku v horizontální rovině využívá mozek z velké části hlavně dvou základních meziušních rozdílů, ITD a ILD.

- **ITD** (Interaural Time Difference) – pro lokalizaci zdroje se využívá časový, resp. fázový rozdíl dopadu zvuku na každé ucho; pokud je zdroj umístěn blíže jedné straně hlavy, dané ucho přijme zvukový signál o chvíli dříve než druhé ucho. Mozek využívá

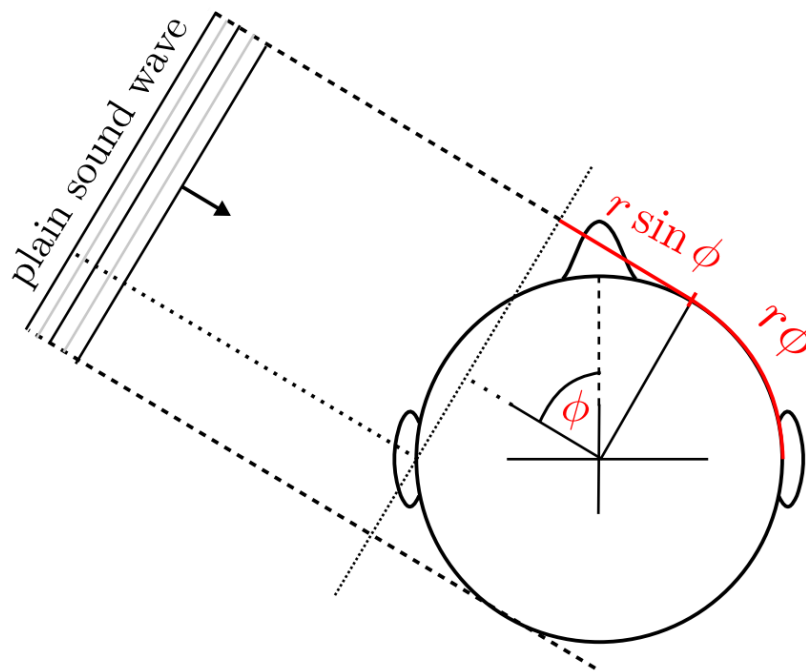
těchto rozdílů pro zjištění azimutu zdroje; lokalizace při nízkých kmitočtech, standardně pro kmitočty pod 1 kHz, lepší detekce fázových a časových rozdílů,



Obrázek 2: Anatomické roviny rozdělující lidské tělo (převzato z [4])

- **ILD** (Interaural Level Difference) – pro lokalizaci zdroje se využívá rozdílů úrovně intenzity zvuku dopadajícího na obě uši. Pokud je zdroj umístěn blíže jednomu uchu, toto ucho obdrží signál hlasitější než ucho druhé; mozek využívá těchto rozdílů pro určení elevace zdroje; lokalizace při středních a vysokých kmitočtech, standardně pro kmitočty nad 2,5 kHz, na vyšších kmitočtech je kratší vlnová délka zvukové vlny a hlava se v tomto případě chová jako překážka.

Na obrázku číslo 3 je znázorněn dopad zvukové vlny na model hlavy, ze kterého je patrné, že vlna vychýlená od mediální roviny dopadá na jedno ucho dříve než na druhé.

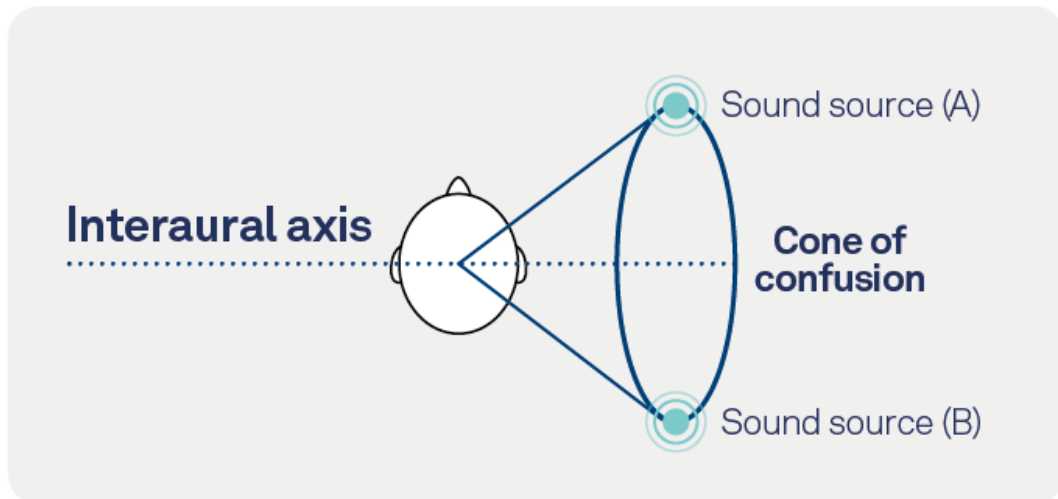


Obrázek 3: Dopad zvukové vlny na model hlavy (převzato z [2])

1.1.3 Chyby při určování polohy zdroje zvuku

Při určování polohy zdroje zvuku v prostoru může docházet k různým nepřesnostem. Tyto chyby lokalizace můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- **Lokální chyby** – poloha zdroje zvuku, která byla určena se mírně liší oproti poloze skutečného zdroje; lokální chyby se pohybují v rozmezí 6° - 7° , jak je uvedeno v [2]. Tyto chyby jsou nejčastěji způsobeny špatným vyhodnocením meziušních rozdílů.
- **Front-back chyby** – jedná se o chyby lokalizace zdroje zvuku, u kterých byl špatně určen azimut, např. místo azimutu $\varphi = 60^\circ$ je určený azimut $\varphi = 140^\circ$, což odpovídá úhlovému rozdílu 60° až 180° ; na těchto místech jsou kvůli anatomii hlavy shodné hodnoty ITD, resp. ILD, tedy obou meziušních rozdílů; vnímaný zdroj se poté nachází v jiném kvadrantu, než ten skutečný – tento jev se nazývá kužel zmatení (tzv. cone of confusion, viz obrázek 4). Možným řešením těchto chyb je např. natočení hlavy.



Obrázek 4: Znáznornění Cone of confusion (převzato z [6])

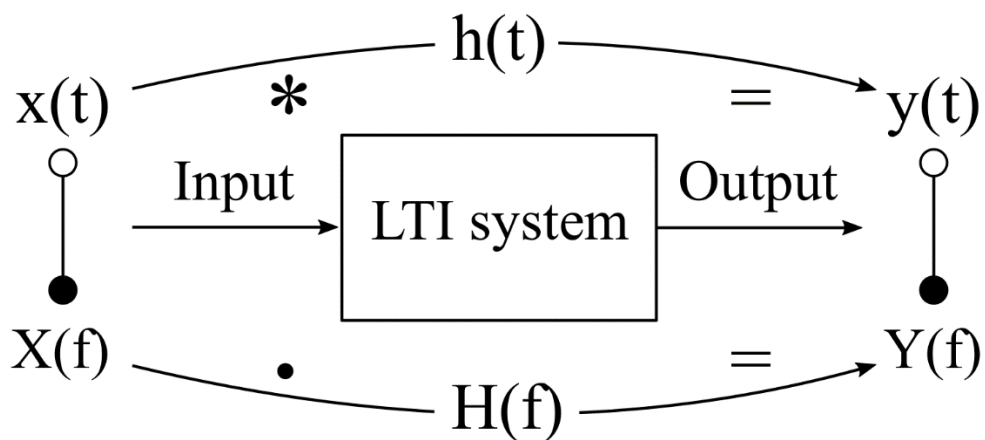
Dalším přístupem pro porozumění prostorové lokalizace zdroje zvuku je průzkum rozlišení sluchového vnímání. Při těchto testech musí testované subjekty určit změnu v poloze jednoho zdroje. Pro popis tohoto jevu se využívá minimální úhlová rozlišitelnost (Minimum Audible Angle nebli MAA), která udává nejmenší rozlišitelný úhel v transversální rovině (azimut) mezi dvěma zdroji, který lze jednoznačně detekovat. Pro potřeby VAS je nutné brát v potaz rozlišení převodní charakteristiky hlavy. Nejnižší MAA je dle [2] 1° - 2° pro širokopásmové zvuky pro azimut $\varphi = 0^{\circ}$. Lokalizace zdroje zvuku je mnohem přesnější v případě, že se jedná o širokopásmový zvuk (například bílý šum). Při úzkopásmovém buzení, jako je například jeden konkrétní tón, dochází k nižší přesnosti lokalizace a MAA je tedy vyšší. Hodnota MAA se také výrazně zvyšuje pro zdroje, které nejsou umístěny přímo před posluchačem, tedy mimo střed mediální roviny, kde k lokalizaci dopomáhají i vizuální podněty. Z toho důvodu dochází k nižší přesnosti určení polohy zdrojů zvuku, které jsou umístěny za testovaným subjektem.

1.2 HRTF

HRTF (Head Related Transfer Function) je funkce popisující přenos zvuku mezi bodovým zdrojem zvuku ve volném poli a uchem (levým i pravým) posluchače pro jednotlivé azimuty φ , elevace θ a vzdálenosti r . HRTF je individuální pro každého posluchače z důvodu rozdílné anatomie, především kvůli velikosti hlavy, tvaru ucha a ušního boltce a délce a průměru zvukovodu.

Na obrázku 5 je znázorněn základní princip zpracování signálu prostřednictvím lineárního časově invariantního (Linear Time Invariant neboli LTI) systému, jak ve frekvenční, tak i v časové oblasti. Na obrázku jsou vyznačeny veličiny $x(t)$ a $X(f)$ reprezentující budící signál a jeho spektrum, impulzní odezva HRIR $h(t)$ a HRTF $H(f)$, a detekovaný signál $y(t)$ a jeho spektrum $Y(f)$. Převod signálu z časové oblasti do frekvenční je umožněn s využitím Fourierovy transformace. Jak je uvedeno v [7], HRTF $H(f)$ lze matematicky vyjádřit jako podíl mezi spektrem detekovaného signálu $Y(f)$ a spektrem budícího signálu $X(f)$ ve frekvenční oblasti, tedy jako

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}. \quad (1)$$



Obrázek 5: Základní princip zpracování signálu prostřednictvím LTI systému v časové a frekvenční oblasti (převzato z [7])

Tato přenosová funkce je jedním z nejdůležitějších aspektů pro vytvoření věrohodného virtuálního zvukového pole ve VR systémech reprodukováném prostřednictvím sluchátek či reproduktorů.

1.2.1 Měření HRTF

K získání individualizované HRTF daného jedince je nutné její experimentální změření nebo její vymodelování pomocí matematických algoritmů. Dle [7] se HRTF nejčastěji měří s využitím HRIR (Head Related Impulse Response), která popisuje odezvu obou uší na impulzní buzení. Po změření HRIR $h(t)$, tedy impulzní odezvy v časové oblasti, získáme korespondující HRTF $H(f)$ aplikací FFT (Fast Fourier Transformation), tedy jako

$$H(f) = FFT\{h(t)\}. \quad (2)$$

Měření HRTF se typicky provádí v bezdozvukové komoře, která simuluje volné pole. V případě, že měření probíhá ve standardní místnosti, ve výsledném měření se pak projevují také odrazy v místnosti. Samotné měření je ve své podstatě velmi jednoduché a probíhá následovně:

1. Posluchač je vybaven párem měřicích mikrofónů, které si umístí do uší.
2. Do předem určené polohy před posluchače je umístěn zdroj zvuku (reproduktor), který slouží k reprodukci generovaného zvuku. Vzdálenost zdroje zůstává po celou dobu měření stejná, mění se pouze azimut φ a elevace θ .
3. Následuje vygenerování budícího signálu prostřednictvím počítače a jeho zaznamenání měřicími mikrofony v uších posluchače.
4. Měření opakujeme pro všechny námi zvolené azimuty φ a elevace θ .

Jak je uvedeno v [7], pro měření HRTF, respektive impulzní odezvy HRIR, se v praxi využívá několika různých metod. Mezi nejpoužívanější metody patří měření s pseudonáhodnými posloupnostmi, kam se řadí MLS a IRS, a dále Sweep signály, které se často využívají při akustických měřeních.

- **Sine sweep** – zdroje jsou buzeny harmonickým signálem, jehož frekvence se spojitě mění v čase; jedná se o signál s konstantní amplitudou a plynulými přechody mezi jednotlivými frekvencemi, proto je výsledná impulzní odezva poté získána s použitím inverzního filtru na výstupní signál,
- **MLS (Maximum Length Sequence)** – zdroje jsou buzeny binární pseudonáhodnou posloupností generovanou prostřednictvím lineárního posuvného registru; impulzní odezva je díky výhodným vlastnostem spočtena jako vzájemná korelace zaznamenaného signálu a budícího signálu.

Samotné měření může být velmi časově náročné v závislosti na hustotě měřicích bodů. Z tohoto důvodu se pro získání individualizované HRTF využívá jejího modelování. Modelování

je založeno na využití naměřených HRTF pro umělé hlavy, ze kterých se za použití poskytnutých informací o rozměrech hlavy, tvaru ucha a ušního boltce a dalších antropometrických dat prostřednictvím matematických algoritmů „modelují“ individualizované HRTF. S vymodelovanou HRTF je poté posluchač schopen dosáhnout při testování lokalizace srovnatelných výsledků, jako s HRTF naměřenou.

1.2.2 SOFA standard

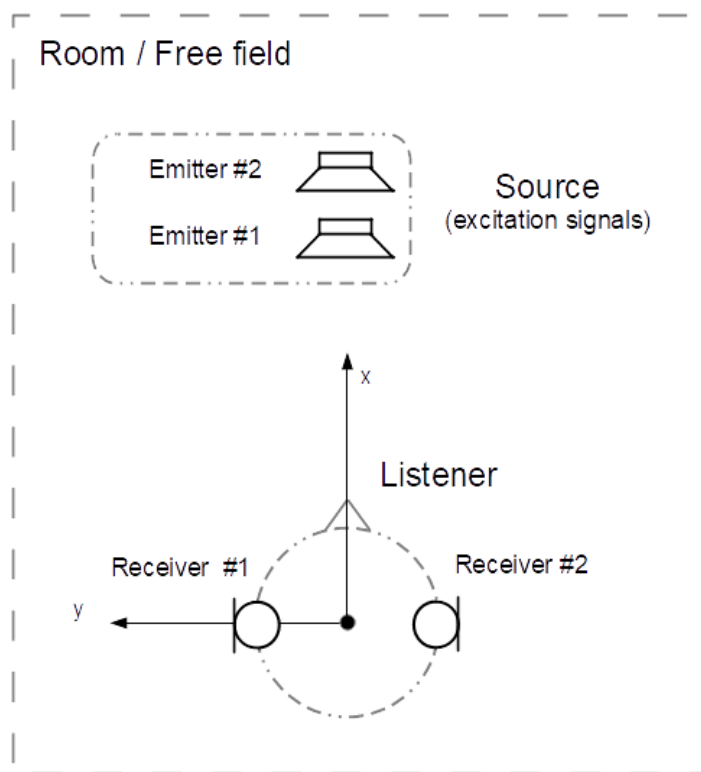
SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics) standard je formát pro ukládání prostorově orientovaných akustických dat, jako je například HRTF, nebo BRIR (Binaural Room Impulse Response). Jak je uvedeno v [8], formát SOFA byl standardizován uskupením AES (Audio Engineering Society), první verze vznikla v roce 2015 a je popsána ve standardu AES69-2015. Poslední změny formátu z roku 2022 jsou popsány ve standardu AES69-2022.

Konkrétně se standard zabývá:

- popisem měření s využitím obecné geometrie,
- jednoznačností definice dat v souboru, všechny požadované informace o měření musí být obsaženy ve formě metadat
- flexibilitou popisu dat, více posluchačů a zdrojů v jednom souboru, popisem vzdáleností,
- kompresí dat pro efektivní ukládání a přenos souboru.

SOFA dále definuje několik objektů (viz obrázek 6), které jsou důležité pro ukládání a práci s naměřenými daty. Konkrétně se jedná o

- a) Zdroj (source) – objekt slučující přítomné emitory
- b) Vysílač (emitter) – zdroj budícího akustického signálu (nejčastěji využíván reproduktor), počet emitorů není v SOFA nijak omezen
- c) Posluchač (listener) – objekt slučující přítomné přijímače
- d) Přijímač (reciever) – akustický senzor sloužící k zachycení dopadajících zvukových vln (nejčastěji mikrofon), počet přijímačů není v SOFA nijak omezen
- e) Místnost (room / free field) – popisuje parametry místnosti (popř. volného pole), kde měření probíhá



Obrázek 6: Popis objektů měřicího aparátu definovaných v SOFA (převzato z [9])

1.2.3 VAS (Virtual Auditory Space)

VAS (Virtual Auditory Space) je algoritmus, který simuluje virtuálně vytvořený zvuk, tak jak bychom ho slyšeli, kdybychom na daném místě ve virtuálním prostředí stáli. VAS zprostředkovává informace o pozicích zdrojů zvuku a prostřednictvím naměřené HRTF dodává pocit prostorovosti zvuku, tak jak ho vnímáme ve skutečném světě. Jedná se o konvoluci signálu od zdroje a HRTF pro příslušný azimut a elevaci. Tento algoritmus se využívá v několika odvětvích:

- Virtuální realita (VR),
- Audio produkce – zde se VAS využívá pro simulaci různých akustických prostorů, jako je např. koncertní sál, zvukové studio atd., a následně se charakteristiky prostoru aplikují na nahranou audio stopu,
- Videoherní průmysl,
- Realistické simulace.

Pro implementaci VAS v aplikaci pro testování lokalizace zdroje zvuku, která byla modifikována a využita při realizaci méj bakalářské práce, se využívá pluginu Steam Audio, který s prostřednictvím konvoluce naměřené HRTF uložené ve formátu SOFA s budícím signálem

vytváří prostorový vjem. Plugin dále umožňuje interpolaci dodané HRTF. Interpolace je nutná z důvodu, že se ne všechna měření provádějí pro veškeré azimuty φ a elevace θ . Steam Audio umožňuje 2 typy interpolace, a to nearest a bilinear.

- **Nearest** – při použití interpolace typu nearest se pro reprodukci zvuku využívá nejbližší známá hodnota HRTF; tato metoda interpolace může způsobit velké úhlové chyby při lokalizaci zdroje, pokud bylo při měření HRTF využito malé množství měřicích bodů.
- **Bilinear** – při použití interpolace typu bilinear se pro reprodukci zvuku pro daný azimut a elevaci využívá vážený průměr nejbližších známých hodnot HRTF.

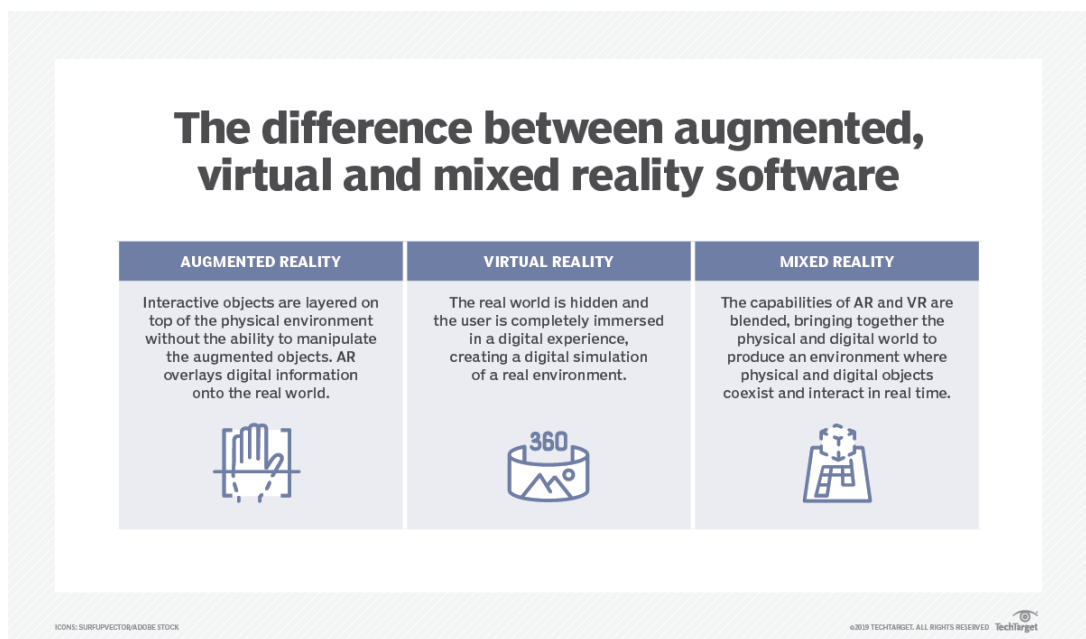
2. Virtuální realita

Pojmem Virtuální realita (VR) je myšlena počítačová simulace 3D prostředí vnímaná uživatelem jako prostředí reálné. Vizualizace může simulovat jak svět skutečný, tak i svět fiktivní. Většina současných simulací poskytuje především audiovizuální zážitky zobrazující se buď na monitoru počítače nebo přes stereoskopické zobrazení. V dnešní době umožňují některé simulace také další vjemy, jako např. čichové, chuťové nebo také hmatové.

První zmínka o VR pochází z 50. let 20. století jako koncept „Experience Theatre“. [10] Na základě tohoto konceptu vytvořil Morton Heilig v roce 1962 prototyp nazvaný Sensorama.

Do povědomí širšího publika se virtuální realita dostala v 90. letech 20. století a počátkem 21. století, kdy už byly VR headsety dostupné i pro běžné uživatele. [10]

S pojmem VR se dále pojí 2 další pojmy, Augmented Reality (AR / Rozšířená realita) a Mixed Reality (MR / Smíšená realita). Jejich porovnání a hlavní rozdíly lze vidět na obrázku 7. Rozšířená realita nám umožňuje promítnutí virtuálních objektů do reálného světa. Zatímco smíšená realita spojuje fyzický a virtuální svět do jednoho prostoru, detailněji rozvedeno v [11].



Obrázek 7: Srovnání AR, VR a Mixed reality (převzato z [11])

2.1 Typy VR

Různé VR systémy se mohou jeden od druhého výrazně lišit v závislosti na jejich využití a použité technologii. Obecně se VR systémy rozdělují do 3 různých kategorií [12]:

- a) Non-immersive
- b) Semi-immersive
- c) Fully immersive

2.1.1 Non-immersive VR systémy

Non-immersive virtuální systémy jsou typem virtuální reality, kde může uživatel interagovat s virtuálním prostředím obvykle prostřednictvím počítače nebo laptopu, kde v rámci určitého softwaru provádí akce nebo kontroluje charakter. Prostředí ale s uživatelem přímo neinteraguje.

V zásadě je tedy možné říct, že všechny formy herních zařízení, mezi které patří např. herní konzole (Sony PlayStation, Microsoft Xbox), stolní počítače a další, mohou poskytnout uživateli Non-immersive virtuální realitu.

2.1.2 Semi-immersive VR systémy

Semi-immersive virtuální systémy jsou kombinací Non-immersive a Fully-immersive virtuální reality. Uživatel se může prostřednictvím monitoru nebo VR headsetu, či s využitím mobilního telefonu volně pohybovat 3D virtuálním prostředím. Jedná se však jen o vizuální vjemy. Jedním z příkladů Semi-immersive virtuální reality může být virtuální prohlídka.

2.1.3 Fully-immersive VR systémy

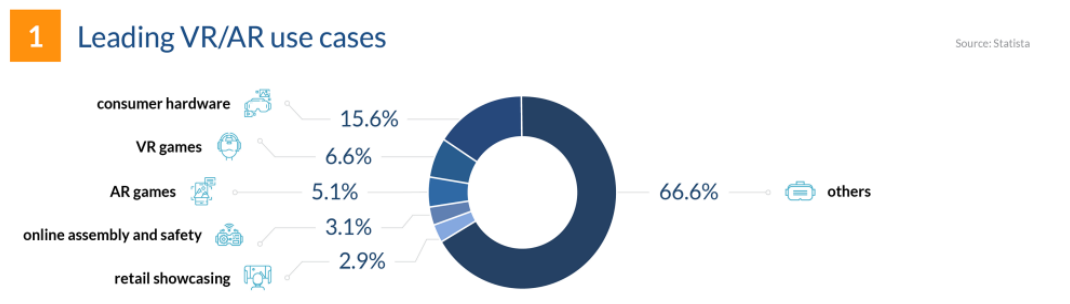
Fully-immersive virtuální systémy jsou typem virtuální reality, která zajišťuje realistický zážitek z virtuálního světa. Tento typ VR využívá kromě headsetu speciální vybavení, jako jsou např. helmy, haptické vesty, rukavice a detektory smyslů.

2.2 Oblasti využití VR

Díky rychlému vývoji výpočetních technologií, jako jsou displeje s vysokým rozlišením a zorným polem, senzory pro snímání pohybu a v neposlední řadě také výkonnost počítačů, se VR systémy stávají dostupnějšími a nacházejí uplatnění v mnoha oblastech, jako je např.:

- a) **Zábavní průmysl** – Momentálně nejrozšířenější průmysl z pohledu využitelnosti VR. Konkrétně do této kategorie spadá videoherní průmysl, kinematografie, live streaming a virtuální prohlídky [10].
- b) **Lékařství** – VR systémy je možné využít i v lékařství. Za pomoci VR probíhá např. léčba ztráty paměti. Chirurgové mohou využít 3D modely pro plánování operací.
- c) **Vzdělávání** – Při výuce jsme schopni simulovat situace, které jsou v reálném světě těžko proveditelné či nereálné. Mezi další využití patří školení zaměstnanců ve firmách nebo simulace krizových situací.
- d) **Marketing, VR meetingy** a další

Přehled využití VR systémů v různých odvětvích shrnuje obrázek 8.



Obrázek 8: Přehled využití VR (převzato z [13])

2.3 Head mounted display (HMD)

K reprodukci většiny obsahu pro VR se v dnešní době využívají brýle pro virtuální realitu, tedy VR headsety. HMD se připevňují na hlavu uživatele a reprodukuje obraz na displej, který má uživatel umístěn velmi blízko očí [14].

Headsety je možné rozdělit do tří variant:

- a) **Standalone HMD** – Jedná se o headsety obsahující všechny nutné komponenty pro zpracování a reprodukci v jediném zařízení.
- b) **PC-based HMD** – HMD musí být přímo připojeno k PC, které je zodpovědné za zpracování obsahu a odesílá ho do vlastního HMD, které se stará pouze o jeho reprodukci.
- c) **Mobile HMD** – HMD vytvořené pomocí výkonného mobilního telefonu jeho zasazením do brýlí. Příkladem může být mobile HMD od Google viz obrázek 9.



Obrázek 9: Příklad mobilního HMD od Google

Pro rok 2025 se předvídá, že nejvíce zastoupené budou standalone HMD, dále mobile HMD a nejméně zastoupené PC-based HMD, viz obrázek 10. Jedním z důvodů vysokého nárustu standalone HMD může být fakt, že k provozu PC-based HMD je nutné vlastnit výkonný počítač, který pro provoz standalone HMD není potřebný. Dalším z důvodů může být jeho přenositelnost.

2 Breakdown of 41 million VR home mounted displays (HMDs) by 2025 Source: Tractica



Obrázek 10: Zastoupení VR headsetů pro rok 2025 (převzato z [13])

Aby bylo možné rozpoznat polohu hlavy a přenést ji na jiná data, potřebuje HMD technologii pro sledování pohybu hlavy. U všech VR systémů je základním prvkem pro sledování pohybu headsetu a ovladačů akcelerometr. Tyto akcelerometry běžně fungují na frekvenci 1 kHz [15].

Akcelerometry slouží k měření zrychlení. Integrací zrychlení v čase získáme rychlost a další integrací rychlosti v čase dále polohu. Tato dvojitá integrace ale zvyšuje chybu výpočtu, která se v čase výrazně hromadí, tudíž sledování polohy pouze pomocí akcelerometru není možné. Z tohoto důvodu vzniklo několik systémů sledování polohy HMD, které slouží ke korekci této chyby.

2.3.1 Constellation systém

Jedná se o původní systém pro Oculus Rift. Každé sledované zařízení má předdefinované „suhvězdi“ infračervených LED skryté pod vnějším plastovým krytem. Senzory umístěné v místnosti, které detekují pouze infračervené záření, posílají do počítače snímky s frekvencí 60 Hz. Počítač následně zpracovává každý snímek a identifikuje polohu každé LED a tím i relativní polohu zařízení.

Software je schopen snadno rozpoznat které LED jsou na snímcích vidět díky předdefinovaným „suhvězdím“, pamatuje si polohy z předchozího snímku, a zná směr zrychlení z akcelerometru a rotaci z gyroskopu [15].

2.3.2 PlayStation VR systém

Systém pro sledování od společnosti Sony pro headset PlayStation VR také využívá kamery, jejichž sledování ale funguje ve viditelném světelném spektru [15]. Panel obsahuje dvě od sebe

vzdálené kamery a je připojen k herní konzoli, která využívá data z kamer ke sledování modrých pruhů na headsetu.

2.3.3 SteamVR Lighthouse

Na rozdíl od ostatních systémů nevyužívá SteamVR Lighthouse žádné kamery a počítač nezpracovává žádná data [15]. Systém je navržen tak, aby nebylo nutné připojovat senzory umístěné v místnosti zpět k počítači.

Base station (bázové stanice) jsou umístěny v protilehlých rozích místnosti. Vyzářují širokouhlé dvojrozměrné infračervené paprsky napříč celou místností. To je prováděno opakovaně vždy po jedné ose, tedy nejprve zleva doprava a poté shora dolů. Před každým pohybem vyzářují záblesk infračerveného záření.

Každé zařízení obsahuje pole infračervených fotodiod připojených na čip, který měří čas mezi zábleskem a zasažením pro každou osu. Z těchto dat je čip schopen určit svou polohu v místnosti.

2.3.4 SLAM/Inside-Out systém

Standalone HMD využívají kamery zabudované přímo do samotných headsetů, které provádějí sledování Inside-Out („zevnitř ven“) pomocí počítačových algoritmů. Specifický typ tohoto algoritmu se nazývá Simultaneous Location and Mapping, tedy SLAM [15].

SLAM algoritmy fungují tak, že detekují jedinečné statické prvky v místnosti. Porovnáním zrychlení a rotace z akcelerometru a gyroskopu s tím, jak se jedinečné prvky zdánlivě pohybují, lze určit polohu headsetu.

Pro sledování ovladačů se v tomto případě používají systémy fungující na podobném principu jako Constellation s viditelným nebo infračerveným zářením. LED umístěné pod plastovým krytem na ovladačích jsou poté sledovány kamerami z headsetu.

Dalším z pomocných senzorů může být senzor pro sledování očních pohybů („Eye tracking“). Běžně se jedná o infračervený detektor, který sleduje, kam přesně se uživatel dívá a dokáže data exportovat. Tato technologie by mohla potenciálně umožňovat např. dynamické změny hloubky ostrosti obrazu. Dále se dají data ze senzoru využít pro studování chování testovaných subjektů ve virtuálním prostředí.

2.3.5 Výrobci HMD

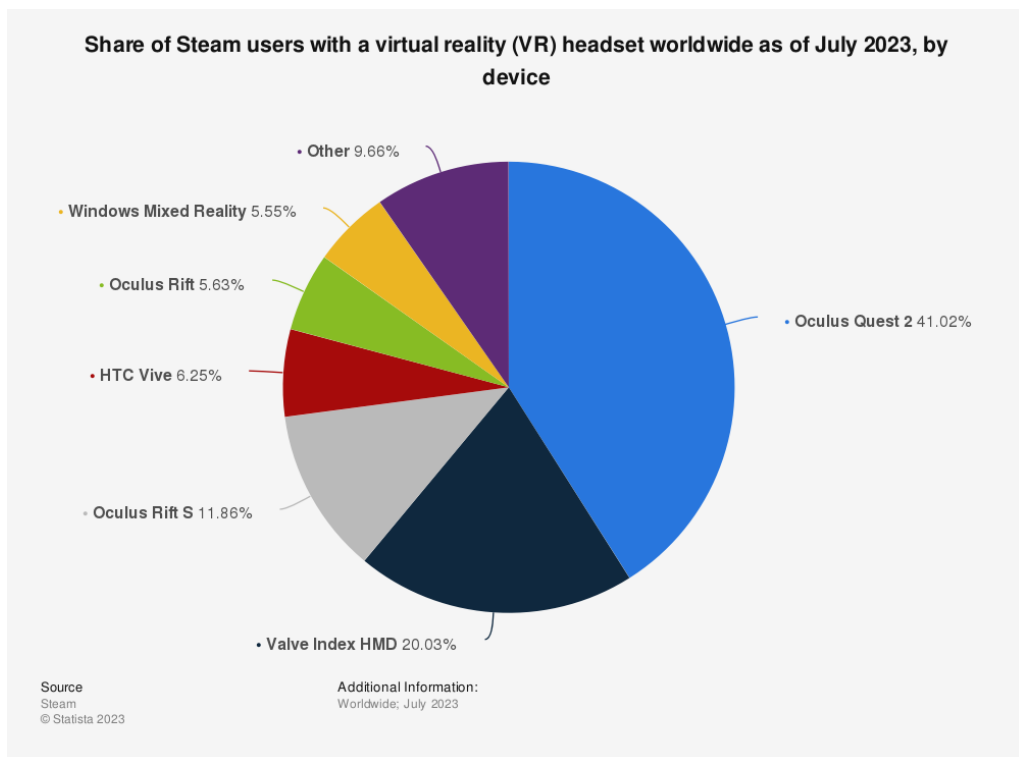
V současné době je na trhu s VR headsety mnoho společností. Mezi nejvýznamnější výrobce HMD patří:

- a) **Meta** – společnost se zaměřuje především na výrobu standalone HMD, které nachází využití hlavně ve videoherním průmyslu; jedná se především o levnější varianty HMD, mezi které patří Oculus Quest 2 (viz obrázek 11),
- b) **HTC** – společnost zaměřující se hlavně na výrobu PC-based HMD, často včetně senzorů pohybu očí. HMD nachází využití jak ve videoherním průmyslu, tak i ve zdravotnictví; mezi nejpoužívanější model patří HTC Vive Pro 2,
- c) **Valve** – společnost cílicí na videoherní průmysl. Vyrábí PC-based VR headsety Valve Index,
- d) **Sony** – výroba headsetů Playstation VR pro konzole Playstation určené primárně pro videoherní průmysl.

Mezi další výrobce HMD se dále řadí společnosti Microsoft, Google, nově i Apple, a další. Na obrázku 12 je přehled VR headsetů používaných uživateli platformy Steam ze srpna 2022.



Obrázek 11: VR headset Oculus Quest (převzato z [10])



Obrázek 12: Přehled VR headsetů používaných uživateli platformy Steam v roce 2022 (převzato z [16])

2.4 Tvorba obsahu pro VR

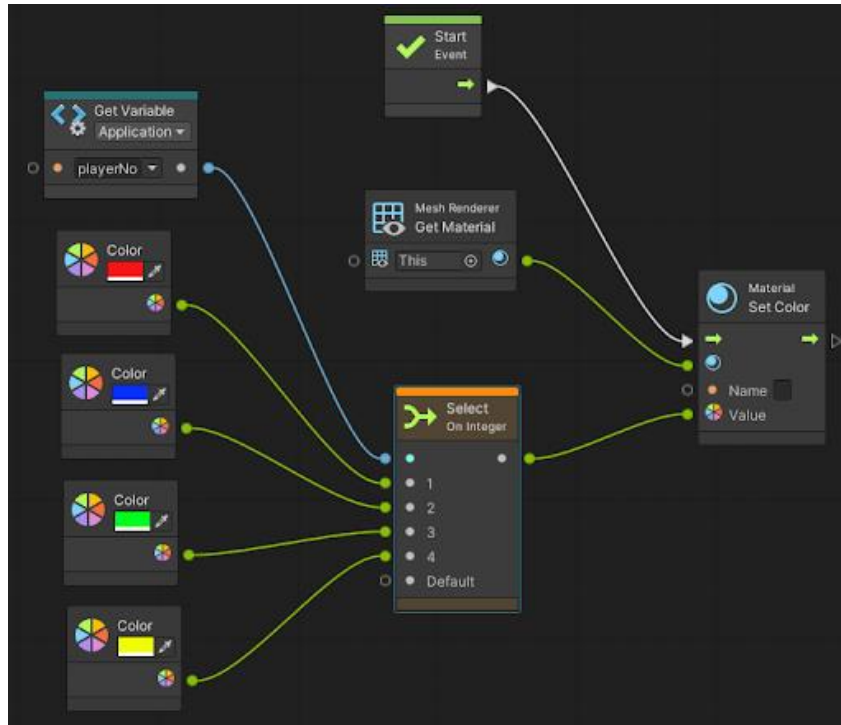
V současné době jsou předními RT3D (Real-Time 3D) enginy pro videohry, kinematografii, průmyslové simulace, XR a další vývoj aplikací Unity engine a Unreal Engine [17]. Unity engine má velkou převahu v produkci na poli XR (Extended reality), zatímco Unreal Engine ve většině převažuje na ostatních platformách.

Oba dva tyto enginy podporují jak Text-base scripting, tak i Visual scripting, který je vhodný pro developery, kteří se nechtějí učit programovací jazyky (viz obrázek 13 resp. obrázek 14). Visual scripting umožňuje vytvářet logiku aplikace pomocí „grafů“ namísto psaní celého kódu. Hlavním rozdílem využívaných enginů je použitý programovací jazyk, ve kterém je kód psán. Další rozdíly jako je rendering, VFX, animace atd. zmiňuje článek [17].

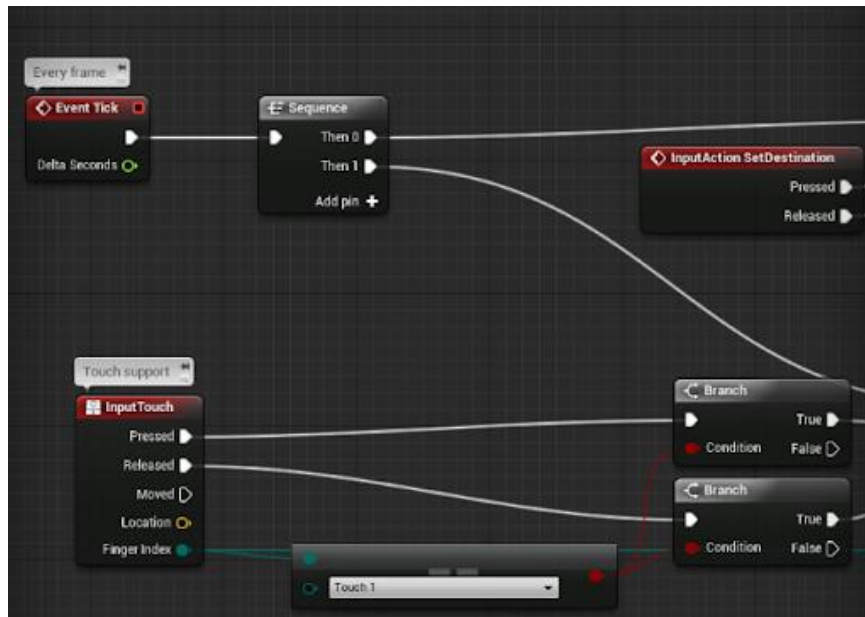
Unity engine využívá pro tvorbu kódu programovacího jazyka C#, který je v mnoha ohledech jednodušší a disponuje rychlejším procesem učení. Unreal Engine využívá programovacího jazyka C++.

Balíček Visual scripting v Unity (dříve Bolt) je node based (založen na uzlech) a umožňuje implementaci chování herních objektů přímo v editoru a je téměř plně kompatibilní s C# skripty. Logika aplikace se vytváří propojením vizuálních uzlů mezi sebou.

V Unreal Engine je Visual scripting primární cestou pro vytvoření logiky aplikace. Jedná se o node based (založený na uzlech) systém, který využívá blueprintů k jednoduššímu skriptování. Není ale přímo kompatibilní s C++ kódem, tudíž je navíc potřebná i znalost C++ knihoven, které rozšiřují zmíněné blueprints.

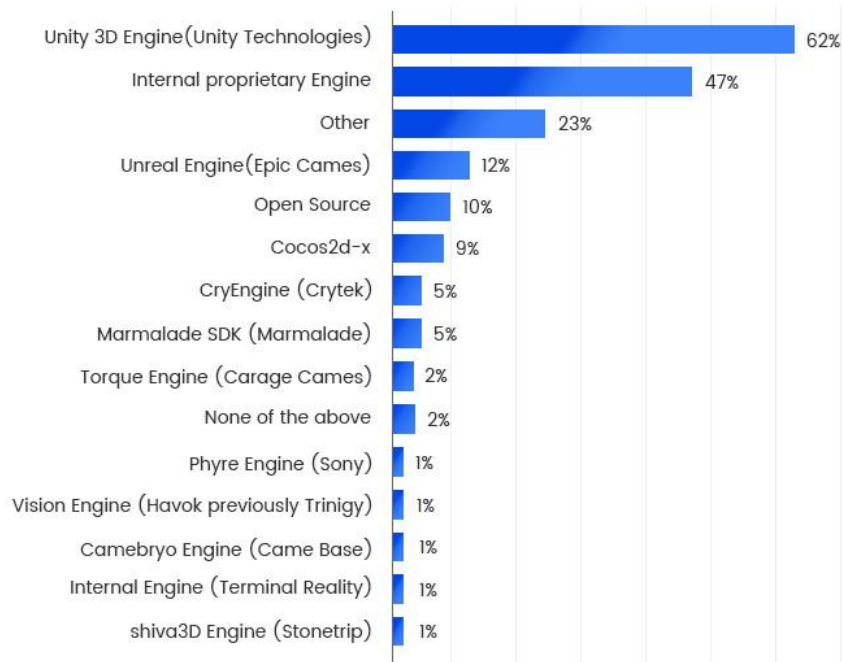


Obrázek 13: Unity engine visual scripting (převzato z [17])



Obrázek 14: Unreal Engine visual scripting (převzato z [17])

Oba tyto enginy dále disponují tzv. Asset storem, který nabízí pro zakoupení již vytvořené modely, pluginy a rozšíření. Další možností, jak získat nové assety pro vytvářenou aplikaci, je vytvoření vlastních modelů a jejich následné importování přímo do projektu.



statista

Obrázek 15: Přehled enginů preferovaných vývojáři (převzato z [17])

Dle grafu na obrázku 15 nejvíce vývojářů obsahu preferuje Unity engine, zatímco Unreal Engine se umístil až na 4. místě.

3. Struktura pracoviště a použitá zařízení

Pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve virtuální realitě se nachází na Katedře radioelektroniky v místnosti 542. V laboratoři je nainstalovaný PC-based HMD HTC Vive Pro Eye umožňující sledování pohybu očí (eye tracking). Dále je v laboratoři umístěn výkonný počítač nutný pro provoz HMD.

3.1 HTC Vive Pro Eye

HTC Vive Pro Eye je PC-based HMD. Pro jeho provoz je tedy nutné připojení k výkonnému počítači (minimální požadavky na hardware viz Tabulka 1), který se stará o zpracování dat a posílá je do HMD. Headset využívá pro sledování pohybu systém SteamVR Lighthouse (podrobněji popsany v kapitole 2.3.3) a dále disponuje senzory pro sledování očních pohybů. Základní parametry daného HMD shrnuje Tabulka 2.

Tabulka 1: Minimální systémové požadavky pro HTC Vive Pro Eye (převzato z [18])

PARAMETR	HODNOTA PARAMETRU
PROCESOR	Intel Core i5-4590 or AMD FX 8350
GRAFICKÁ KARTA	NVIDIA GeForce GTX 970 or AMD Radeon R9 290
PAMĚŤ	4 GB RAM
VIDEO PORTY	DisplayPort 1.2
USB PORTY	1x USB 3.0
OPERAČNÍ SYSTÉM	Windows 7

Tabulka 2: Přehled základních parametrů HMD HTC Vive Pro Eye (převzato z [18])

PARAMETR	HODNOTA PARAMETRU
TYP DISPLEJE	Dual OLED 3.5 inch diagonal
ROZLIŠENÍ DISPLEJE	1440 × 1600 pixelů na oko (2880 × 1600 pro oba displeje)
OBNOVOVACÍ FREKVENCE	90 Hz
ZORNÉ POLE (FOV)	110 °
AUDIO	Zabudovaná sluchátka (odnímatelná) Možnost připojení externích sluchátek
AUDIO INPUT	Integrovaný mikrofon
KONEKTIVITA	USB-C 3.0, DisplayPort 1.2, Bluetooth
SENZORY	SteamVR Tracking, gyroskop, proximity, eye tracking

Pro správnou funkci HMD je nutné její propojení s PC, které je zajištěno pomocí tzv. Link boxu. Dále je také nutné nastavení herní plochy a správného snímání polohy HMD a ovladačů pomocí Base station.

3.1.1 Headset

Headset HTC Vive Pro Eye (viz obrázek 16) obsahuje samotné HMD, popruh pro připevnění na hlavu, senzory pro sledování pohybu a odnímatelná sluchátka. Na spodní straně nalezneme také integrovaný mikrofon. Pro připojení k Link boxu slouží kabel umístěný na zadní straně headsetu. Uvnitř headsetu jsou dále zabudované senzory pro sledování očního pohybu (eye tracking) a proximity senzory.

HMD disponuje duálním 3,5 palcovým OLED displejem s rozlišením 2880 pixelů × 1600 pixelů (1440 px × 1600 px na jeden displej) s obnovovací frekvencí 90 Hz. Audio obstarávají zabudovaná (odnímatelná) sluchátka. Druhou možností je zapojení vlastních externích sluchátek přímo do headsetu prostřednictvím USB-C portu. Pro případnou komunikaci slouží mikrofon integrovaný v headsetu.

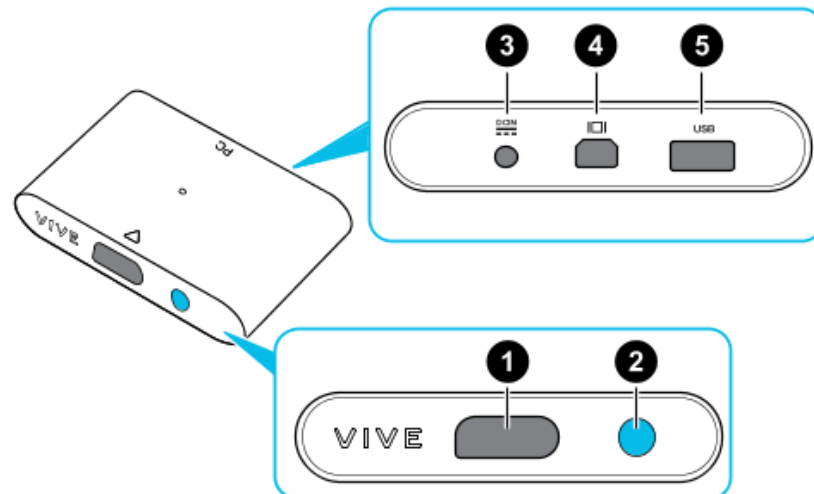
Pro sledování pohybu headsetu v prostoru slouží zabudované senzory a bázové stanice, které jsou popsány v kapitole 3.1.3.



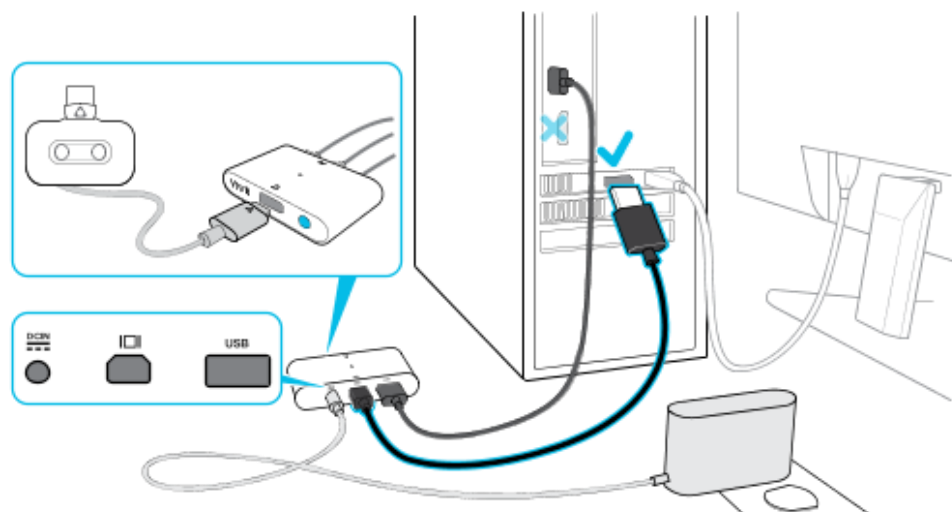
Obrázek 16: Headset HTC Vive Pro Eye

3.1.2 Link box

Link box slouží k propojení HMD s počítačem, přehled portů, kterými link box disponuje je na obrázku 17. Pro připojení HMD slouží port pro kabel na přední straně link boxu, kde se nachází také vypínací tlačítko. Zadní strana link boxu poté obsahuje porty pro připojení k PC a port pro napájení samotného link boxu. Pro připojení do PC se využívá DisplayPort a USB 3.0. Konkrétní schéma zapojení obsahuje obrázek 18.



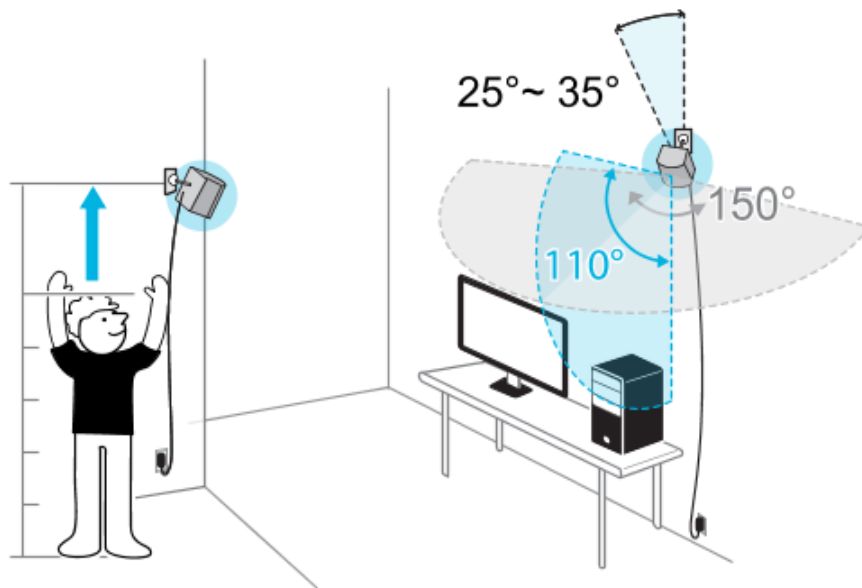
Obrázek 17: Přehled portů HTC Vive Link box (převzato z [18])



Obrázek 18: Schéma zapojení HTC Vive Link box (převzato z [18])

3.1.3 Base station

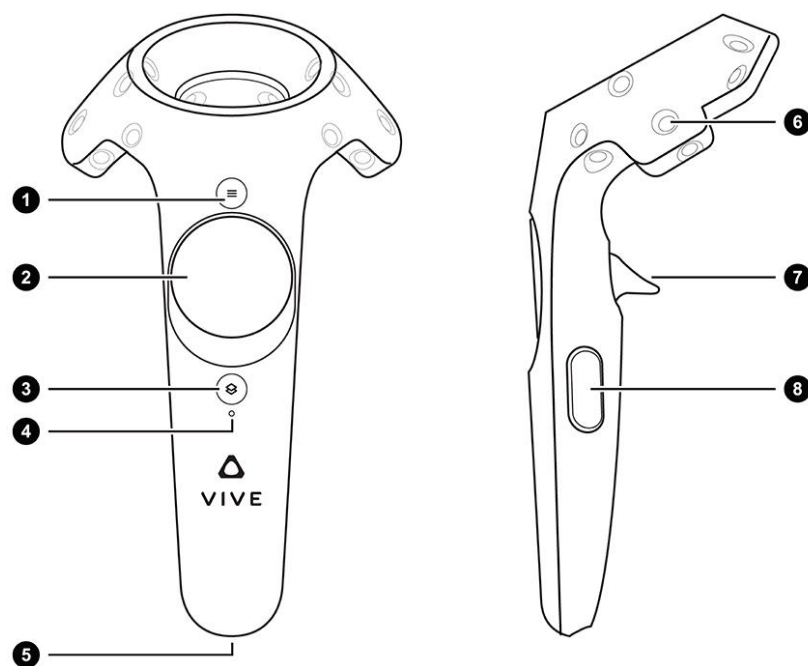
Base station slouží jako senzor pro sledování pohybu HMD a ovladačů v herní ploše. Pro dané HMD se využívají stanice SteamVR Base Station 2.0, které využívají systém sledování pohybu SteamVR Lighthouse. Stanice tedy není potřeba připojovat zpět do PC, stačí připojit pouze napájení (jednoduché schéma zapojení viz obrázek 19). Pro potřeby laboratoře na Katedře radioelektroniky je využito umístění stanic na stativěch naproti sobě.



Obrázek 19: Jednoduché schéma zapojení Base Station (převzato z [18])

3.1.4 Vive controllers

Ovladače Vive controllers slouží k ovládání a interakci s prostředím ve virtuální realitě. Sledování jejich pohybu je zajištěno také pomocí bázových stanic, které sledují senzory na ovladači (označeny číslem 6 na obrázku 20). Ovladače dále disponují Micro-USB portem pro nabíjení, indikační LED a dalšími pěti tlačítky pro ovládání.



Obrázek 20: HTC Vive controller (převzato z [18])

3.2 Počítačová stanice

Jak bylo již řečeno v kapitole 3.1, HMD HTC Vive Pro Eye, který je v laboratoři využíván, je PC-based HMD. Je tedy nutné mít počítač s dostatečně výkonným hardwarem, který zvládne zpracovat data pro dané HMD. Laboratoř disponuje počítačem, který je naprosto dostatečný pro provoz potřebných aplikací ve VR prostředí. Specifikace hardwaru počítače jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Tabulka 3: Hardwarové specifikace počítače dostupného v laboratoři

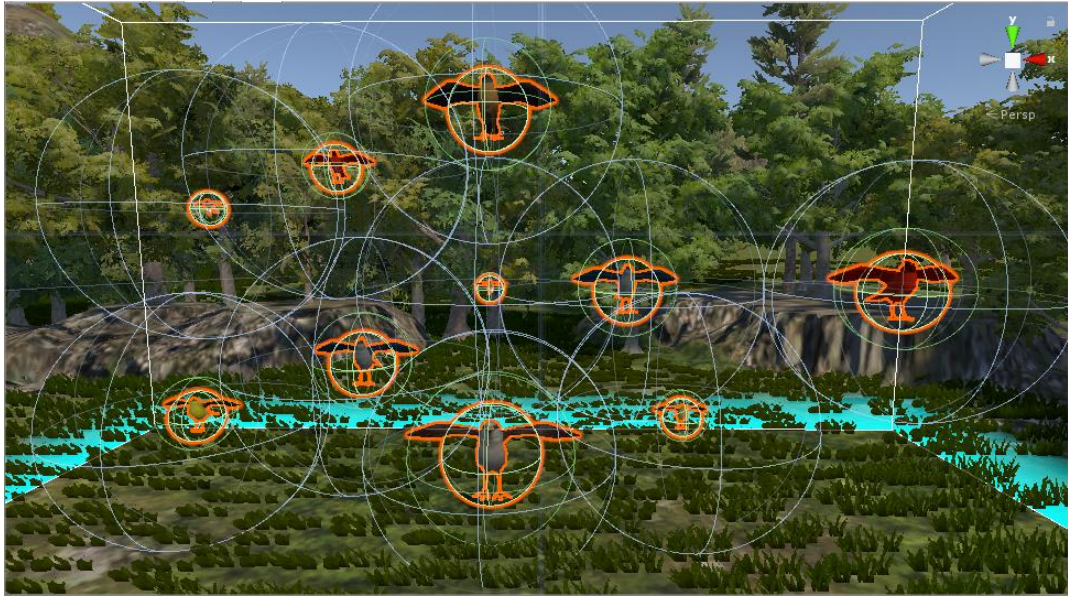
PARAMETR	HODNOTA PARAMETRU
PROCESOR	Intel Core i7-4790
GRAFICKÁ KARTA	NVIDIA GeForce RTX 2060 SUPER
PAMĚŤ	16 GB RAM
VIDEO PORTY	3x DisplayPort 1.4 1x HDMI 2.0
OPERAČNÍ SYSTÉM	Windows 10 Pro
ZDROJ	850 W

Po porovnání hardwarových požadavků pro provoz HMD (uvedeny v tabulce č. 1) s hardwarem počítače v tabulce č. 3, je zřejmé, že je počítač plně schopen spustit i náročnější aplikace pro VR. Počítač disponuje 16 GB operační pamětí, grafickou kartou NVIDIA GeForce RTX 2060 SUPER s 6 GB vnitřní pamětí typu GDDR6. Pokud bude v budoucnu potřeba spouštět high-end VR aplikace, bude s největší pravděpodobností nutné vyměnit stávající procesor Intel Core i7-4790 za novější model. Procesor je ale zatím dostačující pro současné potřeby laboratoře.

3.3 Aplikace pro testování lokalizace zdroje zvuku

Aplikace pro subjektivní testování lokalizace zdroje zvuku ve virtuální realitě byla vytvořena v rámci diplomové práce Viktora Jarolímka v roce 2019. Aplikace je navržena v enginu Unity, ve verzi z roku 2018.

V aplikaci bylo k dispozici 31 již připravených testů, ve kterých musí respondent lokalizovat zdroj zvuku v podobě ptáčka (model získaný z Asset storu). V každém z testů je právě jeden zdroj zvuku, který má respondent lokalizovat a několik dalších ptáčků, kteří fungují jako vizuální distraktory (jako např. na obrázku 21). V některých testech jsou navíc přidány i další vizuální a akustické distraktory (např. déšť, želva či veverka), které slouží k otestování schopnosti určit



Obrázek 21: Vizuální vzhled jedno z testů

zdroj zvuku při několika působících akustických podnětech naráz. Testy se od sebe liší pozicí ptáčků, jejich počtem, velikostí, a v některých případech i jejich pohybem.

Aplikace je z velké části realizována pomocí pluginů Steam VR a Steam Audio, které umožňují interakci s virtuálním prostředím. Díky pluginu Steam Audio, jak je popsáno v kapitole 1.2.3, je možné s pomocí dodané HRTF zajistit prostorovost zvuku jednotlivých zdrojů.

Testovací sekvence začíná shromážděním údajů o respondentovi, volbou typu interpolace a volbou HRTF, a nově i zvolením počtu testů v testovací sekvenci. Po zadání údajů a jejich rekapitulaci může respondent stisknutím bočního tlačítka na ovladači spustit testovací sekvenci z náhodně zvolených testů. V každém z testů vybere respondent pomocí ovladače objekt, který považuje za zdroj zvuku a automaticky se spustí další test.

Výsledky testů se ukládají v podobě strukturovaného textového souboru, viz obrázek 22. Soubor obsahuje nejprve údaje zadané před spuštěním testovací sekvence (tedy informace o respondentovi, počet testů v sekvenci, typ interpolace, vybranou HRTF). Poté jsou v souboru vypsány proběhlé testy a u nich následující informace:

- 1) Označení (jméno) testu a stručný popis
- 2) Správnost lokalizace ve formě correct/incorrect
- 3) Doba potřebná k lokalizaci zdroje zvuku
- 4) V případě špatné odpovědi souřadnice domnělého zdroje a souřadnice správné odpovědi spolu s úhlovým rozdílem

1
None
Number of Test Cases: 10
Interpolation: Bilinear
Generic HRTF

TEST CASE: Test2_E4_21 - 4x4 sources rectangle
- Correct
- Time til answer: 21.60073 seconds

TEST CASE: Test2_G1_25 - 22 static sources + 4 sources rotating around
- Correct
- Time til answer: 7.66539 seconds

TEST CASE: Test2_H2_28 - 27 static sources + distractor (rain)
- Correct
- Time til answer: 10.44973 seconds

TEST CASE: Test2_D4_17 - 3x4 sources triangle
- Incorrect
- Time til answer: 19.0584 seconds
Answer coord: (-3.4, 2.0, 0.0) ||| Source coord: (-3.5, 1.2, -0.7) ||| Angle: 16.7786°

Obrázek 22: Příklad ukládání výsledků testování

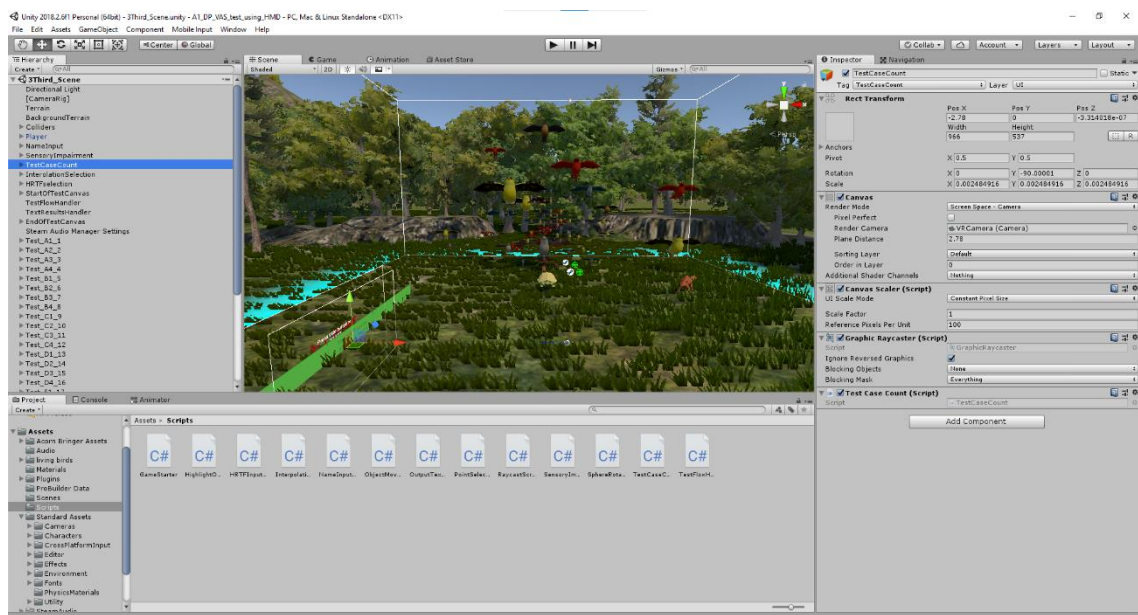
4. Modifikace stávající aplikace a přidání nových testovacích sekvencí

Jak bylo již zmíněno v předchozích kapitolách, aplikace pro určování polohy zdroje zvuku ve VAS je vytvořena v engineu Unity. Zdrojový kód aplikace je tedy psán v programovacím jazyce C#. Aplikace obsahovala 31 již připravených testů různého typu, ze kterých bylo nutné před začátkem samotného testování manuálně zvolit testy, které chceme mít v sekvenci obsažené.

V rámci této bakalářské práce bylo mým cílem implementovat do aplikace randomizaci výběru a pořadí testů, aby nebylo nutné testy volit manuálně. Dalším krokem byla implementace randomizace zdrojů zvuku v jednotlivých testech, aby se vyloučila možnost, že si respondent testy, a k nim korespondující zdroje zvuku zapamatuje. V neposlední řadě bylo také vytvoření tutoriálové sekvence pro seznámení nového uživatele s aplikací. Poslední částí úpravy aplikace bylo její rozšíření o nové testy, která bude zmíněna v jedné z podkapitol níže.

4.1 Práce s Unity

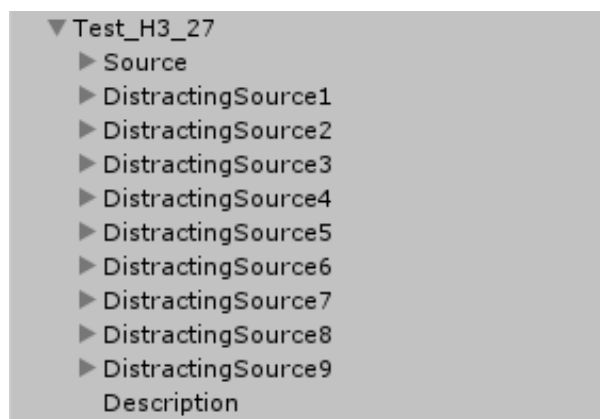
Prvním krokem pro práci s aplikací bylo seznámení se s Unity a samotnou strukturou aplikace. Přehled Unity user interface (dále jen UI) shrnuje obrázek 23.



Obrázek 23: Unity UI

Ve spodní části UI je možné zobrazení projektu, které nám zobrazí všechny komponenty (složky a soubory), které jsou v projektu obsaženy. Další možností zobrazení je Console, do které jsou vypisovány informace při průběhu testování a chybové hlášky.

Na levé straně je poté zobrazena hierarchie celého projektu. V našem případě se jedná o jednu scénu nazvanou Third_Scene, která obsahuje veškeré Game Objecty. V hierarchii můžeme vidět např. terén, definici „hrací“ plochy, několik input fieldů pro zadání informací před spuštěním testovací sekvence a dále samotné testy. Po rozkliknutí jednoho z testů se zobrazí zdroje zvuku a distraktory v daném testu (viz obrázek 24) spolu s jeho popisem.



Obrázek 24: Příklad struktury jednoho z testů v Unity

Na pravé straně nalezneme Inspector, který slouží primárně k upravování Game Objectů, jako je zvolení tagu, určení pozice ve scéně, přidání zdroje zvuku nebo přidání scriptů a dalších komponent samotného objektu. Dále Inspector slouží např. ke zobrazení a úpravě zdrojového kódu bez nutnosti spuštění jiné aplikace.

Uprostřed UI je vizualizace scény se všemi Game Objecty. Po scéně je možné se volně pohybovat a provádět úpravy přímo v grafickém prostředí.

4.2 Randomizace pořadí testů a zdroje zvuku

4.2.1 Randomizace pořadí testů

První modifikací aplikace byla implementace randomizace pořadí testů, aby nebylo nutné před samotným spuštěním aplikace testy manuálně volit. Všechny testy jsou nejprve načteny do pole testArray na základě jejich tagu (např. testCase1, testCase2 pro nové testy), a následně je pole

seřazeno podle názvu testů. Testy jsou z pole vybírány podle jejich indexu, který reprezentuje proměnná `testNumber`.

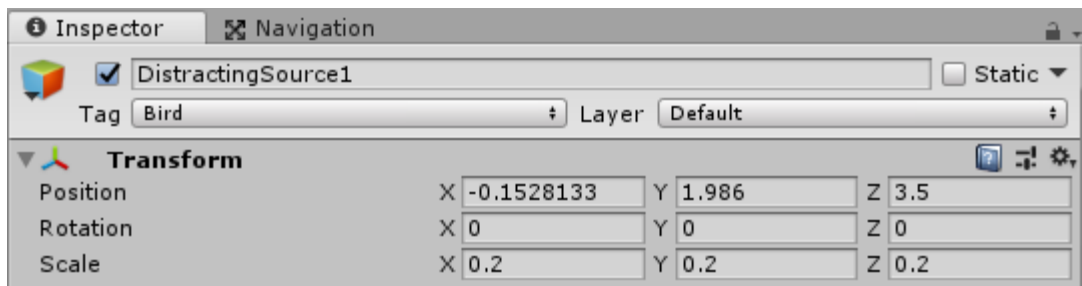
Prvním krokem k realizaci randomizace pořadí testů bylo randomizovat proměnnou `testNumber` od 0 až do posledního indexu pole. Bylo tedy nutné nadefinovat náhodnou proměnnou v C# (řádek 25 ve scriptu `TestFlowHandler`).

Dále bylo nutné proměnnou `testNumber` randomizovat z rozsahu indexů pole tak, aby nedošlo k opakování žádného z indexů. Pro tento účel bylo využito nového seznamu (`List numbers`), do kterého se ukládají již použité indexy. Za využití podmínek a cyklu bylo pak již možné proměnnou `testNumber` randomizovat bez možnosti opakování stejného čísla. Konkrétní implementace je uvedena ve scriptu `TestFlowHandler`, viz příloha A, kde jsou jednotlivé části kódu detailněji popsány na řádcích 74 až 86.

4.2.2 Randomizace zdroje zvuku

Druhým bodem týkajícím se randomizace byla randomizace zdroje zvuku v daném testu. Bylo nutné náhodně zvolit jednoho z ptáčků v testu a spustit přehrávání jeho zvukové stopy. Nejprve bylo nutné přidat všem ptáčkům v každém testu nové komponenty, protože zvukovou stopu obsahoval vždy jen jeden s názvem `Source`. Jednalo se o přidání `Audio Source`, aby měl každý ptáček přiřazenou vlastní zvukovou stopu, a dále o přidání scriptu `Steam Audio Source`, který umožňuje prostorový vjem zvuku s využitím `HRTF`. Aby bylo možné náhodně vybrat jednoho z ptáčků, a nikoliv jeden z distraktorů, které jsou spuštěny vždy, bylo nutné všem ptáčkům přiřadit nový tag „`Bird`“, aby byla možná jejich identifikace prostřednictvím tagů.

Původně byly všechny zdroje zvuku z daného testu vždy před jeho spuštěním načítány do pole `audioSource`. Poté byla u všech zdrojů změněna interpolace a zdroje byly spuštěny ve smyčce. Pro implementaci randomizace zdroje zvuku bylo tedy nutné vyselektovat pouze zdroje zvuku s tagem „`Bird`“ (viz obrázek 25), aby nedošlo ke smíchání s distraktory (jako je déšť, veverka, želva, a další), které jsou obsahem některých testů, a z nich jeden náhodně vybrat a spustit ve smyčce.



Obrázek 25: Ukázka přiřazení nového tagu

Prvním návrhem bylo překopírování zdrojů se specifickým tagem „Bird“ z pole `audioSource` do nově vytvořeného pole `birdSource`. Pro všechny zdroje zvuku z pole `audioSource` by pak bylo možné nastavit pouze interpolace dle výběru uživatele, zatímco z pole `birdSource` by byl náhodně vybrán jeden zdroj, a ten následně spuštěn ve smyčce. Po implementaci této metody a jejím otestování bylo zjištěno, že nelze spustit zdroj zvuku z pole `birdSource`, protože se z pole `audioSource` kopíruje pouze reference na pozici v původním poli. Proto není možné po zavolání funkce s polem `birdSource` spustit přehrávání audio stopy, jelikož se toto pole neodkazuje přímo na daný objekt.

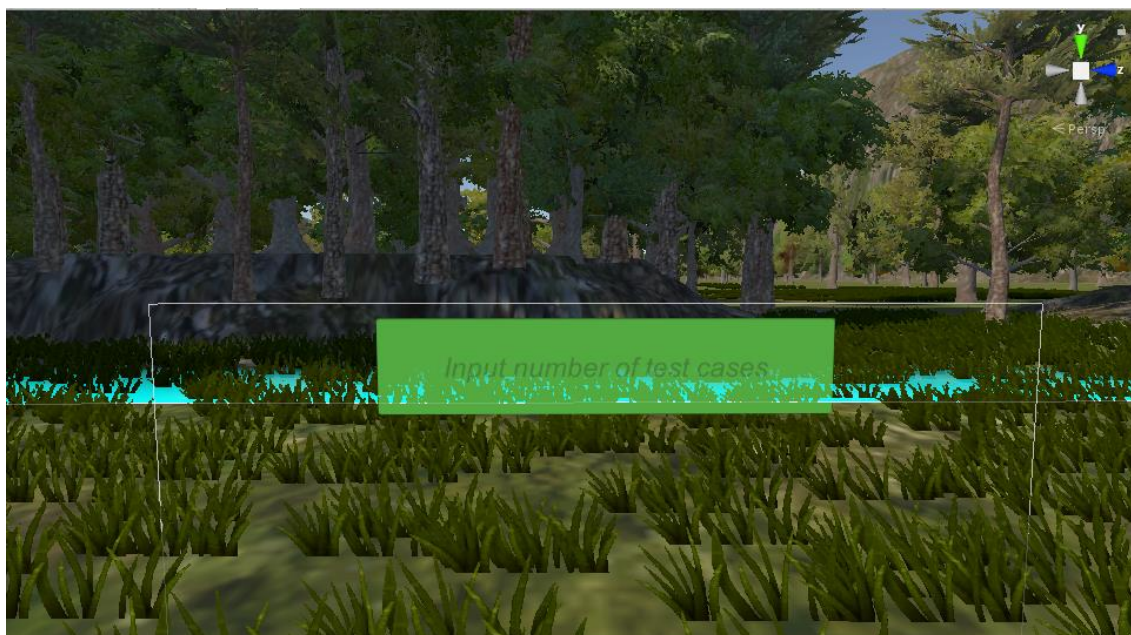
Dále tak bylo pracováno s informací, že není možné kopírovat objekty z jednoho pole do druhého. Bylo tedy nutné ponechat všechny zdroje zvuku z daného testu v poli `audioSource` a z nich vybrat ty s tagem „Bird“. Toho bylo docíleno tím, že se po porovnání tagu všech zdrojů zvuku v poli ukládá číslo zdroje do nového seznamu (`List sources`), ze kterého je pak číslo náhodně generováno.

Finální implementace randomizace zdroje zvuku je uvedena ve scriptu `TestFlowHandler` viz příloha A, kde jsou jednotlivé části kódu popsány a vysvětleny, ve scriptu se jedná o řádky 92 až 110.

4.3 Input field pro zadání počtu testů

Mezi další modifikace aplikace patří také přidání nového input fieldu (textového pole) sloužícího pro zadání požadovaného počtu testů v testovací sekvenci před spuštěním samotného testování.

Bylo nutné nadefinovat v Unity nový input field (viz obrázek 26). Nový input field byl následně upraven tak, aby korespondoval se strukturou celé aplikace. Dále byl zvolen `integer only` způsob zadávání textu, který umožňuje zadávat do pole pouze celá čísla.



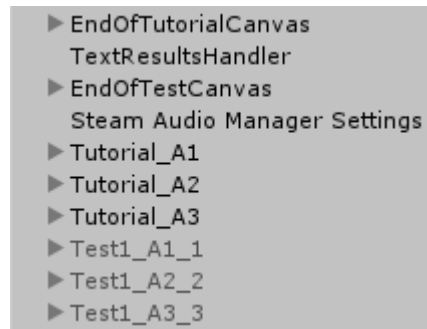
Obrázek 26: Input field pro zadání požadovaného počtu testů

Dalším krokem bylo vytvoření C# scriptu, který s daným polem pracuje. Nový script TestCaseCount se stará o zpracování textu z pole, odesláním informací do output souboru a předání informace o počtu testů scriptu TestFlowHandler.

Posledním krokem k vytvoření celého scriptu je nutné stanovit, jak se budou zadaná data zpracovávat. Po zadání textu, v našem případě zadání celého čísla, a stisknutí klávesy Enter dojde k zapsání textu do pole v podobě stringu. Pro využití údaje o počtu požadovaných testů v sekvenci je nutné jeho převedení z textového formátu (string) do číselného (integer). To je provedeno prostřednictvím funkce `int.Parse()`. Celý zdrojový kód je detailněji popsán a vysvětlen ve scriptu TestCaseCount viz příloha A.

4.4 Vytvoření tutoriálové sekvence

Jednou z posledních velkých modifikací aplikace bylo vytvoření tutoriálové testovací sekvence, která má sloužit k seznámení uživatele s testovací aplikací a samotným průběhem testování. Prvotní myšlenka byla taková, že by bylo možné před zahájením sekvence pomocí jednoho ze dvou tlačítek tutoriál spustit nebo přeskočit. Z důvodu problémů s nastavením tlačítek, takovým způsobem, aby bylo možné s nimi interagovat prostřednictvím VR ovladače, nebyla tato myšlenka zatím plně implementována. Pro ovládání tlačítek je však již připraven samostatný script TutorialControl viz příloha A.



Obrázek 27: Tutoriálové testy v rozhraní Unity

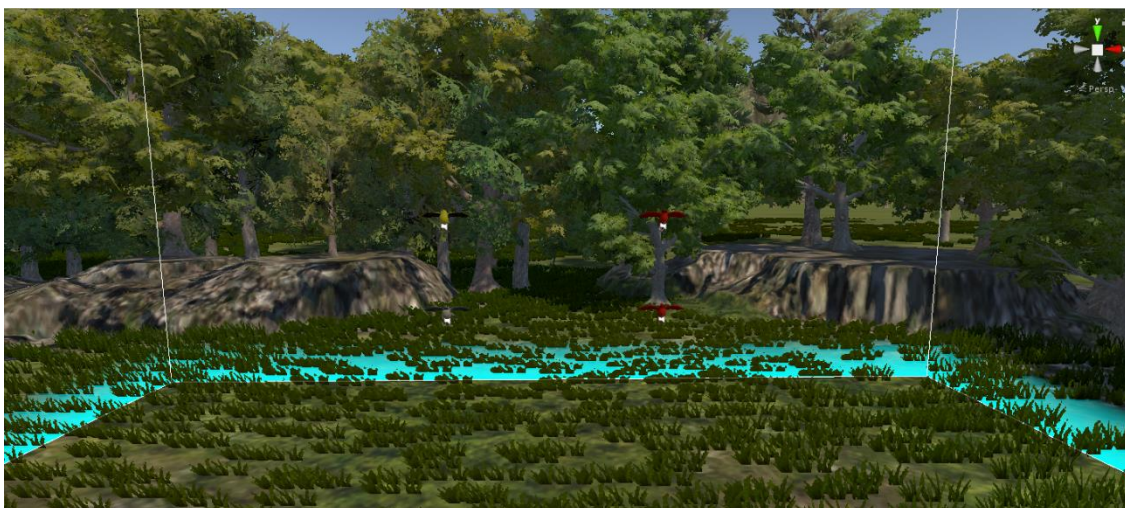
Tutoriálová sekvence momentálně sestává ze tří tutoriálových testů (viz obrázek 27), které demonstrují uživateli základní principy průběhu samotného testování. Tutoriálovou sekvenci řídí nově vytvořený script TutorialFlowHandler, viz příloha A, který je podobný stávajícímu scriptu řídícímu samotnou testovací sekvenci. Jednotlivé části kódu jsou detailněji popsány a vysvětleny přímo v daném scriptu.

Sekvence není momentálně v aplikaci plně implementována, a nebyla řádně odladěna z důvodu nefunkčního výběru zdroje v tutoriálových testech, který se zatím nepodařilo odstranit. Sekvence je však připravena k použití po odladění této chyby.

4.5 Rozšíření aplikace o nové testy

Významným doplněním aplikace bylo vytvoření nových rozšiřujících testů, které na rozdíl od původních 31 testů, kde jsou zdroje zvuku (ptáčci) umístěny v jedné rovině přímo před uživatelem, mají zdroje rozmístěné v celém prostoru kolem uživatele v rozsahu azimutu $\varphi \in [0^\circ; 360^\circ]$. Bylo vytvořeno 29 nových testů roztríděných do několika kategorií podle charakteru testu a rozmístění zdrojů. Každému z testů byl přiřazen nový tag „testCase2“ z důvodu jejich rozlišení od testů původních.

Tyto testy byly vytvořeny za účelem možnosti testování chyb prostorové lokalizace zdroje zvuku. Testy byly modelovány na základě teorie prostorového slyšení, konkrétně na základě teorie kuželu zmatení (cone of confusion), který je popsán v teoretickém úvodu v kapitole 1.1.3.



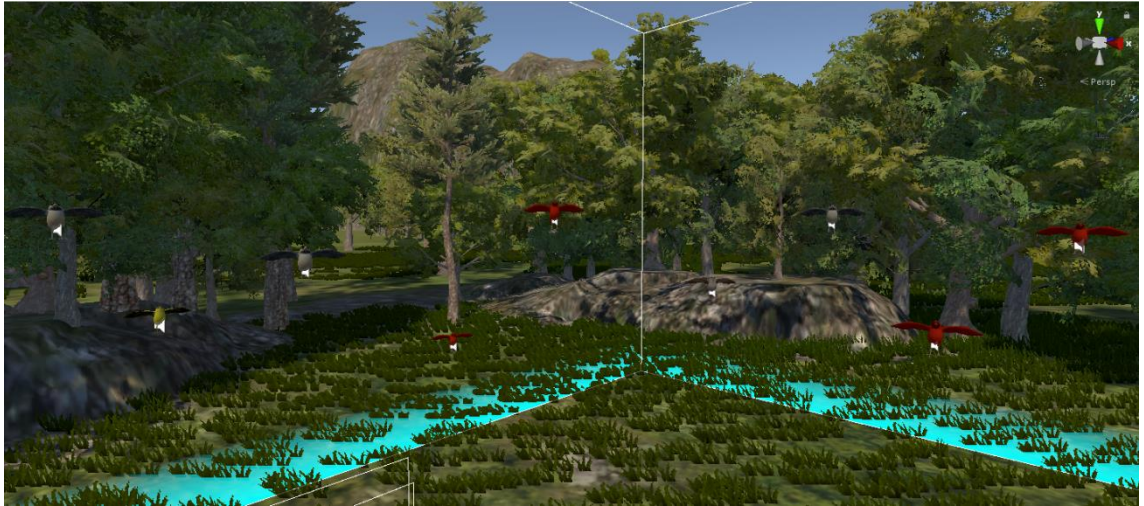
Obrázek 28: Příklad jednoho z nových testů

První dvě sady nových testů označené indexem A a B, mají vždy 8 statických zdrojů rozmístěných tak, že jsou na každé světové straně od uživatele dva zdroje na stejné elevaci, ale s rozdílnými azimuty. V tomto případě by měly být znatelné front-back chyby, a tedy i kužel zmatení.

Třetí sada označená indexem C obsahuje několik testů, kdy jsou statické zdroje rozmístěny na vrcholech trojúhelníku, který je opět umístěn na všech světových stranách jako v případě prvních dvou sad. V rámci sady je využito rozdílných azimutů i elevací.

Čtvrtá sada testů s indexem D má zdroje situované na vrcholech čtyřúhelníku (viz obrázek 28), které jsou v prostoru rozmístěny stejně jako v předchozích sadách. Všechny zdroje v těchto testech jsou opět statické.

Další sady testů označené indexy E, F a G jsou kombinací předešlých testů. Kombinují rozmístění statických zdrojů v různých geometrických útvarech, různých azimutech a elevacích.



Obrázek 29: Příklad jednoho z plně prostorových testů s distraktory

Poslední sadou nových testů je sada označená indexem H. Jedná se o testy, kde jsou zdroje rozmístěny „náhodně“ v celém okolí uživatele v různých elevacích a azimutech. V jednom z testů jsou zahrnuty i pohybující se zdroje zvuku a v dalších jsou využity audiovizuální distraktory, jako je například veverka, želva, potok v lese, či padající déšť. Tyto testy slouží především k determinaci celkové orientace v prostoru při ztížených podmínkách slyšení.

5. Realizace měření a vyhodnocení získaných dat

5.1 Realizace měření v laboratoři

Subjektivní měření s nově vytvořenými testy se uskutečnilo ve dvou kolech. V prvním kole, které proběhlo během prosince 2023 se uskutečnilo měření na 10 předem zvolených testech, kde byl zvolen pouze jeden zdroj zvuku a nebyla aplikována plná randomizace (aplikována byla pouze randomizace pořadí testů). Tohoto měření se zúčastnilo 12 respondentů a sloužilo pouze jako zkouška samotné aplikace s novými úpravami. Z tohoto důvodu nebyly tyto výsledky následně vyhodnoceny.

Druhé kolo měření proběhlo během dubna 2024 a testů se zúčastnilo opět 12 respondentů. Při tomto měření byla aplikována úplná randomizace, tedy randomizace pořadí testů i randomizace zdroje zvuku v každém testu. Před samotným měřením bylo vyselektováno 16 nově vytvořených testů a každému z respondentů bylo náhodně vybráno 10 z nich. Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce bylo pro všechny respondenty zvoleno stejné nastavení testovací sekvence. Při měření byla tedy využita bilineární interpolace (bilinear) a generická HRTF (z databáze Club Fritz).

Samotné měření typicky probíhalo po skupinkách 2-4 osob ve VR laboratoři. Respondenti byli nejprve seznámeni s konceptem aplikace a průběhem testu. Dostali tedy informace a instrukce o tom, co je při testování čeká, jak se vybírají zdroje zvuku a další. Po proběhnutí testu celé skupiny byli respondenti seznámeni s výsledky testů a získaly informace o chybách.

5.2 Struktura naměřených dat

Výstupem aplikace pro měření lokalizace zdroje zvuku ve VR je textový soubor (jak bylo již zmíněno v kapitole 3.3), který obsahuje data o nastavení aplikace, a pro každý test základní informace charakterizující výkon respondenta během celé testovací sekvence. U každého z testů je tedy uvedena správnost lokalizace zdroje, čas reakce a případně úhlová chyba spolu se souřadnicemi odpovědi a zdroje. Tyto údaje byly využity při pozdějším zpracování dat. K těmto datům jsou navíc doplněny základní informace o každém z respondentů, na které byli dotázáni před vlastním testováním. Jedná se o následující informace:

- **pohlaví** – proměnná s hodnotami M a F (M – muž, F – žena)
- **věk** – hodnota věku respondenta, vzhledem k nízkému počtu respondentů a jejich věku v rozmezí 20-26 let není pro vyhodnocování podstatná

- **sluchové a zrakové vady** – pro odůvodnění případných odlehlých hodnot
- **zkušenosti s VR** – třídění na: žádné zkušenosti, letmá zkušenost, aktivní konzumenti

5.3 Zpracování dat získaných měření

Vzhledem k nízkému počtu respondentů, a tedy i malému množství naměřených dat, bylo možné data zpracovávat převážně manuálně. Pouze pro převedení prostorového úhlu na úhel azimutu a elevace bylo využito matematických funkcí pro výpočet úhlu mezi dvěma vektory v internetovém prohlížeči pro urychlení zpracování.

V prvním kroku jsem nejprve rozdělil z výstupního textového souboru aplikace výsledky jednotlivých testů do samostatné tabulky (pro každý test byly výsledky uloženy do jiné tabulky), aby bylo vyhodnocování a vizualizace do grafů přehlednější. Po uložení všech hodnot do tabulky jsem převedl celkový prostorový úhel na jednotlivé složky (tedy azimut a elevace) pro pozdější vyhodnocení. Pro každý z testů jsem následně ze získaných dat vytvořil následující grafy:

- **počet správných a špatných odpovědí** – sloupcový graf, který znázorňuje počet správných a špatných odpovědí pro každý test
- **čas reakce** – box plot znázorňující rozložení času pro vyřešení daného testu

Následně jsem výsledky všech testů uložil do jedné tabulky, která je součástí elektronické přílohy, a vyhodnotil celkové statistiky provedených testů (celkový čas trvání testování a počty správných odpovědí) společně s informacemi o respondentovi. Výsledky jednotlivých testů s komentářem ke každému z nich shrnuje následující kapitola. Vizualizace každého z testů a jejich vyhodnocení je umístěna v příloze B.

5.4 Rozbor výsledků jednotlivých testů

• Test 01

V prvním testu měli respondenti za úkol vybrat jeden z osmi statických zdrojů zvuku. Zdroje byly umístěny po dvojicích ve čtyřech rovinách kolem respondenta, na stejné elevaci, s různými azimuty. Testy tohoto typu, kde se vyskytují pouze dva zdroje na stejné elevaci, by měly být velmi jednoduché na vyřešení, především pokud se jedná o vyšší rozdíl azimutů mezi zdroji (tedy větší vzdálenost mezi nimi).

Mezi deseti náhodně vybranými testy řešili tento test čtyři z dvanácti respondentů, z toho tři určili zdroj správně. Jeden z nich určil zdroj, který se vyskytoval na druhé straně, s úhlovou chybou v azimutu 179° . Jedná se tedy o front-back chybu viz kapitola 1.1.3,

u které jsme chtěli zjistit, zda se může projevovat. Průměrný čas pro vyřešení testu byl 9,67 s.

- **Test 02**

Ve druhém testu měli respondenti opět za úkol vybrat jeden z osmi statických zdrojů zvuku. Zdroje byly opět umístěny po dvojicích ve čtyřech rovinách kolem respondenta, na stejné elevaci, s různými azimuty (tentokrát s větším úhlovým rozdílem).

Tento test podstoupilo při testování osm z dvanácti respondentů, z toho sedm jich určilo zdroj správně. Průměrný čas pro vyřešení testu činil 6,95 s, tedy o necelé tři sekundy méně než u předchozího. U respondenta, který určil zdroj špatně se opět jedná o front-back chybu, kde byl úhlový rozdíl v azimutu mezi zdroji roven 154° .

- **Test 03**

Ve třetím testu měli respondenti znovu vybrat jeden z osmi statických zdrojů zvuku. Zdroje byly opět umístěny po dvojicích ve čtyřech rovinách kolem respondenta, na stejné elevaci, s různými azimuty (v tomto testu s větším úhlovým rozdílem $15,5^\circ$ a nižší elevací).

Tento test podstoupilo šest respondentů, z toho čtyři určili zdroj správně a dva špatně. Průměrný čas pro vyřešení tohoto testu činil 20,9 s, ačkoliv někteří respondenti zvládli test vyřešit do deseti sekund. V obou případech, kdy respondenti vybrali špatný zdroj, se nyní jedná pouze o velkou lokální chybu, která je způsobena špatným vyhodnocením meziušních rozdílů, jak je uvedeno v kapitole 1.1.3.

- **Test 04**

Ve čtvrtém testu měli respondenti znovu vybrat jeden z osmi statických zdrojů zvuku. Zdroje byly opět umístěny po dvojicích ve čtyřech rovinách kolem respondenta, na stejné elevaci, s různými azimuty (se stejným úhlovým rozdílem jako u předchozího testu, na jiné elevaci).

Test podstoupilo opět šest respondentů, kde čtyři z nich určili zdroj správně a dva zvolili špatný. Průměrný čas na vyřešení testu byl 8,3 s. U obou respondentů, kteří zvolili špatný zdroj, se znovu jedná pouze o lokální chybu v rozmezí 14° až 16° .

• Test 05

V pátém testu měli respondenti znovu vybrat jeden z osmi statických zdrojů zvuku. Zdroje byly opět umístěny po dvojicích ve čtyřech rovinách kolem respondenta, na stejné elevaci, s různými azimuty (opět se stejným úhlovým rozdílem, na jiné elevaci).

Pátý test úspěšně vyřešili pouze dva respondenti z pěti. Většina z nich vyřešila test do pěti sekund (medián rychlosti reakce je zde 4,2 s), průměrný čas pro vyřešení byl 6,4 s. U dvou z respondentů došlo k lokální chybě s úhlovým rozdílem mezi zdroji 16,5 °. Poslední respondent, který měl nejvyšší dobu reakce 15,9 s, určil špatný zdroj, a to s úhlovou chybou v azimutu 178 °. Jedná se o další případ front-back chyby, kdy respondent určil jeden z tichých objektů a pravý zdroj byl umístěn za jeho zády. Z vyššího času pro vyřešení tohoto typu testu můžeme usoudit, že tento respondent dlouho přemýšlel, na které straně se zdroj vyskytuje, a nakonec zvolil špatný.

• Test 06

V šestém testu respondenti vybírali jeden z dvanácti statických zdrojů. Tyto zdroje byly nyní umístěny do vrcholů rovnoramenného trojúhelníku ve čtyřech rovinách kolem respondenta. V testech tohoto typu, kde jsou objekty rozmístěny do vrcholů trojúhelníka, bylo prý pro mnoho respondentů složité určit správný zdroj, především proto, že vrchol na jiné elevaci způsoboval zmatení. Z tohoto důvodu respondenti ve většině případů u těchto testů strávili více času.

Šestý test podstoupilo jedenáct z dvanácti respondentů, z toho sedm z nich určilo zdroj správně a jen čtyři zvolili špatně. Průměrný čas pro vyřešení testu byl 16,4 s (s mediánem 14,5 s). U všech respondentů, kteří zvolili špatný zdroj, se jednalo pouze o malou lokální chybu s úhlovým rozdílem 6 ° - 8 °. Všichni respondenti tedy zvládli správně určit kvadrant, ve kterém se zdroj nachází, ale rozlišení elevace bylo složitější, což může souviset i s rozlišením použité generické HRTF.

• Test 07

V sedmém testu respondenti opět vybírali jeden z dvanácti statických zdrojů. Principiálně se jedná o stejný test, jako byl ten předchozí. Zdroje byly umístěny do tvaru rovnoramenného trojúhelníku ve čtyřech rovinách kolem respondenta (nyní ale s menším úhlovým rozdílem v azimutu a nižší elevací jednoho z vrcholů trojúhelníku).

Sedmý test podstoupilo devět respondentů, z nichž čtyři určili správný zdroj a pět zvolilo špatný. Průměrný čas pro vyřešení testu je mírně nižší než u testu předchozího, tedy 14,2 s,

pravděpodobně z důvodu menšího rozestupu objektů mezi sebou. Většina respondentů, která zvolila špatně, se dopustila pouze lokální chyby v rozmezí $5^\circ - 8^\circ$. Jeden z respondentů se ovšem dopustil front-back chyby s úhlovým rozdílem 85° . Nejedná se tedy o chybu, kdy byl zdroj přímo na druhé straně za zády respondenta. Chyba mohla nastat v moment, kdy se respondent otočil, aby eliminoval jeden z tichých objektů. V důsledku toho poté zvolil špatný zdroj.

Test 08

V osmém testu respondenti opět vybírali jeden z dvanácti statických zdrojů. Tyto zdroje byly znovu umístěny do tvaru rovnoramenného trojúhelníku ve čtyřech rovinách kolem respondenta (tentokrát s ještě menším úhlovým rozdílem v azimutu a nižší elevací).

Test číslo osm podstoupilo opět jedenáct z dvanácti respondentů, z toho pouze dva z nich zvolili správně zdroj. Průměrný čas pro vyřešení se opět pohyboval ve stejném rozmezí, tentokrát 14,5 s. Sedm respondentů se dopustilo velmi malé lokální chyby, kde úhel mezi vybraným objektem a skutečným zdrojem činil $3^\circ - 5^\circ$. Dva respondenti se dopustili chyby typu front-back, opět jako u jednoho z předchozích testů toho typu s úhlovým rozdílem pohybujícím se kolem 90° .

• Test 09

V testu číslo devět vybírali respondenti jeden z šestnácti zdrojů zvuku, tentokrát rozmístěných do tvaru pravidelného čtyřúhelníku s různým azimutem a elevací. Zdroje byly opět ve čtyřech rovinách kolem respondenta. Splnění těchto testů s rozmístěním objektů do vrcholů čtyřúhelníku bylo pro respondenty také složitější, především z nutnosti určení zdroje na správné elevaci. Z tohoto důvodu by měl být čas na vyřešení delší než u předchozích testů.

Devátý test podstoupilo šest respondentů, z toho pouze dva zvolili zdroj zvuku správně. Průměrný čas pro vyřešení se opravdu zvýšil, ale pouze na 18.2 s (medián 10,2 s), někteří respondenti zvládli test vyřešit do deseti sekund a snižují tak průměr. Tři ze čtyř respondentů, kteří zvolili špatný objekt, se dopustili pouze chyby na úrovni elevace. Tato chyba by se zřejmě dala minimalizovat použitím změřené HRTF, jak již potvrdil měřením a statistickým vyhodnocením vedoucí mé práce Ing. Martin Novotný v rámci své diplomové práce. Poslední z respondentů se dopustil velké chyby, kdy vybral zdroj na druhé straně čtyřúhelníku, a to s úhlovým rozdílem 26° . Nejedná se tedy o front-back chybu. Diskutabilní je, zda je možné tuto chybu považovat za lokální i v případě tohoto velkého úhlového rozdílu.

- **Test 10**

V desátém testu vybírali respondenti opět jeden z šestnácti zdrojů zvuku rozmístěných do tvaru pravidelného čtyřúhelníku s různým azimutem a elevací (pro tento test byla zvolena vyšší elevace a nižší úhlový rozdíl v azimutu) umístěných ve čtyřech rovinách kolem respondenta.

Test číslo 10 podstoupilo v průběhu testování sedm respondentů, z nichž čtyři byli při řešení úspěšní a tři zvolili špatně. Průměrný čas pro řešení testu byl 25 s, průměr ale významně zvyšuje jeden z respondentů, který test řešil 82 s. Všichni respondenti, kteří se v tomto testu dopustili chyby, chybovali pouze na úrovni elevace s úhlovým rozdílem 18°. Respondenti by zřejmě opět dosáhli vyšší úspěšnosti, pokud by testování probíhalo se změřenou HRTF.

- **Test 11**

V jedenáctém testu vybírali respondenti opět jeden z šestnácti zdrojů zvuku rozmístěných do tvaru pravidelného čtyřúhelníku s různým azimutem a elevací, pro tento test byl v každé rovině z objektů složen čtyřúhelník s jinými rozměry.

Tento test podstoupilo pět respondentů, z toho pouze jeden byl schopný vybrat zdroj správně. Dva respondenti chybovali pouze na úrovni elevace, jejíž rozdíl mezi zdroji byl pro tento případ 23°. Další z respondentů se dopustil lokální chyby s úhlovým rozdílem 15°. Poslední z respondentů se dopustil obou chyb zároveň, zvolil objekt se špatným azimutem (s úhlovým rozdílem 18 °) i elevací (s úhlovým rozdílem 30 °).

- **Test 12**

V testu číslo dvanáct vybírali respondenti jeden z dvanácti zdrojů zvuku. Tyto zdroje byly rozmístěny ve čtyřech rovinách kolem respondenta a rozloženy do tvaru pravoúhlého trojúhelníku. U tohoto testu je možné očekávat nižší čas potřebný pro vyřešení, spolu s vyšší úspěšností. Po správném určení roviny můžeme očekávat především chybu týkající se pouze rozdílu elevace u dvou ze zdrojů.

Test podstoupilo deset z dvanácti respondentů. Úspěšně test vyřešilo šest z nich a čtyři zvolili špatně. Průměrný čas pro vyřešení testu byl 12,9 s (s mediánem 10,5 s), čas nutný pro vyřešení se tedy opravdu od předchozích testů se zdroji umístěnými do vrcholů trojúhelníku snížil. Jeden z respondentů se zde opět, jako u předchozích testů s tímto rozmístěním, dopustil front-back chyby s úhlovým rozdílem azimutu 90 °. Další dva,

kteří zvolili špatně, se dopustili pouze chyby na úrovni elevace, jak bylo předpokládáno, a to s úhlovým rozdílem $12,5^\circ$ - $14,5^\circ$.

• Test 13

Ve třináctém testu měli respondenti za úkol vybrat jeden z 22 statických zdrojů. Zdroje byly náhodně rozmístěny kolem respondenta. V tomto testu navíc jako distraktory sloužily 4 pohyblivé objekty rotující kolem respondenta (tyto distraktory nevydávají zvuk). Tento test slouží především pro ověření přesnosti lokalizace zdroje, které jsou náhodně rozmístěny v prostoru kolem respondenta. U testů s náhodným rozložením objektů je očekávána chyba v určení azimutu i elevace zároveň, a vyšší čas nutný pro vyřešení.

Test číslo třináct podstoupilo osm respondentů, úspěšně test vyřešili čtyři z osmi respondentů. Ačkoliv byl očekáván vyšší čas nutný pro vyřešení, respondenti byli schopni rychlé orientace v prostoru a vyřešili test velmi rychle. Průměrný čas pro vyřešení byl tedy 13,7 s. Všichni tři respondenti, kteří určili špatně, se dopustili chyby v určení správného azimutu (a to s úhlovým rozdílem v rozmezí 15° - 17°) a elevace (ve dvou případech s úhlovým rozdílem 21° , v jednom případě $16,4^\circ$). K těmto chybám mohlo dojít při otáčení respondentů kolem zdroje, které vedlo k jejich zmatení a zvolení špatného objektu.

• Test 14

V testu číslo čtrnáct vybírali respondenti jeden z 26 statických zdrojů. Zdroje byly opět náhodně rozmístěny kolem respondenta. V testu jsou navíc také dva distraktory, jeden v podobě veverka, která rotuje kolem uživatele a vydává rušivý zvuk, a druhý v podobě potoku (zvuk tekoucí vody). Následující dva testy slouží jako ten předchozí k ověření přesnosti lokalizace v prostoru s náhodně rozmístěnými zdroji, navíc ale se ztížením podmínek prostřednictvím distraktorů vydávajících zvuk. Jsou tedy očekávány mírně horší výsledky než u předchozího testu, kde jako distraktory působily pouze objekty rotující kolem respondenta.

Tento test podstoupilo opět osm respondentů, z toho čtyři z nich zvládli vybrat správný zdroj i přes vliv distraktorů. Respondentům se opět podařilo vyřešit test velmi rychle a průměrný čas činil 13 s. Pokud ovšem eliminujeme čas jednoho z respondentů, který odpověděl za 0,03 s (respondent omylem zvolil zdroj ihned po zobrazení testu), což vedlo ke špatné odpovědi, dostaneme průměrný čas 14,9 s. Jeden z respondentů se dopustil velmi malé lokální chyby s úhlovým rozdílem v azimutu $2,7^\circ$ a elevaci $6,2^\circ$. Další dva respondenti se dopustili vyšší chyby v azimutu i elevaci, a to přes 20° , ke které opět mohlo dojít při jejich otáčení kolem zdroje.

Oba tyto testy (tedy test číslo 13 a 14) absolvovalo pět respondentů. Pokud nezahrneme výše zmíněný nepovedený test, tak dostáváme následující výsledky. Jeden z respondentů určil v prvním testu (test 13) správně a ve druhém (test 14) špatně. Další určil v obou testech správně, a to i s velmi rychlým časem (u obou testů do 10 s). Třetí v prvním testu chyboval a v druhém určil správně. Poslední z těchto respondentů chyboval v obou testech.

Výsledky tohoto testu z pohledu úspěšnosti byly tedy stejné jako u předchozího, po eliminaci jednoho z testů, který nelze zahrnout do statistiky, dokonce vyšší.

• **Test 15**

V testu číslo patnáct vybírali respondenti jeden z 26 statických zdrojů. Zdroje byly znovu náhodně rozmístěny kolem respondenta. V testu jsou navíc také dva distraktory v podobě želvy a veverka, které rotují kolem uživatele a vydávají rušivý zvuk.

Patnáctý test absolvovalo tentokrát devět respondentů, z toho čtyři úspěšně a pět zvolilo špatný zdroj. Průměrný čas potřebný pro vyřešení testu byl 16,7 s. Někteří z respondentů byli opět schopni rychlé orientace v prostoru, polovina z nich ovšem tentokrát řešila test více než dvacet sekund. Většina respondentů, kteří odpověděli špatně, se dopustila opět pouze menších chyb v rámci určování správného azimutu a elevace, jak bylo předpokládáno. Jeden z respondentů se ale dopustil front-back chyby s úhlovým rozdílem 46,7 ° (pro azimut 49,3 ° a elevaci 3,9 °). Z důvodu náhodného rozmístění se jedná v porovnání z předchozími front-back chybami pouze o malou chybu. Zajímavé je, že se tento respondent dopustil front-back chyby i přes to, že jeho reakční doba byla 20,9 s.

• **Test 16**

V posledním testu respondenti vybírali jeden z dvanácti statických zdrojů, které byly rozmístěny ve čtyřech rovinách kolem nich. Zdroje byly umístěny vždy po třech přímo nad sebou (se stejným azimutem, ale rozdílnou elevací). Ačkoliv se konstrukčně jedná o velmi jednoduchý test, tak je správné určení zdroje zvuku velmi obtížné. Důvod obtížnosti je pouze v určení správné elevace, která respondentům způsobila problémy s určením už v předchozích testech. V tomto případě není možné předem určit poměr správných a špatných výsledků, protože může dojít k výsledku, kdy respondent náhodně vybere správný zdroj. Můžeme ale očekávat vyšší čas nutný pro vyřešení.

Test podstoupilo devět respondentů, z toho pět odpovědělo správně a čtyři zvolili špatný zdroj. Průměrný čas pro vyřešení testu byl 17,9 s (medián 18,5 s), který snižují dva respondenti s časem reakce 5,7 s a 6,9 s. Většina z respondentů v tomto případě hledala

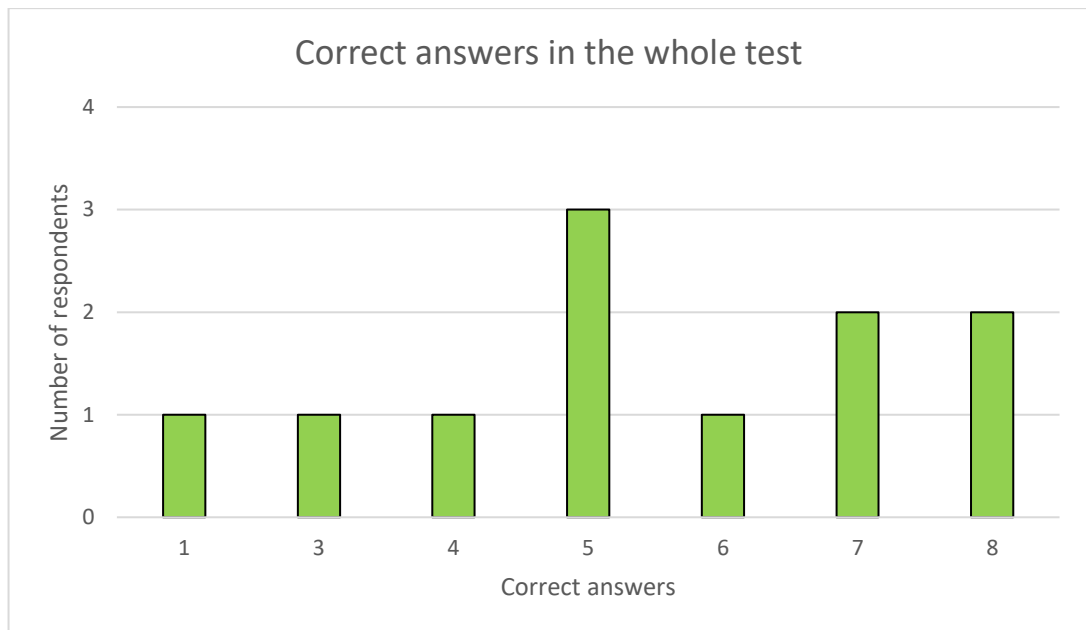
správný zdroj delší dobu. U všech respondentů, kteří zvolili špatně, došlo přesně podle předpokladu pouze k chybě v určení elevace s úhlovým rozdílem v rozmezí $11^\circ - 13^\circ$. Tyto chyby by se opět pravděpodobně minimalizovaly při použití změřené HRTF místo generické.

5.5 Celkové shrnutí výsledků

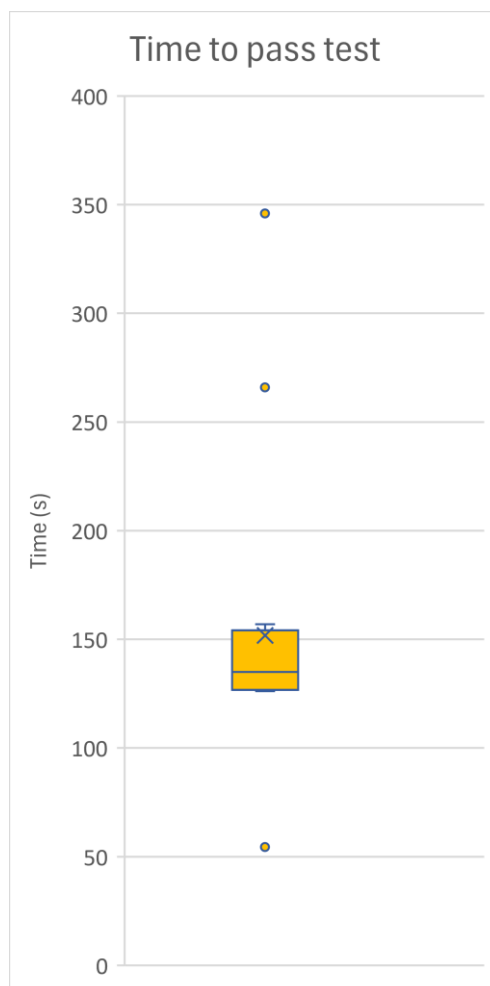
Vizualizace celkového shrnutí výsledků je k dispozici na obrázcích 28 a 29, kde je zobrazen celkový počet správných odpovědí během celého testování a celkový čas nutný pro jeho dokončení. Většině respondentů se tedy podařilo zodpovědět správně alespoň na polovinu testů. Nejhoršího výsledku dosáhl jeden z respondentů, který správně určil pouze jeden zdroj zvuku z deseti. Tento výsledek se ale pravděpodobně váže také k celkovému trvání testů, který byl 54,5 s. Naopak nejlepších výsledků dosáhli dva respondenti, kteří správně určili osm z deseti zdrojů zvuku. Jeden z nich testování absolvoval během dvou minut, druhý ještě více času, a to téměř šest minut. Celkový čas pro dokončení testu se může individuálně pro jednotlivé respondenty velmi lišit. Jedním z důvodů je to, že každý z respondentů měl náhodně vygenerovanou sekvenci deseti testů (některé z nich je možné vyřešit rychleji). Dalším důvodem je strategie, kterou si respondenti zvolí, protože zatím není testování nijak časově omezeno.

Pozitivním výstupem z testování je ale velké množství detekovaných chyb, ať už lokálních, tak front-back chyb, které bylo pro tuto práci klíčové. Jednotlivé chyby jsou diskutovány v předchozí podkapitole 5.4 u jednotlivých testů. Spoustu těchto lokálních chyb pravděpodobně nebude možné minimalizovat, jelikož je mezi jednotlivými objekty velmi malý úhlový rozdíl a respondenti u těchto testů často volí náhodně. Oproti tomu chyby, které souvisí pouze s elevací, by bylo pravděpodobně možné minimalizovat s využitím změřené HRTF, jak je zmíněno i v předchozí podkapitole.

Tyto chyby ale bohužel nelze nijak spojit s rychlostí reakce respondentů, protože někteří se dopustili chyby s časem reakce do 5 s, jiní naopak s časem reakce přesahujícím i 20 s. Z důvodu malého počtu respondentů, kteří se tohoto testování zúčastnili, můžeme tedy přímou spojitost chybovosti s časem reakce vyloučit. Toto by se ale mohlo významně změnit při vyhodnocování výsledků větší skupiny respondentů.



Obrázek 30: Počet respondentů a jejich správných odpovědí v průběhu celého testování



Obrázek 31: Čas potřebný k dokončení celého testování

Závěr

V rámci své bakalářské práce jsem se zabýval přesností lokalizace zdroje zvuku ve virtuálním prostředí. Mým cílem bylo modifikovat aplikaci pro testování tak, aby bylo možné randomizovat pořadí testů a zdroje zvuku v jednotlivých testech, navrhnout nové testy pro detekci a zkoumání chyb směrového slyšení, a provést subjektivní testování s nově vzniklými testy.

V první řadě bylo nutné modifikovat stávající aplikaci pro lokalizaci zdroje zvuku ve VR tak, aby splňovala požadavky pro vypracování této práce. Začal jsem tedy s úpravou samotného zdrojového kódu scriptů, které aplikace využívá. První modifikací, kterou jsem provedl, byla randomizace pořadí testů v testovací sekvenci, aby pro každého z respondentů nebylo stejné pořadí testů. Dále jsem randomizaci aplikoval i pro samotné zdroje zvuku v jednotlivých testech, aby si respondenti při případném opakovaném testování nemohli jednoduše zapamatovat pro každý test správný zdroj zvuku. Jako další možnou úpravou, která by se týkala především úpravy zdrojového kódu, bych navrhoval implementaci časového limitu pro jednotlivé testy, která by zároveň omezila i celkovou dobu testování, což by mohlo vést k zajímavějším výsledkům pro vyhodnocení. Jednou z menších realizovaných modifikací bylo také přidání pole pro zadání požadovaného počtu testů v testovací sekvenci, aby nebylo nutné testy vybírat manuálně.

Aby bylo možné chyby simulovat (hlavně front-back chyby), bylo nutné vytvoření nové sady testů, jelikož stávající sada sestávala pouze z testů, kde byly objekty umístěny pouze v rovině před respondentem. Nově tedy vzniklo celkem 30 testů, kde jsou objekty rozmístěny v několika rovinách kolem respondenta, a jsou schopny tyto chyby simulovat, což dokazují i výsledky subjektivního testování.

V rámci těchto modifikací aplikace jsem se ještě pokusil o vytvoření tutoriálové sekvence, která by mohla respondentům vždy před samotným testováním představit koncept aplikace a orientaci v ní. Z toho důvodu vznikly tři tutoriálové testy a nové scripty, které ovládají tutoriálovou sekvenci. Bohužel se mi ale nepodařilo tuto sekvenci z technických důvodů zprovoznit a plně implementovat do aplikace. Sekvence je ale připravena a po vyřešení chyb ji bude možné vyzkoušet a využít při testování.

Po implementaci všech potřebných modifikací proběhlo subjektivní testování ve VR laboratoři na katedře radioelektroniky FEL ČVUT v Praze. Testování se zúčastnilo 12 respondentů, kteří buď s VR neměli žádné zkušenosti nebo jen velmi malé. Z důvodu velmi malého množství respondentů však není možné z výsledků vyvodit větší závěry, což ovšem nebylo ani cílem práce. Můžeme pouze pozorovat chyby, kterých se respondenti dopustili, a diskutovat o jejich možné

příčině. Z výsledků je však patrné, že bylo dosaženo chyb, které jsem se v rámci nových testů snažil simulovat, a to především front-back chyb. Bohužel ale není možné z dostupných dat žádným způsobem spojit reakční čas respondenta s chybou, které se dopustil. Toho by zřejmě bylo možné dosáhnout při testování s větší skupinou respondentů, jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, nebo právě implementací výše zmíněného časového limitu pro testy. Pro příští testování bych navrhl využití větší skupiny respondentů v různých věkových kategoriích a zaměřil se na testy, ve kterých respondenti více chybovali během tohoto testování. Další otázkou je, jaký vliv mají na odpovědi sluchátka, kterými je zvuk reprodukován. V průběhu testování byla využita integrovaná sluchátka v HMD. Je možné, že by se výsledky testování při použití jiných kvalitnějších sluchátek (např. profesionálních audio headsetů) výrazně lišily.

Dle mého názoru bylo všech cílů práce dosaženo. Bohužel se ale nepodařilo plně implementovat tutoriálovou sekvenci, která by respondentům pomohla pochopit koncept a ovládání aplikace při prvním použití. Při testování na nově vytvořených testech se podařilo simulovat chyby směrového slyšení, které bude možné při následujících měřeních dále analyzovat, a na jejich základě upravit aplikaci a navrhnout testování tak, aby se chyby minimalizovaly.

Použitá literatura

- [1] PAUKNER, Philipp, Martin ROTHBUCHER a Klaus DIEPOLD. Sound Localization Performance Comparison of Different HRTF Individualization Methods [online]. 15. 04. 2014 [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1207048/744102.pdf>
- [2] HERMANN, Thomas, Andy HUNT a John G. NEUHOFF. The Sonification Handbook. Berlín: Logos Verlag, 2011. ISBN 978-3-8325-2819-5.
- [3] SUN, Liang, Xuan ZHONG a William YOST. Dynamic Binaural Sound Source Localization with Interaural Time Difference Cues: Artificial listeners. ResearchGate [online]. 2015 [cit. 2023-12-08]. Dostupné z: doi:10.1121/1.4920112
- [4] Anatomy and Physiology: Anatomical Location [online]. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/suny-ulster-ap1/chapter/practice-anatomical-location/>
- [5] How Head Tracking Can Elevate Your Spatial Audio Experience [online]. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.ceva-ip.com/ourblog/how-head-tracking-can-elevate-your-spatial-audio-experience/>
- [6] A Front-Back Confusion Metric in Horizontal Sound Localization: The FBC Score. ACM Digital Library [online]. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3385955.3407928>
- [7] LI, Song a Jürgen PEISSIG, 2020. Measurement of Head-Related Transfer Functions: A Review. Applied Sciences [online]. 10(14) [cit. 2023-12-25]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10145014
- [8] SOFA (Spatially Oriented Format for Acoustics). Sofa Conventions [online]. [cit. 2023-12-25]. Dostupné z: [https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_\(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics\)#::~:~:text=SOFA%20is%20a%20file%20format%20for%20storing%20spatially,binaural%20or%20spatial%20room%20impulse%20responses%20%28BRIRs%2C%20SRIRs%29.](https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics)#::~:~:text=SOFA%20is%20a%20file%20format%20for%20storing%20spatially,binaural%20or%20spatial%20room%20impulse%20responses%20%28BRIRs%2C%20SRIRs%29.)
- [9] General information on SOFA. Sofa Conventions [online]. [cit. 2023-12-25]. Dostupné z: https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/General_information_on_SOFA

- [10] Virtuální realita – historie a současnost. VR education [online]. [cit. 2023-12-26].
Dostupné z: <https://vreducation.cz/virtualni-realita-historie-a-soucasnost/>
- [11] SHELDON, Robert, 2022. Virtual Reality. *Techtarget* [online]. [cit. 2023-08-18].
Dostupné z: <https://www.techtargget.com/whatis/definition/virtual-reality>
- [12] 5 Types of virtual reality, 2023. *Rextheme* [online]. [cit. 2023-09-04]. Dostupné z:
<https://rextheme.com/types-of-virtual-reality/>
- [13] Virtual reality trends. *Finances online* [online]. [cit. 2023-08-18]. Dostupné z:
<https://financesonline.com/virtual-reality-trends/>
- [14] Head-mounted Displays. *Virtual reality society* [online]. [cit. 2023-08-18]. Dostupné z:
<https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-gear/head-mounted-displays/>
- [15] How VR positional tracking systems work, 2019. *UploadVR* [online]. [cit. 2023-09-04].
Dostupné z: <https://www.uploadvr.com/how-vr-tracking-works/>
- [16] Share of Steam users with a virtual reality. *Statista* [online]. [cit. 2023-08-18].
Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/265018/proportion-of-directx-versions-on-the-platform-steam/>
- [17] Unity vs Unreal. *Xbootcamp* [online]. [cit.2023-08-18]. Dostupné z:
<https://xrbootcamp.com/unity-vs-unreal-engine-for-xr-development/#headline-353-1079>
- [18] VIVE Pro Eye Specs & User Guide. VIVE DEVELOPERS [online]. [cit. 2023-12-26].
Dostupné z: <https://developer.vive.com/resources/hardware-guides/vive-pro-eye-specs-user-guide/>

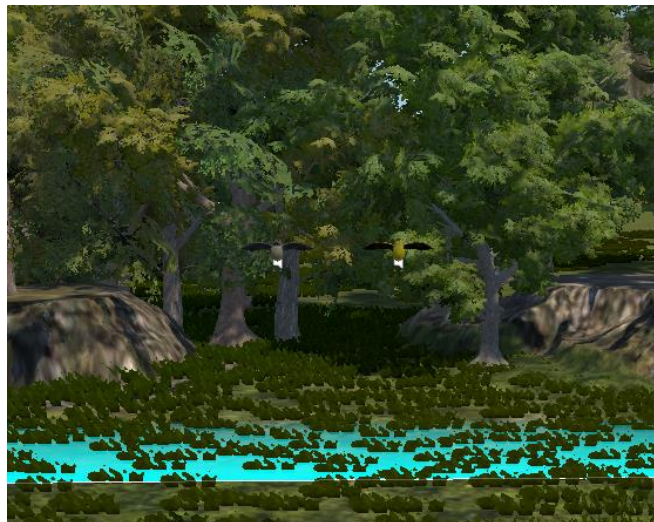
Příloha A – Struktura elektronické přílohy

Elektronická příloha bakalářské práce obsahuje následující složky ve formátu ZIP

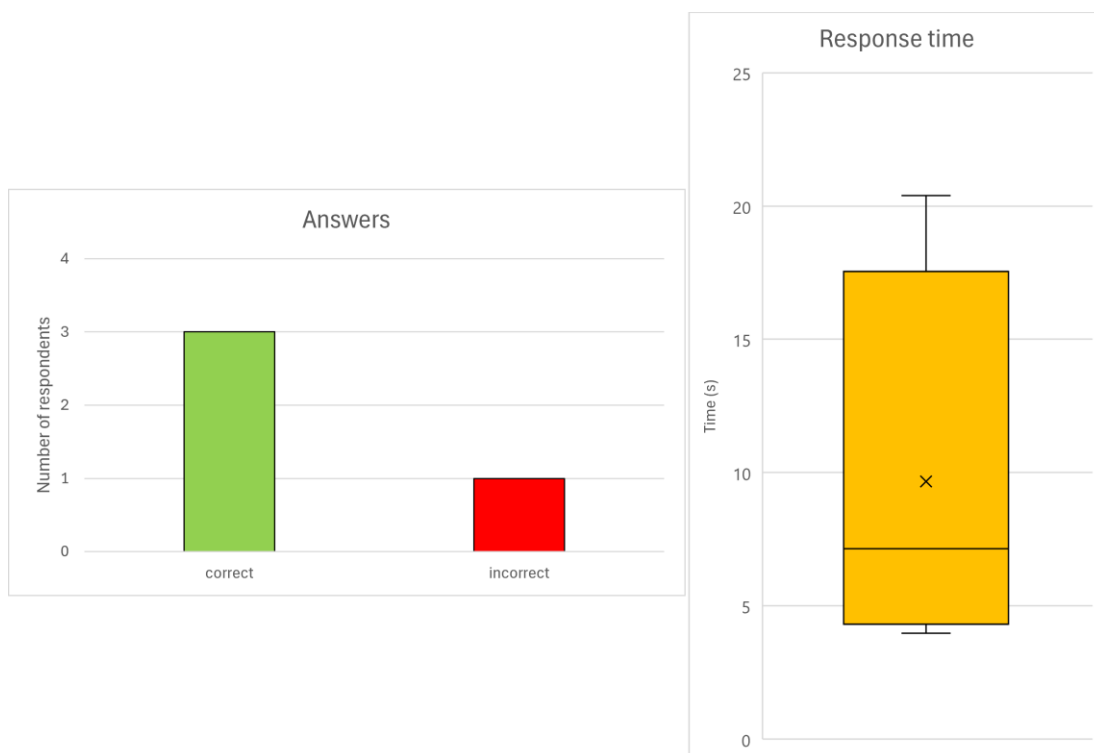
1. **Unity_scripts** – složka obsahující všechny scripty použité pro běh aplikace v Unity; včetně komentáře u modifikovaných či nově vytvořených scriptů
 - TestCaseCount.cs – script pro ovládání nově vytvořeného input fieldu, které slouží pro zadání požadovaného počtu testů v sekvenci
 - TestFlowHandler.cs – script pro ovládání samotné testovací sekvence; v tomto scriptu je nově implementována randomizace
 - TutorialControl.cs – nový script pro ovládání funkce tlačítek pro spuštění nebo přeskočení tutoriálové sekvence
 - TutorialFlowHandler.cs – script pro ovládání tutoriálové sekvence
2. **Test_results** – složka s textovými soubory, které obsahují výsledky jednotlivých testů
3. **Results_evaluated** – složka obsahující xlsx soubor s vyhodnocením a vizualizací jednotlivých testů

Příloha B – Vizualizace testů a jejich vyhodnocení

B.1 Test 01

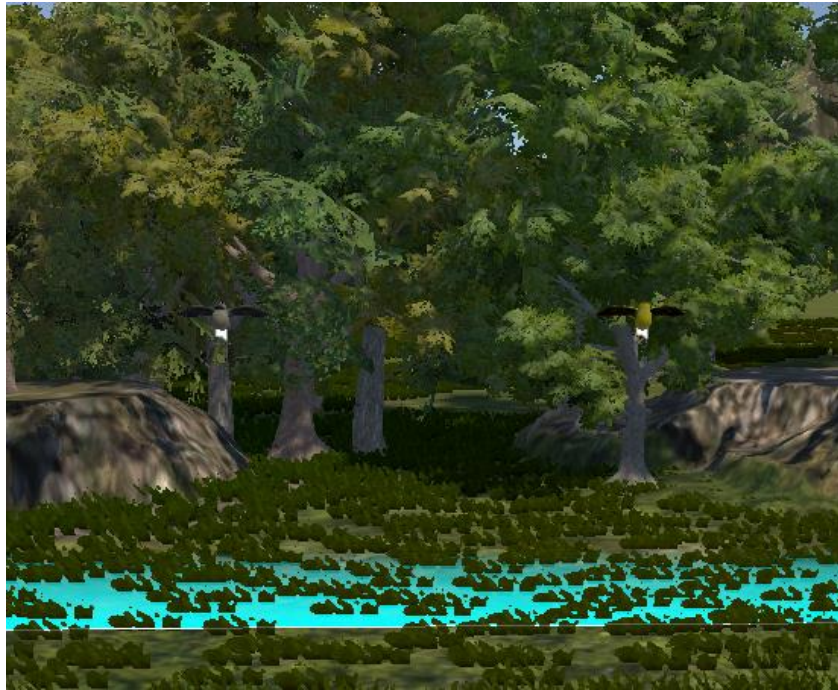


Obrázek 32: Struktura testu 01 v Unity



Obrázek 33: Vizualizace výsledků testu 01

B.2 Test 02

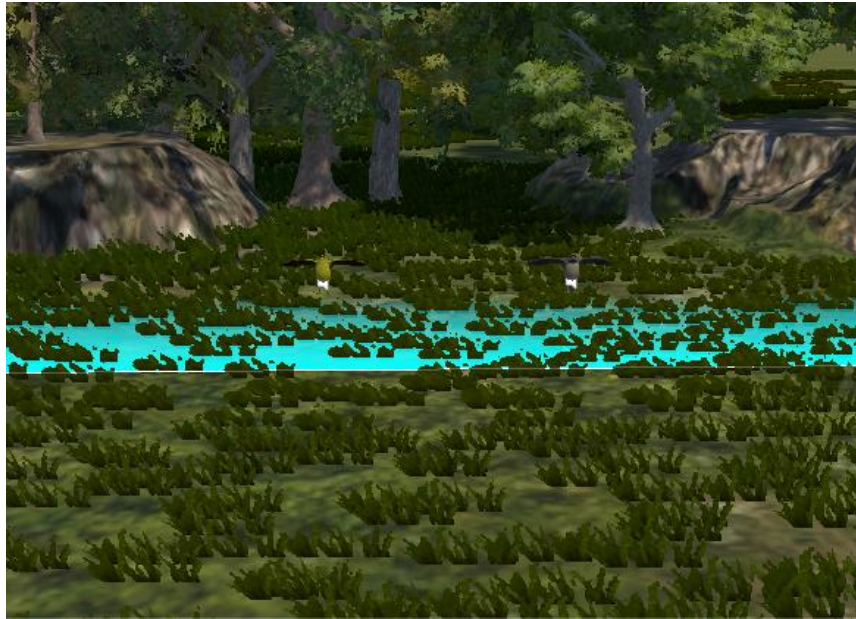


Obrázek 34: Struktura testu 02 v Unity

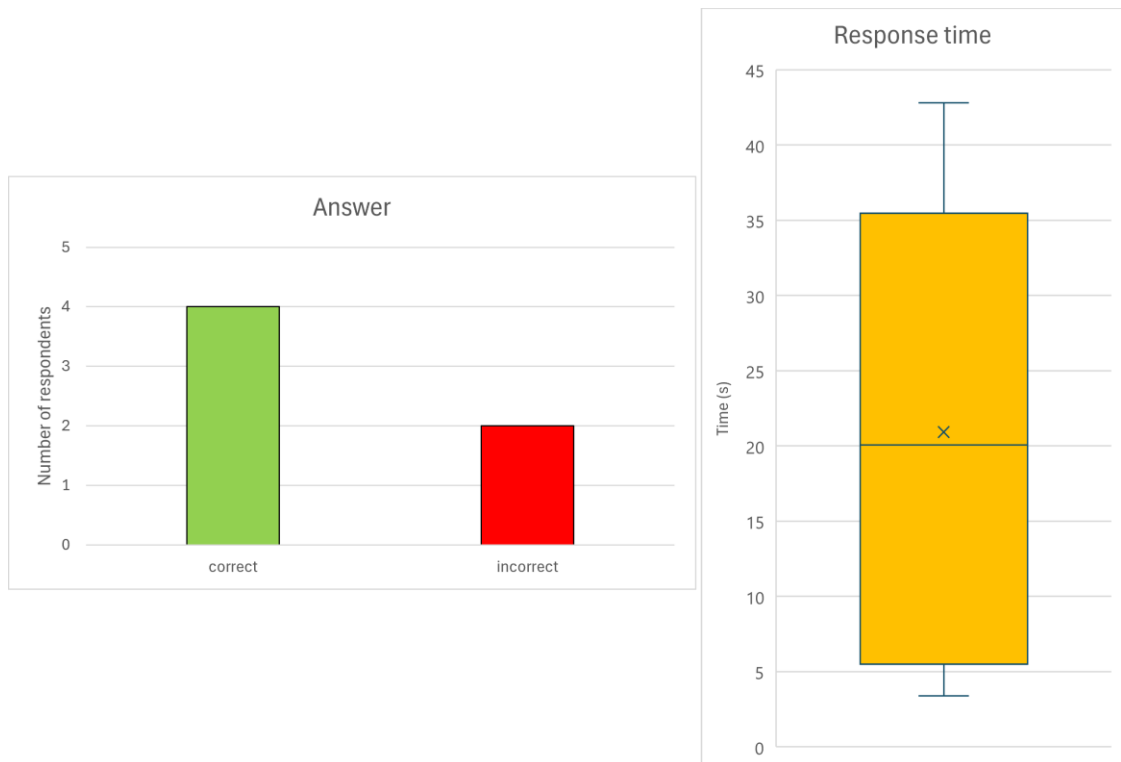


Obrázek 35: Vizualizace výsledků testu 02

B.3 Test 03

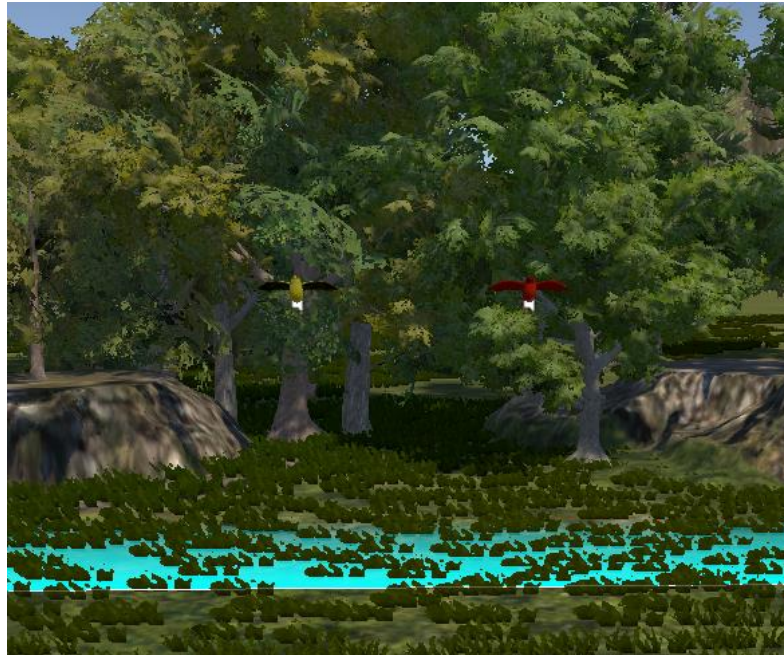


Obrázek 36: Struktura testu 03 v Unity

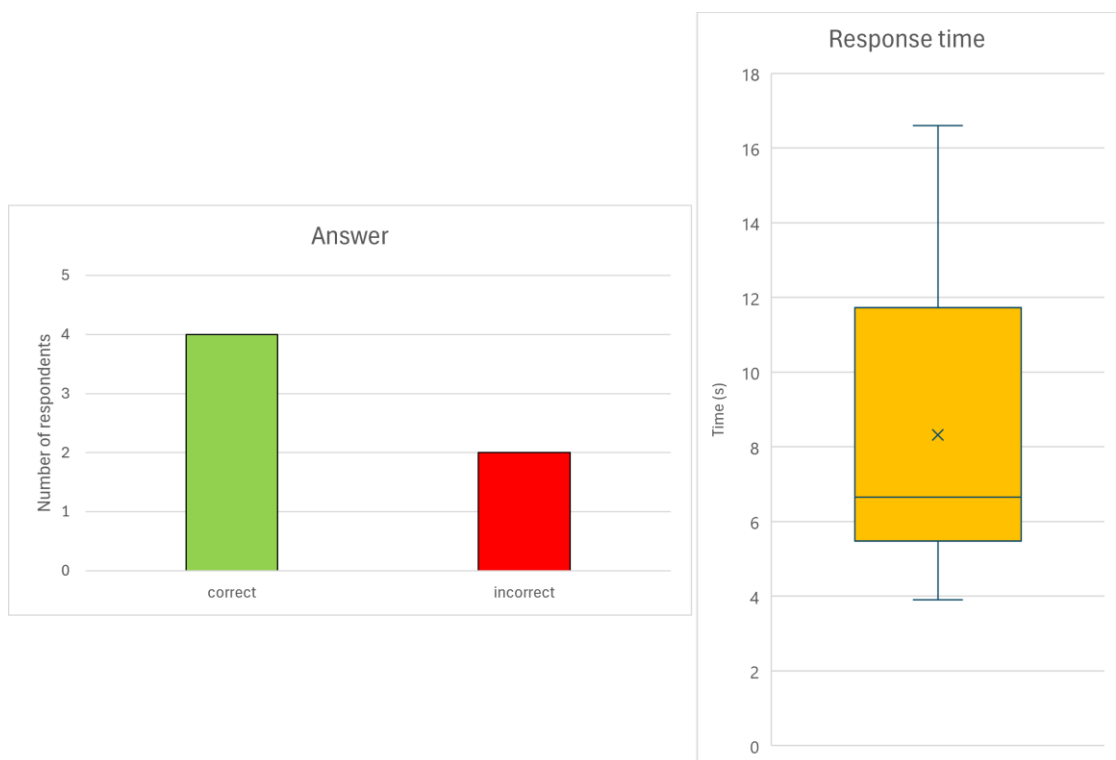


Obrázek 37: Vizualizace výsledků testu 03

B.4 Test 04

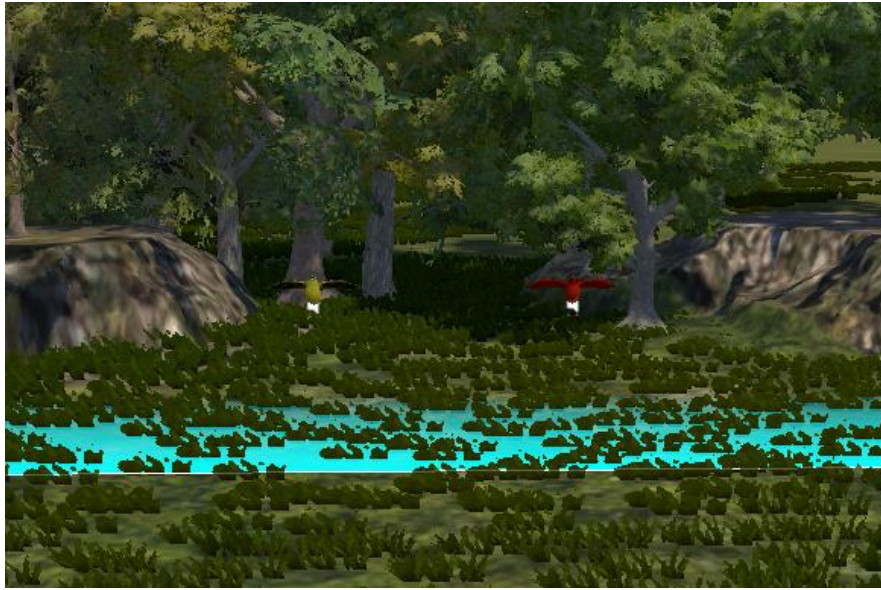


Obrázek 38: Struktura testu 04 v Unity

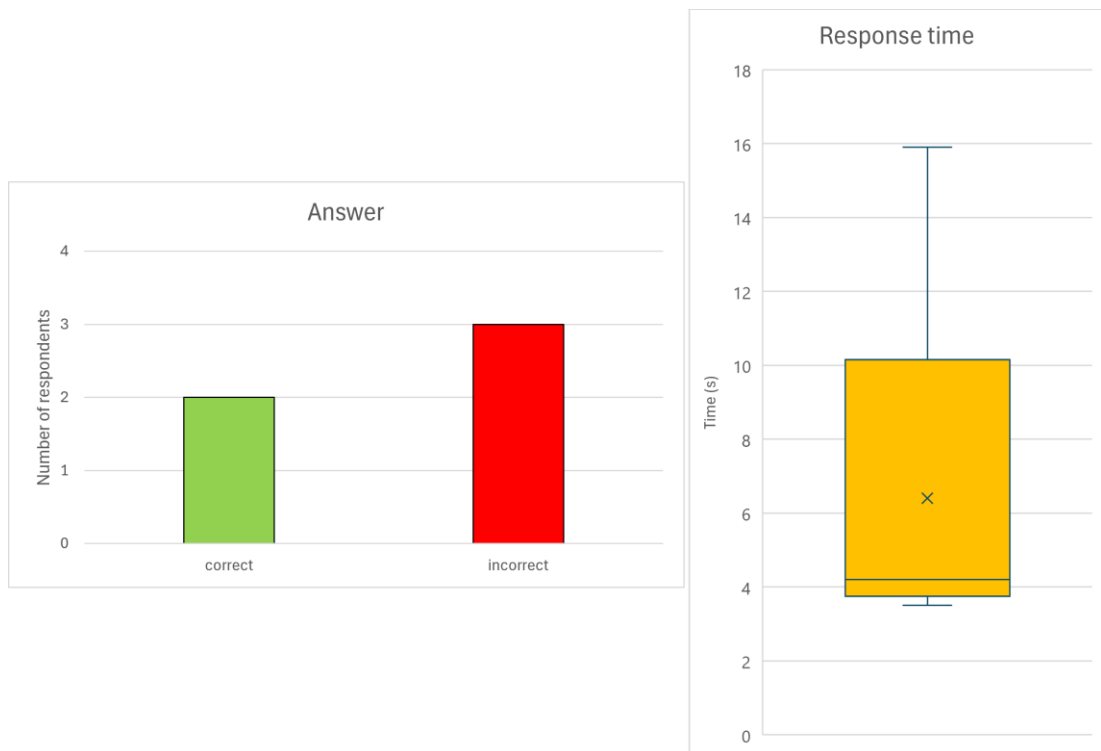


Obrázek 39: Vizualizace výsledků testu 04

B.5 Test 05



Obrázek 40: Struktura testu 05 v Unity

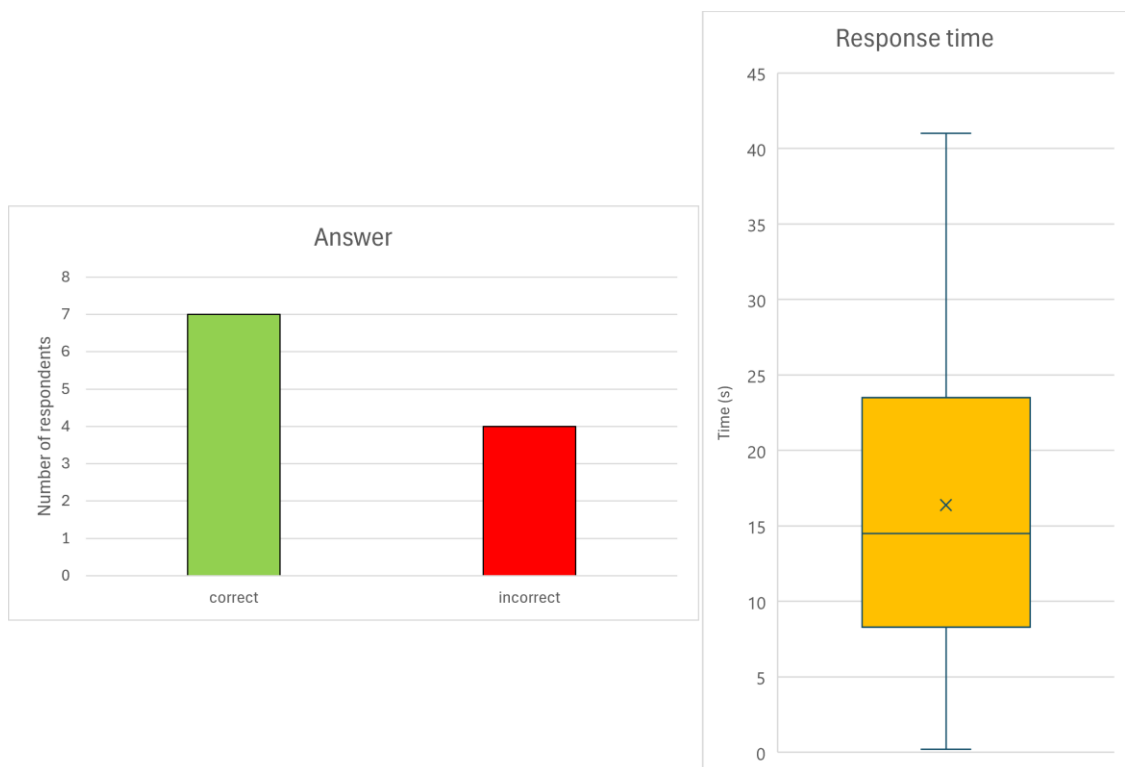


Obrázek 41: Vizualizace výsledků testu 05

B.6 Test 06



Obrázek 42: Struktura testu 06 v Unity

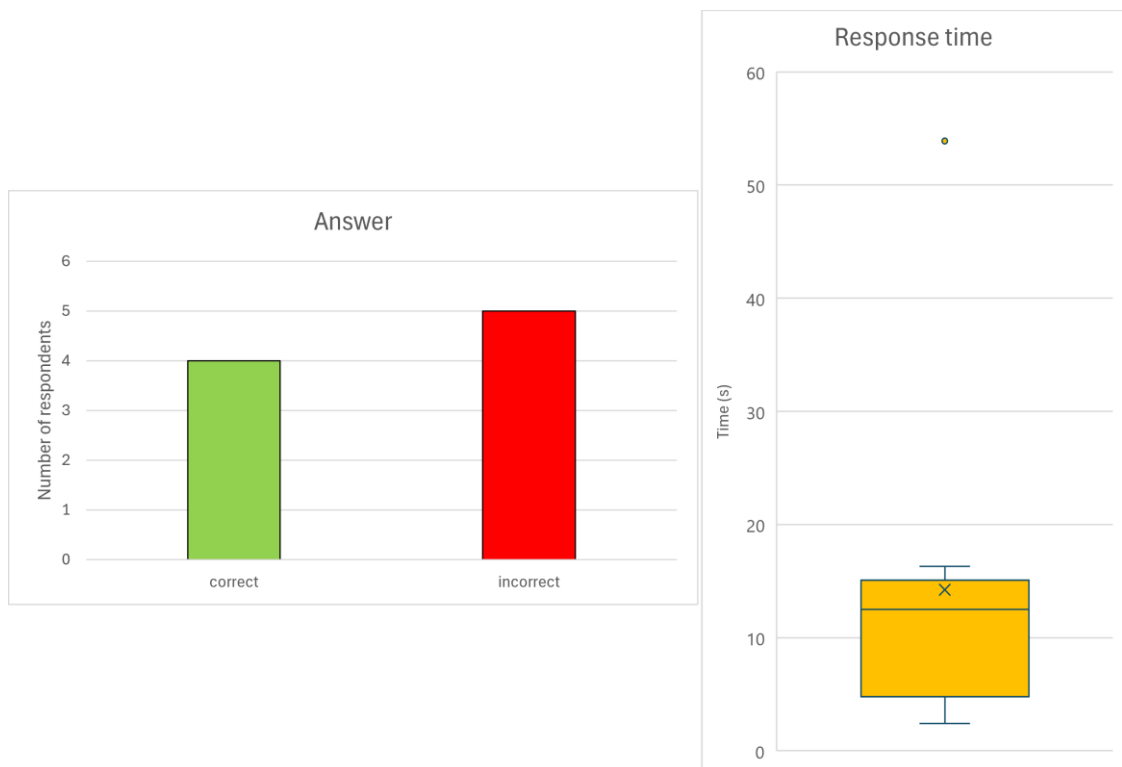


Obrázek 43: Vizualizace výsledků testu 06

B.7 Test 07



Obrázek 44: Struktura testu 07 v Unity

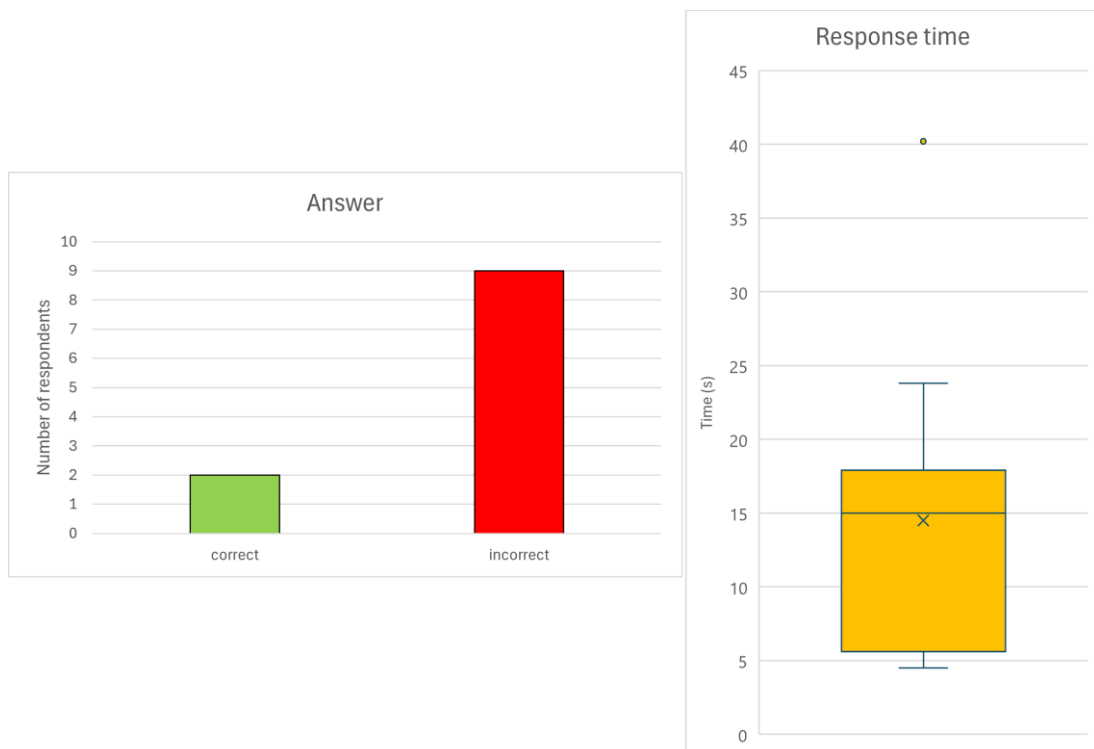


Obrázek 45: Vizualizace výsledků testu 07

B.8 Test 08



Obrázek 46: Struktura testu 08 v Unity



Obrázek 47: Vizualizace výsledků testu 08

B.9 Test 09



Obrázek 48: Struktura testu 09 v Unity



Obrázek 49: Vizualizace výsledků testu 09

B.10 Test 10



Obrázek 50: Struktura testu 10 v Unity

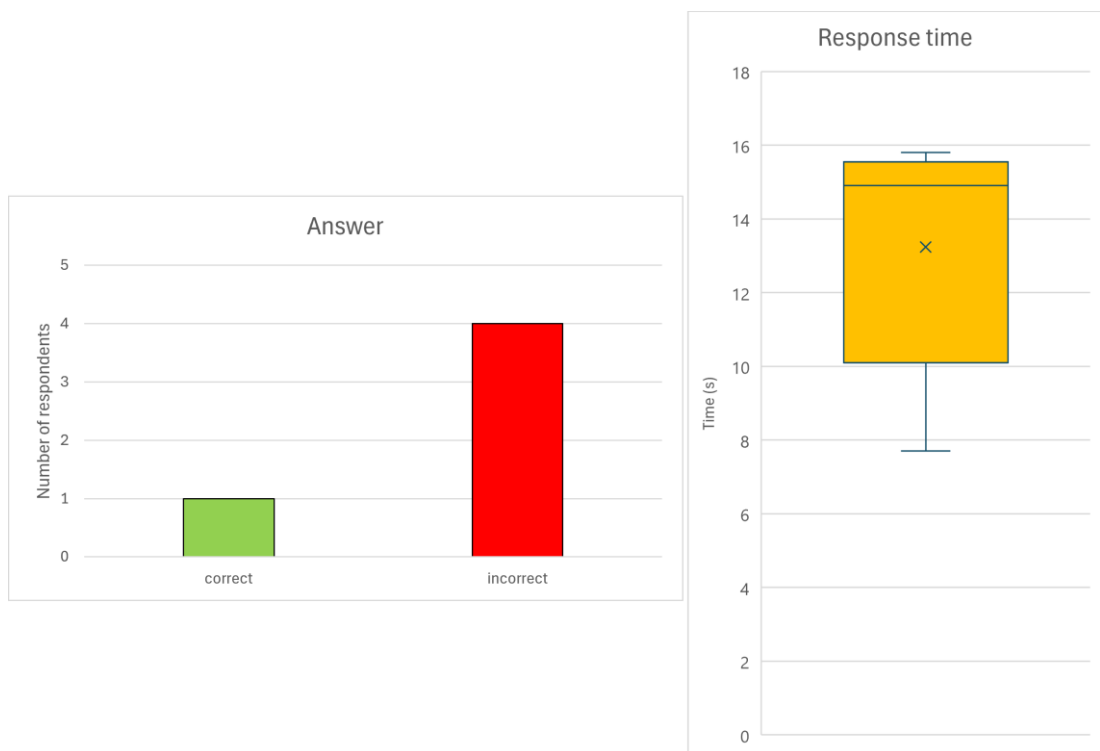


Obrázek 51: Vizualizace výsledků testu 10

B.11 Test 11

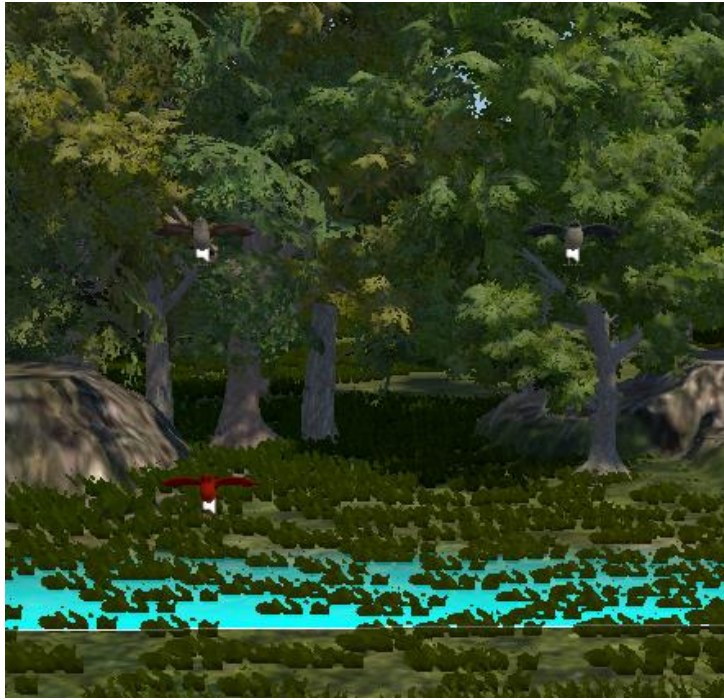


Obrázek 52: Struktura testu 11 v Unity

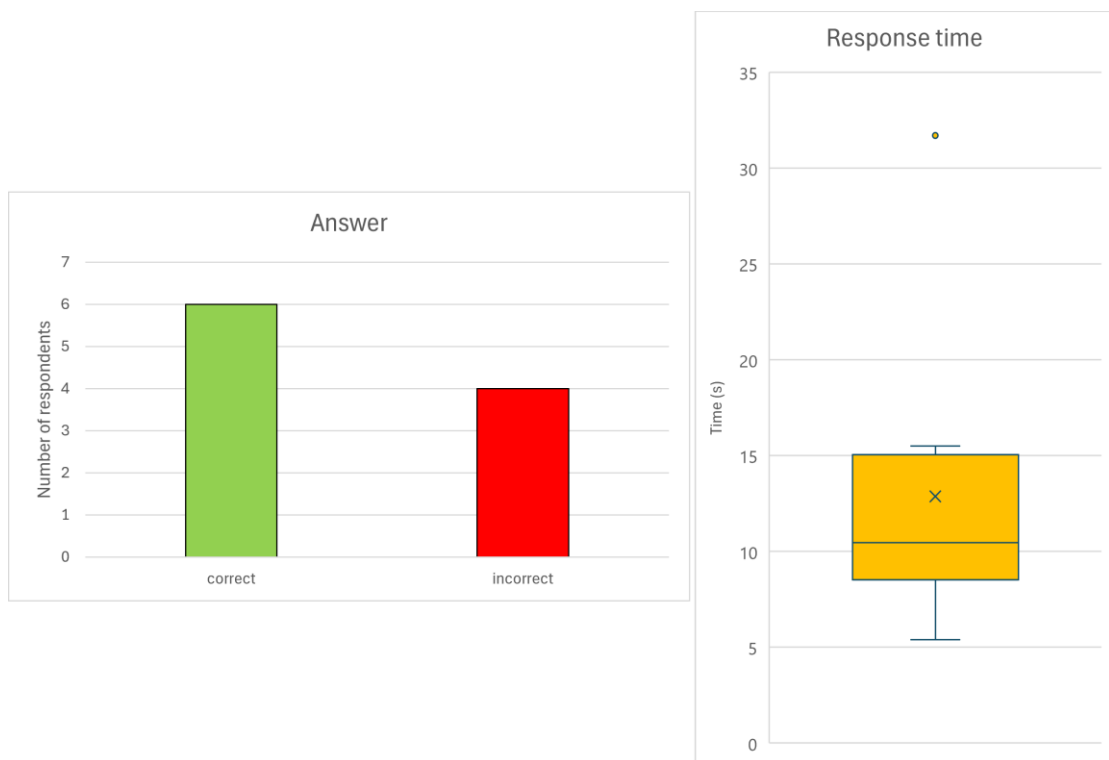


Obrázek 53: Vizualizace výsledků testu 11

B.12 Test 12



Obrázek 54: Struktura testu 12 v Unity

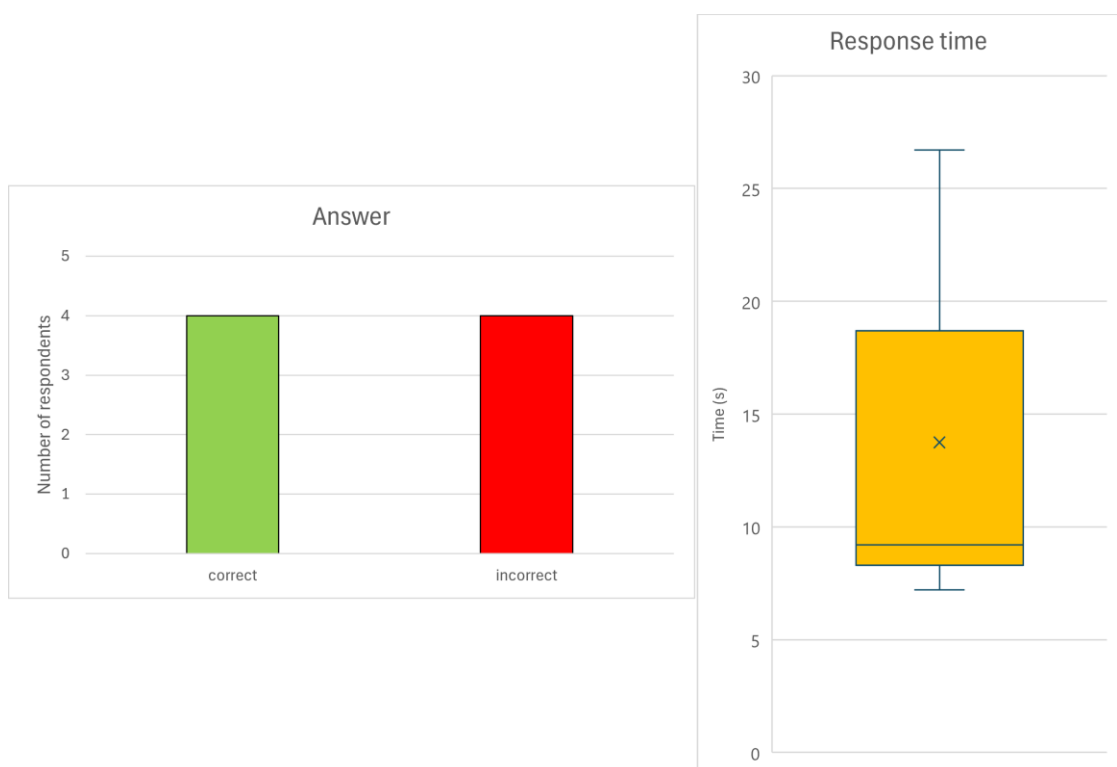


Obrázek 55: Vizualizace výsledků testu 12

B.13 Test 13

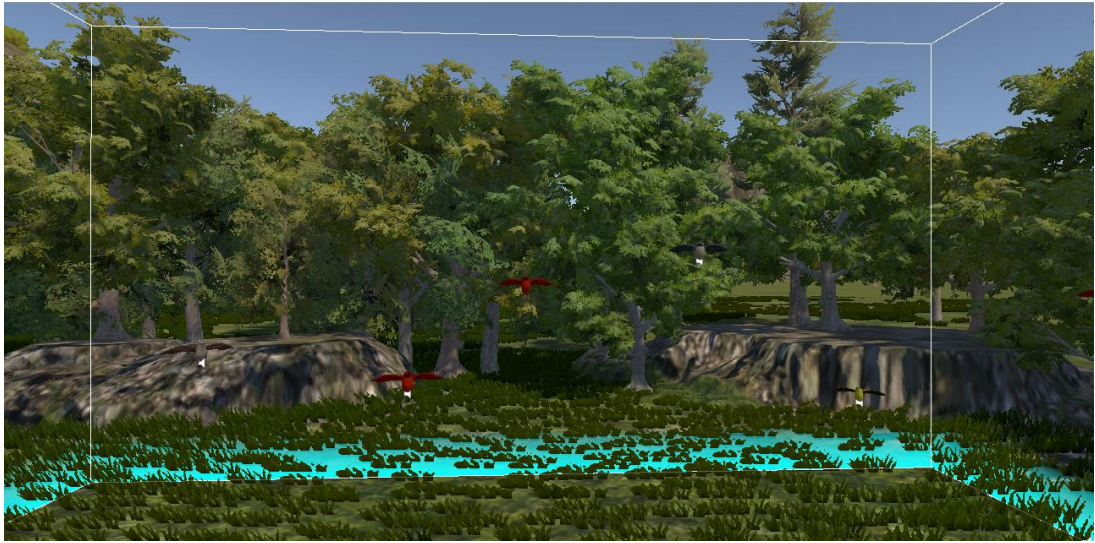


Obrázek 56: Struktura testu 13 v Unity



Obrázek 57: Vizualizace výsledků testu 13

B.14 Test 14

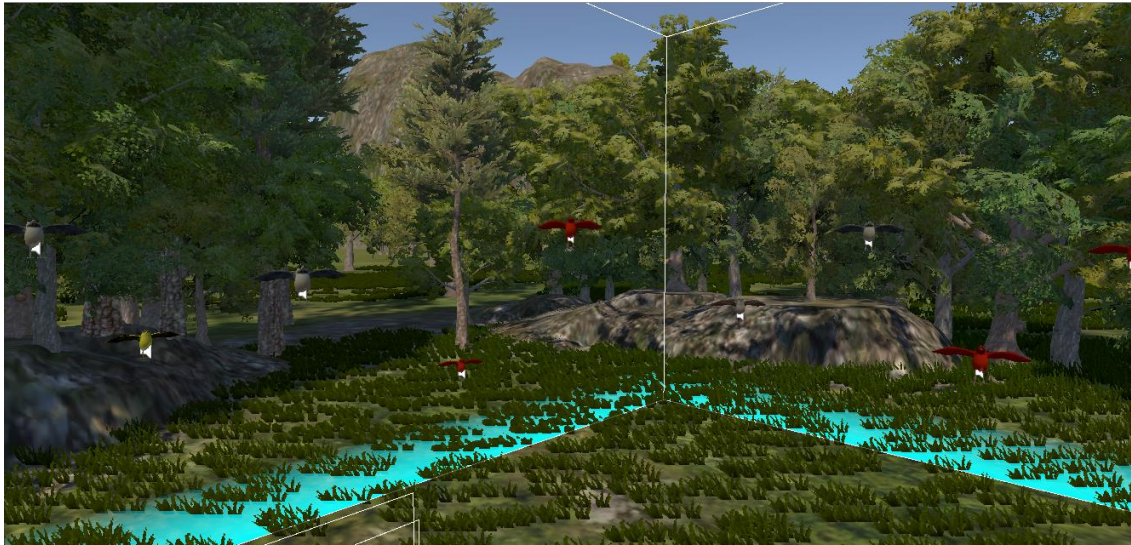


Obrázek 58: Struktura testu 14 v Unity



Obrázek 59: Vizualizace výsledků testu 14

B.15 Test 15



Obrázek 60: Struktura testu 15 v Unity

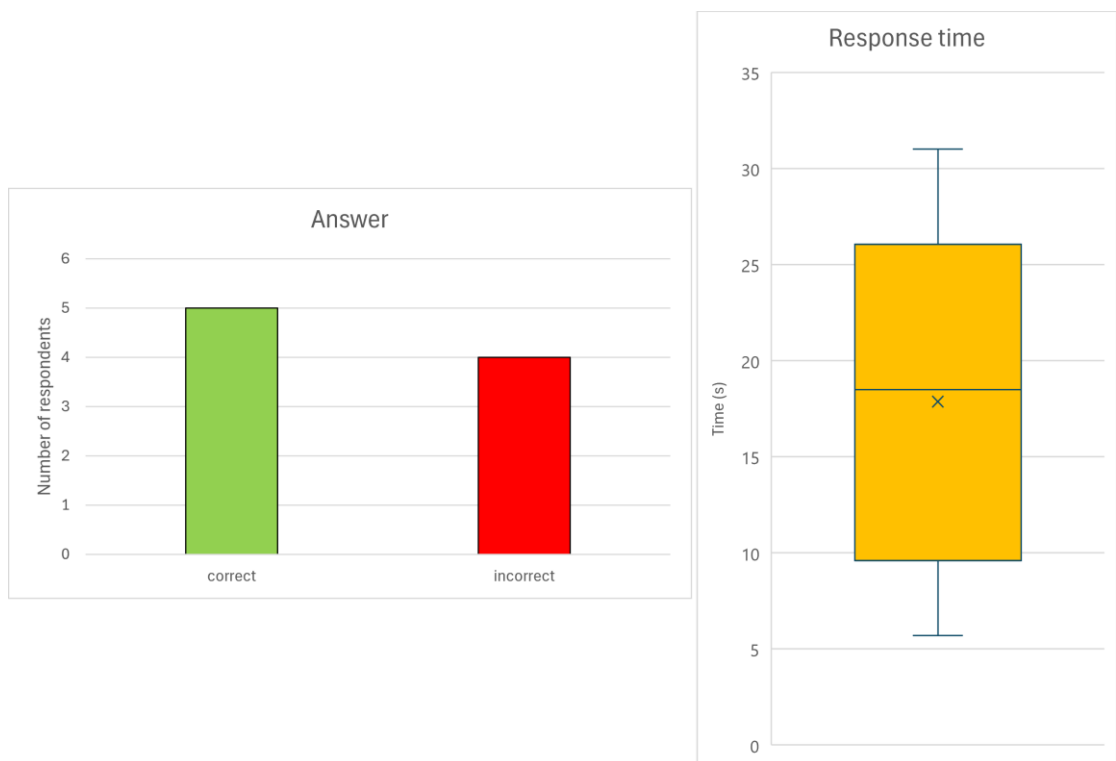


Obrázek 61: Vizualizace výsledků testu 15

B.16 Test 16



Obrázek 62: Struktura testu 16 v Unity



Obrázek 63: Vizualizace výsledků testu 16

B.17 Příklady distraktorů



Obrázek 64: Distraktor 1 - Veverka rotující kolem uživatele



Obrázek 65: Distraktor 2 - Želva rotující kolem uživatele