

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

## Vliv HRTF na polohu zdroje zvuku ve VR

**Bc. Martin Novotný**

Vedoucí práce: Ing. František Rund, Ph.D.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **466298**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv HRTF na polohu zdroje zvuku ve VR**

Název diplomové práce anglicky:

**Sound Localization Dependency on HRTF in VR systems**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s problematikou lokalizace zdroje zvuku člověkem a zvuku ve virtuální realitě (VR). Navrhněte, proveďte a vyhodnoťte experiment zkoumající vliv změny HRTF (Head Related Transfer Function) na vnímání polohy zvuku ve virtuálním akustickém prostoru. Součástí práce je měření HRTF skupiny posluchačů a poslechové testy lokalizace zvuku ve VR na této skupině. Pro tento účel inovujte a propojte stávající pracoviště pro měření a testování HRTF.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŠUPKA, Ondřej. Sestava pro měření HRTF. Praha, 2016 [cit. 2021-09-02]. Diplomová práce. ČVUT FEL.
- [2] JAROLÍMEK, Viktor. Virtual Acoustic Space Test using HMD [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-09-02]. Diplomová práce. FEE CTU.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. František Rund, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **11.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

\_\_\_\_\_  
Ing. František Rund, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Stanislav Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Rundovi, Ph.D. za odborné vedení, hodnotné připomínky, rychlé řešení případných problémů a jeho drahocenný čas. Zároveň bych rád poděkoval Vojtěchu Mičínovi za všechny připomínky k pracovišti VR, které v rámci diplomové práce vzniklo a které díky jeho postřehům může být univerzálnější.

Realizace diplomové práce byla podpořena z grantu SGS číslo SGS20/180/OHK3/3T/13.

## 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, 20. května 2022

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá kvalitou prostorové lokalizace zdrojů zvuku ve VR systémech v závislosti na různých HRTF. Čtenář je v práci nejprve stručně seznámen se základní podstatou směrového slyšení, měření HRTF a využití těchto poznatků při tvorbě VR obsahu. Následně jsou v práci popsána 2 experimentální pracoviště vzniklá na katedře radioelektroniky FEL ČVUT v Praze a jejich vzájemné propojení za účelem sledování vlivu HRTF na polohu zdroje zvuku ve virtuálním prostředí. V poslední části práce je pak nastíněn návrh a průběh subjektivního měření HRTF a prostorové lokalizace zvukových zdrojů a jsou diskutovány jeho výsledky a důsledky pro další práci ve VR systémech.

**Klíčová slova:** zvuk, HRTF, VR systémy, VAS, Unity

**Vedoucí práce:** Ing. František Rund, Ph.D.  
Katedra radioelektroniky  
FEL, ČVUT v Praze

## Abstract

Master thesis deals with sound localisation accuracy in VR systems based on different HRTFs. Firstly, the thesis summarises key concepts of spatial hearing, HRTF measurement principles and VR system application design (with respect to spatial audio). Then 2 experimental workstations arose on the Department of Radioelectronics, FEE CTU are presented to reader. The emphasis is mainly on their interconnection in order to HRTF measurement for VAS. Lastly the thesis deals with subjective test design in order to demonstrate the impact of HRTF on spatial hearing in VAS. The results of these tests are briefly discussed and possible conclusions for VR systems research are outlined.

**Keywords:** sound, HRTF, VR systems, VAS, Unity

**Title translation:** Sound Localization Dependency on HRTF in VR systems

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
<b>1 Teoretický rozbor problematiky</b>	<b>3</b>	<b>Literatura</b>	<b>57</b>
1.1 Podstata směrového slyšení . . . . .	3	<b>A Struktura elektronické přílohy</b>	<b>63</b>
1.1.1 Definice souřadného systému .	3	<b>B Vizualizace testů a jejich</b>	
1.1.2 Subjektivní určování polohy		<b>výsledků</b>	<b>65</b>
zdroje zvuku . . . . .	4	B.1 Test 01 . . . . .	65
1.1.3 Přesnost lokalizace zvukových		B.2 Test 02 . . . . .	66
zdrojů . . . . .	6	B.3 Test 03 . . . . .	67
1.2 HRTF . . . . .	8	B.4 Test 04 . . . . .	68
1.2.1 Měření a vyhodnocení HRTF	10	B.5 Test 05 . . . . .	69
1.2.2 Problémy		B.6 Test 06 . . . . .	70
s neindividualizovanými HRTF . .	12	B.7 Test 07 . . . . .	71
1.2.3 SOFA . . . . .	12	B.8 Test 08 . . . . .	72
1.3 VR systémy . . . . .	15	B.9 Test 09 . . . . .	73
1.3.1 Propojení reálného		B.10 Test 10 . . . . .	74
a virtuálního světa . . . . .	16	B.11 Test 11 . . . . .	75
1.3.2 Tvorba a distribuce VR obsahu	17	B.12 Test 12 . . . . .	76
1.3.3 VAS . . . . .	19	B.13 Test 13 . . . . .	77
1.3.4 HMD . . . . .	20	B.14 Test 14 . . . . .	78
<b>2 Pracoviště pro realizaci diplomové</b>			
<b>práce</b>	<b>23</b>		
2.1 Pracoviště pro měření HRTF . . .	23		
2.1.1 Stručný popis pracoviště . . . .	23		
2.1.2 Úpravy pracoviště při realizaci			
diplomové práce . . . . .	26		
2.2 Pracoviště pro vyhodnocování			
polohy zdroje zvuku ve VAS . . . . .	28		
2.2.1 Stručný popis pracoviště . . . .	28		
2.2.2 Úpravy pracoviště při realizaci			
diplomové práce . . . . .	30		
2.3 Propojení mezi jednotlivými			
pracovišti . . . . .	35		
<b>3 Návrh měření a hypotéz</b>	<b>37</b>		
3.1 Výběr testů a generické HRTF .	37		
3.2 Stanovení hypotéz a testovací			
množiny . . . . .	38		
<b>4 Realizace a vyhodnocení</b>			
<b>realizovaných měření</b>	<b>41</b>		
4.1 Realizace měření . . . . .	41		
4.2 Naměřená data a způsoby jejich			
vyhodnocení . . . . .	43		
4.2.1 Struktura dat pro statistické			
zpracování . . . . .	43		
4.2.2 Zpracování naměřených dat .	44		
4.2.3 Stručný rozbor výsledků . . . .	45		

## Obrázky

1.1 Srovnání Kartézského a sférického souřadného systému včetně označení umístění posluchače vůči souřadným osám . . . . .	4
1.2 Základní roviny rozdělující lidské tělo . . . . .	5
1.3 Srovnání významu metrik ITD a ILD . . . . .	6
1.4 Demonstrace spektrálních vlastností lidského ucha . . . . .	7
1.5 Demonstrace kuželu zmatení . . . . .	8
1.6 Ukázka HRTF pro vybraný azimut $\varphi$ a různé elevace $\theta$ u umělé hlavy Neumann KU100 . . . . .	9
1.7 Ukázka vizualizace HRTF ve formě color plotu pro vybranou elevaci $\theta$ a všechny dostupné azimuty $\varphi$ u reálného respondenta . . . . .	9
1.8 Blokové schéma komplexního laboratorního systému pro měření HRIR . . . . .	11
1.9 Obecná struktura souborového formátu netCFD . . . . .	13
1.10 Naznačení významu jednotlivých objektů definovaných v SOFA standardu . . . . .	14
1.11 Infografika shrnující základní oblasti použití VR systémů . . . . .	16
1.12 Ukázka nastavení herního prostoru v reálném světě . . . . .	17
1.13 Odhadovaný podíl VR systémů v jednotlivých odvětvích v roce 2025 . . . . .	18
1.14 Struktura vývoje aplikace pro VR systémy s využitím pluginu OpenXR . . . . .	18
1.15 Vizualizace HRTF jako LTI systému . . . . .	19
1.16 Srovnání jednotlivých způsobů interpolace . . . . .	20
1.17 Přehled výrobců HMD používaných na platformě Steam v roce 2020 . . . . .	21
2.1 Bloková struktura pracoviště pro měření HRTF . . . . .	24
2.2 Reálný vzhled pracoviště pro měření HRTF v učebně 303 . . . . .	25
2.3 Vzhled GUI programů pro ovládání a analýzu dat na pracovišti měření HRTF . . . . .	27
2.4 Stav hřídele se řemenicemi po proběhnutí všech měření . . . . .	28
2.5 Základní vzhled aplikace pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS . . . . .	29
2.6 Reálný vzhled pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS v místnosti 542 . . . . .	31
2.7 Detail sestavené pracovní stanice pro laboratoř VR systémů s jednotlivými komponenty . . . . .	34
2.8 Doporučené rozmístění bazových stanic dle manuálu HMD HTC VIVE Pro eye . . . . .	34
2.9 Srovnání spektrogramů a PSD dostupných zvukových zdrojů v testovací aplikaci . . . . .	35
4.1 Demografická struktura respondentů . . . . .	41
4.2 Uchycení mikrofonů na uši respondentů při měření HRTF . . . . .	42
4.3 Ukázka průběhu vlastního testování na pracovišti pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS . . . . .	43
4.4 Vizualizace celkového shrnutí . . . . .	54
B.1 Test 01 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	65
B.2 Test 02 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	66
B.3 Test 03 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	67
B.4 Test 04 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	68
B.5 Test 05 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	69
B.6 Test 06 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	70
B.7 Test 07 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	71
B.8 Test 08 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	72



B.9 Test 09 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	73
B.10 Test 10 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	74
B.11 Test 11 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	75
B.12 Test 12 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	76
B.13 Test 13 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	77
B.14 Test 14 – struktura scény a vizualizace výsledků . . . . .	78

## Tabulky

2.1 Přehled parametrů vybraného HMD HTC VIVE Pro Eye . . . . .	32
2.2 Přehled minimálních systémových požadavků HMD HTC VIVE Pro Eye . . . . .	32
2.3 Srovnání parametrů dostupných GPU . . . . .	33
2.4 Srovnání dostupných PSU . . . . .	33
3.1 Přehled měřicích bodů při měření vlastní HRTF testovaných subjektů	38
3.2 Přehled nulových hypotéz a využitých statistických testů . . . . .	39
4.1 Test 01 – hodnoty statistik . . . . .	46
4.2 Test 02 – hodnoty statistik . . . . .	46
4.3 Test 03 – hodnoty statistik . . . . .	47
4.4 Test 04 – hodnoty statistik . . . . .	47
4.5 Test 05 – hodnoty statistik . . . . .	48
4.6 Test 06 – hodnoty statistik . . . . .	48
4.7 Test 07 – hodnoty statistik . . . . .	49
4.8 Test 08 – hodnoty statistik . . . . .	50
4.9 Test 09 – hodnoty statistik . . . . .	50
4.10 Test 10 – hodnoty statistik . . . . .	51
4.11 Test 11 – hodnoty statistik . . . . .	51
4.12 Test 12 – hodnoty statistik . . . . .	52
4.13 Test 13 – hodnoty statistik . . . . .	53
4.14 Test 14 – hodnoty statistik . . . . .	53
4.15 Celkové shrnutí – hodnoty statistik . . . . .	54





## Úvod

V rámci své diplomové práce se budu zabývat směrovým slyšením a využitím jeho konceptů ve VR (*Virtual Reality*) systémech. Směrové slyšení je jev, který nám umožňuje s využitím signálů z obou uší a našich zkušeností lokalizovat jednotlivé zvukové zdroje. Jedná se o velmi komplexní jev, který závisí na mnoha různých faktorech (např. velikost hlavy, tvar a velikost ušního boltce aj.), díky čemuž je proces směrového slyšení pro každého jedince individuální.

Zásadní funkcí pro získání individualizovaných informací o procesu směrového slyšení je HRTF (*Head Related Transfer Function*), což je funkce, která, zjednodušeně řečeno, uchovává informace o tom, jakým způsobem je signál ze zdroje upraven (frekvenční filtrace, časové zpoždění aj.) předtím, než je zpracován v HAS (*Human Auditory System*). Tato funkce má velké využití v již zmíněných VR systémech, neboť je možné s její pomocí velmi efektivně simulovat polohu zvukového zdroje, a to i přes poslech zvuku pomocí sluchátek. Detailní měření HRTF je však pro měřené osoby velmi náročné a zdouhavé. Je proto nutné zjistit, zda se tato měření vůbec vyplatí realizovat, a zda nestačí pouze použít generickou HRTF, která je změřená např. pro umělou hlavu. A to je také cíl mé diplomové práce – naměřit skupině respondentů individuální HRTF a následně s pomocí poslechových testů ve VAS zjistit, zda je možné pozorovat nějaké statisticky významné rozdíly mezi reakcemi respondentů při realizaci poslechového testu s generickou HRTF a individuální HRTF.

Předložená diplomová práce je rozdělena do 4 kapitol. V kapitole 1 jsou čtenáři seznámeni se stručnou teorií směrového slyšení a tvorbou obsahu pro VR systémy. Kapitola 2 pojednává o pracovištích katedry radioelektroniky FEL ČVUT, která byla využita a modifikována při realizaci subjektivních testů v rámci diplomové práce. Kapitola 3 popisuje návrh celého měření včetně formulace nulových hypotéz. Kapitola 4 se pak zabývá vlastní realizací měření, zpracováním a zhodnocením získaných dat.



# Kapitola 1

## Teoretický rozbor problematiky

### 1.1 Podstata směrového slyšení

Jak již bylo řečeno v úvodu práce, zásadní funkce, která obsahuje individualizované informace o směrovém slyšení je HRTF. Tato funkce je různá pro různé úhly a vzdálenosti, proto je pro přehlednost nejprve nutné zadefinovat příslušný souřadný systém tak, aby byla terminologie v průběhu celé práce jednotná.

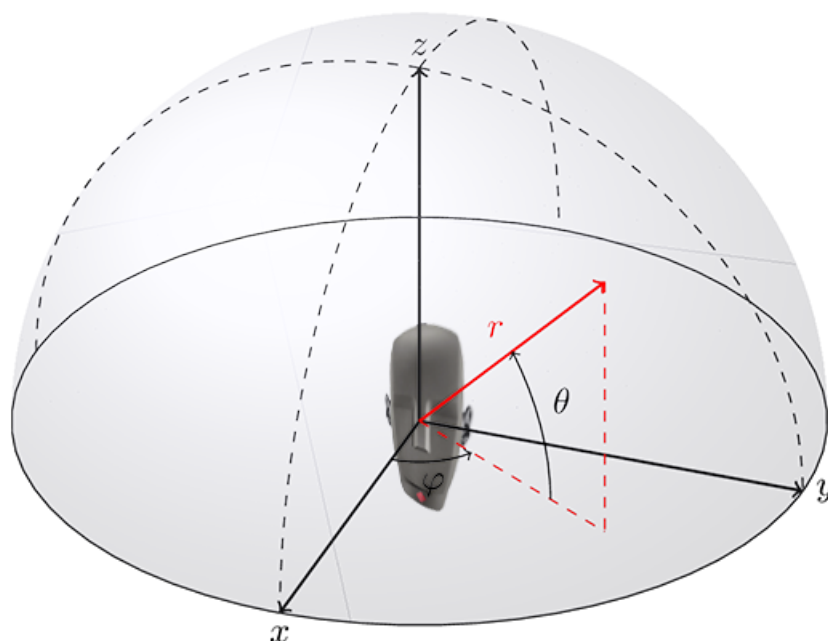
#### 1.1.1 Definice souřadného systému

Každý zvukový zdroj má jednoznačně určenou svoji pozici. Tato pozice je ve 3D prostoru dána jednoznačnou kombinací 3 základních souřadnic, které se liší dle použitého souřadného systému. Běžně se můžeme v akustice setkat se dvěma základními typy souřadných systémů

- **Kartézský souřadný systém** (*cartesian*) – pozice je definována uspořádanou trojicí  $(x, y, z)$ , kde jednotlivé souřadnice značí vzdálenost od počátku dané souřadné osy,
- **Sférický souřadný systém** (*spherical*) – pozice je definována uspořádanou trojicí  $(\varphi, \theta, r)$ , kde  $\varphi$  značí úhel v horizontální rovině označovaný jako azimut ( $\varphi \in [0^\circ; 360^\circ]$ ),  $\theta$  značí úhel v horizontální rovině označovaný jako elevace ( $\theta \in [-90^\circ; 90^\circ]$ ) a  $r$  značí vzdálenost od zdroje zvuku.

Srovnání jednotlivých souřadných systémů demonstruje obr. 1.1. Pro jednotnost v rámci práce je nutné hned na začátku zadefinovat umístění posluchače vůči jednotlivým souřadným osám. Abych byl při popisu jednotný s definicí v rámci standardu SOFA (viz 1.2.3 popř. [1] resp. [2]), je umístění následující (pro vizuální referenci viz obr. 1.1)

- **Kartézský souřadný systém** – kladný směr osy  $x$  udává směr pohledu posluchače, kladný směr osy  $y$  protíná levé ucho posluchače, kladný směr osy  $z$  směřuje nad posluchače,



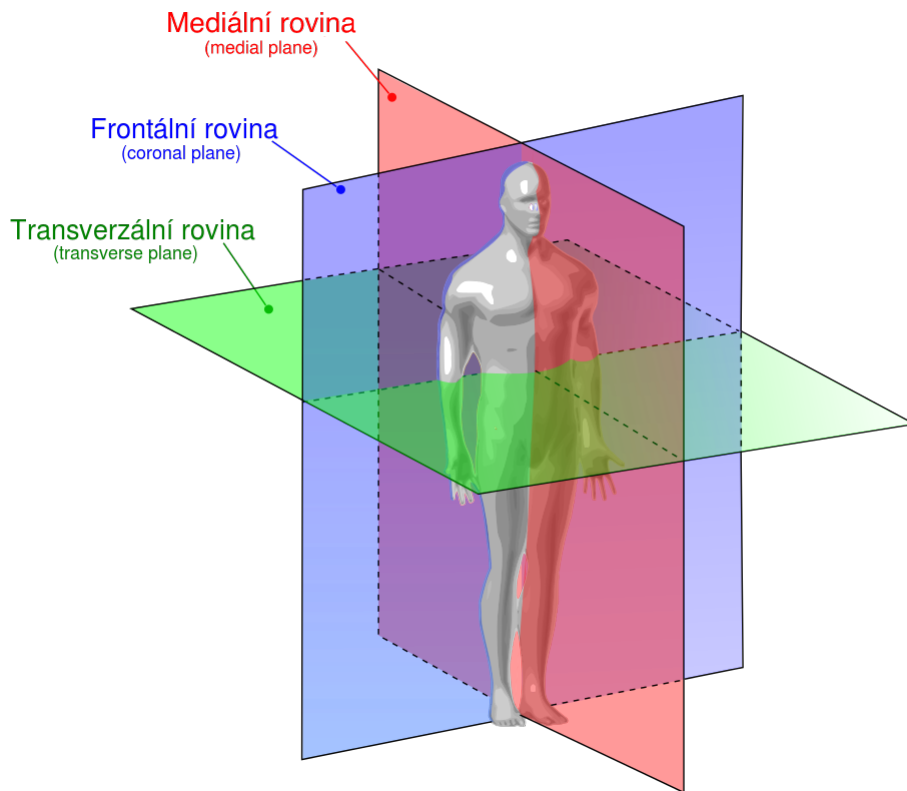
**Obrázek 1.1:** Srovnání Kartézského a sférického souřadného systému včetně naznačení umístění posluchače vůči souřadným osám

- **Sférický souřadný systém** – směr pohledu posluchače odpovídá azimutu  $\varphi = 0^\circ$  a elevaci  $\vartheta = 0^\circ$ , kladný směr azimutu je proti směru hodinových ručiček (tj. levé ucho odpovídá azimutu  $\varphi = 90^\circ$ ), kladný směr elevace je ve směru nad posluchačem (tj. pokud se posluchač kouká kolmo nahoru, odpovídá to elevaci  $\theta = 90^\circ$ ).

Při měření prostorového chování lidského sluchu se častěji využívá sférického souřadného systému. V některých odborných textech je možné se při popisu prostorové lokalizace také setkat s anatomickým popisem, kdy je jako reference brána mediální rovina lidského těla. Mediální rovina je taková rovina, která jde ve směru pohledu posluchače a rozděluje tělo na souměrné části – levou a pravou (viz obr. 1.2).

### 1.1.2 Subjektivní určování polohy zdroje zvuku

Jak udává např. [3], [4], [5], [6] a mnoho dalších zdrojů, základní technický popis subjektivní určování polohy zdroje zvuku vychází z tzv. meziušních rozdílů (tzv. *binaural cues*) a spektrálních vlastností ušního boltce. Jak již bylo zmíněno, celý proces směrového slyšení je ale velmi komplexní a je závislý na mnoha proměnných – proto se nemohou tyto vlastnosti používat odděleně, ale pro správnou funkčnost prostorové lokalizace je nutné je kombinovat a využívat i vlastní zkušenosti. V dalším textu této sekce se zaměřím převážně na technický popis lokalizace zdroje zvuku.



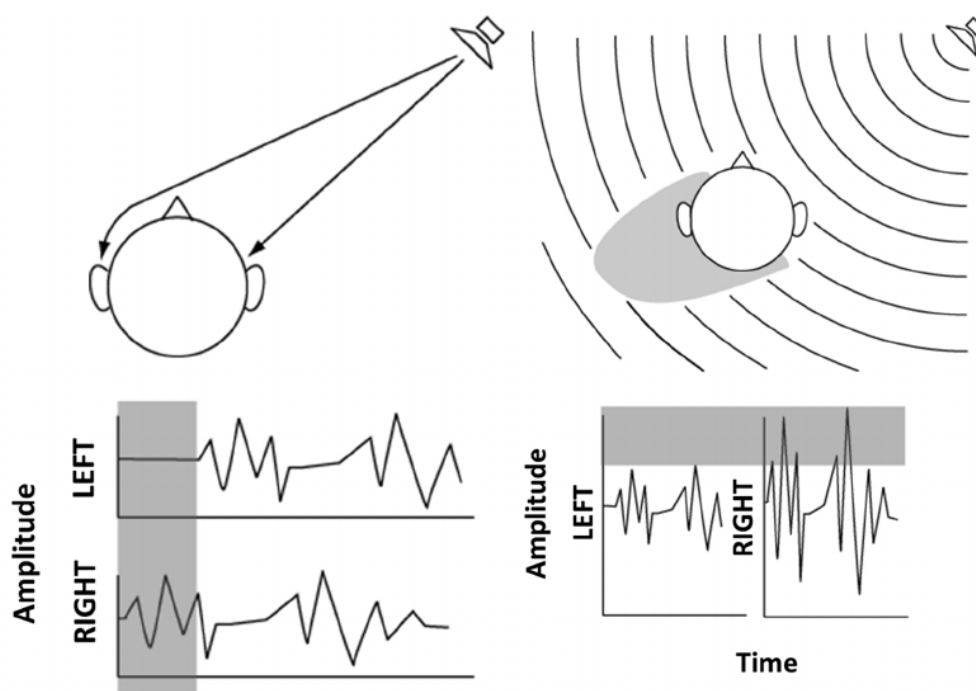
**Obrázek 1.2:** Základní roviny rozdělující lidské tělo (převzato a upraveno z [7])

Pro určení polohy zdroje zvuku v horizontální rovině (neboli určení azimutu  $\varphi$ ) využívá mozek převážně dvou základních meziušních rozdílů (tzv. duplexní teorie), a to

- **ITD** (*Interaural Time Difference*) – pro lokalizaci se využívá časových rozdílů v dopadu signálu na jednotlivé uši; využitelné pro nízké kmitočty (typicky udáváno pod 1 kHz),
- **ILD** (*Interaural Level Difference*) – pro lokalizaci se rozdílů v úrovni signálu, který dopadl na jednotlivé uši; využitelné pro střední a vysoké kmitočty (typicky udáváno pro kmitočty nad 2,5 kHz), a to kvůli vzniku akustického stínu za hlavou, neboť na vyšších kmitočtech je vlnová délka zvukové vlny krátká a hlava se tak chová jako překážka.

Vizuální demonstraci základního konceptu jednotlivých meziušních metrik shrnuje obr. 1.3.

Pro určení polohy zdroje zvuku ve vertikální rovině (neboli určení elevace  $\theta$ ) se převážně využívá rozdílných spektrálních vlastností ucha pro různé elevace  $\theta$  (tzv. *spectral cue* popř. *monoaural cue*). Je to z toho důvodu, že ušní boltec funguje jako směrově závislý frekvenční filtr. Tento princip je schematicky demonstrován na obr. 1.4.



**Obrázek 1.3:** Srovnání významu metrik ITD (vlevo) a ITD (vpravo) (převzato z [5])

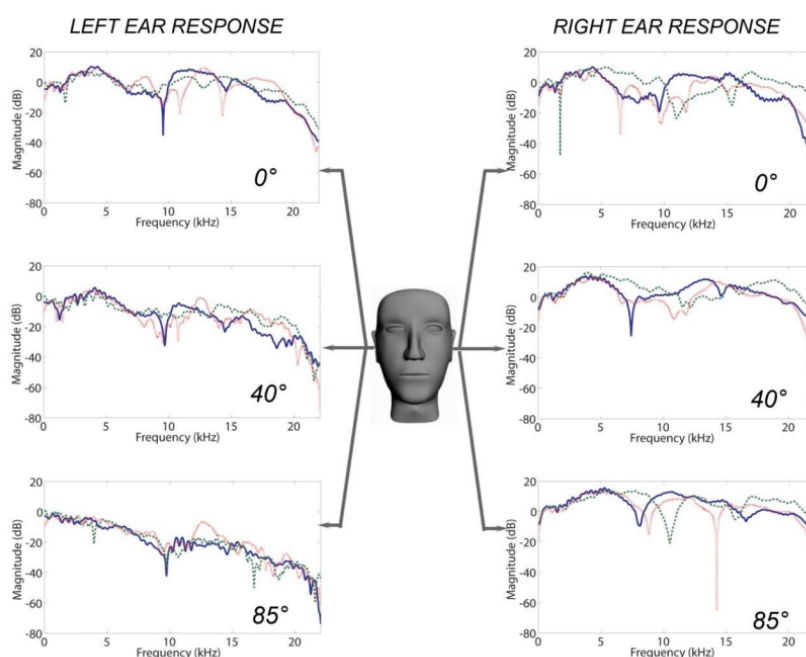
Jak uvádí [4], vlastní vzdálenost  $r$  je odhadnuta dle dopadající úrovně zvukového signálu ze známých hodnot ( $s$  využitím známého zákona převrácených čtverců, který nám říká, že ve volném prostoru dochází k poklesu hladiny intenzity zvuku o 6 dB při dvojnásobné vzdálenosti; využitelné hlavně pro zdroje, u kterých tušíme generovanou hladinu intenzity zvuku), na základě poměru přímých a odražených vln či na základě většího útlumu určitých kmitočtů ve vzduchu (dle [4] dochází k útlumu kmitočtů nad 4 kHz).

Kombinací těchto poznatků (spolu s dalšími parametry, jako je naše zkušenost aj.) pak díky zpracování signálů z jednotlivých uší v mozku dostáváme relativně přesný odhad polohy zdroje zvuku. Mírou přesnosti lokalizace zvuku s využitím všech dostupných poznatků se zabývá následující sekce.

### 1.1.3 Přesnost lokalizace zvukových zdrojů

Minimální úhlová rozlišitelnost (MAA neboli *Minimum Audible Angle*) HAS se dle [4] či [8] udává přibližně kolem  $2^\circ$  pro azimut  $\varphi = 0^\circ$  (dle [3] je tato hodnota dokonce kolem  $4^\circ$  pro azimut  $\varphi = 0^\circ$ ). Tato hodnota je však určena experimentálně na skupině mnoha posluchačů a liší se dle konkrétní pozice zvukového zdroje, jeho hlasitosti a spektrálního obsahu. Z informací uvedených v sekci 1.1.2 jasně vyplývá, že lokalizace zdroje zvuku je mnohem přesnější, pokud je budící stimul širokopásmový (např. bílý šum), horší přesnosti lokalizace dosahuje úzkospektrální buzení (např. čistý tón). Při současném působení několika zvuků se spektrálním složením se pak pro lokalizaci





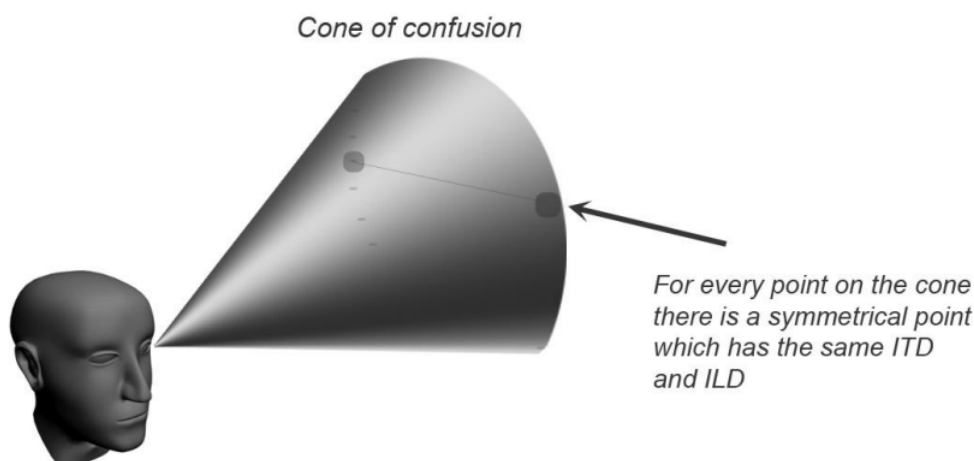
**Obrázek 1.4:** Demonstrace spektrálních vlastností lidského ucha. Je vidět, že pro různé elevace (ale i pro různé azimuty, jak bude později ukázáno) se ušní boltec chová jako frekvenční filtr. (převzato z [8])

spektrálních charakteristik ucha téměř nevyužívá a spoléhá se spíše na meziušní rozdíly. Jak je uvedeno např. v [8], hůře se také lokalizují zdroje zvuku se spektrálním obsahem v pásmu zhruba od 1 kHz do 2,5 kHz. Je to z toho důvodu, že na těchto kmitočtech ani jedna z meziušních metrik nefunguje spolehlivě, a proto je lokalizace takovýchto zdrojů mnohem těžší. Dále je možné přesněji lokalizovat zdroje zvuku, které se nacházejí před posluchačem, kde k lokalizaci zdrojů zvuku často pomáhá i HVS (*Human Visual System*). Díky tomu se hůře lokalizují zdroje zvuku umístěné za posluchačem popř. zdroje zvuku, jejichž elevace  $\theta$  je vyšší než elevace pozorované HAS.

Předchozí odstavec se primárně zabýval přesností lokalizace statických zdrojů zvuku. Na rozdíl od HVS je HAS mnohem méně citlivý na pohyb zdrojů zvuku. K tomu, aby HAS zaznamenal rozdíl mezi dvěma pohybujícími se zdroji zvuku, je dle [4] minimální úhlová rozlišitelnost (tzv. MAMA neboli *Minimum Audible Moving Angle*) vyšší. Z tohoto důvodu je tak lokalizace mnohem náročnější, pokud se zvukové zdroje pohybují.

Z hlediska přesnosti lokalizace zdroje zvuku můžeme nastalé chyby rozdělit do dvou základních kategorií

- **lokální chyby** – určená poloha zvukového zdroje vykazuje jen drobnou úhlovou změnu oproti reálné pozici; typicky se tyto chyby pohybují kolem  $6^\circ$  až  $7^\circ$  a jsou způsobeny nepřesným vyhodnocením meziušních rozdílů či spektrálních vlastností,



**Obrázek 1.5:** Demonstrace „kuželu zmatení“ (*cone of confusion*) a důsledků jeho vzniku (převzato z [8])

- **front-back chyby** – určená poloha zvukového zdroje je v absolutní hodnotě správná vzhledem k mediální rovině, ale zdroj se nachází v jiném kvadrantu, tedy např. místo azimutu  $\varphi = 50^\circ$  je určený azimut  $\varphi = 130^\circ$  (což odpovídá úhlovému rozdílu  $180^\circ - 50^\circ$ ); tato chyba je způsobena díky tomu, že na těchto místech jsou vzhledem ke geometrii hlavy shodné hodnoty obou meziušních rozdílů – tento jev se označuje jako „kužel zmatení“ (*cone of confusion* – ukázka viz obr. 1.5) a je řešen s využitím spektrálních charakteristik ucha popř. natočením pozice hlavy.

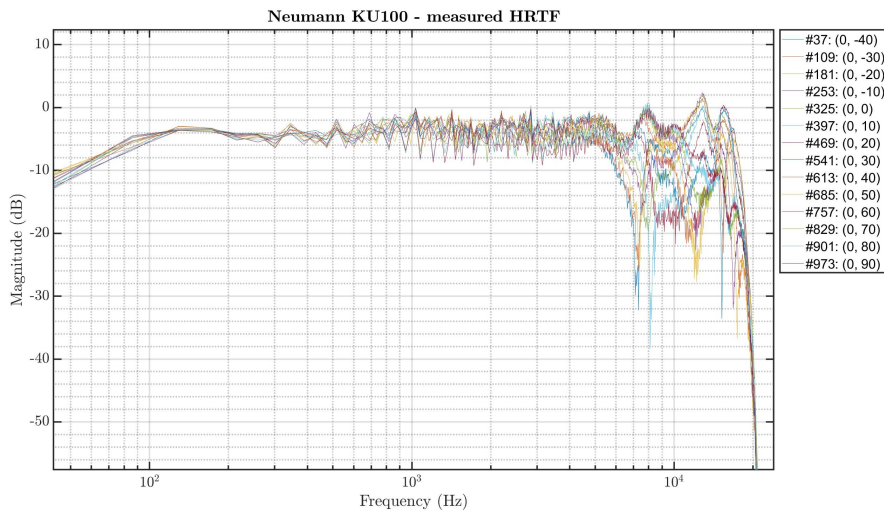
## 1.2 HRTF

HRTF (*Head Related Transfer Function*)  $H$  je množina přenosových funkcí hlavy a lidského ucha<sup>1</sup> (levého i pravého) pro jednotlivé azimuty  $\varphi$  a elevace  $\theta$ . Jak je uvedeno v [9], matematicky se jedná o podíl mezi spektrem zaznamenaného signálu  $S_{\text{meas}}$  a spektrem budicího signálu  $S_{\text{input}}$ , tedy

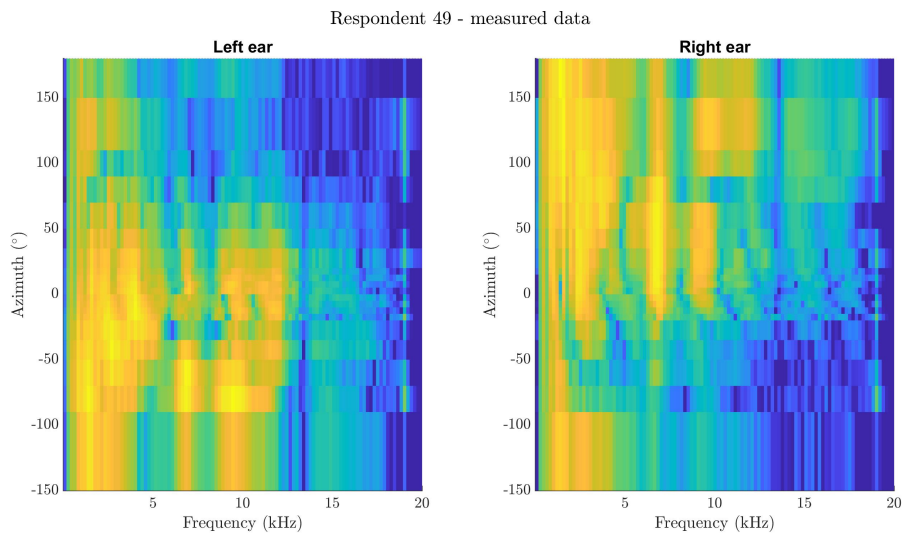
$$H(f, \varphi, \theta) = \frac{S_{\text{meas}}(f, \varphi, \theta)}{S_{\text{input}}(f, \varphi, \theta)}. \quad (1.1)$$

Jak bylo řečeno v sekci 1.1.2, změna spektra zaznamenaného signálu je daná tím, že ušní boltce se chová jako frekvenční filtr, který pro různé azimuty  $\varphi$  a elevace  $\theta$  filtruje dopadající zvukový signál. HRTF je pro každého posluchače velmi individuální, neboť závisí například na rozměrech hlavy, tvaru ušního boltce ad. Zároveň je ale jednou z klíčových funkcí pro reprodukci zvukového pole ve VR systémech (touto problematikou se bude více zabývat sekce 1.3.3),

<sup>1</sup>V souvislosti s měřením lidského ucha je možné se občas setkat i s PRPF (*Pinna Related Transfer Function*), která popisuje přenosové vlastnosti ušního boltce. V souvislosti s VR systémy se však tato funkce samostatně nevyužívá, proto se zde zaměřím pouze na popis HRTF.



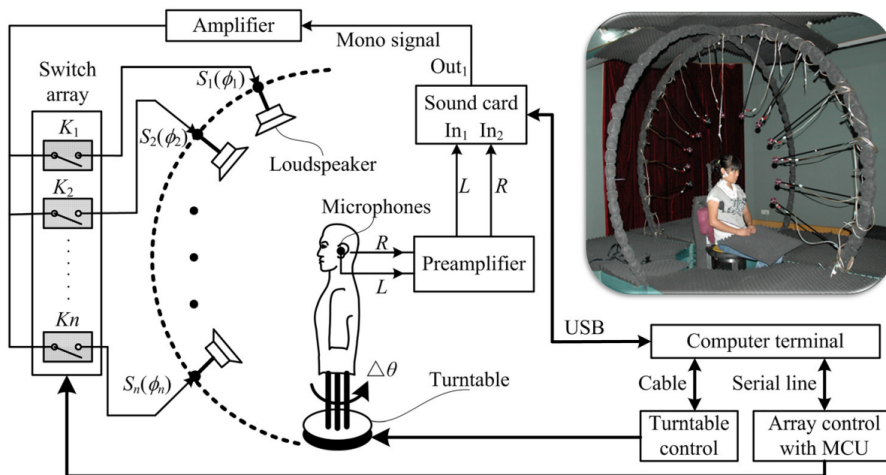
**Obrázek 1.6:** Ukázka HRTF pro vybraný azimut  $\varphi$  a různé elevace  $\theta$  u umělé hlavy Neumann KU100 (údaje získány z HRTF z databáze Club Fritz, viz [10])



**Obrázek 1.7:** Ukázka vizualizace HRTF ve formě color plotu pro vybranou elevaci  $\theta$  a všechny dostupné azimuty  $\varphi$  u reálného respondenta. Při srovnání color plotu levého a pravého ucha je také možné na vyšších kmitočtech pozorovat výrazný vliv ILD.

proto je nutné znát podstatu jejího měření a ukládání. Příklad vizualizace HRTF pro daný azimut  $\varphi$  a různé elevace  $\theta$  pro umělou hlavu Neumann KU100 ukazuje obr. 1.6. Zobrazení HRTF od jednoho z respondentů subjektivních testů ve formě color plot zobrazuje obr. 1.7. Je vidět, že toto zobrazení elegantně ukazuje hodnoty HRTF vybrané elevace  $\theta$  (v tomto případě je elevace  $\theta = 0^\circ$ ) pro všechny měřené azimuty  $\varphi$ .





**Obrázek 1.8:** Ukázka blokového schématu komplexního laboratorního systému pro měření HRIR. Podobný systém je k dispozici i na FEL ČVUT (převzato z [11])

- **MLS** (*Maximum Length Sequence*) – reproduktory jsou buzeny pseudonáhodnou posloupností generovanou posuvným registrem; výsledná impulzní odezva (HRIR) je pak díky výhodným vlastnostem budící posloupnosti získána jako vzájemná korelace budící posloupnosti a zznamenaného signálu – délka pseudonáhodné sekvence však musí být vždy delší než délka měřené impulzní odezvy.

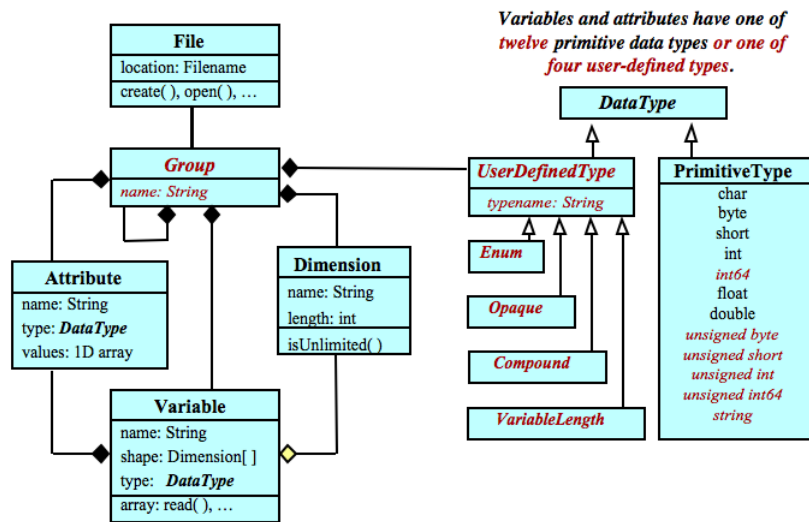
Jak bylo ukázáno v [12], tyto metody vedou při měření HRTF na prakticky stejné výsledky. Detailnější popis jednotlivých metod je pak možný dohledat v [12], [13], [14] či [15].

Z hlediska polohy zdroje zvuku a posluchače můžeme měřené HRTF (resp. HRIR) rozdělit (např. dle [16]) do dvou základních kategorií

- **near-field** (blízké pole) – v rámci HRTF jsou velmi výrazné vlivy vzdálenosti přijímačů od zdroje; principiálně pro vzdálenosti do 1 m od zdroje zvuku,
- **far-field** (vzdálené pole) – v rámci HRTF jsou velmi zanedbatelné vlivy vzdálenosti přijímačů od zdroje; principiálně pro vzdálenosti nad 1 m (včetně) od zdroje zvuku.

Je však nutné podotknout, že vzdálenosti, ve kterých je považována HRTF za far-field se v mnohých zdrojích liší (např. dle [17] je možné za far-field HRTF považovat až HRTF měřené ve vzdálenosti větší než 1,5 m). Ve většině měření (vč. měření realizovaného na fakultě) se však získává far-field HRTF a vliv HRTF na vzdálenosti od zdroje  $d$  je tak zanedbatelný. V případě nutnosti použití Near-field HRTF se tato funkce typicky získá ze známých far-field HRTF pomocí ekvalizace. Bližší popis této metody je možný dohledat v [16].





*A file has a top-level unnamed group. Each group may contain one or more named subgroups, user-defined types, variables, dimensions, and attributes. Variables also have attributes. Variables may share dimensions, indicating a common grid. One or more dimensions may be of unlimited length.*

**Obrázek 1.9:** Demonstrace obecné struktury souborového formátu netCFD (převzato z [22])

gineering Society), verze SOFA 1.0 je popsána ve standardu AES69-2015<sup>4</sup>. Standard byl zaveden z důvodu nutného sjednocení naměřených dat z mnoha dostupných databází HRTF (CIPIC, ARI, openDAFF aj.). Konkrétně se standard snaží o

- popis měření s využitím obecné geometrie,
- jednoznačnou definici dat v obsahu souboru (např. rozložení při měření aj.)
- flexibilitu popisu (více zdrojů, přijímačů aj.) ad. (více viz [1] či [2])

Standard vychází ze souborového formátu netCFD (obecnou strukturu tohoto souborového formátu shrnuje obr. 1.9) a definuje několik základních objektů (viz obr. 1.10)

- **přijímač** (*receiver*) – akustický senzor (např. mikrofón) zachytávající dopadající zvukové vlny; jejich počet není omezen a v SOFA standardech se značí  $R$ ,
- **posluchač** (*listener*) – objekt slučující všechny přijímače,
- **emitor** (*emitter*) – zdroj akustického signálu (např. reproduktor); jejich počet není omezen a v SOFA standardech se značí  $E$ ,

<sup>4</sup>V průběhu psaní práce AES uvedl novou verzi standardu SOFA, konkrétně SOFA 2.0. Tato verze však definuje nové možnosti (např. popis pomocí sférických harmonických funkcí aj.), které se v práci nevyužívají, a proto zde zůstanu pouze u popisu SOFA 1.0.

- **zdroj** (*source*) – objekt slučující všechny emitory,
- **místnost** (*room*) – definice parametrů místnosti, ve které dochází k měření.

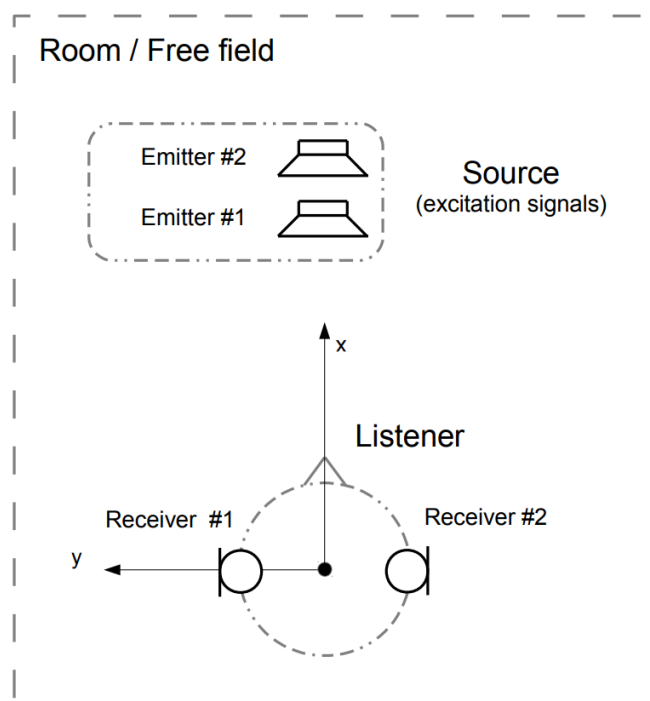
Vlastní naměřené hodnoty jsou pak uloženy do struktury **Data** ve formě jednotlivých HRIR (datový typ **FIR**) popř. HRTF (datový typ **TF**) s vazbou na počet měření  $M$ , počet přijímačů  $R$  a délku měření ve vzorcích  $N$  (časové vazby jsou pak určeny s využitím vzorkovací frekvence  $f_s$  uložené spolu s naměřenými hodnotami ve struktuře **Data**).

K tomu, aby bylo možné s naměřenými daty jednoznačně pracovat (např. určit polohu měření aj.) jsou jednotlivé objekty popsány metadaty, jako např.

- popis zdroje/posluchače/místnosti,
- poloha,
- použitý souřadný systém aj. (*cartesian, spherical*)

Další metadata jsou pak globální a definují např.

- datový typ (**FIR, TF**),
- datum vytvoření,
- organizace aj.



**Obrázek 1.10:** Naznačení významu jednotlivých objektů definovaných v SOFA standardu (převzato z [2])



Popis standardu SOFA v odstavcích výše je velmi stručný (ale obsahuje důležité parametry použité při implementaci), podrobnější informace (vč. struktury všech proměnných) je možné najít v [1] resp. [2].

## 1.3 VR systémy

Virtuální realita (VR) je pojem, který se v dnešních dnech velmi skloňuje. I přesto, že teoretické základy VR systémů byly popsány v 60. letech 20. století Ivanem Sutherlandem, do povědomí uživatelů se dostávají až v posledních dekadách, viz [23]. Toto masové rozšíření VR systémů mezi běžnou populaci je zapříčiněno nárůstem výpočetního výkonu běžných zařízení (PC, mobilní telefony aj.). Mezi elementární koncepty dnešních VR systémů lze dle [23] zařadit 3 základní vlastnosti

1. ponoření uživatele do virtuálního prostředí (*immersion*),
2. obklopení uživatele virtuálním prostředím,
3. interakce s virtuálním prostředím.

Díky těmto vlastnostem a masovému nárůstu výpočetních výkonů se tak mohou stát VR systémy nedílnou součástí mnoha odvětví, jako například

- herní průmysl,
- medicína,
- vzdělávání,
- automotive průmysl,
- reklamní průmysl aj.

Detailní přehled oblastí, pro které jsou VR systémy nejvíce prospěšné a výhod zavádění těchto systémů shrnuje infografika z obr. 1.11.

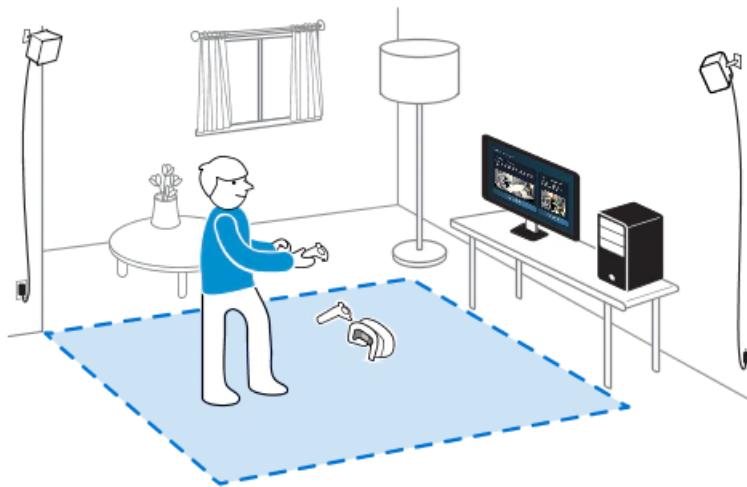
Ve srovnání se sférickými videi přináší VR systémy další stupně volnosti, neboť se pozorovatel může jak otáčet kolem své vlastní osy, tak i pohybovat (s čímž souvisí potřeba trackingu VR headsetu, kterému se věnuje sekce 1.3.1). Toto je pro koncového uživatele velká výhoda, ale zároveň i nevýhoda pro tvůrce VR obsahu, neboť na toto musí myslet a již během tvorby obsahu musí najít způsob, jak umožnit uživateli pohyb do částí virtuálního prostoru, který je díky bariérám v reálném prostoru nedosažitelný. S těmito problémy pomáhá tvůrcům volba vhodného engine pro tvorbu aplikace a výběr správných pluginů.



**Obrázek 1.11:** Infografika shrnující základní oblasti použití VR systémů a výhody a nevýhody jejich nasazení dle průzkumů z roku 2020 (převzato z [24])

### 1.3.1 Propojení reálného a virtuálního světa

Před začátkem práce s libovolným VR systémem je nutné definovat vazbu mezi reálným a virtuálním světem. Toto se dělá pomocí trackingu VR headsetu v reálném prostoru (typicky pomocí integrovaných gyroskopů či externích bázových stanic s využitím fotocitlivých detektorů). Každý výrobce má jasně definovaný proces kalibrace, který typicky zahrnuje nastavení výšky uživatele, podlahy a nastavení virtuálních stěn pro virtuální prostor. Toto nastavení je přítomné z toho důvodu, aby uživatel, který je pohlcen VR obsahem, neinteragoval s objekty z reálného světa (např. nenarazil do stolu aj.). Typické nastavení virtuálních stěn ukazuje obr. 1.12. Virtuální stěny jsou reprezentovány čárkovanou čarou a modře je vyznačen prostor v reálném světě, ve kterém se může uživatel pohybovat při sledování VR obsahu (tzv. „herní oblast“). Je zřejmé, že před provedením procesu kalibrace je nutné umístit externí bázové stanice (pokud jsou u headsetu potřeba). Bázové stanice se doporučuje umístit do protilehlých rohů místnosti tak, aby byly schopné lokalizovat headset v celé herní oblasti.



**Obrázek 1.12:** Ukázka nastavení herního prostoru v reálném světě (převzato z [25])

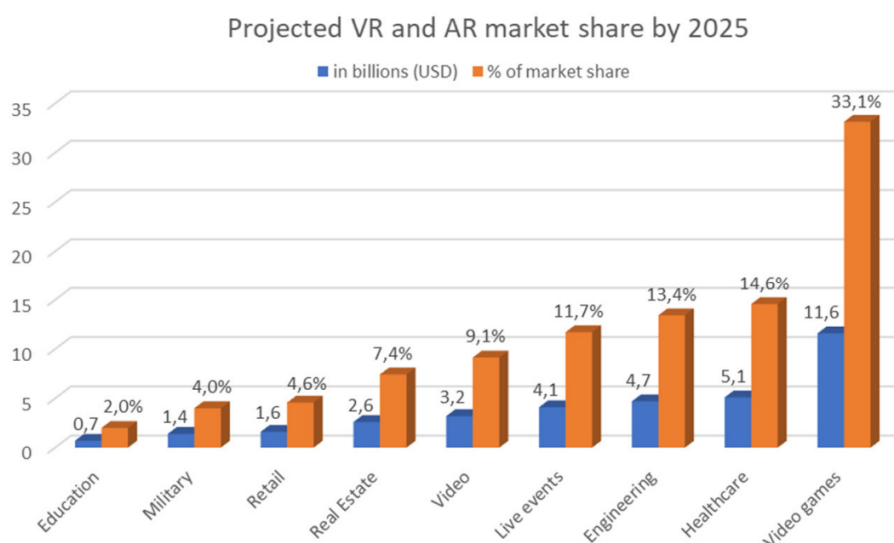
### ■ 1.3.2 Tvorba a distribuce VR obsahu

V současné době většina obsahu pro VR systémy vzniká s využitím 2 enginů, a to

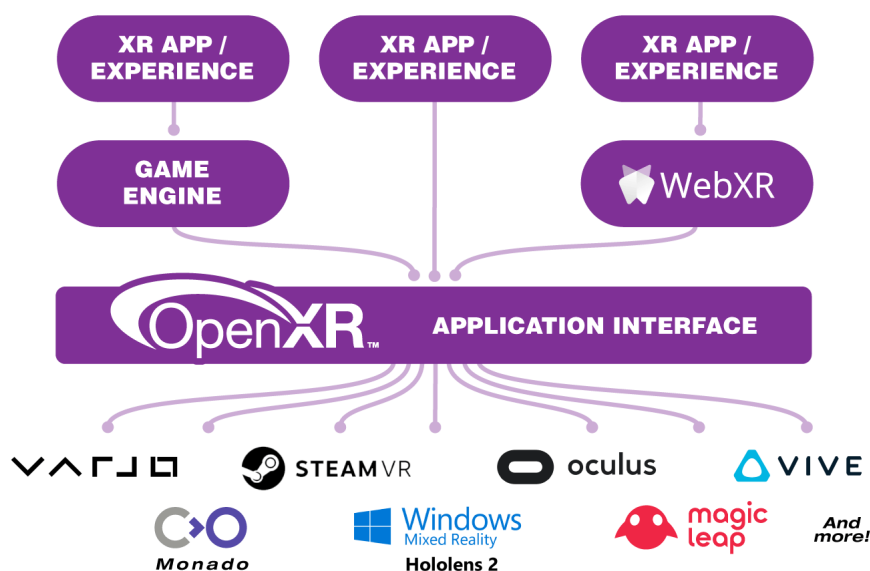
- **Unity** – tvorba kódu v C#,
- **Unreal Engine** – tvorba kódu v C++ popř. s využitím Blueprintů (grafické programování).

Oba tyto enginy najdou uplatnění jak při tvorbě VR obsahu, tak i při tvorbě PC či mobilních aplikací. Použití obou enginů je v základu velmi podobné, největším rozdílem jsou jazyky, ve kterých je psán kód (což je zmíněno výše), další případné rozdíly shrnuje článek [26] či je možné je srovnat přímo s využitím webové prezentace jednotlivých enginů [27] resp. [28]. Při tvorbě obsahu je možné u obou enginů využít již vytvořených modelů (z tzv. Asset store) či využít exportu ze SW pro tvorbu 3D modelů, jako např. Blender, Maya či 3DS Max. Díky tomu je možné vytvořit prakticky libovolný VR obsah (od jednoduché hry po např. simulaci muzea či libovolné stavby), díky čemuž je možné VR systémy využít prakticky pro libovolné odvětví průmyslu, což dokazuje i infografika z obr. 1.13, která ukazuje předpokládané využití VR systémů v jednotlivých odvětvích průmyslu v roce 2025. Z infografiky je vidět, že kromě herního průmyslu je velké využití VR systémů i ve zdravotnictví či inženýrství.

Pro jednodušší vývoj VR obsahu je vhodné do vybraného enginu nahrát pluginy, které obsahují předdefinované funkce pro snazší práci s VR systémy a distribuci výsledných aplikací pro koncová zařízení. V současné době se pro vývoj VR obsahu doporučuje využívat plugin OpenXR, který umožňuje podporu pro mnoho distribučních platform, jejichž základní výčet shrnuje



**Obrázek 1.13:** Odhadovaný podíl VR systémů v jednotlivých odvětvích v roce 2025 (převzato z [29])



**OpenXR provides a single cross-platform, high-performance API between applications and all conformant devices.**

**Obrázek 1.14:** Struktura vývoje aplikace pro VR systémy s využitím pluginu OpenXR (převzato z [30])

infografika z obr. 1.14. Dále pak OpenXR umožňuje např. přenést do virtuálního prostoru bariéry nastavené při definici místnosti při zahájení práce s VR systémy aj. Detailní popis funkce tohoto pluginu jde nad rámec této práce a je možné ho nalézt např. v [30].

### 1.3.3 VAS

VAS (*Virtual Acoustic Space*) je označení pro algoritmus, který s využitím informace o pozici zdrojů zvuku a dostupné HRTF umožňuje při binaurálním poslechu pomocí sluchátek navodit pocit prostorovosti. Tento algoritmus je základem pro reprodukci zvukového pole ve VR systémech. Základní princip získání výstupního signálu pro jednotlivé uši  $s_{L/R}$  spočívá ve filtraci spektra zvukového zdroje  $s_{\text{source}}$  dle příslušné HRTF  $H_{L/R}$  (resp. konvoluci signálu zvukového zdroje s HRIR  $h_{L/R}$ ) – HRTF vlastně představuje LTI systém, který nám vytváří požadované výstupní signály (viz obr. 1.15). Pro větší počet zdrojů je možné formulaci výše zapsat matematicky jako

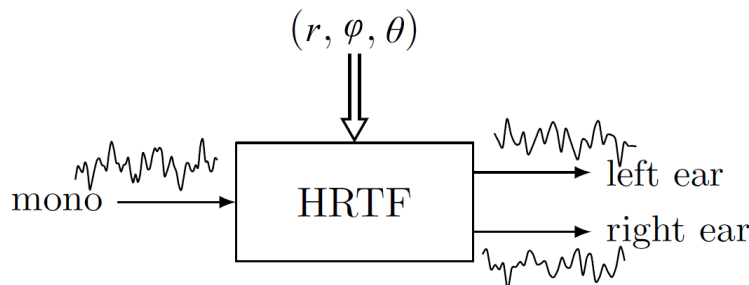
$$s_{L/R}(t) = \sum_{N=1}^n \mathcal{F}^{-1}\{H_{L/R}(f, \varphi, \theta) \cdot S_{\text{source}_n}(f, \varphi, \theta)\}, \quad (1.3)$$

resp.

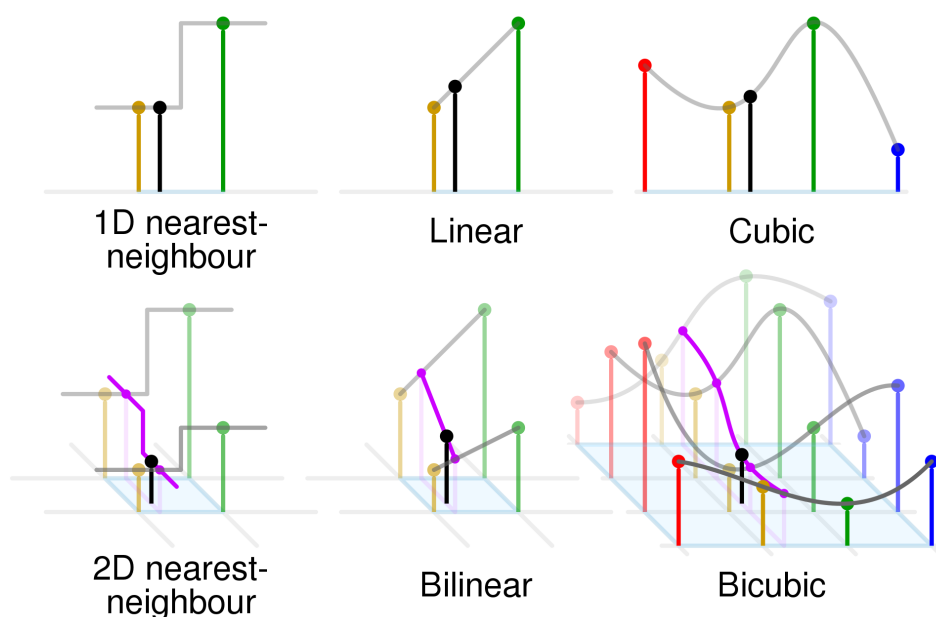
$$s_{L/R}(t) = \sum_{N=1}^n h_{L/R}(t, \varphi, \theta) * s_{\text{source}_n}(t, \varphi, \theta). \quad (1.4)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá (a je potvrzeno např. v [31] či [32]), že pro exaktní prostorovou lokalizaci je nutné využít měničů, jejichž frekvenční a fázová charakteristika je co možná nejvíce plochá, aby nedocházelo k chybným interpretacím popř. je nutné provést příslušnou ekvalizaci s ohledem na reprodukční systém, např. s využitím HpTF (*Headphone-to-ear Transfer Function*), která nám umožní např. eliminovat vícenásobné odrazy od boltce a s tím způsobené front-back chyby aj. Více je možné se o této problematice dočíst např. v [33].

Pro realizaci VAS ve VR systémech je možné využít pluginu Steam Audio, který umožňuje z dodané HRTF ve formátu SOFA vytvořit při binaurální reprodukci prostorový vjem. Bohužel ne vždy je měření HRTF resp. HRIR prováděno ve všech azimutech  $\varphi$  a elevacích  $\theta$ . Z tohoto důvodu je nutné provést pro zdroje zvuku mimo měřené azimuty  $\varphi$  a elevace  $\theta$  interpolaci. Plugin Steam Audio umožňuje dle [34] dva základní způsoby interpolace, a to



**Obrázek 1.15:** Vizualizace HRTF jako LTI systému pro vytváření výstupních zvukových signálů ve VAS (převzato z [3])



Obrázek 1.16: Srovnání jednotlivých způsobů interpolace (převzato z [35])

- **nearest** – pro reprodukci zdroje zvuku se použije nejbližší známá hodnota HRTF; při snaze o přesnou lokalizaci a řídkém rozložení měřicích bodů HRTF je toto naprosto nevhodná metoda, neboť může způsobit velkou úhlovou chybu v lokalizaci zdroje zvuku,
- **bilinear** – pro určení HRTF pro azimut  $\varphi$  a elevaci  $\theta$  daného zvukového zdroje se využije vážený průměr HRTF z nejbližších známých hodnot HRTF.

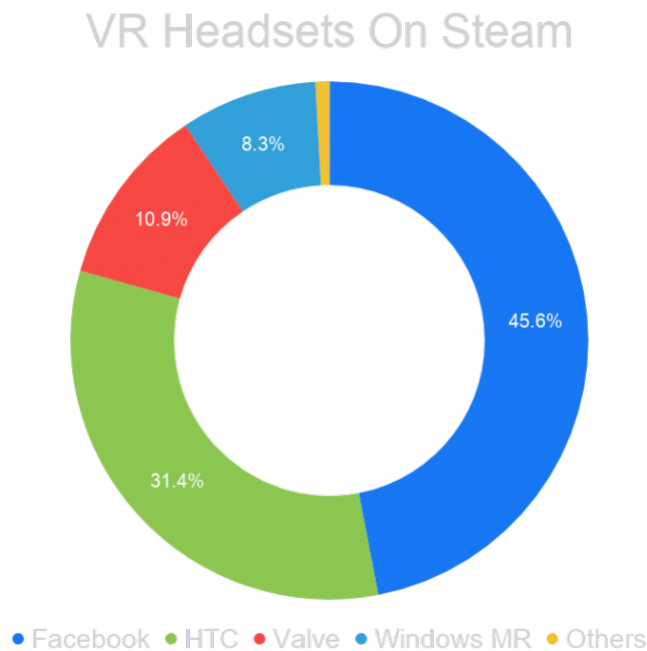
Vizuální srovnání jednotlivých způsobů interpolace (vč. těch, které se v rámci pluginu Steam Audio nevyužívají) přibližuje obr. 1.16.

### 1.3.4 HMD

V současné době je VR obsah nejběžněji reprodukován pomocí brýlí pro virtuální realitu, neboli headsetů (tzv. HMD – *Head Mounted Display*). Tyto headsety se vyrábějí ve dvou režimech, a to

- **standalone** – HMD obsahuje všechny potřebné komponenty pro zpracování a reprodukci VR obsahu (GPU aj.) v jednom zařízení (např. Oculus Quest 2),
- **desktop** – HMD je připojeno k výkonnému PC, které se stará o zpracování VR obsahu a vlastní HMD se stará pouze o reprodukci dodaných dat (např. HTC Vive).

Řada HMD je v současné době vybavena i dalšími pomocnými senzory (např. pro detekci pohybu očí), které pro vědecké účely umožňují další studium



**Obrázek 1.17:** Přehled výrobců HMD používaných na platformě Steam v roce 2020 (převzato z [36])

chování subjektů ve virtuálním prostředí.

Dle infografiky z obr. 1.17 patří mezi největší výrobce HMD dvě společnosti, konkrétně

- **Oculus** (Facebook/Meta) – zaměřuje se na výrobu standalone HMD určených hlavně pro herní průmysl (typicky levnější varianty HMD), nejpoužívanější model je v současné době Oculus Quest 2,
- **HTC** – zaměřuje se primárně na výrobu desktop HMD (HTC VIVE Pro) typicky i včetně pomocných seznorů, určených jak pro herní průmysl, tak i pro další aplikace (např. ve zdravotnictví aj.), vyrábí ale i standalone varianty HMD (HTC VIVE Focus).

Jednotlivé headsety se kromě režimu funkce liší i dostupným rozlišením, snímkovou frekvencí, podporou jednotlivých platforem pro VR obsah apod. Přesné parametry vždy přehledně shrnují stránky výrobců, tedy např. [38] či [37].





## Kapitola 2

### Pracoviště pro realizaci diplomové práce

V rámci diplomové práce bylo mým cílem znovu zprovoznit a propojit pracoviště, která vznikla na katedře radioelektroniky v minulých letech jako diplomové práce. Konkrétně se jedná o následující pracoviště

- **měření HRIR/HRTF** – původní verze pracoviště byla vytvořena Ing. Ondřejem Šupkou, podrobnější informace o původní implementaci viz [12],
- **vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS** – původní verze pracoviště byla vytvořena Ing. Viktorem Jarolínkem, podrobnější informace o původní implementaci viz [39].

Základní popis funkce jednotlivých pracovišť a změny provedené během diplomové práce se pokusím shrnout v sekcích 2.1 a 2.2.

Nově vytvořené pracoviště pro měření lokalizace zvuku ve VR má následující bloková strukturu

1. Změření a vyhodnocení HRIR/HRTF testovaného subjektu.
2. Uložení informací o HRIR/HRTF do SOFA souboru.
3. Přenesení výsledného SOFA souboru mezi pracovišti.
4. Využití SOFA souboru pro reprodukci zvukového pole ve VAS.
5. Srovnání výsledků pro testovaný subjekt a různé SOFA soubory (v rámci DP se jedná o jeden standardizovaný a jeden změřený).

Popsanou funkci pracoviště jsem v rámci diplomové práce ověřil pomocí testů na rozdíly v lokalizaci zdrojů zvuku při využití generické HRTF a změřených HRTF. Tyto testy a jejich vyhodnocení jsou blíže popsány v kapitolách 3 a 4.

#### 2.1 Pracoviště pro měření HRTF

##### 2.1.1 Stručný popis pracoviště

Pracoviště pro měření HRTF vzniklo na katedře radioelektroniky v rámci diplomové práce Ondřeje Šupky již v roce 2016. Vlastní pracoviště se skládá

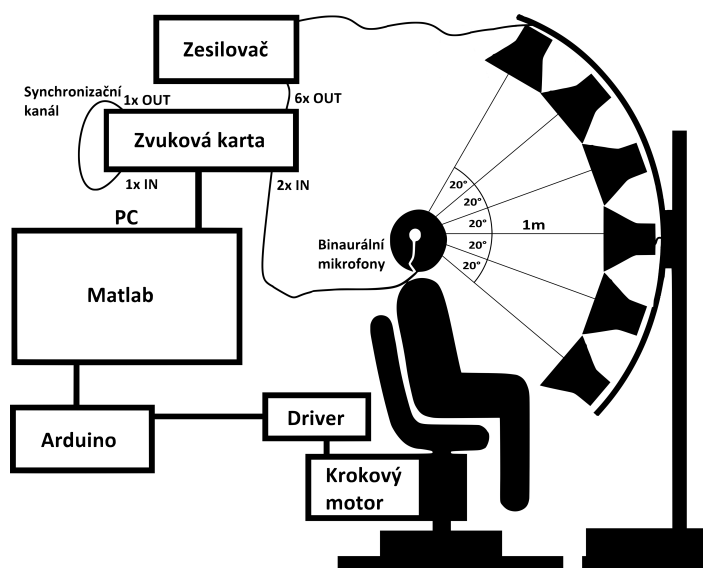
z následujících komponent

- reproduktorová konstrukce s 6 reproduktory v daných elevacích,
- otočná židle s krokovým motorem,
- Arduino UNO,
- dva mikrofony s konstrukcí na jejich uchycení na uši,
- rack se zesilovači a zvukovou kartou,
- PC s GUI pro měření a řízení celého systému.

Blokovou strukturu zapojení pracoviště ukazuje obr. 2.1, reálný vzhled pracoviště je pak na obr. 2.2.

Pracoviště díky dostupnému SW (vytvořeným v programu MATLAB) s velmi přehledným GUI (viz obr. 2.3a) umožňuje po propojení dle schématu z obr. 2.1 měřit HRTF v 6 elevacích  $\theta$  (jedná se o azimuty  $\theta \in \{-40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ\}$ ) a v libovolných azimutech  $\varphi$  (které je nutné v GUI definovat) s využitím všech základních metod popsaných v sekci 2.1 (tedy Sweep Sinus, OLSS a MLS). Také umožňuje do výstupního souboru zapsat metadata o posluchači, jako např. jeho jméno, věk či pohlaví.

Postup měření na daném pracovišti je velmi přímočarý – respondent se usadí na otočnou židli a na uši mu jsou nasazeny mikrofony. Následně se v GUI pro ovládání systému vybere typ získávání impulzní odezvy, propojí se Arduino (je nutné zvolit příslušný port zjištěný např. dle správce zařízení), zapíše se údaje o respondentovi a spustí se měření. Během měření komunikuje SW s Arduinem po sériové lince a posílá mu příkazy, které Arduino interpretuje a na jejich



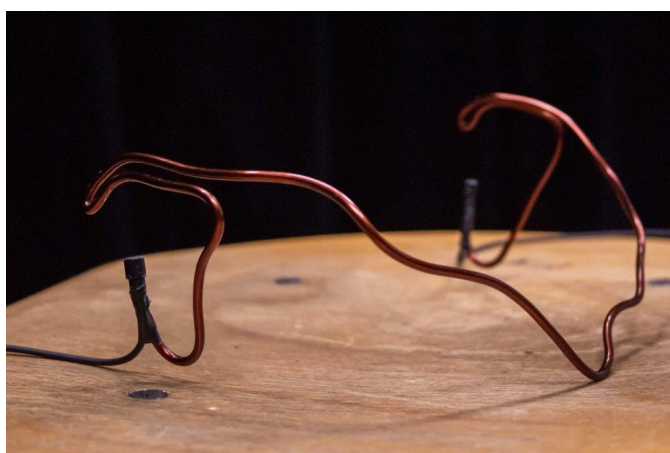
**Obrázek 2.1:** Blokova struktura pracoviště pro měření HRTF (převzato z [12])



(a) : Reproduktorový sloup a otočná židle



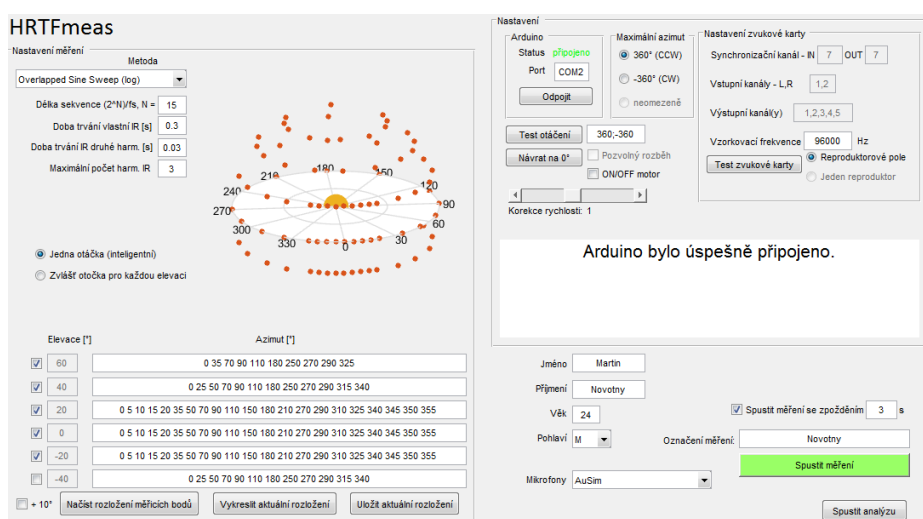
(b) : Řídící PC, Arduino UNO a rack se zesilovači a zvukovou kartou



(c) : Konstrukce pro uchycení mikrofonů na uši

**Obrázek 2.2:** Reálný vzhled pracoviště pro měření HRTF v učebně 303





(a) : Vzhled GUI aplikace pro řízení celého měření HRTF



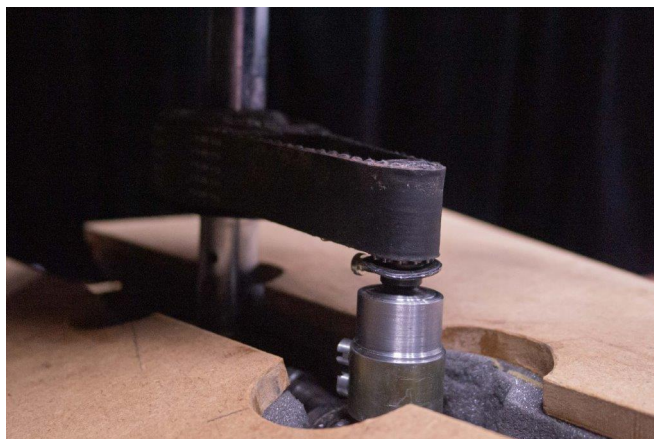
(b) : Vzhled GUI aplikace pro analýzu naměřených dat

**Obrázek 2.3:** Vzhled GUI programů pro ovládání a analýzu dat na pracovišti měření HRTF

problémem již nezabývat a nechat jeho řešení až na dobu, kdy nebude nutné dělat větší množství testů a epoxid tak bude mít dostatečný čas na zaschnutí.

V průběhu provádění subjektivních testů došlo k naprostému oddělení řemenice od hřídele (zjevně kvůli velkému mechanickému namáhání). Hřídel jsem tedy nechal opravit ve specializované dílně. Během této opravy došlo

také k vyčištění nečistot na řemenici, díky čemuž nyní nenastávají problémy s přeskakováním řemenu, které se občas staly a bylo nutné tak celý proces měření opakovat. Díky tomu je tak celý systém otočné židle nyní mnohem více funkční a při měření již nastává jen minimum komplikací. Aktuální stav řemenice demonstruje obr. 2.4.



**Obrázek 2.4:** Stav hřídele se řemenicí po proběhnutí všech měření. Je jasné vidět, že na řemenici chybí vrchní díl, díky kterému má řemen tendenci vyklouznout.

### ■ **Výměna zvukové karty**

Po špatných zkušenostech s připojením a komunikací mezi řídicím PC a zvukovou kartou RME Fireface 400 (která využívá ke komunikaci v současné době již zastaralé sběrnice Firewire) jsem po dohodě s vedoucím práce vyměnil zvukovou kartu za RME Fireface UC, která ke komunikaci využívá sběrnice USB. Po reinstalaci driverů zvukové karty již funguje obousměrná komunikace bez větších problémů. Díky této výměně se také stalo pracoviště více univerzální – jeho řízení tak totiž již není navázáno na PC, který obsahuje FireWire port, ale je možné využít libovolného PC, neboť USB port obsahuje v současné době prakticky každé zařízení.

## ■ **2.2 Pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS**

### ■ **2.2.1 Stručný popis pracoviště**

Pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS vzniklo na katedře radioelektroniky v rámci diplomové práce Viktora Jarolímka v roce 2019. Jedná se o VR aplikaci (základní vzhled aplikace po jejím spuštění je na obr. 2.5, vzhled scén u vybraných testů je pak možné najít v příloze B) vytvořenou s využitím engine Unity (konkrétně ve verzi 2018.2.6f1). Interakce s VR prostředím je primárně realizována pomocí pluginů OpenVR a Steam Audio. Aplikace se skládá z 31 připravených testů (s využitím kopírování



**Obrázek 2.5:** Základní vzhled aplikace pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS

je případně možné vytvořit další testy), ve kterých má respondent za úkol lokalizovat zdroj zvuku v podobě zpívajícího ptáčka. V každém testu je vždy právě jeden hledaný zdroj zvuku (zpívající ptáček) a několik ptáčků, kteří nezpívají. Jednotlivé testy se liší vzájemnou pozicí ptáčků, jejich počtem či jejich pohybem. V některých testech jsou dokonce přidány i vizuální a akustické distraktory (např. želva, veverka či déšť), které slouží k zjištění schopnosti lokalizace chtěného zdroje zvuku při několika působících podnětech. Díky využití pluginu Steam Audio je možné při vytváření VAS velmi jednoduše měnit HRTF, díky které se při poslechu na sluchátkách dokáže vytvořit iluze prostorovosti jednotlivých zvukových zdrojů.

Celý test začíná zjištěním základních údajů o respondentovi (jméno, známé problémy s HAS či HVS), volbou typu interpolace a vybrané HRTF. Následně se realizují vybrané poslechové testy. Po zvolení domnělého zdroje zvuku se automaticky přejde na další test a uživatel nemá možnost návratu na předchozí test. Výsledky testu jsou uloženy ve formě strukturovaného textového souboru, který obsahuje informace vyplněné na začátku testu (tzn. informace o respondentovi, typ interpolace, vybraná HRTF) a u každého testu poté obsahuje následující informace

- **typ testu a jeho stručný popis** – základní označení testu a uvedení počtu zdrojů a jejich rozestavení,
- **doba potřebná k lokalizaci** – čas v sekundách určující dobu potřebnou k lokalizaci zvukového zdroje,
- **správnost lokalizace** – proměnná, která ukazuje jestli testovaný subjekt lokalizoval správný zvukový zdroj (correct) či nikoliv (incorrect),

- **úhlový rozdíl** – proměnná, která udává úhlový rozdíl mezi polohou domnělého zvukového zdroje a jeho přesnou polohou (tyto informace jsou uloženy spolu s úhlovým rozdílem; tato proměnná se zobrazuje pouze pokud byl zvukový zdroj nesprávně lokalizován).

Příklad strukturovaného uložení výsledků ukazuje následující soubor

```
NAME_SURNAME
0
Interpolation: Bilinear
Measured HRTF

TEST CASE: Test_A1_1 - 8deg angle - 1 source, 1 distractor,
           side by side
- Correct
- Time til answer: 5.441991 seconds

TEST CASE: Test_A4_4 - 15deg angle - 1 source, 1 distractor,
           side by side
- Incorrect
- Time til answer: 7.95265 seconds
Answer coord: (0.4, 1.2, 3.4) ||| Source coord: (-0.5, 1.3,
           3.5) ||| Angle: 13.6768
```

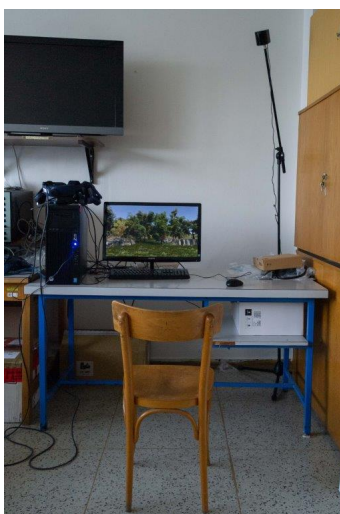
## ■ 2.2.2 Úpravy pracoviště při realizaci diplomové práce

Pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS bylo při realizaci diplomové práce kolegy Jarolímka umístěno v místnosti 552. Tato místnost však slouží i pro výuku a při případných experimentech s VR bylo nutné vždy celý VR set postavit a následně sklidit. Proto jsme se po rozhovoru s vedoucím práce shodli na vytvoření samostatné laboratoře pro VR systémy v místnosti 542. Aktuální vzhled laboratoře je vidět na obr. 2.6. Po dohodě jsme se zde rozhodli nastálo nainstalovat HMD HTC Vive Pro Eye, který umožňuje i sledování očních pohybů (těmi se v rámci své bakalářské práce zabývá kolega Mičín). Základní parametry daného HMD shrnuje tab. 2.1.

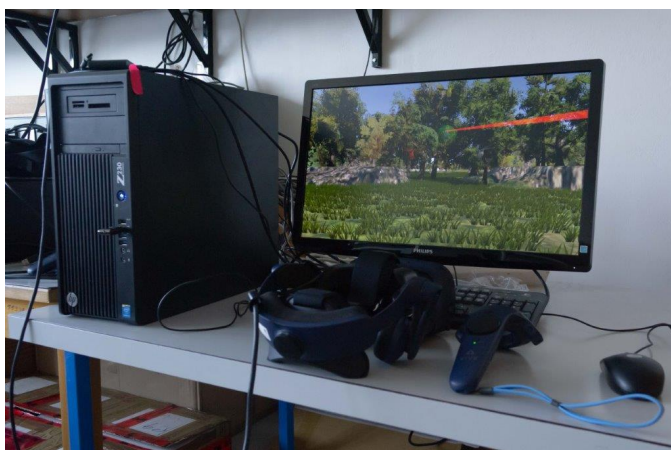
## ■ Sestavení vhodné pracovní stanice

Protože je vybraný HMD typu desktop, bylo nutné do této místnosti umístit PC, který zvládne spolehlivě zpracovat data pro tento HMD, jehož minimální systémové požadavky shrnuje tab. 2.2. Katedra disponuje několika pracovními stanicemi HP Z230, a proto jsem se jednu z nich rozhodl po dohodě s vedoucím práce využít i v této laboratoři. Jak jsem později zjistil, nejednalo o nejlepší výběr a bylo nutné odladit velké množství problémů. Stanice v základní konfiguraci z katedry disponovala GPU NVIDIA Quadro 2200,





(a) : Pracovní místo v laboratoři vč. bázové stanice pro tracking HMD (druhá bázová stanice je umístěna za fotoaparátem)



(b) : Detail jednotlivých komponent pracoviště

**Obrázek 2.6:** Reálný vzhled pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS v místnosti 542

jejíž parametry byly pro účely VR pracoviště naprosto nedostatečné (tuto skutečnost mi sdělil i testovací SW SteamVR Performance Test). Proto jsem vyměnil tuto GPU za GPU GIGABYTE GeForce RTX 2060, jejíž parametry byly pro naši potřebu dostatečné. Srovnání základních parametrů obou GPU shrnuje tab. 2.3.

Po zapojení nové GPU (RTX 2060) do pracovní stanice se zjistilo, že původní zdroj pracovní stanice (DPS-400AB) nezvládne tuto GPU spolehlivě napájet (problém u tohoto zdroje byl i v obstarání 8pin PCIe kabelu, neboť zdroj disponoval pouze 6pin verzí), a tak bylo nutné vybrat nový napájecí zdroj. Z důvodu větší přehlednosti v připojené kabeláži jsem se rozhodl zakoupit modulární zdroj Seasonic Focus GX 850 Gold, jehož parametry splňují požá-

**Tabulka 2.1:** Přehled parametrů vybraného HMD HTC VIVE Pro Eye (převzato z [25])

název parametru	hodnota parametru
typ displeje	Dual OLED 3,5 in
rozlišení displeje	1440 px × 1600 px (2880 px × 1600 px pro oba displeje)
obnovovací frekvence	90 Hz
zorný úhel (FOV)	110°
konektivita	USB 3.0, DisplayPort 1.2
audio	zabudovaná (odnímatelná) sluchátka možnost připojení vlastních sluchátek přes USB-C

**Tabulka 2.2:** Přehled minimálních systémových požadavků HMD HTC VIVE Pro Eye (převzato z [25])

název parametru	hodnota parametru
procesor	Intel Core i5-4590
grafická karta	NVIDIA GeForce GTX 970
paměť	4 GB RAM
obrazové výstupy	DisplayPort 1.2
USB porty	1x USB 3.0
operační systém	Windows 7

davky GPU. Základní srovnání obou zdrojů shrnuje tab. 2.4. Před zapojením zdroje však bylo nutné ještě objednat redukci na atypickou základní desku použité pracovní stanice – oproti běžným 24 pinům obsahuje tato základní deska jen 18 pinů. Tato redukci se běžně nevyrábí a bylo nutné ji objednat z AliExpressu, díky čemuž se při realizaci práce nabralo zpoždění.

Po obstarání jednotlivých komponent bylo možné vlastní pracovní stanici sestavit, což se jevílo jako nejjednodušší úkol. Sestavená pracovní stanice (viz obr. 2.7) je plně funkční a je možné na ní provozovat i náročnější aplikace v prostředí VR.

## ■ Konfigurace HMD

V první řadě bylo nutné rozmístit externí bázové stanice, které slouží k trackování HMD. Doporučené rozmístění bázových stanic (vč. jejich ukotvení) ukazuje obr. 2.8. V laboratoři bylo nutné zajistit případnou mobilitu díky čemuž se instalace na zeď (která je doporučována) nejevila jako vhodná. Místo

**Tabulka 2.3:** Srovnání parametrů dostupných GPU (údaje čerpány z [40] a [41])

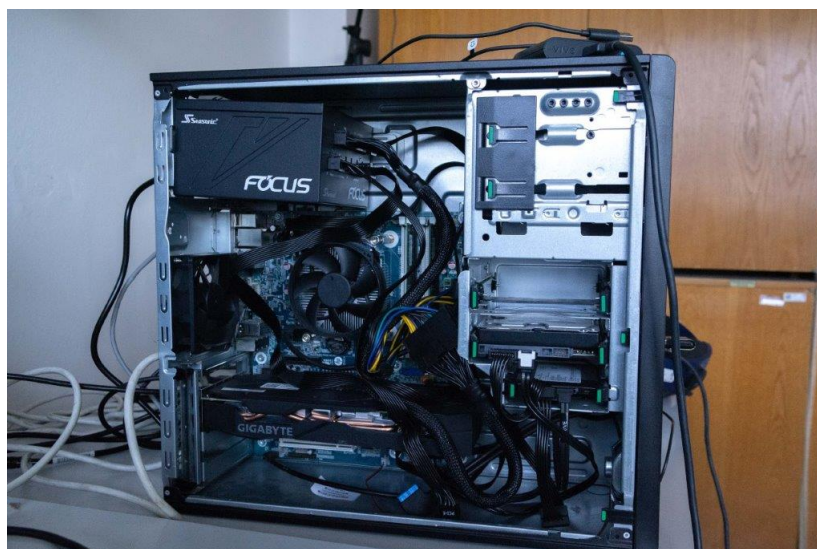
název parametru	Quadro K2200	RTX 2060
velikost paměti	4 GB	6 GB
typ paměti	GDDR5	GDDR6
šířka sběrnice	128 b	192 b
taktovací frekvence	N.A.	14 MHz
počet jader	640	1920
maximální rozlišení @ 60 Hz	3840 px × 2160 px	7680 px × 4320 px
sběrnice	PCI-E 2.0 x16	PCI-E 3.0 x16
konektivita	2× DisplayPort 1.2 1× DVI-I DL	3× DisplayPort 1.4 1× HDMI 2.0
napájení	přes PCI-E	externí (8pin PCIe)
požadovaný výkon PSU	N.A.	500 W

**Tabulka 2.4:** Srovnání dostupných PSU

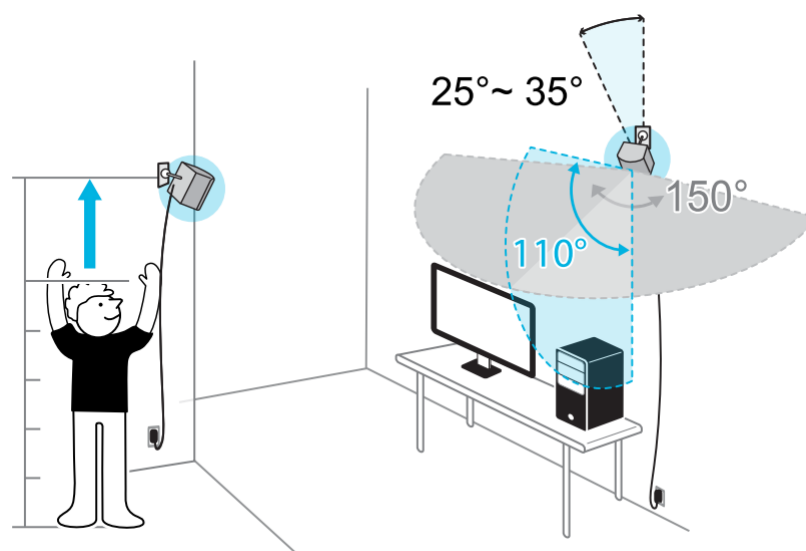
název parametru	DPS-400AB	GX 850
výstupní výkon	400 W	850 W
modularita	nemodulární	plně modulární
konektivita	MB 16 pin SATA PCIe 6pin	MB 24 pin SATA PCIe 8pin

toho jsem bázové stanice umístil nejprve na stojany od světel (vzhledem k jejich průměru závitu, který odpovídá průměru závitu na bázových stanicích), po zakoupení příslušné redukce pak na mikrofonní stojany, na kterých jsou bázové stanice dosud. Jejich polohu a natočení jsem se snažil volit tak, aby přibližně odpovídala doporučení z obr. 2.8 a stanice pokrývaly celý „herní prostor“ (který je ale v případě aplikace na vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS velmi malý, neboť je posluchač celou na jednom místě a může se pouze otáčet).

Vlastní instalace driverů HMD proběhla po připojení HMD k PC s využitím dodávané aplikace *ViveSetup* bez jakýchkoliv problémů. Pro spuštění VR se tak v současné době pouze stačí přihlásit do účtu Steam, spustit aplikaci *SteamVR* a umístit HMD do „herního prostoru“.



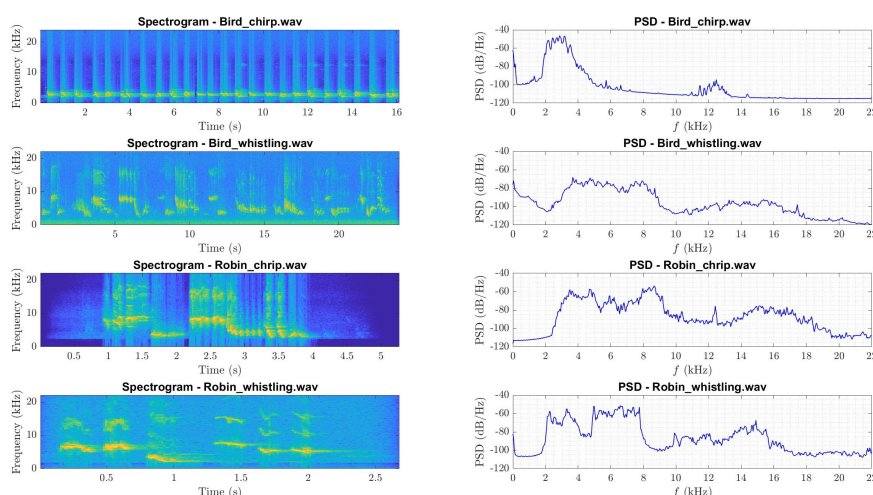
**Obrázek 2.7:** Detail sestavené pracovní stanice pro laboratoř VR systémů s jednotlivými komponenty



**Obrázek 2.8:** Doporučené rozmístění základních stanic dle manuálu HMD HTC VIVE Pro eye (převzato z [25])

## ■ Oživení původní aplikace

Původní verze aplikace pro testování ve VAS byla vytvořena v Unity ve verzi 2018.2.6f1 s využitím staršího pluginu OpenVR (který je už v současné době neudržovaný a v novějších verzích Unity není podporován). V první fázi diplomové práce jsem se rozhodl aplikaci převést (i s ohledem na plánované experimenty se sledováním očních pohybů) do nejnovější verze Unity s využitím nového pluginu OpenXR. Bohužel jsem ale zjistil, že tento převod je velmi náročný a po přečtení několika příspěvků v komunitě vývojářů Unity (viz



**Obrázek 2.9:** Srovnání spektrogramů a PSD dostupných zvukových zdrojů v testovací aplikaci

např. [42]) jsem se dočetl, že je lepší aplikace vytvořené s využitím pluginu OpenVR nepřekódovávat a provozovat s využitím LTS (*Long Term Support*) verzí Unity, což jsem nakonec také udělal.

V samotné aplikaci jsem příliš změn neudělal, změnil jsem pouze drobnosti v kódu kolegy Jarolímka (hlavně kvůli správným cestám pro ukládání výstupů z testů aj.) za účelem vytvoření stabilního buildu finálního testu. Také jsem na základě připomínek od vedoucího práce provedl spektrální analýzu zvuků, které se používaly v původní aplikaci k lokalizaci jednotlivých zdrojů zvuku. Výsledky spektrální analýzy ukazuje obr. 2.9. Je vidět, že teoreticky nejvhodnějším zvukem pro lokalizaci je zvuk označený jako `Robin_whistling.wav`, a to z důvodu jeho širokého spektrálního rozsahu (viz 1.3). Daný zvuk je i pro posluchače velmi příjemný na poslech, a proto jsem tedy tento zvuk zvolil jako jediný, který se v realizovaných testech využívá (pokud nepočítám zvuk akustických distraktorů).

## 2.3 Propojení mezi jednotlivými pracovišti

Data mezi jednotlivými pracovišti se přenášejí pomocí souboru uloženém ve formátu SOFA. Struktura tohoto souboru je popsána v sekci 1.2.3. Vytvoření souboru ve formátu SOFA probíhá s využitím SOFA Matlab/Octave API, které je dostupné z [43]. Toto API obsahuje několik předdefinovaných funkcí sloužících jak pro ukládání, tak i čtení či práci se soubory ve formátu SOFA. V rámci diplomové práce využívám pro vytvoření SOFA souboru funkci `SOFASave`

Při nahlédnutí do komentáře funkce `SOFASave` je vidět, že na svém vstupu



## Kapitola 3

### Návrh měření a hypotéz

#### 3.1 Výběr testů a generické HRTF

Po přípravě a zprovoznění jednotlivých pracovišť bylo nutné vybrat příslušné testy, které ukáží schopnost prostorové lokalizace při různých HRTF. Rozhodl jsem se vyjít z testů, které sestrojil kolega Jarolímek v rámci své diplomové práce. Vybral jsem celkem 14 testů, z toho

- **9 statických** (T01-T08, T12) – jednotlivé testy se skládají z několika statických objektů (z nichž je vždy právě 1 zdrojem zvuku) a liší se jejich rozložením v prostoru, úhlovou vzdáleností či velikostí zdroje; cílem testů je zjistit schopnost lokalizace zdrojů zvuku při různém rozložení zdrojů a jejich různé vzdálenosti od posluchače,
- **3 dynamické** (T09-T11) – jednotlivé testy se skládají z několika objektů (z nichž je vždy právě 1 zdrojem zvuku), které mění svoji pozici v prostoru (u některých testů i mezi sebou); cílem testů je zjistit schopnost lokalizace zdrojů zvuku při jejich pohybu
- **2 kombinované** (T13-T14) – jednotlivé testy se skládají z několika různých objektů, z nichž jsou některé statické, jiné pohyblivé a některé fungují jako akustické distraktory (veverka, želva, déšť); cílem testů je zjistit schopnost lokalizace zdrojů zvuku při působení dalších „rušivých“ zvukových i vizuálních zdrojů.

Po vybrání příslušných testů jsem s těmito testy vytvořil stabilní build dané aplikace, pomocí kterého jsem odbavil všechna měření. Jako generickou HRTF jsem se rozhodl vybrat HRTF z databáze Club Fritz. Tato databáze obsahuje několik HRTF změřených pro binaurální mikrofon Neumann KU-100 v různých laboratořích vysokých škol z celého světa. Pro testování jsem se rozhodl použít HRTF označenou jako `ClubFritz8.sofa`, která pochází z NICT v Japonsku. Tato HRTF je měřena celkem v 1008 bodech. Důvod použití této HRTF je z toho důvodu, že byla měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje, což jsou stejné podmínky, které byly realizovány i při měření na FEL. Podrobnosti o všech změřených HRTF v databázi Club Fritz shrnuje [10].

Individuální HRTF je možné změřit celkem v 5 elevacích  $\theta$  pro různé azimuty v každé z elevací. Vybrané rozložení měřicích bodů shrnuje tab. 3.1. Individuální HRTF tedy bude celkem měřena v 85 bodech. Různé rozložení měřicích bodů bylo voleno z toho důvodu, abychom se na vybraných elevacích (typicky těch, které jsou podstatné pro vybrané testy, tj.  $\theta \in \{-20^\circ; 0^\circ; 20^\circ\}$ ) přiblížili prostorovému rozlišení použité generické HRTF.

**Tabulka 3.1:** Přehled měřicích bodů při měření vlastní HRTF testovaných subjektů

elevace $\theta$ ( $^\circ$ )	azimut $\varphi$ ( $^\circ$ )
60	0, 35, 70, 90, 110, 180, 250, 270, 290, 325
40	0, 25, 50, 70, 90, 110, 180, 250, 270, 290, 315, 340
20	0, 5, 10, 15, 20, 35, 50, 70, 90, 110, 150, 180,
0	210, 270, 290, 310, 325, 340, 345, 350, 355
-20	

## 3.2 Stanovení hypotéz a testovací množiny

Před začátkem testování je nutné stanovit nulové hypotézy, které chci v rámci vlastního testu zamítnout či přijmout (vč. požadované hladiny významnosti  $\alpha$ ). K těmto hypotézám by zároveň rovnou měly být přiřazeny i statistické testy, aby bylo možné s jejich pomocí určit minimální velikost testovací množiny tak, aby data měla statisticky vypovídající hodnotu (hlavně se jedná o redukci chyb prvního a druhého typu). Přehled základních hypotéz (vč. určení příslušných statistických testů<sup>1</sup>) shrnuje tab. 3.2. S určení velikosti testovací množiny mi pomohl program GPower, který na základě následujících parametrů

- velikost účinku (*effect size*): 0,4 (předpokládám střední až menší rozdíly mezi jednotlivými skupinami),
- hladina významnosti  $\alpha$ : 0,05,
- síla testu ( $1 - \beta$ ): 0,8,

doporučil test realizovat alespoň s 50-55 respondenty, což je hodnota, které jsem se pokusil dosáhnout v rámci diplomové práce i já. V případě získání statisticky významných rozdílů bych rád vlastní měření rozšířil (např. v průběhu doktorského studia či návazného výzkumu), aby se platnost hypotéz prokázala s menší pravděpodobností chyby.

<sup>1</sup>Testy jsem se snažil volit dle předpokládaného rozdělení dané veličiny a jejich robustnosti – u reakčního času předpokládám, že se ze svého principu bude blížit normálnímu rozdělení, a proto jsem volil parametrické testy, u úhlové chyby jsem naopak zvolil neparametrické testy, neboť dané rozdělení bude velmi šikmé – většina hodnot bude v okolí  $0^\circ$



**Tabulka 3.2:** Přehled nulových hypotéz a využitých statistických testů

hypotéza $H_0$	provedený test	označení testu
Časy reakce pocházejí u generické HRTF z normálního rozdělení.	Lilliefors test	SW_generic
Časy reakce pocházejí u individuální HRTF z normálního rozdělení.	Lilliefors test	SW_individual
Časy reakce pocházejí u generické i individuální HRTF z rozdělení se stejnou střední hodnotou.	párový t-test	t_time
Úhlové rozdíly pocházejí u generické i individuální HRTF z rozdělení se stejným mediánem.	párový Wilcoxonův	RS_angle
Počet správně lokalizovaných zdrojů zvuku pochází u generické i individuální HRTF z rozdělení se stejným mediánem.	párový Wilcoxonův	RS_count
Průměrný čas reakce se nemění v závislosti na pohlaví.	ANOVA	A_sex
Průměrný čas reakce se nemění v závislosti na zkušenostech s VR.		A_exp
Průměrný čas reakce se nemění v závislosti na pohlaví a zkušenostech s VR zároveň.		A_sex_exp
Průměrný úhlový rozdíl se nemění v závislosti zkušenostech s VR.	Kruskal-Wallis	KW_angle

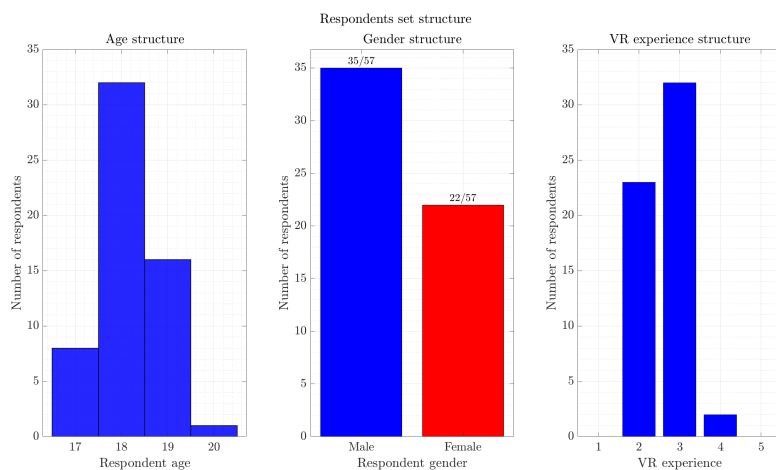


## Kapitola 4

### Realizace a vyhodnocení realizovaných měření

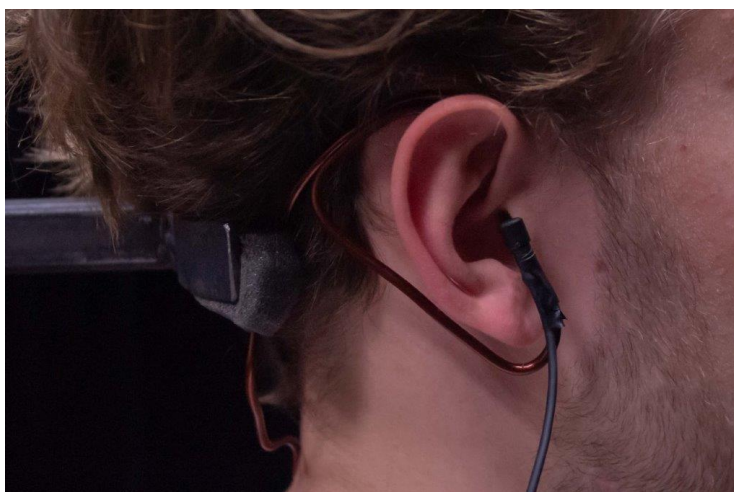
#### 4.1 Realizace měření

Subjektivní měření se uskutečnila převážně v průběhu dubna 2022. Všechny části měření (tj. změření HRTF a podstoupení 2 lokalizačních testů ve VR prostředí) se zúčastnilo celkem 57 osob. Demografickou strukturu respondentů shrnuje obr. 4.1. Z obrázku vyplývá, že se mi bohužel nepodařilo v dostatečném počtu respondentů zajistit i starší osoby (i vzhledem k doznívající pandemii). Z tohoto důvodu jsem se rozhodl měření zaměřit hlavně na mladší osoby, neboť je více než pravděpodobné, že za několik let budou právě oni pravidelnými konzumenty VR systémů.



**Obrázek 4.1:** Demografická struktura respondentů (význam popisu osy u zkušenosti s VR viz sekce 4.2.1)

Měření typicky probíhalo po skupinkách 5-6 osob a jedna tato měřicí sekvence trvala přibližně hodinu a půl. Měření probíhalo tím způsobem, že respondentům byl nejprve představen koncept HRTF (tedy velmi stručně řečeno co to HRTF je, proč se měří a k čemu se dá využít). Následně jednotliví respondenti



**Obrázek 4.2:** Uchycení mikrofonů na uši respondentů při měření HRTF. Respondenti byli celou dobu opření o opěrku umístěnou vzadu na židli, díky čemuž byl mikrofon statický.

podstoupili měření HRTF (uchycení mikrofonů na ucho přibližuje obr. 4.2). Pro měření impulsní odezvy byla využita metoda OLSS, a to vzhledem k tomu, že je z implementovaných metod časově nejefektivnější – měření tedy pro respondenty trvá nejkratší dobu (zhruba kolem 3-4 minut). Tato výhoda je vykoupena delším zpracováním naměřených dat, což ale není takový problém, neboť je možné tato data zpracovat a převést do SOFA formátu při realizaci poslechových testů s generickou HRTF. Při zpracování byl na naměřená data aplikován low pass filtr (se zlomovým kmitočtem 100 Hz) a high pass filtr (se zlomovým kmitočtem 18 kHz). Ekvalizace měřicího systému (i vzhledem k výsledkům popsaným v [31] pro vzdálenost měřeného respondenta 1 m od reproduktorů) nebyla provedena. Dále byla naměřená impulzní odezva zkrácena na 512 vzorků. Toto rozlišení nám podává dostatečnou informaci o tvaru dané HRTF (a vzhledem k její délce, která odpovídá  $2^n$ , je i výpočetní náročnost při provádění FFT nižší), zároveň umožňuje poměrně značně redukovat velikost výsledného SOFA souboru.

Po provedení měření HRTF se respondenti přesunuli na pracoviště pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS. Zde byli respondenti seznámeni s průběhem testů (tzn. že dostali základní informace o tom, co je v testech čeká, jakým způsobem se vybírají zdroje zvuku aj.) a měli možnost si vyzkoušet VR prostředí a danou aplikaci (na jiných testech než byly vybrány pro vlastní testování) před začátkem testování. Po této úvodní sekvenci jednotliví respondenti podstoupili vybranou množinu 14 testů s generickou HRTF, následně měli přibližně 15-20 minut přestávku (než proběhlo testování s generickou HRTF pro celou skupinu) a poté podstoupili opětovné měření, tentokrát s jejich individualizovanou HRTF (která byla v průběhu testů s generickou HRTF vyhodnocena). Během testů seděli respondenti na židli a mohli libovolně naklánět hlavou (viz obr. 4.3). V přestávce mezi měřeními



**Obrázek 4.3:** Ukázka průběhu vlastního testování na pracovišti pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS

nedostávali respondenti informaci o tom, jak dopadlo měření s generickou HRTF, proto nemohou být výsledky tímto faktem zkresleny.

## 4.2 Naměřená data a způsoby jejich vyhodnocení

### 4.2.1 Struktura dat pro statistické zpracování

Jak již bylo zmíněno v sekci 2.2.1, výstupem z měřicí sekvence je soubor, který pro každý z testů obsahuje základní proměnné, které charakterizují, jakým způsobem si testovaný subjekt vedl. Všechny číselné proměnné (tj. čas reakce a úhlovou chybu) jsem převzal v nezměněné podobě, binární proměnnou správnost lokalizace jsem převzal tak, že původní hodnotě „Correct“ pro zpracování odpovídá hodnota „1“ a hodnotě „Incorrect“ hodnota „0“. Tyto údaje (spolu s údajem o celkové době trvání testu) tvoří základ pro další statistické zpracování. Z důvodu větší statistické relevance jsem výstupy z testů doplnil základními demografickými informacemi o jednotlivých respondentech, které jsem získal z dotazníkového šetření před vlastním testováním popř. při měření HRTF. Jedná se konkrétně o následující informace

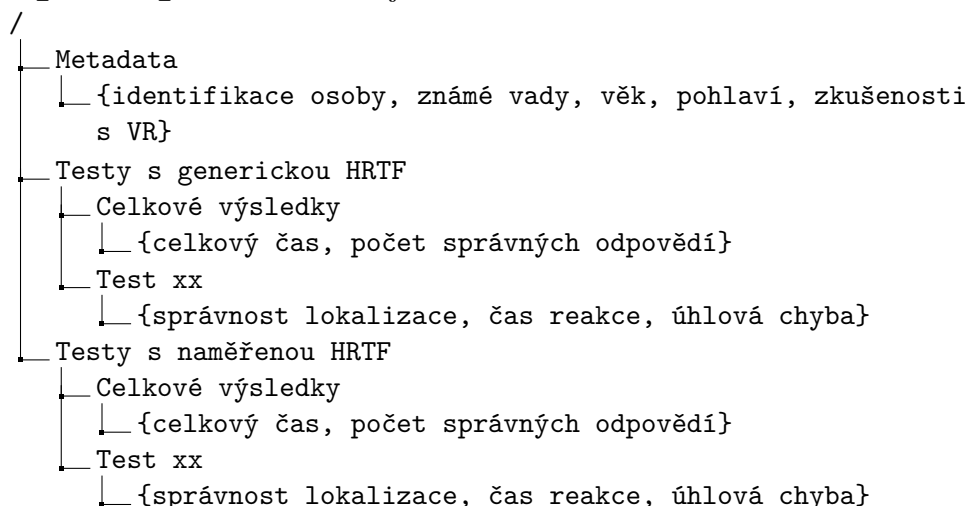
- **věk** – hodnota věku subjektu zaokrouhlená směrem dolů (vzhledem k nízkému věkovému rozptylu respondentů jsem nakonec tuto hodnotu nevyužil),
- **pohlaví** – binární proměnná s hodnotami {M – muž; F – žena},
- **známých sluchových a zrakových vadách** – slouží hlavně pro případné vyřazení odlehlých hodnot,

- **zkušenosti s VR** – kategorická proměnná s kategoriemi {žádné; základní povědomí; letmá zkušenost; aktivní konzument; aktivní tvůrce}<sup>1</sup>,

## 4.2.2 Zpracování naměřených dat

Zpracování naměřených dat proběhlo kompletně s využitím SW MATLAB. Všechny použité skripty (vč. komentářů) jsou k dispozici v elektronické příloze diplomové práce.

Nejprve jsem s využitím skriptu `results_split` rozdělil jednotlivé výsledky testů do samostatných souborů (při realizaci více měření za sebou byly všechny výsledky uloženy v jednom souboru, což by pro zpracování nebylo příliš přehledné) s pevně danou strukturou. Výsledné textové soubory s výsledky skript uložil do složky `results`. Textové soubory z této složky jsem poté použil jako vstup do skriptu `results_read`. Tento skript nejprve načte jednotlivé textové soubory a získá z nich informace o respondentovi a proměnné charakterizující výsledky jednotlivých testů (viz sekce 4.2.1). Následně tato data na základě jména respondentů spáruje (také spolu s tabulkou `respondents_data.xlsx`, ve které jsou demografické informace o respondentech) a vytvoří proměnnou `test_results_sorted` s následující strukturou



Následně je proměnná `test_results_sorted` využita na vstupu skriptu `results_processing`, ve kterém dochází k vizualizaci výsledků, kdy pro každý test (a pro každý typ HRTF odděleně) jsou vytvořeny následující grafy

- **počet správných odpovědí** – bar plot, který ukazuje počet správných odpovědí pro daný typ testu (pro přehlednost je nad každým bar plotem napsáno i číslo ve tvaru „počet správných odpovědí/celkový počet respondentů“),
- **čas reakce** – box plot vizualizující dané rozložení vč. zobrazení mediánu a případných outlierů,

<sup>1</sup>Tyto kategorie jsou na histogramu z obr. 4.1 označeny čísly 1-5 v pořadí, v jakém jsou zde vyjmenovány.

- **úhlová chyba** – beeswarm plot, který ukazuje rozložení naměřených hodnot; růžovým křížkem je pak vyobrazen medián pro jednotlivé testy.

Analogicky jsou vizualizovány i celkové statistiky provedených testů (boxplot s celkovými časy a histogramy s počtem správných odpovědí pro generickou a naměřenou HRTF) a demografické informace o respondentech (histogram s věkem respondentů a boxploty s pohlavím a zkušenostmi respondentů s VR).

Následně jsou provedeny statistické testy zmíněné v tab. 3.2. Jak vyplývá z této tabulky, normalitu časů reakce jsem se pokoušel ověřit pomocí Lilliefors testu (výjimečně na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ ). Ve většině případů dle tohoto testu vyšlo, že data pocházejí z normálního rozdělení. U některých měření se však normalita neprokázala. I přesto jsem se ale i v těchto případech rozhodl na čas reakce aplikovat parametrické testy (vzhledem k tomu, že mám relativně velký počet respondentů) s tím, že v případě velmi „těsného“ výsledku skutečnost nenormality vezmu v potaz. Výstupy z jednotlivých testů vč. stručného komentáře, shrnuje následující sekce (vizualizace výsledků jednotlivých testů jsou pro přehlednost umístěny do přílohy B).

### ■ 4.2.3 Stručný rozbor výsledků

#### ■ Test 01

V rámci prvního testu respondenti vybírali ze dvou statických objektů na stejné elevaci, ale s různými azimuty (úhlový rozdíl  $8^\circ$ ). Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.1, výstupy z příslušných statistických testů (uvedených v kapitole 3) shrnuje tab. 4.1. I bez prohlédnutí exaktních výstupů statistických testů je z vizualizace vidět, že pro lokalizaci takovýchto zdrojů není vlastní HRTF zapotřebí – rozdíly jsou statisticky nevýznamné. Efekt skupin (pohlaví a zkušenosti s VR) je pro tento test také statisticky nevýznamný.<sup>2</sup>

#### ■ Test 02

V rámci druhého testu respondenti opět vybírali ze dvou statických objektů na stejné elevaci, ale s různými azimuty (tentokrát byl větší úhlový rozdíl  $15^\circ$ ). Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.2, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.2. Rozdíly jsou v tomto případě statisticky významné (tj. jak pro rychlost reakce, tak pro úhlový rozdíl). Překvapivé však je to, že při použití vlastní HRTF se obě metriky zvětšují (a počet správných odpovědí klesá). Vzhledem k tomu, že tento test nebyl vůbec komplexní (tj. jednalo se pouze o 2 objekty na stejném azimutu), nedokáží bohužel přesně určit, čím je toto způsobeno.

<sup>2</sup>Jak vyplývá z dalších výsledků, efekt skupin je statisticky nevýznamný u všech testů, proto se už o něm nebudu zmiňovat. Předpokládám, že tato nevýznamnost je dána buď malou testovací množinou popř. hrubým rozlišením naměřené HRTF.

**Tabulka 4.1:** Test 01 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,14, p = 0,015$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,17, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = 0,42, p = 0,67$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,45, p = 0,65$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,01, p = 0,93$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,26, p = 0,77$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,88, p = 0,42$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 0,96, p = 0,62$	$H_0$

**Tabulka 4.2:** Test 02 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,18, p < 0,01$	$H_1$
SW_individual	$K(56) = 0,20, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = -2,39, p = 0,02$	$H_1$
RS_angle	$Z = -2,42, p = 0,02$	$H_1$
A_sex	$F(1,51) = 0,07, p = 0,79$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 1,14, p = 0,33$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 1,39, p = 0,26$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 1,11, p = 0,57$	$H_0$

### ■ Test 03

V rámci třetího testu respondenti vybírali ze tří statických objektů rozmístěných do trojúhelníku (tzn. jednotlivé zdroje mají odlišný azimut i elevaci) s úhlovým rozdílem  $5^\circ$ . Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.3, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.3. Je vidět, že rozdíly v tomto případě nejsou statisticky významné. Je ale možné pozorovat delší dobu reakce, neboť se již jedná o komplexnější strukturu postavení objektů.

### ■ Test 04

V rámci čtvrtého testu respondenti opět vybírali ze tří statických objektů rozmístěných do vrcholů trojúhelníku, tentokrát byl úhlový rozdíl  $15^\circ$ . Vizualizaci



**Tabulka 4.3:** Test 03 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,13, p = 0,016$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,14, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = -0,90, p = 0,37$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,55, p = 0,58$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,11, p = 0,74$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,67, p = 0,52$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,56, p = 0,57$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 2,29, p = 0,32$	$H_0$

**Tabulka 4.4:** Test 04 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,14, p = 0,014$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,12, p = 0,08$	$H_0$
t_time	$t(56) = -1,70, p = 0,10$	$H_0$
RS_angle	$Z = -2,88, p < 0,01$	$H_1$
A_sex	$F(1,51) = 0,83, p = 0,37$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 1,65, p = 0,20$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 1,19, p = 0,31$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 1,25, p = 0,54$	$H_0$

scény a výsledků shrnuje obr. B.4, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.4. Úhlový rozdíl je statisticky významný. Stejně jako u Testu 02 (opět se jedná o úhlový posun zdrojů  $15^\circ$ ) je překvapivé, že po využití vlastní HRTF jsou hodnoty výrazně odlišné, a to tak, že horší lokalizace nastává s vlastní HRTF. Takto výraznou změnu si v současné nedokáží vysvětlit a bylo dobré ji při příštích měřeních dále prozkoumat.

#### ■ Test 05

V rámci pátého testu respondenti vybírali ze čtyř statických objektů rozmístěných do vrcholů trojúhelníku, s úhlovým rozdílem  $8^\circ$  a jedním objektem umístěným ve středu tohoto trojúhelníku. Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.5, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.5. Ani jeden

z pozorovaných výsledků není statisticky významný (ačkoliv téměř zamítáme hypotézu  $H_0$  u času reakce – překvapivě z vizualizací plyne, že při použití vlastních HRTF je doba reakce vyšší).

### ■ Test 06

V rámci šestého testu respondenti opět vybírali ze čtyř statických objektů rozmístěných do vrcholů trojúhelníku a jeho středu, tentokrát však s úhlovým rozdílem  $3^\circ$ , který je na prahu rozlišitelnosti. Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.6, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.6. Ani jeden z pozorovaných výsledků není statisticky významný. Je také vidět, že počet správně lokalizovaných zdrojů pro generickou a změřenou HRTF je zhruba srovnatelný.

**Tabulka 4.5:** Test 05 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,15, p < 0,01$	$H_1$
SW_individual	$K(56) = 0,10, p = 0,19$	$H_0$
t_time	$t(56) = -1,90, p = 0,06$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,12, p = 0,91$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,73, p = 0,40$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,7, p = 0,50$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,24, p = 0,79$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 4,76, p = 0,09$	$H_0$

**Tabulka 4.6:** Test 06 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,16, p < 0,01$	$H_1$
SW_individual	$K(56) = 0,12, p = 0,08$	$H_0$
t_time	$t(56) = 1,63, p = 0,11$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,20, p = 0,84$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,02, p = 0,88$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 2,48, p = 0,09$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,03, p = 0,97$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 4,34, p = 0,11$	$H_0$

### ■ Test 07

V rámci sedmého testu respondenti vybírali ze čtyř statických objektů, které byly rozmístěny do vrcholů čtverce. Úhlový rozdíl zůstal shodný jako v předchozím případě, a to  $3^\circ$ . Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.7, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.7. Za statisticky významný lze v tomto případě považovat rozdíl mezi mediány úhlové chyby. Z výsledků vyplývá, že se překvapivě podařilo dosáhnout větší přesnosti lokalizace zvuku s generickou HRTF. Dle mého názoru je toto způsobeno větším rozlišení generické HRTF v elevaci  $\theta$ .

### ■ Test 08

V rámci osmého testu respondenti opět vybírali ze čtyř statických objektů, které byly rozmístěny do vrcholů čtverce. Úhlový rozdíl se tentokrát zvýšil na  $15^\circ$ . Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.8, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.8. Za statisticky významný (leč velmi slabě – přesně na hranici intervalu spolehlivosti) lze v tomto případě považovat rozdíl mezi střední hodnotou rychlosti reakce. Z výsledků vyplývá, že respondenti byli schopni rychleji zareagovat s generickou HRTF, což dle mého jen potvrzuje mé tvrzení uvedené u Testu 07, neboť při rozmístění jednotlivých objektů do vrcholů čtverce je správné rozlišení v elevaci klíčové.

### ■ Test 09

Od devátého testu začínají dynamické testy, při kterých se jednotlivé objekty pohybují (v předchozích testech byly stále statické, jen se měnil jejich počet a vzájemné rozmístění). V rámci devátého testu byly umístěny čtyři objekty ve vrcholech čtverce (tak jako v předchozích dvou testech) a pohybovaly se definovaným způsobem po ose  $x$  (tzn. docházelo ke změně jejich azimutu

**Tabulka 4.7:** Test 07 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,17, p < 0,01$	$H_1$
SW_individual	$K(56) = 0,13, p = 0,03$	$H_0$
t_time	$t(56) = -1,30, p = 0,20$	$H_0$
RS_angle	$Z = -2,17, p = 0,03$	$H_1$
A_sex	$F(1,51) = 0, p = 0,99$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,37, p = 0,69$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,38, p = 0,69$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 0,58, p = 0,75$	$H_0$

**Tabulka 4.8:** Test 08 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,11, p = 0,08$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,17, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = -2,01, p = 0,049$	$H_1$
RS_angle	$Z = -1,69, p = 0,09$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,16, p = 0,69$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 1,13, p = 0,33$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,08, p = 0,93$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 0,64, p = 0,73$	$H_0$

$\varphi$ ). Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.9, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.9. Ani jeden z pozorovaných výsledků není v tomto testu statisticky významný. Je ale zajímavé sledovat, jak pohyb objektů pomohl lokalizaci pomocí naměřené HRTF, neboť počet správně lokalizovaných zdrojů je nyní pro oba typy HRTF velmi podobný.

#### ■ Test 10

V rámci desátého testu respondenti vybírali ze sedmi objektů, které se náhodně pohybovaly po ose  $x$ . Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.10, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.10. Ani jeden z pozorovaných výsledků není v tomto testu statisticky významný. Začíná se zde ale projevovat

**Tabulka 4.9:** Test 09 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,12, p = 0,05$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,15, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = -0,49, p = 0,62$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,27, p = 0,78$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,06, p = 0,81$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,04, p = 0,97$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,57, p = 0,57$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 0,23, p = 0,89$	$H_0$

**Tabulka 4.10:** Test 10 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,10, p = 0,24$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,09, p = 0,30$	$H_0$
t_time	$t(56) = -1,04, p = 0,30$	$H_0$
RS_angle	$Z = 1,76, p = 0,08$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,03, p = 0,87$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 1,05, p = 0,36$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,98, p = 0,38$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 3,64, p = 0,16$	$H_0$

naměřená HRTF, která pomáhá k přesnější lokalizaci jednotlivých zdrojů zvuku (a to i přesto, že se počet zdrojů zvuku zvětšuje).

### ■ Test 11

V rámci jedenáctého testu respondenti vybírali ze sedmi objektů, které se náhodně pohybovaly jak po ose  $x$ , tak i po ose  $y$  (tzn. že měnily jak svůj azimut  $\varphi$ , tak svoji elevaci  $\theta$ ). Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.11, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.11. Ani jeden z pozorovaných výsledků není v tomto testu statisticky významný. Opět je však možné pozorovat vliv naměřené HRTF na přesnou lokalizaci zdrojů zvuku.

**Tabulka 4.11:** Test 11 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,09, p = 0,26$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,11, p = 0,07$	$H_0$
t_time	$t(56) = -0,94, p = 0,35$	$H_0$
RS_angle	$Z = -0,53, p = 0,60$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,54, p = 0,47$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,21, p = 0,81$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,93, p = 0,40$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 0,5, p = 0,79$	$H_0$

### ■ Test 12

V rámci dvanáctého testu respondenti vybírali ze sedmi objektů, které byly statické, ale každý z objektů měl jiný rozměr. Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.12, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.12. Ani jeden z pozorovaných výsledků není v tomto testu statisticky významný. Stejně jako v předchozích případech je ale u tohoto testu vidět, že s využitím naměřené HRTF se podařilo většímu množství respondentů správně určit polohu daného zdroje zvuku.

### ■ Test 13

V rámci třináctého testu respondenti vybírali z osmi objektů, které se náhodně pohybovaly kolem posluchače (a některé z nich byly statické). Zároveň byly v rámci scény přítomny i dva pohyblivé audio distraktory (želva a veverka), které sloužily pro odvedení pozornosti. Vizualizaci scény a výsledků shrnuje obr. B.13, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.13. Jako statisticky významný výsledek je možné určit změnu času reakce. Jak je vidět z vizualizace, pro naměřenou HRTF je medián reakčního času nižší než pro generickou HRTF. Z počtu správných odpovědí také plyne, že tento test byl pro respondenty nejtěžší a přesně zvládlo zdroje lokalizovat jen zhruba 20 % respondentů (pro naměřenou HRTF o 2 více než pro generickou HRTF). Na druhou stranu, v případě špatné lokalizace byla úhlová chyba zhruba kolem  $6^\circ$ , což je vzhledem k počtu akustických podnětů velmi dobrý výsledek.

### ■ Test 14

V rámci čtrnáctého testu respondenti vybírali ze sedmi statických objektů náhodně rozmístěných před posluchačem. Do scény byl také za posluchače vložen statický audio distraktor ve formě deště. Vizualizaci scény a výsledků

**Tabulka 4.12:** Test 12 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,14, p = 0,011$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,11, p = 0,10$	$H_0$
t_time	$t(56) = 1,51, p = 0,14$	$H_0$
RS_angle	$Z = 1,43, p = 0,15$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,1, p = 0,75$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,21, p = 0,80$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,26, p = 0,77$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 4,16, p = 0,12$	$H_0$

**Tabulka 4.13:** Test 13 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,12, p = 0,07$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,14, p < 0,01$	$H_1$
t_time	$t(56) = 3,01, p < 0,01$	$H_1$
RS_angle	$Z = 1,30, p = 0,20$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 1,25, p = 0,27$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,25, p = 0,78$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,08, p = 0,92$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 1,07, p = 0,59$	$H_0$

shrnuje obr. B.14, výstupy z příslušných statistických testů shrnuje tab. 4.14. Ani jeden z pozorovaných výsledků není v tomto testu statisticky významný. Stejně jako v předchozích případech je ale i u tohoto testu vidět, že díky naměřené HRTF se podařilo většímu množství respondentů správně určit polohu daného zdroje zvuku.

### ■ Celkové shrnutí

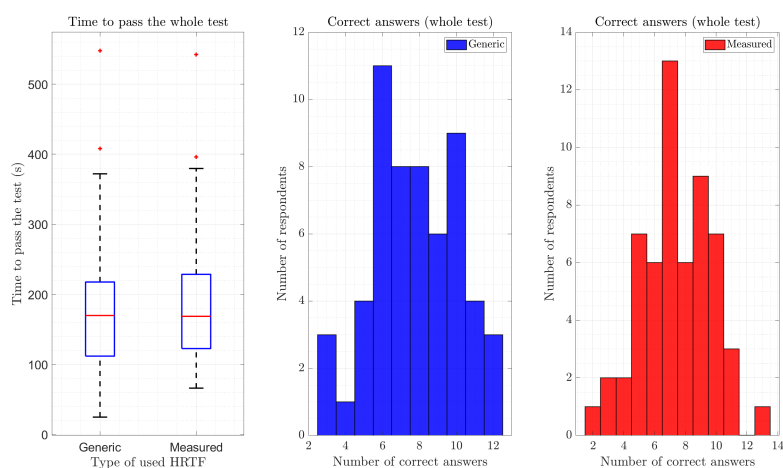
Na obr. 4.4 je vidět vizualizace celkového shrnutí realizovaných testů. Výstupy ze statistických testů shrnuje tab. 4.15. Z vizualizace a výsledků testů je patrné, že časy vyplňování testu jsou pro oba typy HRTF (tedy generickou a naměřenou) srovnatelné, stejně tak i počet správných odpovědí. Z celkového

**Tabulka 4.14:** Test 14 – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,13, p = 0,03$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,09, p = 0,41$	$H_0$
t_time	$t(56) = -0,54, p = 0,59$	$H_0$
RS_angle	$Z = 0,91, p = 0,36$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,1, p = 0,76$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,57, p = 0,57$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,2, p = 0,82$	$H_0$
KW_angle	$H(2) = 1,57, p = 0,46$	$H_0$

**Tabulka 4.15:** Celkové shrnutí – hodnoty statistik

označení testu	hodnoty statistik	výsledná hypotéza
SW_generic	$K(56) = 0,13, p = 0,03$	$H_0$
SW_individual	$K(56) = 0,12, p = 0,04$	$H_0$
t_time	$t(56) = -1,25, p = 0,22$	$H_0$
RS_count	$Z = 1,40, p = 0,16$	$H_0$
A_sex	$F(1,51) = 0,02, p = 0,89$	$H_0$
A_exp	$F(2,51) = 0,65, p = 0,52$	$H_0$
A_sex_exp	$F(2,51) = 0,24, p = 0,79$	$H_0$

**Obrázek 4.4:** Vizualizace celkového shrnutí

přehledu se tedy příliš nevyplatí vlastní HRTF měřit. V rozboru jednotlivých testů však bylo vidět, že pro některé testy (hlavně ty, ve kterých dochází k pohybu jednotlivých zvukových zdrojů) je využití vlastní HRTF velmi výhodné, neboť dokáže zajistit rychlejší reakci respondenta, což je pro mnoho VR systémů klíčové.



## Závěr

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval vlivem HRTF na polohu zdroje zvuku v prostředí VR. Mým cílem bylo navrhnout testovací proceduru, znovu zprovoznit, propojit a modifikovat dostupná měřicí pracoviště na katedře radioelektroniky a provést subjektivní testy.

Na katedře radioelektroniky v rámci diplomové práce nově vzniklo v místnosti 542 pracoviště pro VR, které sloužilo jak pro potřeby subjektivních testů, tak na něm zároveň pracovali i další kolegové v rámci svých závěrečných prací. Vzájemnou komunikací (hlavně s kolegou Mičínem) se na tomto pracovišti podařilo odladit původní nedokonalosti (např. špatný tracking HMD, nedostatečný výkon zdroje PC aj.) a dle mého pohledu je pracoviště v současném stavu plně funkční a připravené na další projekty související s VR systémy. Pokud by bylo pracoviště pro VR umístěno v této místnosti nastalo, bylo by ještě rámci navazujících projektů dobré modifikovat pozici bazových stanic (např. je pevně umístit na zeď) a lépe definovat „herní zónu“ pro VR prostředí – v rámci subjektivních testů toto nebylo zapotřebí, pro náročnější aplikace (ve kterých by byl důležitý i pohyb respondentů) by však toto bylo naprostou nutností.

Dále jsem v rámci diplomové práce implementoval funkční propojení (ve formě konvertoru naměřených HRIR do formátu SOFA) mezi pracovištěm pro měření HRTF a pracovištěm pro vyhodnocování polohy zdroje zvuku ve VAS. Při implementaci propojení jsem navázal na práci kolegy Tirau, který se tímto problémem také zabýval, bohužel však funkční implementaci nedokončil. V rámci diplomové práce se mi bohužel nepodařilo ověřit implementaci ekvalizace na pracovišti pro měření HRTF, o které se zmiňuje kolega Šupka ve své diplomové práci. Myslím si, že i bez provedení ekvalizace jsou výsledky práce relevantní. Pro častější využívání pracoviště pro měření HRTF je poté nutné odladit problémy mechanické soustavy otočné židle (hlavně vypadávající řemen). Také by bylo vhodné soustavu pro měření HRTF umístit blíže k pracovišti pro VR (ačkoliv v místnosti 303, kde je pracoviště pro měření HRTF nyní umístěno, je díky závěsům dosaženo velmi dobré akustiky), a to proto, aby bylo možné na sebe měření více navázat (např. za účelem zrychlení subjektivních testů, kdy by jeden respondent podstupoval měření HRTF a zároveň by druhý mohl podstupovat test lokalizace ve VAS).

Subjektivní testy byly realizovány na skupině 57 respondentů s různými zkušenostmi s VR systémy. S přihlédnutím k výsledkům vím, že příště by bylo dobré množinu respondentů ještě rozšířit, neboť z výsledků plyne, že výsledný effect size není tak velký, jak jsem původně předpokládal, díky čemuž jsou současné výstupy ze statistických testů zatíženy většími chybami II. řádu (síla testu je tak menší). Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, bohužel se vlivem dozívající pandemie při sestavování množiny respondentů nepodařilo sehnat rozdílné věkové kategorie (např. nad 30 let či 50 let), aby testy pokrývaly větší množství věkových skupin. U většiny testů se také nepodařilo na dané hladině významnosti  $\alpha$  zamítnout nulovou hypotézu, tedy že nejsou výrazné rozdíly mezi časem reakce a úhlovým rozdílem mezi testy prováděnými s generickou HRTF a naměřenou HRTF, stejně jako prokázat vliv skupin (pohlaví, zkušenosti s VR) na hodnoty daných parametrů. Toto může být dle mého názoru způsobeno několika důvody, např. prostorovým rozlišením naměřené HRTF ve srovnání s generickou HRTF (generická HRTF byla měřena ve větším množství azimutů  $\varphi$  a hlavně elevací  $\theta$ ), nedostatečnou adaptabilitou jednotlivých subjektů na jejich vlastní HRTF, neideálním umístěním měřicích mikrofónů (nebyly vloženy přímo do zvukovodu, tak jak by bylo pro měření HRTF vhodné, ale byly lehce nad ním) popř. využitím integrovaných sluchátek v HMD, které ne vždy úplně přesně přiléhaly na uši respondentů.

I přesto, že se nepodařilo statisticky významně poukázat na rozdíly v lokalizaci mezi naměřenou a generickou HRTF, bylo zajímavé sledovat vliv vlastní HRTF např. u testů s pohyblivými zdroji resp. několika akustickými (i vizuálními) distraktory. V těchto případech dosahovali respondenti při testech větší úspěšnosti s naměřenou HRTF. Respondenti také po provedení testů většinou oznamovali, že jim lokalizace při měření s vlastní HRTF přišla mnohem jednodušší (což se ale ne vždy odrazilo na výsledcích testů). Otázkou pro další výzkum zůstává, zdali toto bylo způsobeno opravdu větší vhodností naměřené HRTF nebo pouze většími zkušenostmi jednotlivých respondentů ve VR prostředí. Zároveň bylo zajímavé pozorovat, že i přesto, že bylo prostorové rozlišení obou HRTF rozdílné (1008 bodů u generické HRTF oproti 85 bodům u naměřené HRTF), byly výsledky lokalizace u většiny testů velmi podobné. Z dostupných dat si dovoluji tvrdit, že pro aplikace ve VR prostředí, u kterých nám nejde o absolutní přesnost v lokalizaci zvukových zdrojů, bohatě postačí nějaká z generických HRTF. U aplikací ve kterých nám více záleží na přesnosti lokalizovaného zvukového zdroje popř. je přítomné větší množství akustických distraktorů (což jsou např. VR hry aj.) je použití vlastní HRTF (s dostatečným prostorovým rozlišením) velmi vhodné.

Cíle práce byly dle mého názoru kompletně splněny. Na dostupných datech se sice nepodařilo prokázat statisticky významný vliv HRTF na rychlost reakce či úhlovou chybu (což je závěr, který by člověk dle základní podstaty směrového slyšení očekával), podařilo se však ukázat, že při přítomnosti distraktorů či pohyblivých zdrojů zvuku má vlastní HRTF (i přes nízké prostorové rozlišení) významný vliv a pomáhá správně lokalizovat jednotlivé zdroje zvuku.



## Literatura

- [1] *AES Standard for File Exchange – Spatial Acoustic Data File Format*. Audio Engineering Society [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://www.aes.org/standards/comments/drafts/aes69-xxxx-201206-cfc-draft.pdf>
- [2] MAJDAK, Piotr a Markus NOISTERNIG. *SOFA: Spatially Oriented Format for Acoustics* [online]. [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: [https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA\\_\(Spatially\\_Oriented\\_Format\\_for\\_Acoustics\)](https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_(Spatially_Oriented_Format_for_Acoustics))
- [3] PAUKNER, Philipp, Martin ROTHBUCHER a Klaus DIEPOLD. *Sound Localization Performance Comparison of Different HRTF-Individualization Methods* [online]. 15. 04. 2014 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1207048/744102.pdf>
- [4] HERMANN, Thomas, Andy HUNT a John G. NEUHOFF. *The Sonification Handbook*. Berlín: Logos Verlag, 2011. ISBN 978-3-8325-2819-5.
- [5] SUN, Liang, Xuan ZHONG a William YOST. *Dynamic Binaural Sound Source Localization with Interaural Time Difference Cues: Artificial listeners*. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2015, **137**(4) [cit. 2022-03-15]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.4920112
- [6] CHENG, Corey I. a Gregory H. WAKEFIELD. *Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency, and Space* [online]. [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10196>
- [7] *Human Anatomy Planes*. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human\\_anatomy\\_planes.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_anatomy_planes.svg)
- [8] MOORE, David. *The Development of a Design Tool for 5-speaker Surround Sound Decoders*. 2009. Doctoral thesis. University of Huddersfield. [online]. [cit. 2022-03-24] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/277197330\\_The\\_development\\_of\\_a\\_design\\_tool\\_for\\_5-speaker\\_surround\\_sound\\_decoders](https://www.researchgate.net/publication/277197330_The_development_of_a_design_tool_for_5-speaker_surround_sound_decoders)

- [9] LI, Song a Jürgen PEISSIG. *Measurement of Head-Related Transfer Functions: A Review*. Applied Sciences [online]. 2020, **10**(14) [cit. 2022-01-11]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10145014
- [10] ANDREOPOULOU, Areti, Durand R. BEGAULT a Brian F. G. KATZ. *Inter-Laboratory Round Robin HRTF Measurement Comparison*. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing [online]. 2015, **9**(5), 895-906 [cit. 2022-02-08]. ISSN 1932-4553. Dostupné z: doi:10.1109/JSTSP.2015.2400417
- [11] YU, Guangzheng, Ruixing WU, Yu LIU a Bosun XIE. *Near-Field Head-Related Transfer-Function Measurement and Database of Human Subjects*. The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2018, **143**(3), EL194-EL198 [cit. 2022-02-20]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.5027019
- [12] ŠUPKA, Ondřej. *Sestava pro měření HRTF*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT FEL.
- [13] NOVAK, Antonin, Pierrick LOTTON a Laurent SIMON. *Synchronized Swept-Sine: Theory, Application, and Implementation*. Journal of the Audio Engineering Society [online]. 2015, **63**(10), 786-798 [cit. 2022-03-10]. ISSN 15494950. Dostupné z: doi:10.17743/jaes.2015.0071
- [14] DIETRICH, Pascal, Bruno MASIERO a Michael VORLAENDER. *On the Optimization of the Multiple Exponential Sweep Method* [online]. Březen 2013 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/236024151\\_On\\_the\\_Optimization\\_of\\_the\\_Multiple\\_Exponential\\_Sweep\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/236024151_On_the_Optimization_of_the_Multiple_Exponential_Sweep_Method)
- [15] THOMAS, Mark. *MLS Theory* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.commsp.ee.ic.ac.uk/~mrt102/projects/mls/MLS%20Theory.pdf>
- [16] AREND, Johannes M. a Christoph PÖRSCHMANN. *Synthesis of Near-Field HRTFs by Directional Equalization of Far-Field Datasets*. In: DAGA [online]. Berlin, 2019, s. 1454-1457 [cit. 2022-04-27].
- [17] LENTZ, Tobias. *Near-field HRTFs*. In: DAGA [online]. Stuttgart, 2007 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: [https://pub.dega-akustik.de/DAGA\\_1999-2008/data/articles/002824.pdf](https://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/articles/002824.pdf)
- [18] ZHANG, Wen, Prasanga N. SAMARASINGHE a Thushara D. ABHAYAPALA. *Parameterization of the Binaural Room Transfer Function Using Modal Decomposition*. In: The Journal of the Acoustical Society of America [online]. 2019, EL8-EL14 [cit. 2022-05-10]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/1.5115333
- [19] ROMIGH, Griffin D. *Individualized Head-Related Transfer Functions: Efficient Modeling and Estimation from Small Sets of Spatial Samples*

- [online]. 05. 12. 2012 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/user/robust/www/Thesis/RomighThesis.pdf>
- [20] ENZNER, G., Chr. ANTWEILER a S. SPORS. *Trends in Acquisition of Individual Head-Related Transfer Functions*. The Technology of Binaural Listening [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 57-92 [cit. 2022-02-15]. ISBN 978-3-642-37761-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-37762-4\_3
- [21] HE, Jianjun, Woon-Seng GAN a Ee-Leng TAN. *On the Preprocessing and Postprocessing of HRTF Individualization Based on Sparse Representation of Anthropometric Features*. 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) [online]. IEEE, 2015, 2015, 639-643 [cit. 2022-02-16]. ISBN 978-1-4673-6997-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICASSP.2015.7178047
- [22] Network Common Data Form (NetCDF). *Unidata* [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- [23] SHERMAN, William R. a Alan B. CRAIG. *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design* [online]. 2. vydání. 2019 [cit. 2022-01-22]. ISBN 978-0-12-818399-1. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=D-0cBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=A+Brief+History+of+Virtual+Reality&ots=QS\\_nahfT5U&sig=UtVJUwNC7h3clTT1A-FGglebZuY&redir\\_esc=y#v=onepage&q=A%20Brief%20History%20of%20Virtual%20Reality&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=D-0cBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=A+Brief+History+of+Virtual+Reality&ots=QS_nahfT5U&sig=UtVJUwNC7h3clTT1A-FGglebZuY&redir_esc=y#v=onepage&q=A%20Brief%20History%20of%20Virtual%20Reality&f=false)
- [24] *7 Top Virtual Reality Trends & Predictions for 2022/2023 According to Experts*. Finances Online [online]. [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://financesonline.com/virtual-reality-trends/>
- [25] *VIVE Pro Eye Specs & User Guide*. VIVE Developers [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://developer.vive.com/resources/hardware-guides/vive-pro-eye-specs-user-guide/>
- [26] *Unity vs. Unreal: What to Choose for Your Project?* [online]. 2021 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://program-ace.com/blog/unity-vs-unreal/>
- [27] *Unity Real-Time Development Platform: 3D, 2D, VR & AR engine* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://unity.com/>
- [28] *Unreal Engine: The most powerful real-time 3D creation tool* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US>
- [29] MARKOPOULOS, Evangelos a Mika LUIMULA. *Immersive Safe Oceans Technology: Developing Virtual Onboard Training Episodes for Maritime Safety*. *Future Internet* [online]. 2020, 12(5) [cit. 2022-04-28]. ISSN 1999-5903. Dostupné z: doi:10.3390/fi12050080

- [30] *OpenXR Overview*. The Khronos Group [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.khronos.org/openxr/>
- [31] DOBRUCKI, Andrzej, Przemysaw PLASKOTA a Piotr PRUCHNICKI. *System for High Speed Measurement of Head-Related Transfer Function*. Advanced Topics in Measurements [online]. InTech, 2012, 2012-03-07 [cit. 2022-01-12]. ISBN 978-953-51-0128-4. Dostupné z: doi:10.5772/35554
- [32] TAKANE, Shouichi, Koji ABE, Kanji WATANABE a Sojun SATO. *Influence of Loudspeaker Systems on Acquisition of Head-Related Transfer Functions* [online]. 2013 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16950>
- [33] LIU, Jinlin, Huiqun DENG, Peifeng JI a Jun YANG. *Headphone-To-Ear Transfer Function Estimation Using Measured Acoustic Parameters*. Applied Sciences [online]. 2018, 8(6) [cit. 2022-05-12]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8060918
- [34] *Steam Audio Source*. Steam Audio Unity Integration [online]. [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://valvesoftware.github.io/steam-audio/doc/unity/source.html>
- [35] *Comparison of 1D and 2D interpolation*. In: Wikimedia Commons [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison\\_of\\_1D\\_and\\_2D\\_interpolation.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_of_1D_and_2D_interpolation.svg)
- [36] *More Than 1 Million Steam Users Now Have A VR Headset: Here's Which Ones*. UploadVR: VR/AR News, Reviews, Guides, Analysis [online]. 01. 04. 2020 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://uploadvr.com/steamvr-hardware-survey-mar-2020/>
- [37] *VIVE: VR Headsets, Games and Metaverse Life* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.vive.com/us/>
- [38] *Meta Quest: Quest VR Headsets, Games & Equipment* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: [https://store.facebook.com/quest/?utm\\_source=www.oculus.com&utm\\_medium=oculusredirect](https://store.facebook.com/quest/?utm_source=www.oculus.com&utm_medium=oculusredirect)
- [39] JAROLÍMEK, Viktor. *Testování virtuálního akustického prostoru s využitím HMD*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/82888>. Diplomová práce. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph.D.
- [40] *Datasheet Quadro K2200* [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: [https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/design-visualization/documents/75509\\_DS\\_NV\\_Quadro\\_K2200\\_US\\_NV\\_HR.pdf](https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/design-visualization/documents/75509_DS_NV_Quadro_K2200_US_NV_HR.pdf)
- [41] *GeForce RTX 2060 OC 6G*. GIGABYTE: Upgrade Your Life [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <https://www.gigabyte.com/cz/Graphics-Card/GV-N20600C-6GD-rev-20/sp#sp>

- [42] *Is Unity leaving support for OpenVR entirely.* Unity Forum [online]. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://forum.unity.com/threads/is-unity-leaving-support-for-openvr-entirely.803523/>
- [43] *SOFA Matlab/Octave API.* GitHub: Where the worl builds software [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: [https://github.com/sofacoustics/API\\_MO](https://github.com/sofacoustics/API_MO)





# Příloha A

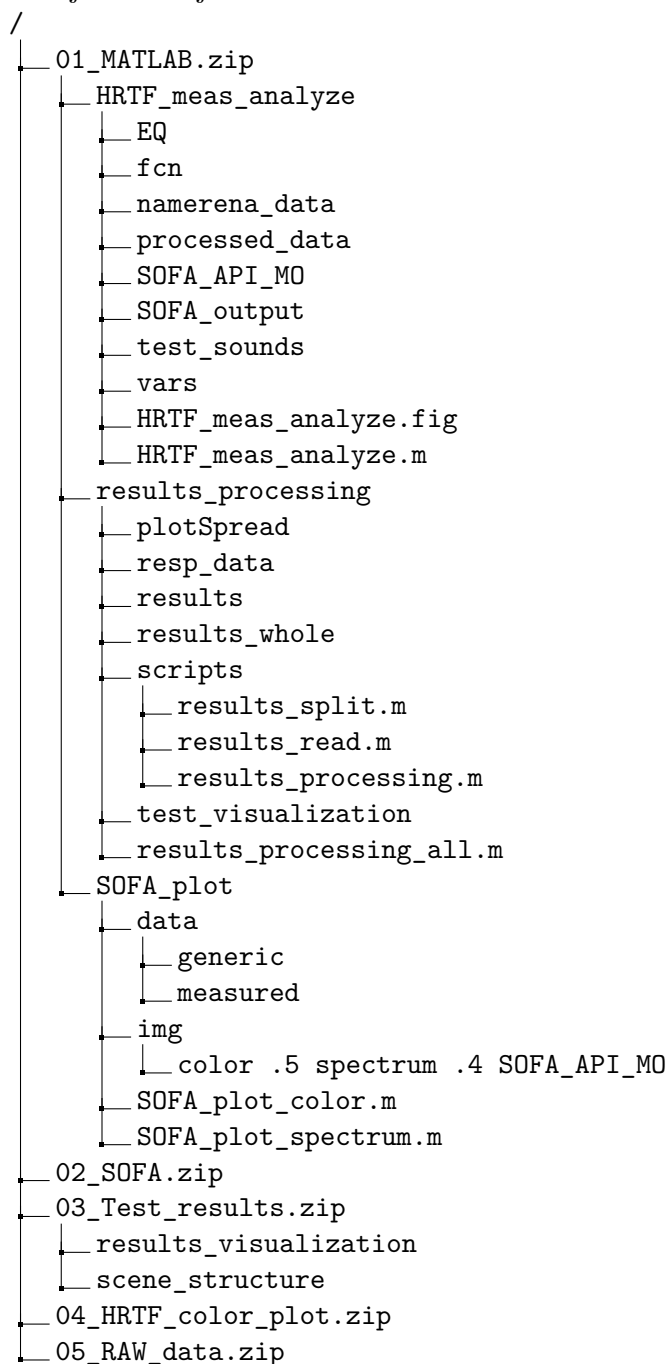
## Struktura elektronické přílohy

Elektronická příloha diplomové práce se skládá z následujících ZIP souborů

1. **MATLAB** - složka obsahuje všechny implementované skripty (vč. nutných externích funkcí, jako např. `plotSpread` a `SOFA_API_MO`) vč. komentářů; konkrétně se jedná o skripty
  - `HRTF_meas_analyze.m` - skript pro analýzu naměřených dat z pracoviště na měření HRTF (primárně vytvořený v diplomové práci Ondřeje Šupky); funkce pro konverzi do SOFA souboru je na řádcích 1210-1353,
  - `results_split.m` - skript pro rozdělení hromadných výsledků z pracoviště pro lokalizaci polohy zdroje zvuku ve VAS na jednotlivé soubory (po dotázání je nutné vybrat soubory ze složky `results_whole`),
  - `results_read.m` - skript pro vyčítání hodnot z rozdělených souborů s výsledky lokalizace ve VAS,
  - `results_processing.m` - skript pro vykreslení a statistické vyhodnocení výsledků z jednotlivých testů lokalizace ve VAS (na řádku 9 je možné zapnout vizualizaci grafů, na řádku 10 poté detailnější výstupy ze statistických testů – Anova a Kruskal Wallis),
  - `results_processing_all.m` - skript pro hromadné spuštění statistické analýzy (spouští postupně skripty `results_split.m`, `results_read.m` a `results_processing.m`),
  - `SOFA_plot_color.m` - skript pro vykreslení color plotů jednotlivých naměřených SOFA souborů,
  - `SOFA_plot_spectrum.m` - skript pro vykreslení hodnot jednotlivých HRTF v závislosti na frekvenci (pro azimut  $\varphi$  vybraný na řádku 18).
2. **SOFA** - složka s naměřenými HRTF ve formátu SOFA,
3. **Test\_results** - složka se samostatnými obrázky s vizualizací výsledků provedených subjektivních testů (podsložka `results_visualization`) a rozložením jednotlivých objektů ve VR prostoru při provádění daného testu (podsložka `scene_structure`),

4. **HRTF\_color\_plot** - složka s vizualizacemi jednotlivých naměřených HRTF ve formě color plotu,
5. **RAW\_data** - složka se surovými daty získanými na pracovišti pro měření HRTF.

Přesnou strukturu uložení dat v jednotlivých souborech elektronické přílohy přibližuje následující schéma



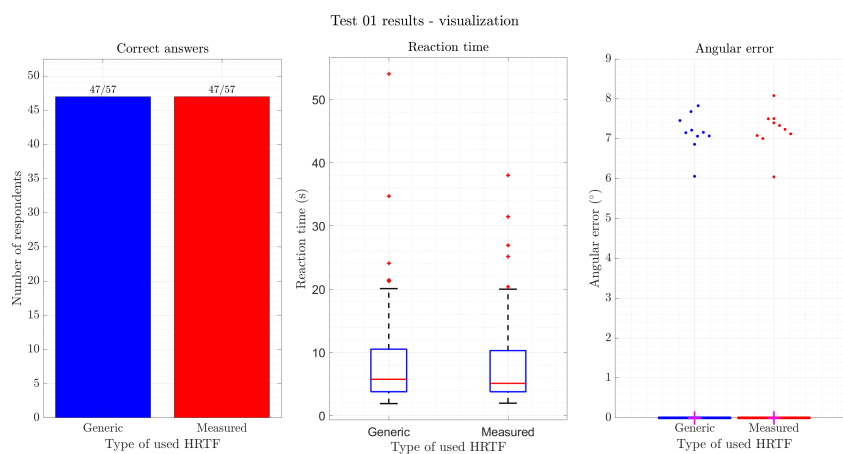
## Příloha B

### Vizualizace testů a jejich výsledků

#### B.1 Test 01



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 01



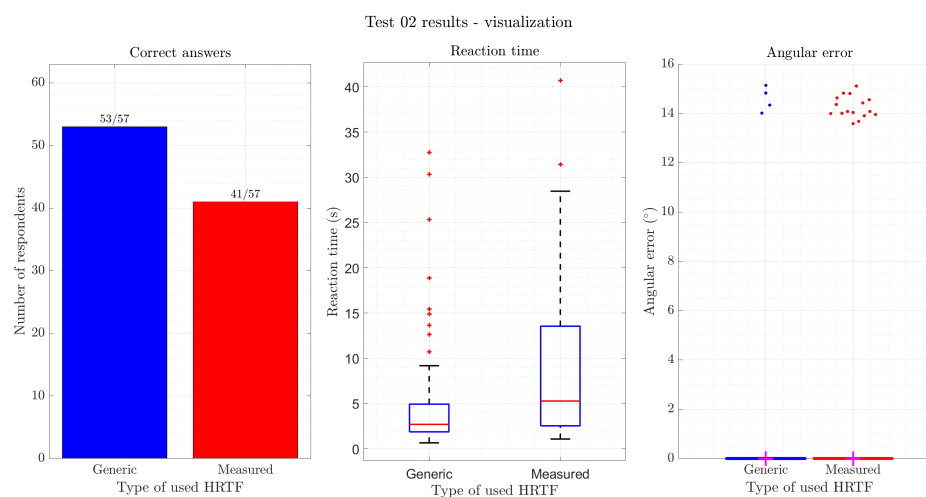
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 01

Obrázek B.1: Test 01 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.2 Test 02



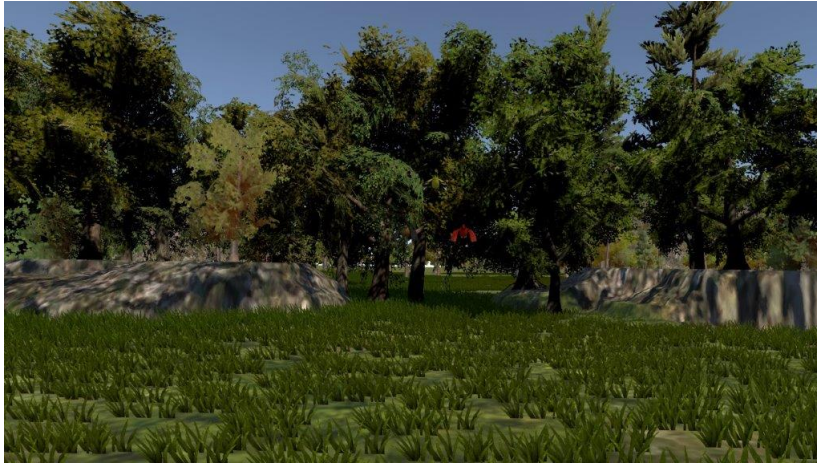
(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 02



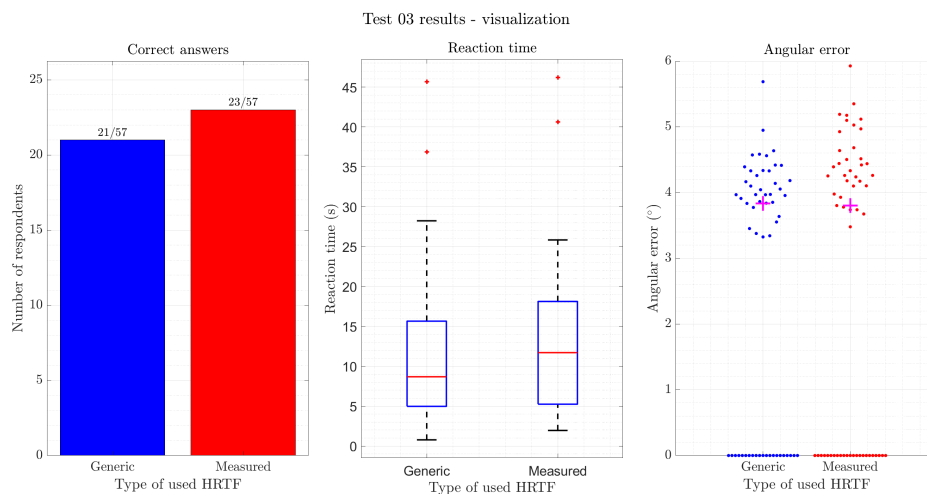
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 02

Obrázek B.2: Test 02 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.3 Test 03



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 03



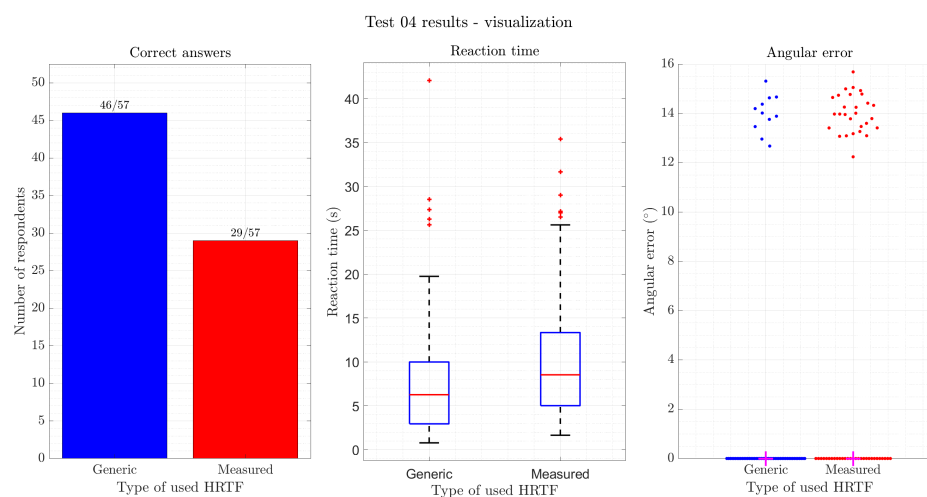
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 03

Obrázek B.3: Test 03 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.4 Test 04



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 04



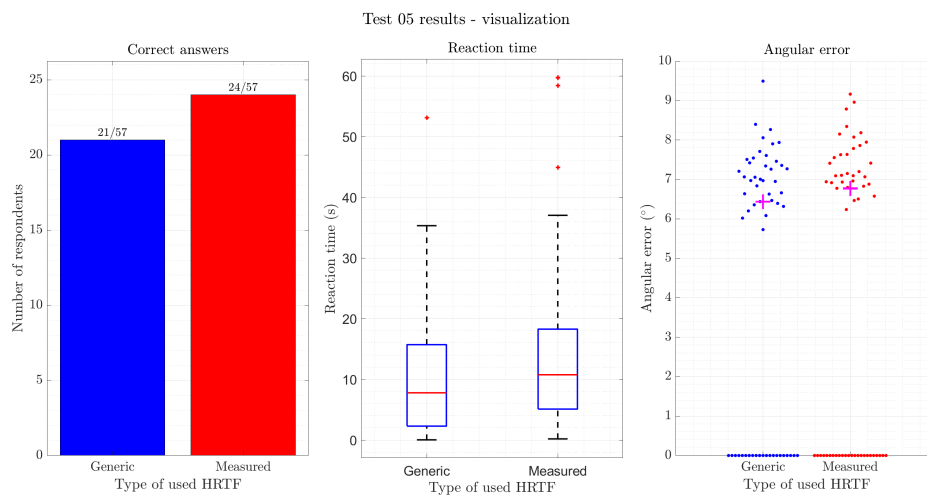
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 04

Obrázek B.4: Test 04 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.5 Test 05



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 05



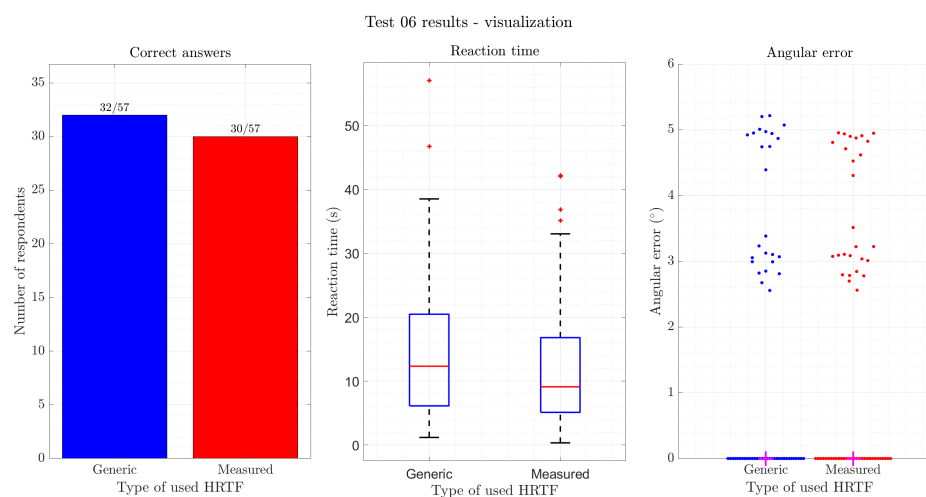
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 05

Obrázek B.5: Test 05 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.6 Test 06



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 06

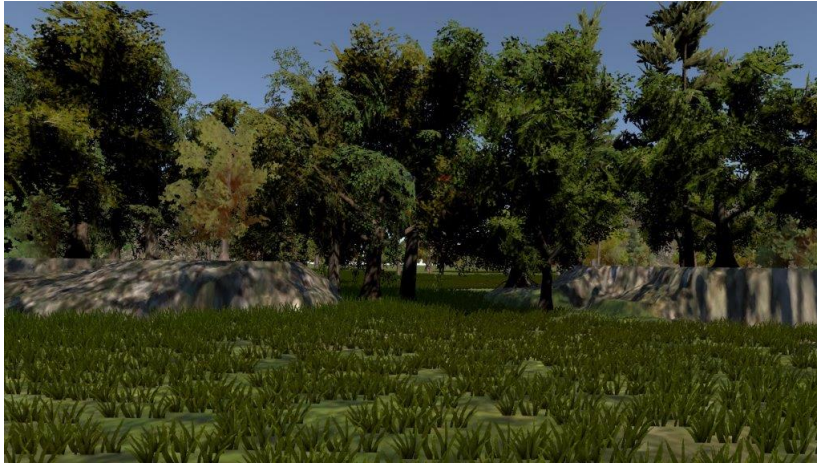


(b) : Vizualizace výsledků pro Test 06

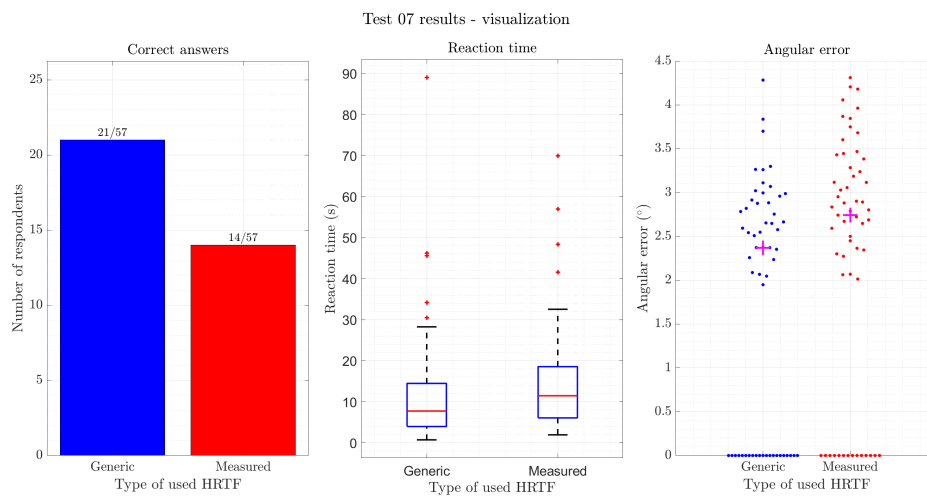
Obrázek B.6: Test 06 – struktura scény a vizualizace výsledků



## B.7 Test 07



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 07



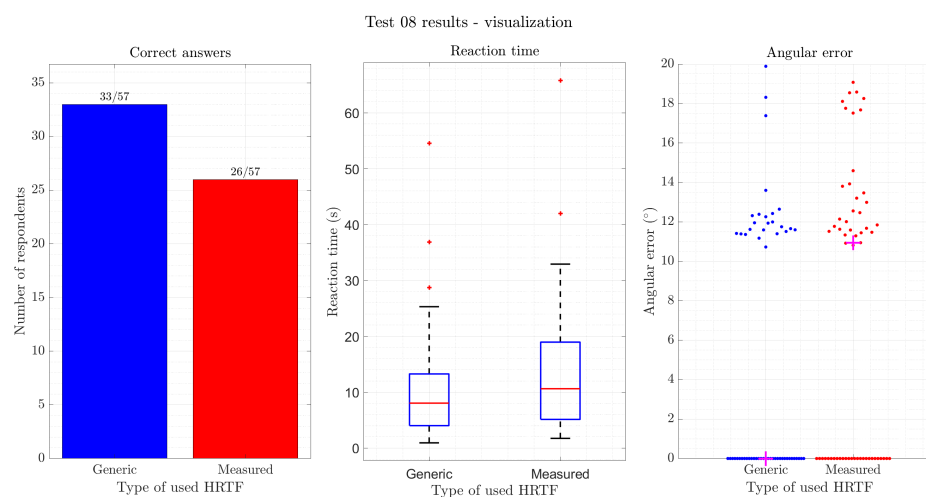
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 07

Obrázek B.7: Test 07 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.8 Test 08



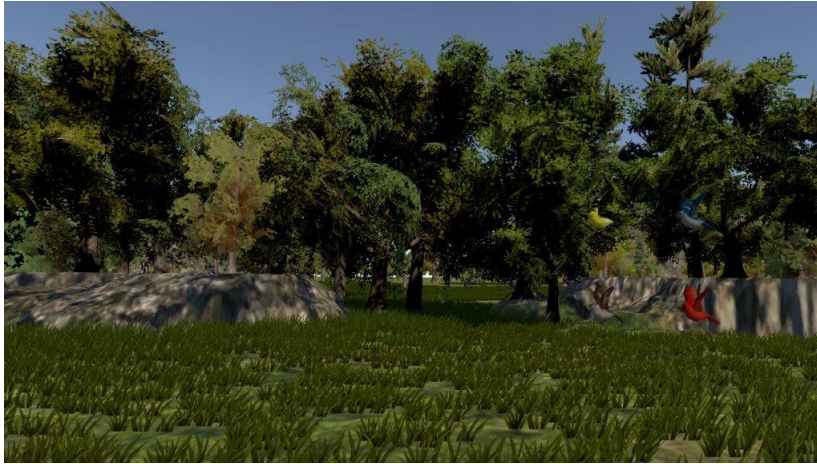
(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 08



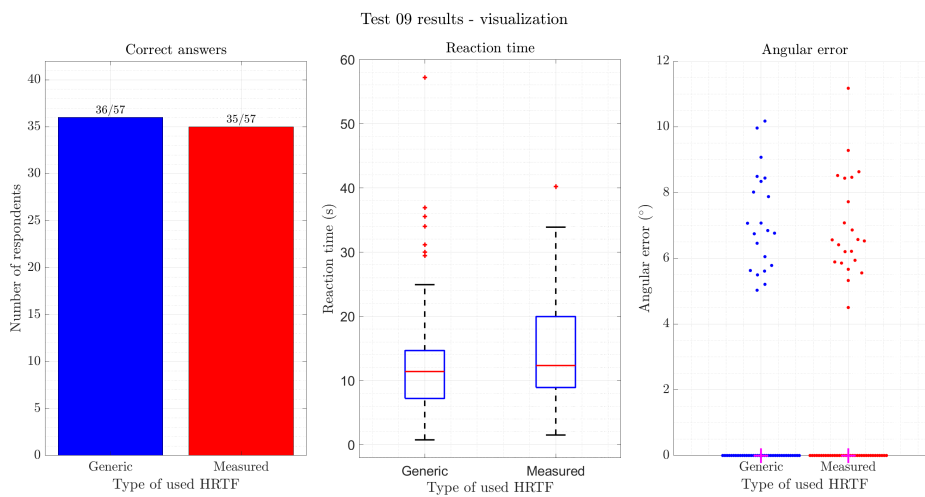
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 08

Obrázek B.8: Test 08 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.9 Test 09



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 09



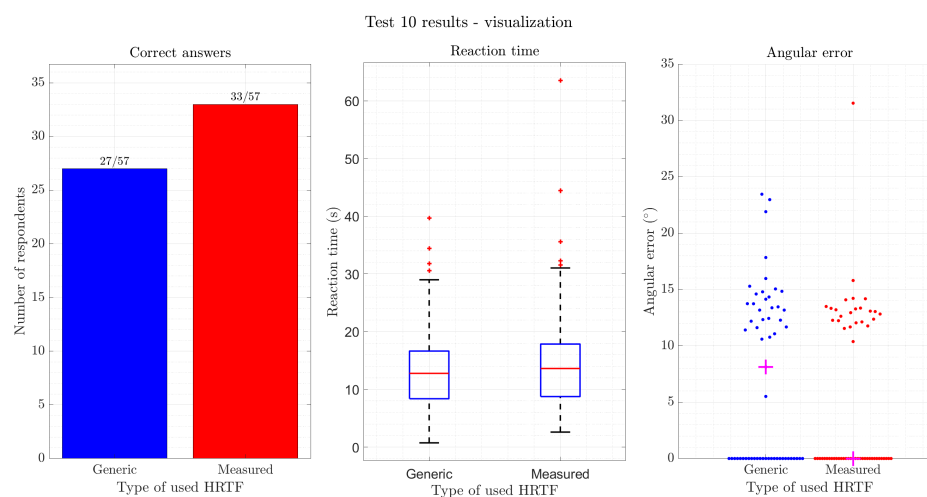
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 09

Obrázek B.9: Test 09 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.10 Test 10



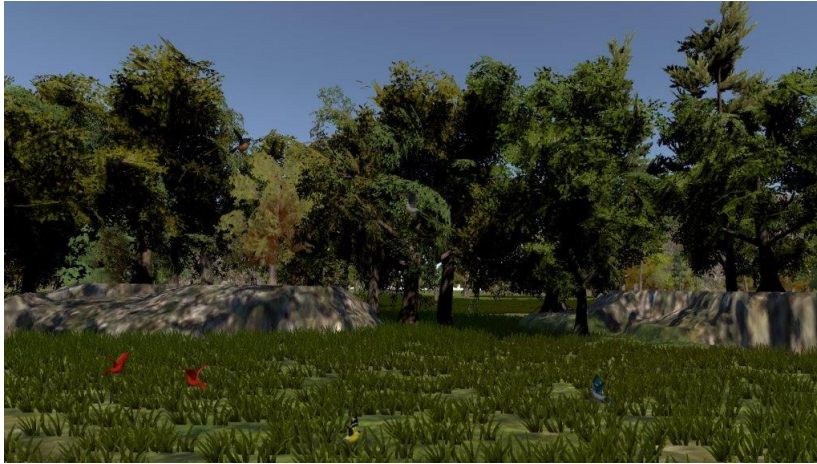
(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 10



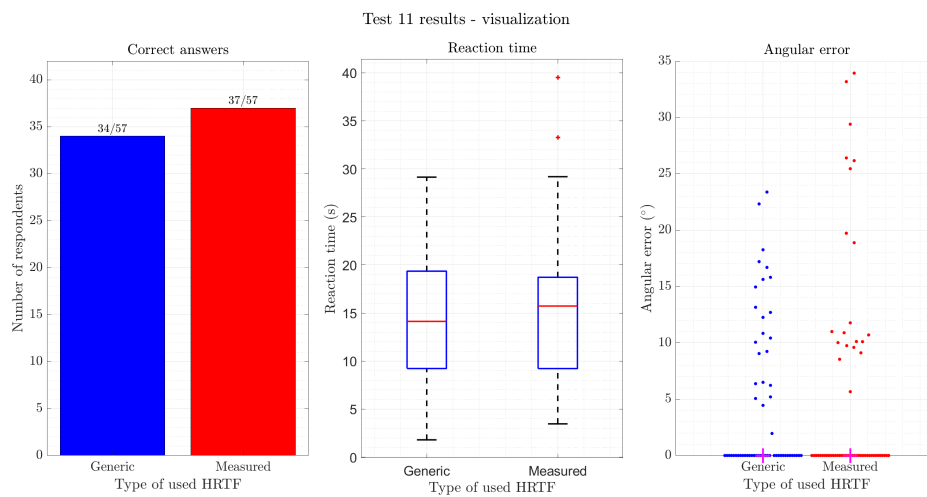
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 10

Obrázek B.10: Test 10 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.11 Test 11



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 11



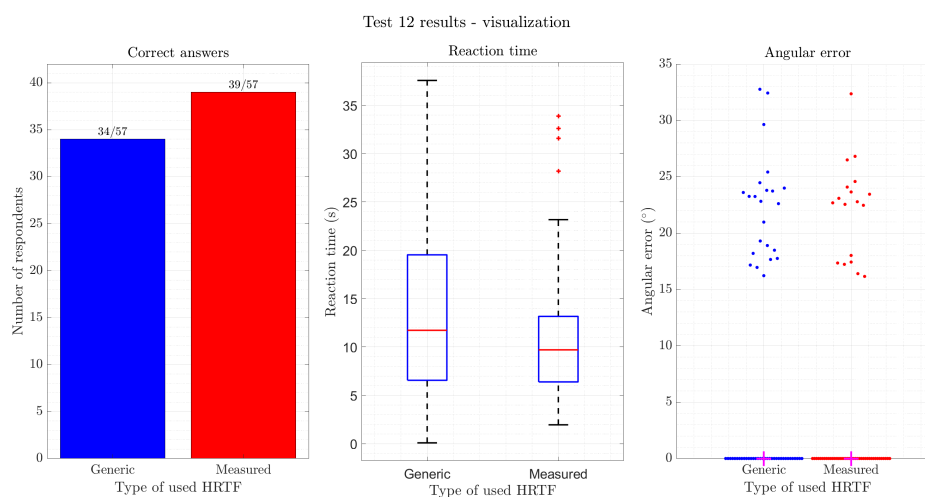
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 11

Obrázek B.11: Test 11 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.12 Test 12



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 12



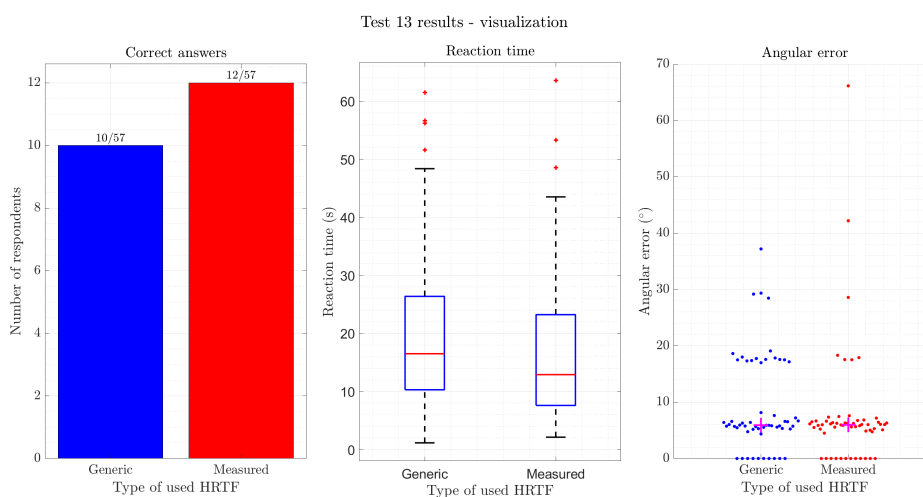
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 12

Obrázek B.12: Test 12 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.13 Test 13



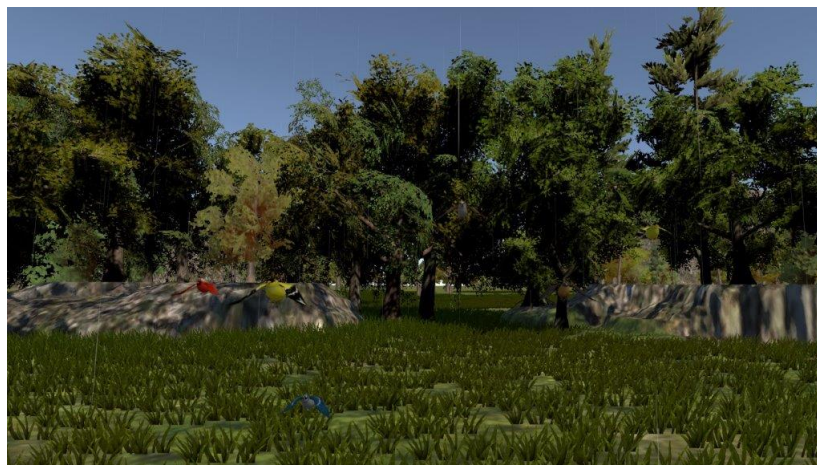
(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 13



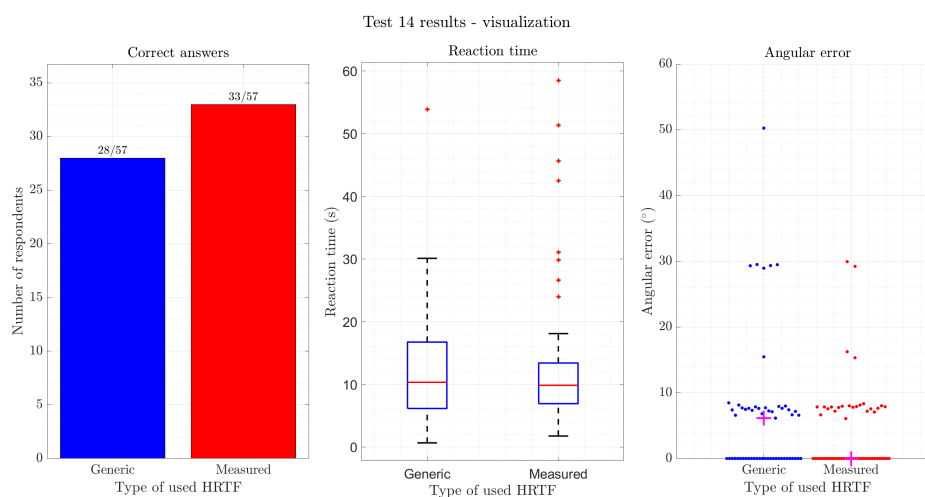
(b) : Vizualizace výsledků pro Test 13

Obrázek B.13: Test 13 – struktura scény a vizualizace výsledků

## B.14 Test 14



(a) : Struktura scény ve VR prostředí pro Test 14



(b) : Vizualizace výsledků pro Test 14

Obrázek B.14: Test 14 – struktura scény a vizualizace výsledků