

**UNIVERZITA KARLOVA**  
**FAKULTA HUMANITNÍCH STUDIÍ**



Pavel Srp

Navigace pomocí prostorového zvuku ve virtuální realitě

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Mgr. Lukáš Hejtmánek Ph.D.

Praha, 2023

## Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně. Všechny použité prameny a literatura byly řádně citovány. Práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne .....

podpis.....

### **Poděkování:**

Tímto bych rád poděkoval především Mgr. Lukáši Hejtmánkovi Ph.D. za vedení mé práce, nesčetné konzultace, rady a všeobecnou ochotu, jakkoliv pomoci. Dále bych rád poděkoval Bc. Oliveru Kobiánovi, Bc. Viktorii Račkové, Kláře Růžičkové a Veronice Sýkorové za pomoc s pilotním testováním a administrováním experimentu.

## **Abstrakt**

Využití simulovaného prostorového zvuku je v posledních letech na vzestupu. ve filmech, v hudbě, v hrách i ve virtuální realitě je prostorový zvuk důležitým prostředkem pro navození imerze a dodání prostorovosti. Experimentuje se mimo jiné i s novými formami navigace založených na prostorovém zvuku, které by měly pozitivnější vliv na prostorovou paměť oproti klasické navigaci na displeji. Tato práce se zaměřuje na otázku, jakou roli hraje integrace auditorních vodítek v prostoru spolu s propriocepčními a vestibulárními informacemi o vlastním pohybu při navigaci podle zvuku. pro tento účel byla ve virtuální realitě vytvořena upravená verze klasické úlohy na prostorovou paměť a navigaci, a to Morrisova vodního bludiště. Participanti ve vymezené oblasti hledali skrytou cílovou kruhovou oblast, na kterou museli v časovém limitu dojít. Lokaci této oblasti bylo možné najít a zapamatovat si jí pomocí tří do prostoru rozmístěných zdrojů nepřetržitého zvuku. Participanti řešili úlohu postupně pomocí tří různých způsobů pohybu. Ty byly vybrány na základě odlišné míry přístupu k informacím o vlastním pohybu. Způsoby pohybu byly následující - 1) volná chůze, 2) v sedě, kde se prostorem participanti pohybovali pomocí joysticku, ale otáčeli se na otočné židli a 3) v sedě, kde byl jak pohyb, tak otáčení ovládáno pomocí dvou joysticků. Participanti průběžně vyplňovali dotazníky zjišťující nevolnost a spokojenost se způsobem pohybu, na konci pak dotazník na zkušenosti s hraním her a virtuální realitou. v teoretické části této práce se zaměřím na obecné studium navigace, na navigaci podle zvuku a na testování navigace ve virtuální realitě. v praktické části budou popsány metody experimentu a analýza výsledků. Analýza porovnávala počet úspěšných nalezení cílové oblasti, rychlost nalezení a ušlou vzdálenost mezi jednotlivými způsoby pohybu a možné ovlivnění výkonu v důsledku nevolnosti, spokojenosti s pohybem, zkušenostmi s hraním her a zkušenostmi s VR. ve výsledcích se neprojevil výrazný rozdíl mezi pohyby a předpoklad, že si participanti povedou lépe, budou-li se pohybovat způsobem s vyšší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím se tak nepotvrdil. Tyto poznatky bude možné využít například při navrhování her a navigačních systémů v nich.

**Klíčová slova:** virtuální realita, prostorová paměť, prostorová navigace, prostorový zvuk, zvuková vodítka.

## **Abstract**

The use of simulated spatial audio has been on the rise in recent years. In films, music, games and virtual reality, surround sound is an important in creating immersion and adding spaciousness to the environments. Also, new forms of navigation based on spatial sound are being experimented with. These can have a more positive effect on spatial memory compared to traditional on-screen step by step navigation. This work focuses on the role of the integration of auditory cues with proprioceptive and vestibular information about one's own movement, in sound-based navigation. For this purpose, a modified version of the classic spatial memory and navigation task, the Morris water maze, was created in virtual reality. Participants searched for a hidden goal area, which they had to reach within a time limit. The location of this area could be memorized using three sources of continuous spatial sound. Participants solved the task consecutively using three different types of movement. These were chosen based on different degrees of access to information about one's own movement. The movement modes were as follows - 1) free walking, 2) seated, where participants moved through space using a joystick but rotated on a swivel chair, and 3) seated, where both movement and rotation were controlled using two joysticks. After each movement type participants completed questionnaires to determine cybersickness and user experience of movement. After all, three types of movement participants completed questionnaire about gaming and virtual reality experiences. In the theoretical part of this thesis, I will focus on the study of navigation, on navigation by sound cues, and on testing navigation in virtual reality. The practical part will describe methods of the experiment and the analysis of its results. The analysis compared movement types in the numbers of successful findings of goal area as well as time spent, and distance traveled before finding goal area. The analysis also tested for possible effects on performance due to cybersickness, user experience of the movement, gaming experience and VR experience. There was no significant difference in the results between the movements, and thus the assumption that participants would perform better if they moved with higher level of access to proprioceptive and vestibular information was not confirmed. These findings could be used, for example, in the design of games and navigation systems within them.

**Keywords:** virtual reality, spatial memory, spatial navigation, spatial sound, auditory cues

# Obsah

Obsah.....	6
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1. Navigace.....	10
2.1.1. Typy navigačních vodítek.....	10
2.1.2. Referenční rámce.....	11
2.1.3. Navigační strategie.....	11
2.1.3.1. Beacons.....	11
2.1.3.2. Integrace dráhy.....	12
2.1.3.3. Reakční strategie / trasa.....	12
2.1.3.4. Kognitivní mapy.....	13
2.1.4. Je navigace vizuocentrická?.....	14
2.2. Lokalizace a navigace podle zvuku.....	15
2.2.1. Mechanismus lokalizace.....	15
2.2.2. Integrace sluchu a ostatních smyslů u lokalizace.....	16
2.2.3. Simulace prostorového zvuku.....	17
2.2.4. Navigace podle zvuku.....	18
2.3. Testování ve VR.....	20
2.3.1. Výhody testování ve VR.....	20
2.3.2. Možné problémy.....	21
3. Praktická část.....	23
3.1. Cíle výzkumu.....	23
3.2. Hypotézy.....	23
3.3. Aplikační potenciál.....	23

3.4.	Metody výzkumu .....	23
3.4.1.	Popis experimentu.....	23
3.4.2.	Způsoby pohybu .....	26
3.4.3.	Zdroje zvuků .....	28
3.4.4.	Popis prostředí .....	28
3.4.5.	Hardware.....	29
3.4.6.	Software .....	30
3.4.7.	Místo měření .....	31
3.4.8.	Vzorek.....	31
3.4.9.	Dotazníkové metody .....	32
3.4.9.1.	Simulator sickness questionnaire.....	32
3.4.9.2.	VR Locomotion Experience Questionnaire .....	32
3.4.9.3.	Dotazník na hodnocení zdrojů zvuků .....	32
3.4.9.4.	Dotazník herních zkušeností.....	33
3.4.10.	Etické otázky výzkumu.....	33
3.4.11.	Zpracování dat .....	34
3.5.	Výsledky .....	34
3.5.1.	Porovnání pohybů .....	34
3.5.2.	Ovlivňující faktory .....	35
3.6.	Diskuse.....	38
3.6.1.	Porovnání pohybů .....	38
3.6.2.	Ovlivňující faktory.....	41
3.6.3.	Schrnutí diskuse .....	42
4.	Závěr.....	43
	Bibliografie.....	44

Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	50
Seznam obrázků.....	50
Seznam tabulek.....	50
Seznam grafů .....	50



## 1. Úvod

Virtuální realita (dále jen “VR”) a simulovaný prostorový zvuk, dvě témata, která se v posledních letech stávají více a více diskutovanými. Skrze VR se nám ukázal zcela nový způsob interakce s digitálním světem, díky kterému se nám otevírají nové realistické a imerzivní zážitky ze všech možných oblastí, jako je zábava, vzdělávání, ale i psychologie, kde VR našla celou řadu uplatnění. VR se používá v terapii při léčbě PTSD či úzkosti (Emmelkamp & Meyerbröcker, 2021) nebo třeba při diagnostice dětí s ADHD (Rizzo et al., 2000). Simulace prostorového zvuku se zase promítá do nových možností vnímání hudby, filmů, videoher a VR. Specificky ve VR je pak prostorový zvuk zmiňovaný jako jeden z důležitých nástrojů pro nastolení atmosféry a imerzivního prostředí (Kern & Ellermeier, 2020). Obě témata, jak VR, tak prostorový zvuk, zaznamenaly úspěch i ve studiu navigace. VR jakožto skvělý nástroj pro tvorbu navigačních experimentů. Simulovaný prostorový zvuk jako prostředek ke studiu navigace pomocí zvukových vodítek, či jako nástroj pro tvorbu zcela nových způsobů, jak se navigovat (Heller & Schöning, 2018).

V rámci teoretické části této práce se nejdříve zaměřím na samotnou oblast výzkumu navigace, která stanoví základní termíny studia navigace, se kterými budu dále pracovat a otázce, zda je navigace vizuocentrická. Další část bude věnována zvuku, lidské schopnosti zvuky lokalizovat, jak je naše auditorní vnímání ovlivněno ostatními smysly a simulaci prostorového audia. Nakonec se pak zaměřím na studie zkoumající navigaci podle zvukových vodítek a potenciální výzkumnou otázku, kterou se budu zabývat v praktické části. Závěr teoretické části pak bude věnován specifikům testování ve VR. v praktické části budou popsány metody a výsledky experimentu, kterým byla zkoumána otázka, jaký je vliv způsobu pohybu na prostorovou navigaci pomocí zvukových vodítek.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Navigace

Schopnost navigace je jednou ze základních kognitivních schopností a navigovat se prostředím za účelem nalezení potravy či úkrytu je vlastní všem pohybujícím se zvířecím druhům. Navigace zůstává důležitá pro lidi i v dnešní moderní době. Novými i specifickými úkoly se staly např. jak se dostat do práce, domů či do obchodů v městech, pro která je vlastní komplexní systém cest a silnic. Účelem této kapitoly je představit základní navigační výzkum. v poslední části této kapitoly se pak zaměříme na to, jestli je navigace vizuocentrická, a jaký má smysl studovat nevizuální formy navigace, jako je například právě navigace podle zvuku.

#### 2.1.1. Typy navigačních vodítek

Navigační vodítka, označují souhrnně zdroje informací, pomocí nichž se navigujeme a orientujeme v prostoru. Tato vodítka se dělí na dvě skupiny podle toho, zda jsou interní či externí vůči tělu navigátora (Hejtmánek, 2020).

Idiotetická vodítka označují vodítka, která člověk získává sám ze svého těla, tedy ze svých vlastních interních tělesných smyslů. do této kategorie spadají vestibulární vodítka, propiocepční vodítka a optický tok (Whishaw & Brooks, 1999).

Vestibulární informace získávané z vestibulárního systému umístěného ve vnitřním uchu umožňují získávat informace o vlastní orientaci, rotaci a zrychlení v prostoru (Yoder & Taube, 2014). Vodítka propiocepční zase označují informace získávané z nervových zakončeních ve svalech, kloubech a kůži. To například umožňuje získávat povědomí o počtu ušlých kroků (Grant & Magee, 1998). do kategorie idiotetických vodítek spadá i optický tok, který označuje specifické vzorce vizuálních změn na sítnici zapříčiněných pohybem prostředí vůči navigátorovi (Redlick & Harris 2001). z optického toku je možné získat přibližné informace o vlastním pohybu tam, kde je fyzický pohyb nemožný, jak tomu může být například ve VR (Ellmore & McNaughton, 2009).

Druhou skupinou navigačních vodítek jsou vodítka allothetická. Ta označují veškerá externí vodítka tedy ta, co leží mimo tělo navigátora. u lidí se jedná převážně o vizuálně vnímané objekty, lidé se však dokáží úspěšně orientovat, i podle zvukových a olfaktorických vodítek (Viaud-Delmon & Warusfel, 2014; Jacobs, 2012).

### 2.1.2. Referenční rámce

Koncept referenčních rámců má v oblasti prostorového vnímání a paměti zásadní význam, jelikož se od něj odvíjí popis navigačních strategií a prostorového chování celkově. Referenční rámce určují, jaký způsobem jsou místa v prostoru reprezentována v naší mysli, a jak jsou tato místa v naší reprezentaci prostoru specifikována. Referenční rámce se dělí na egocentrické a allocentrické (Galati et al., 2010).

Egocentrický rámec je založený na subjektivních vztazích k okolním předmětům. Jeho výsledkem je reprezentace prostoru, ve kterém působí navigátor (subjekt) jako hlavní orientační bod (Colombo et al., 2017). Při tomto rámci musí neustále docházet k aktualizování kvůli vlastnímu pohybu (Committeri et al., 2004).

V druhém typu rámce, allocentrickém, jsou to naopak předměty v prostoru, které slouží jako hlavní orientační body a jejich pozice jsou ukládány vůči jiným předmětům. Allocentrický rámec je tak nezávislý na pozici navigátora (Galati et al., 2010).

V reálných situacích jsou používány kombinace těchto dvou rámců a střídají se podle potřeby a prostředí, ve kterém se navigátor pohybuje. Využití allocentrického či egocentrického rámce se také může lišit v závislosti na osobní nereflektované preferenci každého člověka (Colombo et al., 2017).

### 2.1.3. Navigační strategie

V této části představíme řadu několika dominantních strategií používaných pro navigaci. Jedná se o ideální typy strategií, jejichž hlavním cílem je dostat člověka prostorem z bodu A do bodu B (Ekstrom et al., 2018). V reálných podmínkách se strategie samozřejmě průběžně mění a kombinují v závislosti na schopnostech navigátora a na prostředí (Hejtmánek, 2020).

#### 2.1.3.1. Beaconing

Jedná se o strategii, při které se navigátor orientuje k jednomu allothetickému vodítku, což může být například hora, budova či zvuk proudící vody (Ekstrom et al., 2018). Tuto strategii je možné vysvětlit pomocí jednoduchého paradigmatu stimulus-reakce a nevyžaduje zapojení paměti ani hlubšího prostorového vnímání. Jedná se tak na provedení velmi jednoduchou strategii, která nevyžaduje velkou kognitivní zátěž (Hejtmánek, 2020). Tato strategie je často

dominantní u pacientů s rozvinutou Alzheimerovou nemocí, kvůli nemožnosti použít komplexnější navigační strategie (Ekstrom et al., 2018).

#### 2.1.3.2. Integrace dráhy

Jedná se o egocentrickou strategii, při které se participant orientuje pomocí vztahování se k pozici, ze které odstartoval (Loomis et al., 1993). Při pravé integraci dráhy se tak děje čistě na základě allotheticých vodítek, tedy bez toho, aniž by byla používána vodítka externí. Tato strategie je například mravenci používána zejména při průzkumu okolí či hledání potravy, a díky ní se po nalezení potravy, dokáží vrátit zpět k mraveništi (Ekstrom et al., 2018). U lidí jí například používali domorodí obyvatelé ostrova Pulwat pro navigaci na širém mořském prostranství, kde neměli přístup k allothetickým vodítkům jako jsou hvězdy či kompas (Ekstrom et al., 2018). Tato navigace funguje pomocí neustálého aktualizování směru a vzdálenosti (vektoru) od startovní pozice při jakémkoliv pohybu navigátora (Yoder, 2014). Kvůli potřebě neustálého aktualizování vektoru vůči startu je integrace dráhy náchylná k chybám, které se navíc kumulují s ušlou vzdáleností (Ekstrom et al., 2018). U lidí je integrace dráhy zkoumána především pomocí úlohy doplňování trojúhelníku. V této úloze je participant proveden dvěma rameny trojúhelníku a jeho úkolem je najít bod, ze kterého vyrazil (Loomis et al., 1993). Při této úloze se opakovaně ukazuje, že lidé se blíží k ideální dráze startu, ale mají tendenci k ostřejším úhlům a kratším ušlým vzdálenostem (Loomis et al., 1993; Klatzky et al., 1998).

#### 2.1.3.3. Reakční strategie / trasa

Při reakční strategii nebo také trase se navigátor pohybuje na základě série instrukcí, které má uložené v paměti. Tuto strategii je možné vysvětlit jako řadu po sobě jdoucích jednoduchých reakcí na stimuly (Hejtmánek, 2020). Možným příkladem trasy může být cesta z domova do obchodu: „Jdu rovně, u žlutého baráku zabočím doleva a jdu opět rovně“.

Strategie trasy má několik nevýhod. Jednak málokdy umožňuje svobodu při průběhu cesty a je tak odkázána na přesné plnění instrukcí. Kvůli tomu je náchylná k chybám. Může totiž dojít ke změně prostředí a dům, podle kterého jsme se orientovali, byl zbořen nebo navigátor může zapomenout jednu z instrukcí (O'Keefe & Nadel, 1979). Pokud k těmto chybám dojde a navigátor se dostane mimo naučenou trasu, může pro něho být těžké pokračovat a je často

odkázán na bloudění. Další nevýhodou tras je, že ne všechny je možné aplikovat reverzně (O'Keefe & Nadel, 1979).

#### 2.1.3.4. Kognitivní mapy

Koncept kognitivních map byl poprvé použit Edwardem Tolmanem (1948) při studování navigačního chování potkanů v bludišti. Jedná se o strategii využívající allocentrický rámec. Při této strategii se předpokládá, že se navigátor řídí podle myšlenkové reprezentace prostoru, která je podobná našim fyzickým kartografickým mapám. Původní koncept kognitivních map předpokládal, že objekty mezi sebou zaujímají euklidiánské vzdálenosti a jsou uloženy v souřadnicovém systému (Tolman, 1948; O'Keefe & Nadel, 1979). Dlouhou dobu však panovaly spory o samou existenci kognitivních map. Tolmanův původní experiment se nepodařilo replikovat a byly mu vyčítány metodologické chyby, specificky pak že úlohu bylo možné plnit pomocí reakční strategie (Gentry et al., 1948). Až výzkumy následujících desetiletí prokázaly, že lidé i některé ostatní zvířecí druhy si opravdu vytvářejí myšlenkové konstrukty podobné mapám (O'Keefe & Nadel, 1979). Přesná myšlenková reprezentace však stále není jasná. Řada autorů se odklání od euklidiánské reprezentace prostoru a přiklání se spíše k reprezentacím pomocí propojených uzlů, kde jsou objekty ukládány ve vzdálenostech k jiným objektům, než aby byly zasazeny do souřadnicového systému (Gillner & Mallot, 1998; Chrástil & Warren, 2013). Kognitivní mapy jsou každopádně oproti strategii tras méně náchylné na změny v prostředí a umožňují značnou flexibilitu. Jsou však také více kognitivně náročné a nezaručují vždy tu nejrychlejší cestu (O'Keefe & Nadel, 1979).

Jednou z klasických úloh pro studování kognitivních map je Morrisovo vodní bludiště (Morris, 1984). Při této úloze se potkani v kruhovém bazénu s hlubokou vodou učí najít pod vodou skrytou vyvýšenou platformu. Experiment byl původně navržen pro studování funkce hipokampu pro navigaci a prostorovou paměť (Morris, 1984). Vzhledem k tomu, že tato úloha je relativně flexibilní, se z Morrisova vodního bludiště a jeho ekvivalentů stala klasická úloha pro studování navigace a prostorové paměti. Ta se dnes používá u lidí, a to jak v reálném prostředí, tak ve VR pomocí různých typů allothetických vodítek (Newman & Kaszniak, 2000; Skelton et al., 2006; Viaud-Delmon & Warusfel, 2014).

#### 2.1.4. Je navigace vizuocentrická?

Zrak je natolik nedílnou součástí toho, jak většina lidí vnímá svět a jak se v něm pohybuje, že až na specifické situace je pro většinu lidí proces navigace totožný s navigací vizuální (Merleau-Ponty, 1962). pro většinu vidomých je navigace prostředím proces, který probíhá bez větší aktivní pozornosti či snahy (Merleau-Ponty, 1962). Jak se jeví, tak vizuální zpracování prostoru s vysokým rozlišením se zdá být klíčové pro mnoho našich navigačních schopností. Hlavním důvodem se zdá být to, že vize je velmi dobrým nositelem prostorových informací (Ekstrom 2015). Lidé navíc na vizi postavili řadu dalších navigačních systémů, jako kartografické mapy, rozcestníky a další vizuální značky. Tyto skutečnosti však způsobily, že studium navigace bylo historicky silně ovlivněno vizuocentrismem, tedy přílišným zaměřením pouze na vizi a na vizuální navigační úlohy. To způsobilo nedostatečné zohlednění ostatních smyslových proudů (Giudice, 2018).

Proč je ale vlastně nevýhodné zaměřit se pouze na vizuální navigaci? Jedním z důvodů je dopad na studium navigace u nevidomých. na tu je často nahlíženo jako na podřadnou té vizuální a jsou zdůrazňovány spíše rozdíly, nežli společné rysy (Giudice, 2018). Někteří také zdůrazňují možnost toho, že obtíže s navigací, kterým nevidomí čelí nejsou často způsobeny, ani tak zhoršenými navigačními schopnostmi jako spíše tím, že vše kolem nich je uzpůsobené vizuální navigaci (Ungar, et al., 1996). Vizuocentrismus může mít ale dopad i pro vidomé. Nové metody navigace využívající jiných, než vizuálních vodítek mohou mít pozitivní dopad pro všechny. Například Clemenson a kolegové, (2021) zkoumali navigační pomůcku založenou na zvukovém kompasu (je-li kompas otočen směrem k cíli, ozývá se zvuk) a porovnávali ji s klasickou GPS, na kterou jsme zvyklí z našich mobilů. Zjistili, že participanti se zvukovým kompasem vykazovali větší prostorové povědomí než participanti s klasickou GPS. Tato metoda navíc také vedla k většímu experimentování a zkoušení nových tras. Tyto výsledky mohou být přínosné, jelikož se ukazuje, že klasické metody GPS (instrukce krok za krokem) vybízejí k pasivní navigaci, která negativně ovlivňuje prostorové vnímání (Hejtmánek et al., 2018).

Odklonění od vizuocentrismu k výzkumu nevizuálních způsobů navigace spolu s vizuálními, může také dodat nové informace o tom, jak náš mozek integruje informace z několika smyslových proudů zároveň a poskytuje nám ucelené povědomí o prostoru, ve kterém se nacházíme. Nakonec je totiž to, jak se orientujeme prostorem, a jak se v něm

pohybujeme, co je hlavním účelem navigace a studium navigace nevizuální nám v tom může jen pomoci.

## 2.2. Lokalizace a navigace podle zvuku

Navigace podle zvuku byla podobně jako jiné druhy nevizuální navigace dlouho opomíjená kvůli vizuocentrismu. Tato oblast tak stále zůstává relativně neprozkoumaným tématem, a to hlavně u vidomých. do této situace navíc nové technologie, jako reproduktory, sluchátka a pokročilé simulace zvuku, otevřely řadu možností nových aplikací a způsobů, jak akusticky vnímat svět kolem nás. To samozřejmě vyvolává řadu výzkumných otázek, jak tyto nové technologie působí na navigační proces. v této kapitole se nejdříve zaměříme na lokalizaci zvuku, proces, bez kterého by následná navigace nebyla možná. v druhé části kapitoly pak popíšeme studie zkoumající přímo navigaci podle zvuku.

### 2.2.1. Mechanismus lokalizace

Zvuková vodítka za normálních okolností slouží jako orientační body, kterými mohou být například proudící voda či ruch silnice. Aby se však tyto vodítka daly použít, je nejdříve potřeba je lokalizovat. Lokalizace zvuku je proces, při kterém posluchač určuje pozici zvuku vůči sobě. bez této lokalizace by následná navigace vůbec nebyla možná. Samotný proces lokalizace je závislý na interakcích mezi fyzickými vlastnostmi zvuku, hlavou a externími částmi uší (Grothe et al., 2010). V horizontální rovině lidé určují směr převážně pomocí takzvaných binaurálních vodítek, způsobených vzdáleností uší od sebe a hlavou, jakožto fyzickou překážkou v dráze šíření zvuku. Jedná se jednak o časový rozdíl mezi tím, kdy je stejný zvuk přijímán do uší nazývaný interaurální časová diference (interaural time difference, ITD) a o rozdíl v hlasitosti, frekvenci a frekvenčním posunu zvuku mezi ušima nazývaný interaurální intenzitní diference (interaural level difference, ILD) (Middlebrooks, 2015). Ve vertikální rovině je lokace zvuku určována pomocí monofonních spektrálních vodítek. Tato vodítka označují specifické frekvenčně závislé změny, ke kterým dochází, když zvuky dopadají na externí části uší (Grothe et al., 2010).

Lidé jsou relativně dobří v lokalizaci směru, ze kterého zvuky vycházejí, zhruba okolo 5 stupňů (Makous & Middlebrooks, 1990). Vzhledem k tomu, že je lokalizace zvuků závislá na fyzických vlastnostech zvuků, se za jistých podmínek značně snižuje přesnost a někdy zcela

selhává. Celkově jsou lidé přesnější u zvuků, co jsou před nimi než za nimi (Makous & Middlebrooks, 1990). Při horizontální lokalizaci jednotónových zvuků (jedna nota na piánu) se pak přesnost lokalizace snižuje zhruba na polovinu (Middlebrooks, 2015). Při rozlišování, zda zvuk vychází zepředu či zezadu, u zvuků, co leží pouze v nízkém frekvenčním pásmu, se přesnost blíží náhodě (Middlebrooks, 2015). Celkově vzato se zdá, že lidé lokalizují zvuky nejlépe pokud jsou širokopásmové, tedy obsahují frekvence z celého slyšitelného spektra (Yost et al., 2013). Při odhadu vzdálenosti jsou lidé horší než při určování směru. v ideálních podmínkách zvládají zhruba odhadovat zvuky do vzdálenosti 2 m. Při větších vzdálenostech a hlučných prostředích se přesnost drasticky zhoršuje (Middlebrooks, 2015).

### 2.2.2. Integrace sluchu a ostatních smyslů u lokalizace

Naše lokalizace zvuku není pouze akustický fenomén, který se jednou naučíme a zůstává nám po celý život neměnný. Právě naopak, naše schopnost lokalizace zvuků je velice plastická a je výsledkem integrace našich ostatních smyslů, jako je vize a propriocepce (Aytekin et al., 2008). Toho, že naše vizuální vnímání ovlivňuje to, co slyšíme, může být příkladem takzvaný McGurk Efekt, při kterém během komunikace můžeme slyšet jiné zvuky, pokud je to, co slyšíme v rozporu s vizuálními podněty tváře mluvčího (Tiippana, 2014). Podobné jevy se dějí i při naší lokalizaci zvuků. Řada studií ukazuje na to, že existuje silné propojení mezi lokalizací zvuků a vizí (Zwiers et al., 2003; King, A. J. 2009; Kumpik et al., 2019). Navíc se zdá, že naše vizuální vnímání má v tomto vztahu dominantní postavení a je v roli učitele, který korektuje možné chyby vzniklé při lokalizaci (Kumpik et al., 2019). To se projevuje například tak, že mají-li účastníci před lokalizační úlohou krátký trénink ukazování, při kterém cíle i vidí, jejich přesnost lokalizace se zpřesňuje (Tabry et al., 2013). Vize, ale může i zcela změnit vnímanou lokalitu zdroje zvuku. Tento jev se nazývá ventrilokvistický efekt. Klasickým příkladem tohoto efektu může být břichomluvecké vystoupení s loutkami, kde se může zdát, že zvuk vychází z loutky (Bruns, 2019). Tento efekt je možné replikovat pomocí optických čoček či ve VR (Bertelson & Radeau, 1981, Zwiers et al., 2003).

Zdá se, že naše auditorní vnímání je propojené i s propriocepcí a vestibulárním systémem. Tato oblast sice není tolik probídaná jako integrace s vizí, ale několik málo studií se touto problematikou zabývalo a jejich výsledky naznačují, že proprioceptivní zpětná vazba má prospěšné a korektivní účinky na trénink lokalizace zvuku (Carlile et al., 2014). Pokud při



lokalizaci mohou participantů volně pohybovat hlavou, dosahují menších lokalizačních chyb, než ti, kteří hlavou hýbat nemohou (Honda et al. 2013; Parseihian & Katz, 2012). Podobné výsledky se ukazují i pokud participantů před lokalizací absolvují krátký lokalizační trénink. Pokud během tohoto tréninku mohou volně pohybovat hlavou jejich následná lokalizace je lepší, než bez tohoto tréninku (Blum et al., 2004). Tyto studie ukazují, že propojení sluchu s našim vnímáním vlastního pohybu je zajímavou oblastí výzkumu, ve kterém je však ještě prostor pro nové výzkumy. Celkově pak mohou výzkumy integrace sluchu s ostatními smysly nejen přispět k dalšímu výzkumu multisenzorického vnímání, ale mají i řadu praktických důsledků třeba například na oblast simulace prostorového zvuku.

### 2.2.3. Simulace prostorového zvuku

Naše schopnost vytvářet a upravovat digitální audio se za posledních 100 let proměnila k nepoznání. s moderní technikou máme schopnost velice přesně nahrávat a měnit zvuky reálné i vytvářet zvuky naprosto nové. Nové technologie se dotkly i oblasti prostorového zvuku. Momentálně nejpoužívanější metoda pro simulování prostorového zvuku se jmenuje "head-related transfer function" (HRTF). Tato metoda pomocí sluchátek (ty jsou nutné) podle specifické rovnice upravuje hlasitostní, časové a frekvenční rozdíly mezi levým a pravým sluchátkem tak, že se posluchači zdá, že zvuk má prostorové vlastnosti (Cheng & Wakefield, 1999). Vzhledem k tomu, že je tvar hlavy a externích částí uší či směr zvukovodu pro každého člověka individuální, má teoreticky i každý člověk svoji vlastní individuální HRTF. Ta se získává přesným měřením, a to tak, že participant sedí ve zvukotěsné místnosti a v uších má vloženy mikrofony. Postupně jsou mu pak pomocí kruhového pole mikrofonů pouštěny zvuky z několika úhlů. na základě získaných dat je poté vytvořena samotná HRTF. Při přesně naměřeném HRTF se úspěšnost lokalizace blíží reálné lokalizaci (Kawaura et al., 1991). Před další částí je však potřeba říci, že měření lokalizační přesnosti u simulovaného zvuku je studie od studie značně rozdílné, jelikož dlouhou dobu neexistovala žádná všeobecná metodologie podle, které by se přesnost měřila. Některé studie jako třeba Poirier-Quinot et al. (2022) se však již snaží ucelenou metodologii poskytnout.

Ačkoliv individuálně měřené HRTF zaručuje relativně přesnou simulaci, jeho měření je časově náročné a nástroje k tomu potřebné jsou velmi nákladné a objemné. Tyto limity vyústily v potřebu, vytvořit jednodušší alternativu. V tomto ohledu se ustanovila dvě hlavní řešení.

Prvním z nich je na základě omezených, ale snadno získatelných informací, jako jsou rozměry hlav a externích částí uší vybrat z databáze už naměřených HRTF, takové s podobnými parametry. Přesnost lokalizace s takto přiděleným HRTF je většinou nižší, než při individuální variantě (Spagnol, 2020). Druhým řešením je neindividualizované HRTF. Toto řešení využívá generalizovanou HRTF rovnici pro všechny lidi. Toto řešení nevyžaduje žádné předchozí měření, a tak se s touto možností setkáváme v naprosté většině pro běžné uživatele zaměřených aplikací, jako jsou například hry a filmy. Toto řešení je, nejméně přesnou variantou (Wenzel et al., 1993). Ačkoliv jsou obě metody méně přesné než individuální HRTF, právě zde se dá pozitivně využít plastičnosti lidského sluchu zmiňované v kapitole 2.2.2. Díky této plastičnosti je možné se v lokalizaci zpřesnit a potenciálně se na generalizované HTRF adaptovat, a to během několika minut (Majdak et al., 2010; Parseihian & Katz, 2012). Neindividuální HRTF má v experimentech také silný faktor environmentální validity, jelikož je to typ simulovaného prostorového zvuku, se kterým se setká naprostá většina populace. Při práci s neindividuální HRTF je ještě potřeba brát v potaz, že existuje celá řada knihoven pomocí, kterých je možné tuto metodu aplikovat (Steam Audio, Oculus D, FMOD, atd.). Ucelené porovnání všech nejpoužívanějších knihoven zatím neexistuje, avšak zdá se, že významné rozdíly v knihovnách se začínají projevovat až ve specifických situacích, jako jsou simulace daleko vzdálených zdrojů či komplexních ozvěn (Larsen & Kraus 2021).

#### 2.2.4. Navigace podle zvuku

V této části budou popsány navigace, které přesahují jednoduché lokalizační úlohy tím, že v nich bylo potřeba se také pohybovat prostorem. Začátek bude věnován jednoduchým úlohám jako je beaconing. Další část bude směřovat ke komplexním úlohám založených na několika zvucích zároveň. Využitelnost prostorového zvuku pro jednoduchou navigaci pomocí beaconingu již byla prozkoumána. Zvuková vodítka jsou použitelná a lidé jsou podle nich schopni úspěšně nalézt cíle (Lokki & Gröhn, 2005; Marples et al., 2020). Schopnost dojít k zvukového beaconu se potvrdila i v jednoduchém zvukovém bludišti, kde byl náraz do stěny oznámen specifickým tónem. Participanti se navíc pozici beaconu naučili a byli schopni k němu dojít i bez zvuku (Fialho et al., 2021). Při této úloze se také ukázalo, že komplexita bludiště a kognitivní schopnosti jedince ovlivňují rychlost nalezení cíle (Fialho et al., 2021). Zkoumány také byly rozdíly a kombinace vizuálních a zvukových beaconů. Pokud je vizuální vodítko

doplněno o prostorový zvuk, lidé jsou rychlejší v jeho hledání (Lokki & Gröhn, 2005; Burkins & Kopper, 2015). Zvuková vodítka také mohou posílit prostorovou paměť. Při úloze hledání cílů v jednoduchém bludišti Burkins & Kopper (2015) zjistili, že pokud byly cíle doplněny o prostorovou zvukovou stopu, dokázali participantů na konci experimentu přesněji ukázat na pozici cílů. Heller a Schöning (2018) poté zajímavým způsobem prostorové audio použili jako hudební navigační pomůcku. Participantům při navigaci hrála ve sluchátkách píseň. Jedna ze zvukových částí písně (hlas či kytara) byla upravena tak, aby vycházela ze stejného směru jako cíl navigace. Jejich studie ukázala že navigace pomocí této metody je možná, ale komplexní zkoumání této metody či jím podobným zatím chybí.

Studii zabývajících se navigací a prostorovou pamětí u navigace na více jak jednoho zvuku je velice málo. Tato část tak popíše pouze 3 studie, které byly nalezeny. McMullen a Wakefield, (2014) zkoumali, jakým způsobem si lidé pamatují pozici a zdroj zvuku při několika zvucích zároveň. Ukázalo se, že většina participantů v jejich studii si byla schopna pozici čtyř zvuků, které jim byly hrány, zapamatovat. Ukázalo se také, že participantů byli úspěšnější při volném vybavení pozic zvuků než, když si je měli vybavit dle vybraného pořadí. Nardi a kolegové (2022) zase zkoumali, zda jsou se lidé schopni, zorientovat se pomocí geometrického seskupení zvukových vodítek. Participantů byli usazeni v malé oktogonální ohradě a kolem nich byly do obdélníku rozmístěny reproduktory s rozdílnými zdroji zvuku. Jejich cílem si bylo zapamatovat, na které straně oktogonální ohrady se nachází cíl. Výsledky ukazují, že si byli pozici cíle schopni zapamatovat nejen podle zvukových vodítek samotných, ale i podle jejich geometrického uspořádání. Když totiž byli v poslední fázi experimentu, všechny zdroje zvuku vydávaly stejný zvuk, byli participantů s nadnáhodnou přesností schopni vybrat jednu ze dvou možných pozic, při čemž se orientovali pouze podle toho, že v obdélníku byly dvě strany kratší.

Stěžejní studie pro tuto práci je pak Viaud-Delmon a Warusfel (2014). V této studii autoři pracovali s upravenou verzí Morrisova vodního bludiště (viz. kapitola 2.1.3.4), kde jako vodítka sloužily tři zdroje zvuku, které byly umístěny do rovnostranného trojúhelníku. na základě nich participantů opakovaně hledali skrytou oblast, která se mezi nimi nacházela. Participantů byly v plnění této úlohy všeobecně úspěšnější. Autoři tak na výsledcích ukázali, že participantů byli schopni na základě zvukových vodítek zakódovat pozici skrytého cíle. Navíc se na základě slepé mapy, do které participantů po splnění experimentu kreslili pozici zvukových vodítek

a cíle, domnívají, že většina participantů si byla schopna vytvořit allocentrickou reprezentaci testovací úlohy. Autoři ve své studii zmiňují, že ačkoliv ukázali možnosti demonstrovat schopnost se navigovat podle zvukových vodítek, zůstává otázka, jak je tato schopnost ovlivněna přístupem k propriocepčním a vestibulárním informacím o vlastním pohybu. V jejich experimentu se participantů totiž pohybovali volnou chůzí a měli tak k propriocepčním a vestibulárním informacím plný přístup.

Právě odpověď na tuto otázku bude hlavním výzkumným cílem této práce. Design bude podobný, úloha bude však s třemi způsoby pohybu, které budou mít rozdílnou míru přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím. Další výraznou změnou bude technické zpracování. Viaud-Delmon & Warusfel (2014) ve své studii používali speciální sluchátka v kombinaci s několika kamerami, které pomocí softwaru zjišťovali natočení uživatele a na základě toho simulovali prostorový zvuk. Prostorový zvuk byl také simulován pomocí relativně starého softwaru (Jot & Warusfel, 1995). V této práci tak budu technické zpracování aktualizovat a využívat moderní prostředky pro virtuální realitu s moderním softwarem na simulaci prostorového zvuku, které jsou běžně používány v komerčních situacích.

### 2.3. Testování ve VR

VR označuje počítačem generovanou simulaci, která skrze smysly uživatele budí iluzi skutečného místa nebo situace. Tato simulace je zprostředkována pomocí speciálního zařízení, takzvaného VR headsetu. Využití VR v oblasti psychologie je v posledních letech na vzestupu, a to jak ve výzkumu, tak v terapii. v této části se krátce specificky zaměříme na to, jaké výhody a potenciální problémy přináší testování ve VR pro tuto práci.

#### 2.3.1. Výhody testování ve VR

Testování navigačních experimentů má řadu výhod. Asi nejdůležitější je naprostá kontrola nad testovacím prostředím. Experimentátor má naprostou kontrolu nad tím, co participant ve virtuální realitě vidí a slyší a vytvořit tak naskriptovaný a vždy přesný sled událostí. Specificky pro experimenty pracující s analogiemi Morrisova vodního bludiště (viz. kapitola 2.1.3.4) je VR velkou výhodou. Ačkoliv je ekvivalenty možné vytvořit a testovat i v reálném prostředí (Newman & Kaszniak, 2000), zrealizovat to je velmi nákladné a časově náročné. VR se v tomto ohledu jeví jako ideální řešení. Experimentátor má pomocí VR přesnou kontrolu nad

vodítky, podle kterých se může participant orientovat. Moderní VR headsety také umožňují přesně snímat a ukládat nejen lokaci participanta v čase, ale orientaci jeho hlavy. Další důležitou výhodou VR je možnost pohybovat se virtuálním prostředím bez toho, aniž by se participant pohyboval reálným pohybem ve skutečnosti. To je velice žádoucí například při testování lidí v MRI či EEG, kde se participant ani pohybovat nemohou. Tento fakt taky umožňuje testovat to, jakým způsobem na lidi působí pohyb bez reálného pohybu a s tím spojená absence propriocepčních a vestibulárních informací.

### 2.3.2. Možné problémy

Asi největší nevýhodou VR je takzvaná cybersickness nebo také VR sickness/simulator sickness. Cybersickness se projevuje nevolností, závratěmi a dezorientací a může způsobit i nadměrnou únavu a bolesti hlavy (Bonato et al., 2009). Ačkoliv přesný původ není známý, výzkumníci se domnívají, že vzniká konfliktem mezi vizuálním a vestibulárním systémem. Vestibulární systém dostává informace, že tělo zůstává v klidu, zatímco oči vnímají pohyb nebo změny okolí. Tento rozpor může způsobit pocit dezorientace a následně vést i k nevolnosti a závratím (Bonato et al., 2009).

Cybersickness se tak objevuje více v situacích zahrnujících pohyb a otáčení a je silnější se zvyšující se rychlostí a časem stráveným ve VR (Dužmańska et al., 2018). To jak moc nebo jestli vůbec bude člověk ovlivněn cybersickness, je značně individuální, ale výzkumy ukazují, že předchozí zkušenosti s VR nebo jinými herními systémy mohou mít pozitivní efekt (Sobczyk et al. 2015). Celkově vzato je pak důležité kontrolovat míru nevolnosti u participantů VR výzkumů a kontrolovat míru Cybersickness pomocí dotazníků, jako může být například Simulator sickness questionnaire (Kennedy, 1993).

Již zmíněná předchozí zkušenost s VR a herními systémy se kromě menší náchylnosti k cybersickness může projevit i v úspěšnosti plnění úloh tam, kde tyto zkušenosti mohou pomoci s rychlejší aklimatizací s ovládáním VR (Sobczyk et al., 2015). Řada VR headsetů se ovládá pomocí ovladačů s tlačítky, se kterými mají hráči her větší zkušenosti. Je tedy žádoucí zjišťovat zkušenosti s VR a hraním her.

Oba možné problémy testování ve VR tedy mají své řešení. Aby se předešlo možným nežádoucím efektům cybersickness je potřeba komunikovat s participanty experimentů, varovat je a průběžně se jich ptát, zda nepocítují negativní příznaky. Je také žádoucí negativní příznaky

zjišťovat pomocí dotazníků, abychom mohli zjistit potenciální efekt na výkon participantů. Pomocí dotazníků je žádoucí zjišťovat i herní zkušenosti, které naopak mohou mít pozitivní vliv na výkon ve VR. Pokud se totiž tyto problémy podchytí, výhody zmíněné v předchozí kapitole dělají z VR velice silný nástroj pro studování navigace.

### 3. Praktická část

#### 3.1. Cíle výzkumu

Cílem této praktické části je zjistit, jaký mají propriocepční a vestibulární informace o vlastním pohybu vliv na výkon v navigaci podle zvuku ve VR.

#### 3.2. Hypotézy

Při pohybování způsobem s vyšší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím:

- H1: naleznou participanti vícekrát cílovou oblast v časovém limitu,
- H2: naleznou participanti vícekrát cílovou oblast v časovém limitu, pokud jim bude odstraněna část zvukových vodítek,
- H3: participanti ujdou před nalezením cílové oblasti menší vzdálenost a najdou ji rychleji.

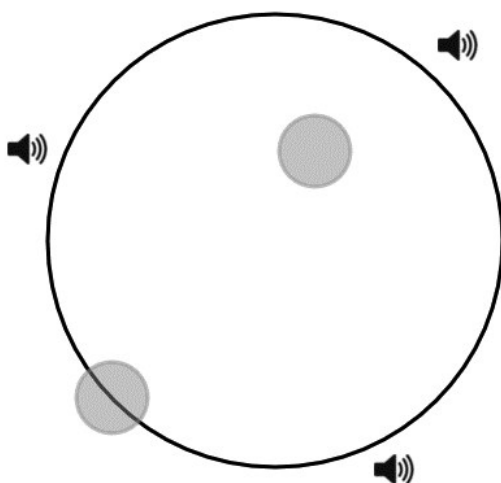
#### 3.3. Aplikační potenciál

Výsledky této práce prohloubí naše povědomí o vazbě mezi naším vnímáním zvuku a propriocepčními a vestibulárními informacemi. Výsledky bude také možné použít při navrhování a designování zvukových navigačních elementů, a to jak ve VR, tak v klasických virtuálních prostředích vnímaných skrze monitor.

#### 3.4. Metody výzkumu

##### 3.4.1. Popis experimentu

Úloha je postavena na principu Morrisova vodního bludiště (blíže popsáno v 2.1.3.4), kde participantovým úkolem je se opakovaně pokusit najít skrytou kruhovou oblast. Lokaci této cílové oblasti je možné si zapamatovat pomocí tří do prostoru rozmístěných zdrojů zvuku. Základní schéma experimentu je ukázané na obr. 1.



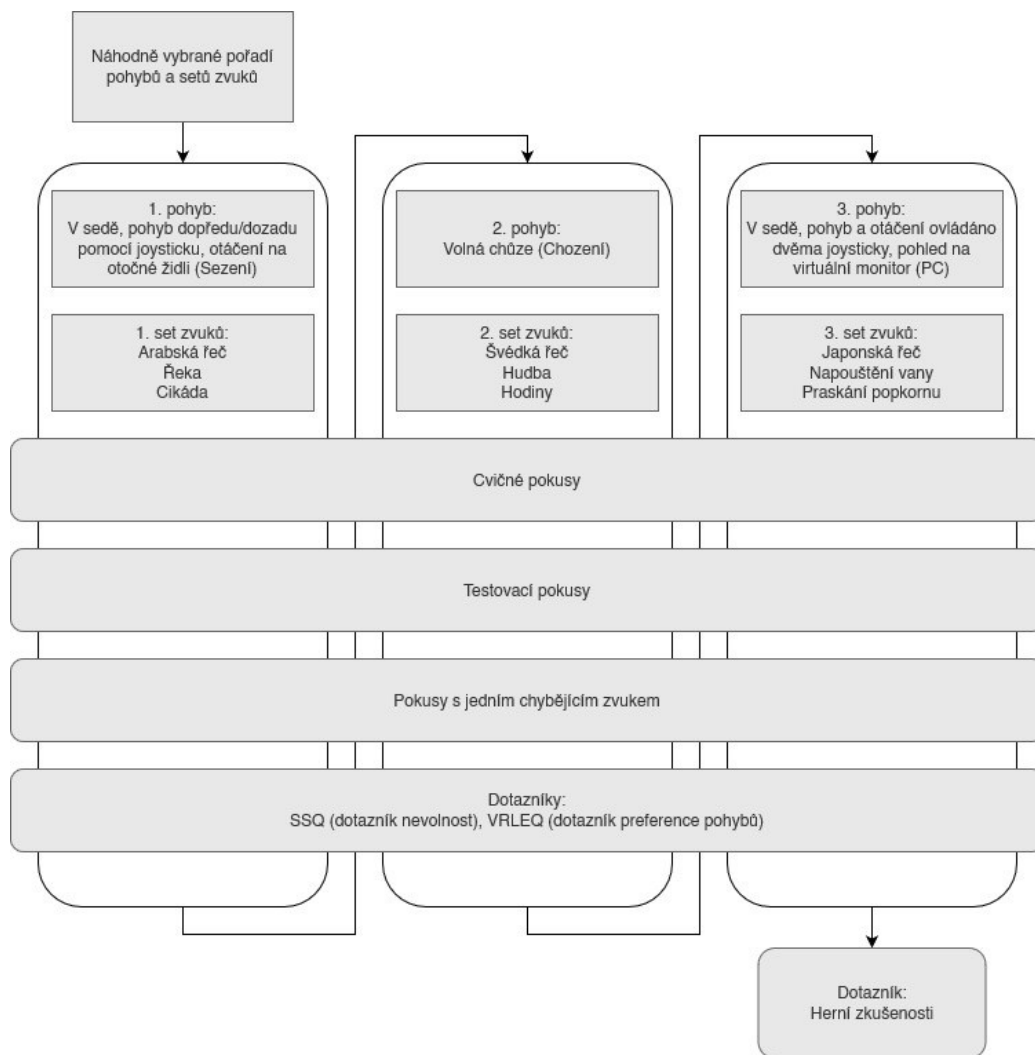
Obrázek 1 – Základní schéma testovací úlohy

Participantů plnili úlohu ve třech sériích, z nichž každá obsahovala 21 pokusů. v každé sérii se participantů pohybovali jiným způsobem pohybu s rozdílnou mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím (pohyby budou podrobněji popsány v kapitole 3.5.2). Při každém způsobu pohybu jí hledali pomocí rozdílné sady zvuků (sady zvuků budou podrobněji popsány v kapitole 3.5.3). Kombinace zvuků a pohybů byly předem určeny z předem vygenerovaného seznamu všech možných kombinací. Celé schéma experimentu je vidět na obrázku 2.

Jak již bylo řečeno, každá ze sérií se skládala z 21 pokusů hledání skryté oblasti. Tyto pokusy byly rozděleny na tři druhy.

- Pokusy 1. – 3. byly cvičné. Skrytá cílová oblast v nich byla viditelná. Tato fáze sloužila k tomu, aby si participantů zvykli na daný způsob pohybu, dostali základní informace o pozici skryté oblasti a potenciálně se na něco zeptali administrátora.
- Pokusy 4. - 12. byly se všemi zvuky. v těchto pokusech byla již skrytá oblast skrytá.
- Pokusy 13. – 21. byly s chybějícím zvukem. Při každém pokusu chyběl jeden ze tří zdrojů zvuků. pro tyto pokusy byl náhodně vygenerován seznam tak, aby chyběl každý zvuk třikrát.



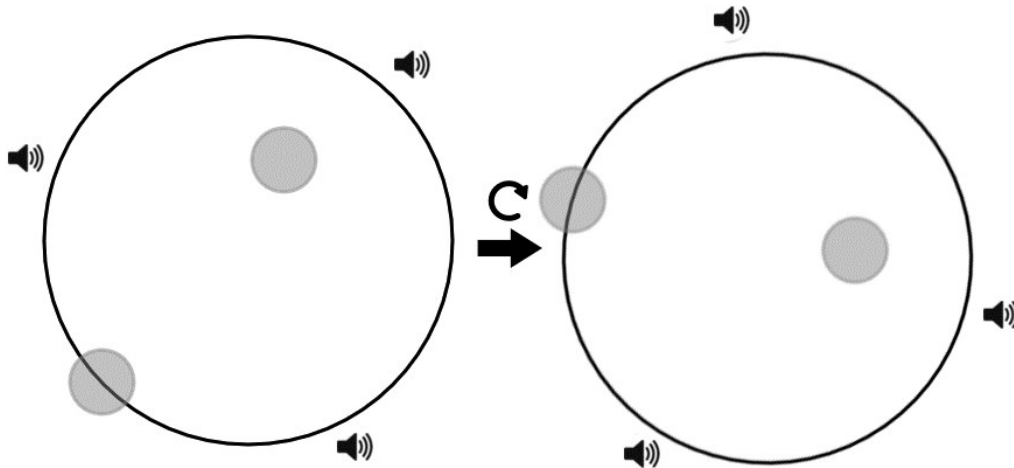


Obrázek 2 - Schéma průběhu experimentu

Časový limit pro nalezení skryté cílové oblasti byl stanoven na 30 vteřin. Pokud participant do tohoto limitu nenašel skrytou oblast, pokus byl označen za neúspěšný a cílová oblast mu byla zobrazena. Vypršení limitu bylo oznámeno i bzučivým zvukovým signálem. Třicetivteřinová hranice byla určena na základě pilotního testování, a to jednak kvůli časové náročnosti experimentu, a tak možné frustraci participanta.

Poté co participant došel na cílovou oblast, úspěšně či neúspěšně, ozval se zvukový signál cinknutí. Po dvou vteřinové prodlevě byly zdroje zvuku vypnuty. Poté se na předem daném místě zobrazila startovací oblast. Startovací oblast byla vygenerována na okraji čtyřmetrové kružnice, se středem totožným se středem jak reálného, tak virtuálního prostředí.

Když participant došel na startovací oblast, byl započat nový pokus. Zdroje zvuku a cílová oblast byla pootočená tak, aby jejich konstelace zůstala stejná (viz. obr. 3). Tento krok byl zaveden, aby se participant nebyli schopni naučit pozici cíle pouze za pomoci integrace dráhy (viz kapitola 2.1.3.2). Seznam pozic startovací oblasti, cíle a zdrojů zvuku byl předem vygenerován, aby se cíl nacházel tak aby se nestalo, že se cíl nacházel hned vedle startovací pozice.



Obrázek 3 - Schéma, které ukazuje možné pootočení cíle a zvukových vodítek

### 3.4.2. Způsoby pohybu

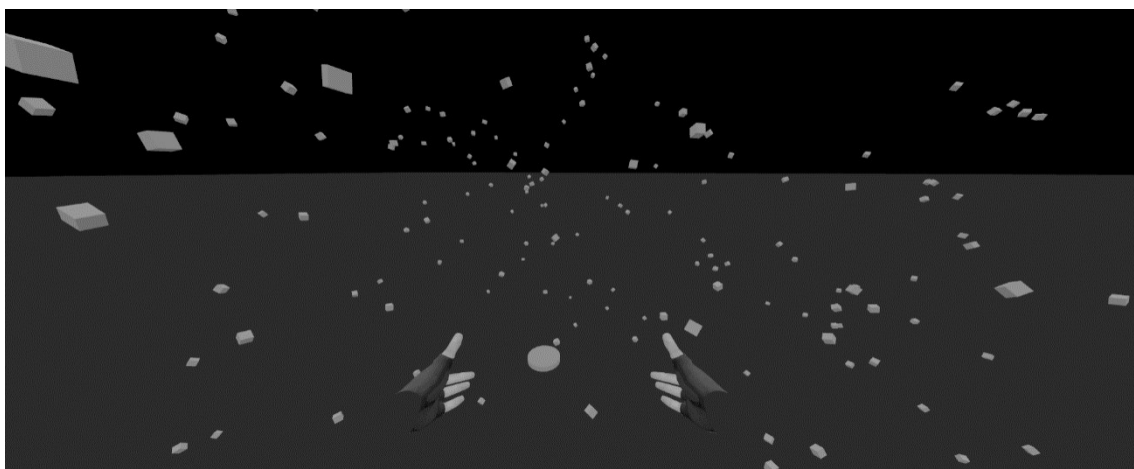
Pro účely experimentu bylo potřeba vybrat tři způsoby pohybu, které se od sebe budou lišit rozdílnou mírou přístupu k ideothetickým informacím. Dalším kritériem byla jednoduchost implementace těchto možných způsobů pohybu do experimentální aplikace. Na základě těchto kritérií byly vymyšleny následující tři způsoby pohybu.

Navrženy byly tři způsoby pohybu, které se od sebe liší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím:

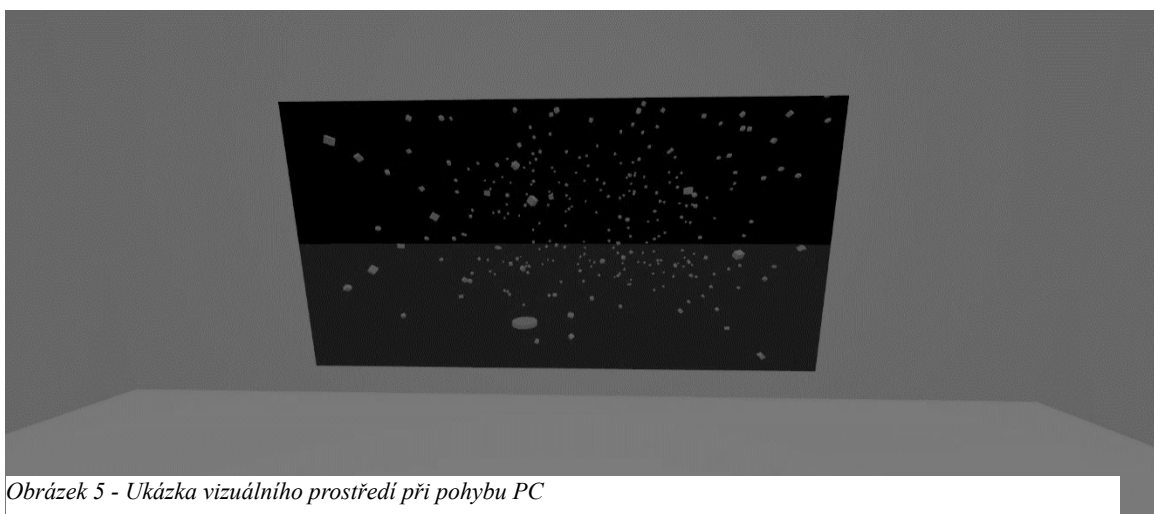
1. Chůze – Participant se pohybovali fyzickou volnou chůzí přímo ve virtuálním experimentálním prostředí. Tento pohyb poskytoval veškeré propriocepční a vestibulární informace o vlastním pohybu.
2. Sezení – Participant seděli na otočné židli. v prostředí se pohybovali dopředu a dozadu pomocí joysticku na ovladači. Směr dopředu udávala orientace headsetu, tedy natočení hlavy. Participant se fyzicky otáčeli na židli. Tento pohyb tak

poskytoval *propriocepční a vestibulární* informace pouze o vlastním otáčení. o pohybu dopředu a dozadu měl participant informace pouze z optického toku.

3. PC – Participant kroužili na větší monitor, na kterém ovládali avatara, který se pohyboval ve virtuálním prostředí (viz. Obr. 5). Participant seděli na židli a pohyb a otáčení v prostoru ovládali dvěma joysticky na ovladačích. Při tomto pohybu tak neměli žádné informace o vlastním pohybu vyjma optického toku. z důvodu konzistentnosti vizuálního prostředí a možného rozdílu v kvalitě simulovaného zvuku bylo rozhodnuto simulovat desktopový monitor uvnitř VR.



Obrázek 4 - Ukázka vizuálního prostředí při pohybu Chození a Sezení



Obrázek 5 - Ukázka vizuálního prostředí při pohybu PC

### 3.4.3. Zdroje zvuků

Studie ukazují, že se lidé lépe orientují podle širokopásmových zvuků, tj. zvuků, které obsahují frekvence z celého slyšitelného pásma (Yost et al. 2013, Middlebrooks 2015). Hlavním kritériem výběru zvukových vodítek tak bylo vybrat širokopásmové zvuky. Dalším kritériem bylo, aby se daly jednoduše rozlišit. Posledním kritériem bylo, aby obsah zvuku co nejméně upoutával pozornost.

Na základě již zmíněných kritérií byl vytvořen seznam devíti zvuků z online knihoven. z nich byly vytvořeny tři trojice, které byly vybrány pro tématickou podobnost:

- Arabský přednes, proudící řeka, bzučení cikády.
- Švédský přednes, výtahová hudba, tikot hodin.
- Japonský přednes, napouštění vany, praskající popcorn.

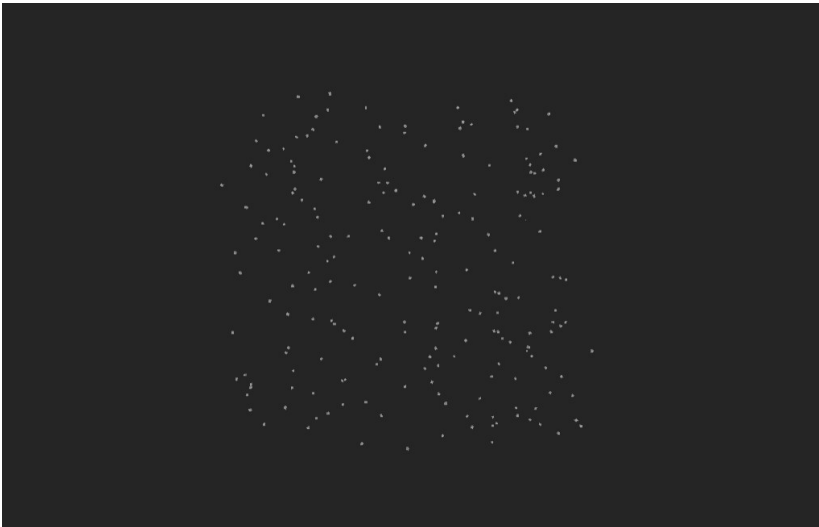
V programu pro editování zvukových stop Audacity byly ořezány delší časové úseky ticha tak, aby byly delší než vteřina. Délky zvukových stop variovaly od 10 sekund po 90 sekund. Následně byl použit dynamický kompresor (Chris's Dynamic Compressor), aby byla srovnána hlasitost zvuků na stejnou úroveň. Nastavení kompresoru bylo následující: ratio = 0.9, Compression hardness = 0.9, Floor = -40, noise gate falloff = 0, Maximum amplitude = 0.95, use perceptual model = 1.

Finální zvuky byly vyzkoušeny při pilotním testování a byly shledány participanty jako přijatelné.

### 3.4.4. Popis prostředí

Experimentální prostředí (viz. obr. 4) bylo tvořeno černou plochou představující zemi. Okolní obloha byla tmavě šedá, kdy bylo možné vidět horizont pro lepší orientaci. V prostředí bylo dále vygenerováno 320 malých zelených krychlí o velikosti strany 0,05 metru. Krychle byly náhodně rozmístěny do objemu pomyslné krychle o rozměrech 8,1 metrů na šířku a hloubku a 3,5 metrů na výšku. Tyto krychle plnily dvojí funkci. Za prvé představovaly pomyslnou vizuální hranici experimentálního prostředí, pokud by se participant příliš vzdálil od požadovaného cíle. Za druhé sloužily pro udržení alespoň minimální informace o vlastním pohybu pomocí optického toku u pohybů, kde se participant fyzicky vůbec nepohyboval. Aby

se předešlo tomu, že by participanti mohli používat krychle jako stabilní orientační vodítka rozmístění krychlí se během experimentu průběžně náhodně měnilo.



*Obrázek 6 - pohled testovací prostředí z dálky*

Při pohybu Chození byla maximální testovací oblast omezená fyzickými limitacemi testovací místnosti. Okraje místnosti byly signalizovány svítivě modrou mřížkou, která se zobrazila, pokud se k nim participant přiblížil. Pokud se přiblížil ještě více, zobrazilo se mu černobílé vyobrazení místnosti, aby se zcela zamezilo možnosti narazit.

Při pohybu Chození byla maximální testovací oblast omezená fyzickými limitacemi testovací místnosti. Okraje místnosti byly signalizovány svítivě modrou mřížkou, která se zobrazila, pokud se k nim participant přiblížil. Pokud se přiblížil ještě více, zobrazilo se mu černobílé vyobrazení místnosti, aby se zcela zamezilo možnosti narazit.

Startovací a cílové oblasti představovaly barevné kruhy o výšce 0,1 metru umístěné na zemi. Startovací oblast byla ve svítivě červené barvě a cílová oblast v barvě svítivě žluté.

#### 3.4.5. Hardware

Pro experiment byl použit VR headset Oculus Quest 2, neboť umožňuje testovat na dostatečně velké ploše bez nutnosti kabelů. Tento headset je relativně populární a je tak relativně reprezentativní tomu, s čím se běžný uživatel dostane do kontaktu.



Obrázek 7 - produktová fotografie VR headsetu Oculus Quest 2

Headset obsahuje vestavěné reproduktory v krátké vzdálenosti od uší (ekvivalent sluchátek) a 0,35 mm jack pro externí sluchátka. Obě varianty umožňují využití simulovaného prostorového audia. pro účely tohoto experimentu byly použity vestavěné reproduktory. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě pilotního testování, kdy při simulaci prostorového zvuku pomocí externích sluchátek docházelo k silnému šumu. Vestavěné reproduktory navíc umožňovaly mluvit s participanty během experimentu, například za účelem dotázání se na míru nevolnosti.

#### 3.4.6. Software

Samotný experiment pro VR headset jsme naprogramovali svépomocí s podporou školitele. pro vytvoření experimentálního prostředí a základních funkcionalit byl použit herní engine Unity (Haas, 2014). Unity umožňuje tvorbu multiplatformních aplikací, včetně aplikací právě pro Oculus Quest 2. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.3 existuje celá řada knihoven simulujících prostorový zvuk. pro tento experiment bylo prostorové audio simulováno pomocí generalizovaného HRTF skrze framework Oculus spatializer. Tento spatializer byl vytvořen firmou Meta přímo pro simulování prostorového zvuku pro Oculus Quest a zdál se tak být ideální volbou, která je navíc reprezentativní pro relativně velkou část uživatelů VR.

### 3.4.7. Místo měření

Testování probíhalo na Fakultě humanitní studií Univerzity Karlovy v učebně 2.32. v místnosti byl vytvořen prostor o průměru 4,2 metru. pro pohyby s otáčením byla použita jednoduchá točivá židle bez opěrek.



Obrázek 8 - Fotografie testovací místnosti

### 3.4.8. Vzorek

Hlavním zdrojem participantů byl mailingový list pro potenciální zájemce na účasti na psychologickém experimentu, který byl předkládán studentům psychologických předmětů na Fakultě humanitních studií. Potenciálním zájemcům byla zaslána pozvánka sdělující krátký popis experimentu spolu s aplikačním potenciálem a možnými riziky (cybersickness). Účast na experimentu mohla být uplatněna pro bonusové body ve specifických psychologických předmětech na FHS.

Celkově se přihlásilo 34 participantů. Dva z participantů z experimentu odstoupili z důvodu nevolnosti a neschopnosti dokončit úlohu. U dvou participantů byla úloha špatně zadaná a byli tak pro důvody možného zkreslení z celkové analýzy taktéž vyloučeni. Výsledný vzorek tedy tvořilo 30 participantů. Průměrný věk byl 25,19, směrodatná odchylka byla 8,71. Počet žen byl 25 a mužů 9.

### 3.4.9. Dotazníkové metody

Participantů po každém způsobu pohybu vyplňovali tři dotazníky. Dotazník Simulator sickness questionnaire (Sobczyk, 1993) sloužil k určení míry nevolnosti a dalších symptomů jako únava či bolest očí. Druhým byl VR Locomotion Experience Questionnaire (Boletsis, 2020), který sloužil k získání informací o použitelnosti, preference a participantem vnímané složitosti pohybů. Třetí dotazník obsahoval hodnocení subjektivních pocitů z jednotlivých zdrojů zvuku. Po dokončení všech tří pohybů participantů vyplňovali poslední dotazník. Dotazník zjišťoval herní zkušenosti participantů spolu s jejich preferencemi na žánry her i platformy, na kterých případně hry hrají (Račková, 2022).

#### 3.4.9.1. Simulator sickness questionnaire

Simulator sickness questionnaire (Kennedy, 1993) je dotazník, který byl vytvořen pro zjišťování míry nevolnosti ve virtuálních simulátorech reality (v tomto případě VR headset). v tomto dotazníku participantů vyplňovali míru negativních příznaků na čtyřstupňové škále. pro účely této práce bylo z těchto odpovědí následně podle postupu popsaného v Kennedy (1993) vypočítáno skóre pro subkategorii nevolnosti. Ta poté byla srovnávána mezi jednotlivými pohyby. Z originálu byly otázky přeloženy do češtiny Oliverem Kobiánem (Kobián, 2022).

#### 3.4.9.2. VR Locomotion Experience Questionnaire

VR Locomotion Experience Questionnaire (Boletsis, 2020) je dotazník vytvořený ve snaze o standardizovaný dotazník, který by měřil různé aspekty používaných metod pohybu ve VR. pro potřeby této práce byla využita pouze část dotazníku (otázky 17.-26.), která se zaměřuje na otázky vnímané použitelnosti a preference použitých metod pohybů. Podle hodnocení otázek v Boletsis (2020) bylo vypočítáno skóre pro vybrané otázky. Otázky byly přeloženy do češtiny Oliverem Kobiánem (Kobián, 2022).

#### 3.4.9.3. Dotazník na hodnocení zdrojů zvuků

Cílem dotazníku bylo zjistit, jakým způsobem participant vnímal jednotlivé zvuky. Byl vytvořen pro případ, že by některá ze sad zvuků ovlivňuje výkon participanta. Na pětistupňové Likertově škále – rozhodně nesouhlasím (1), spíše nesouhlasím (2), ani souhlasím, ani



nesouhlasím (3), spíše souhlasím (4), rozhodně souhlasím (5) – byla vyplňována míra souhlasu s následujícími výroky:

1. Tento zvuk mi připadal tichý.
2. Tento zvuk mi připadal nahlas.
3. Podle tohoto zvuku se mi dobře orientovalo.

Tyto otázky byly položeny pro každý zdroj zvuku po dokončení experimentu jedním ze způsobů pohybu.

#### 3.4.9.4. Dotazník herních zkušeností

Tento dotazník byl vytvořený Viktorií Račkovou (Račková, 2022) za účely zjištění herních zkušeností participantů specificky pak, ale i žánrů her, co hrají a typu zařízení, na kterém hry hrají. Součástí tohoto dotazníku byla i otázka na zkušenost s VR. Pro účely této práce se zaměřím pouze na tři otázky a to: „Hrajete počítačové hry?“, „Používali jste někdy VR?“

#### 3.4.10. Etické otázky výzkumu

Účastníkům byl před začátkem experimentu dán informovaný souhlas, ve kterém byli seznámeni s průběhem experimentu. Dále byli seznámeni s rizikem možné nevolnosti, diskomfortu a vyvolání epileptického záchvatu. Tato skutečnost byla po přečtení ještě jednou zdůrazněna administrátorem experimentu.

Z důvodu zmíněné možné nevolnosti bylo během experimentu participantům několikrát zdůrazňovaná možnost experiment přerušit, či zcela ukončit, udělá-li se jim nevolno. V průběhu experimentu byli participanté několikrát tázáni, zda se jim nedělá špatně. Participanté měli k dispozici vodu a během vyplňování dotazníku mezi fázemi si mohli odpočinout. Tato pauza mimo VR pravděpodobně snižovala pocity nevolnosti. U tří participantů se projevila zvýšená míra nevolnosti a na chvíli přerušili experiment. Dva ze tří si přáli v experimentu pokračovat, jeden z participantů experiment ukončil. Jeden participant experiment přerušil z důvodů přílišné časové náročnosti a silné frustrace. Veškerá data od participantů byla anonymizována a záznamy byly drženy pod identifikačním kódem.

#### 3.4.11. Zpracování dat

Pro zpracování výsledků byla využita řada programů. Na předzpracování dat byly použity programovací jazyky Python a R. Data získaná z headsetu byly uloženy ve formátu: čas, pozice a rotace v prostoru. Z těchto dat byly programově získány délky jednotlivých pokusů, celkové ušlé vzdálenosti za pokus a průměrná rychlost za pokus. Za základě délky pokusu byl určen počet úspěšných pokusů, kratších než 30 vteřin a z nich vypočítána průměrná úspěšnost na jednu fázi.

Vypočítaná data byla následně spojena s daty z dotazníků v programu Excel pomocí, kterého byla vytvořena jedna sumativní velká tabulka. Tato tabulka byla následně použita ve statistickém programu JASP, ve kterém byly poté provedeny veškeré statistické testy.

### 3.5. Výsledky

Při statistických testech byla hladina signifikance na 0.05.

#### 3.5.1. Porovnání pohybů

Jako hlavní kritérium pro porovnání pohybů byl použit počet úspěšných pokusů. Jako další kritéria porovnání pohybů posloužila ušlá vzdálenost úspěšných pokusů a délka trvání úspěšných pokusů. Tato kritéria zkoumala pouze úspěšné pokusy, protože nebylo možné spolu srovnávat části s neviditelnou a viditelnou cílovou oblastí, jelikož se jednalo o rozdílné úlohy. V tabulce 1 jsou ukázány základní výsledky jednotlivých kategorií. Pro další porovnání pohybů v jednotlivých kategoriích byla použita analýza rozptylu. U porovnání počtu úspěšných pokusů ANOVA nenalezla signifikantní rozdíl mezi skupinami ( $F(2, 90) = 2.39, p = 0.097$ ). Při porovnání ušlé vzdálenosti úspěšných pokusů signifikantní rozdíl nalezen byl ( $F(2, 905) = 3.95, p = 0.02$ ). Post hoc analýza používající Tukeyho kritérium významnosti poté ukázala, že signifikantní rozdíl se vyskytl mezi pohyby PC ( $M = 9.28, SD = 4.42$ ) a Sezením ( $M = 10.3, SD = 4.61$ ),  $p = 0.014$ . Signifikantní rozdíl byl nalezen i při porovnání délky trvání úspěšných pokusů  $F(2, 905) = 3.42, p = 0.033$ . Tukeyho post hoc analýza ukázala signifikantní rozdíl mezi Chozením ( $M = 14.22, SD = 7.05$ ) a Sezením ( $M = 15.72, SD = 7.18$ ),  $p = 0.028$ .

Způsob pohybu	celkový počet úspěšných pokusů		ušlá vzdálenost úspěšných pokusů (v metrech)		délka trvání úspěšných pokusů (v sekundách)	
	M	SD	M	SD	M	SD
Všechny pohyby	9.63	4.02	9.75	4.37	14.8	7.02
Chození	10.52	3.72	9.77	4.07	14.22	7.05
PC	9.94	4.53	9.28	4.42	14.65	6.81
Sezení	8.39	3.57	10.3	4.61	15.72	7.18

Tabulka 1 - Základní výsledky pro porovnávané kategorie

Další porovnávaným kritériem bylo porovnání úspěšnosti mezi pokusy ve všech zvuky s pokusy s chybějícím zvukem, a to jak celkově mezi všemi pohyby zároveň, tak každý pohyb zvlášť. Pro toto porovnání byl použit párový studentův T-test. Signifikantní rozdíl se neprojevil ani v jedné ze zkoumaných kategorií. Podrobné výsledky jsou ukázány v tabulce 2.

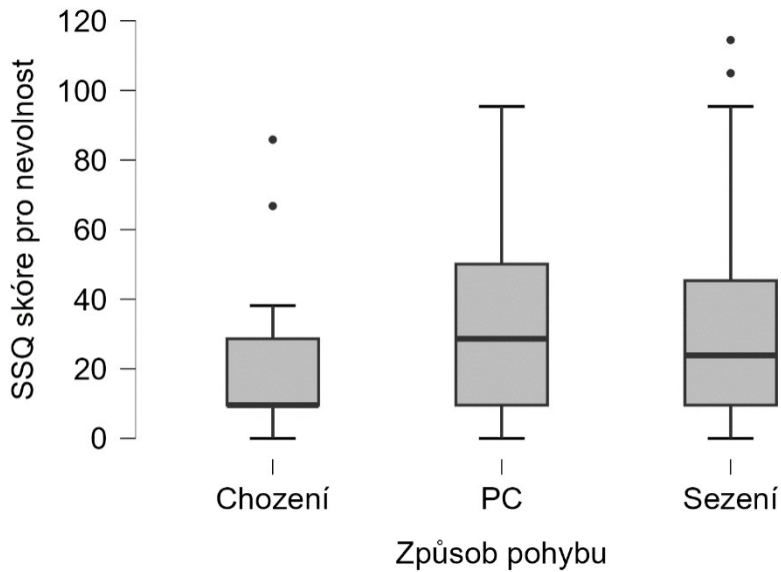
Způsob pohybu	df	pokusy se všemi zvuky		pokusy s chybějícím zvukem		t	p
		M	SD	M	SD		
Všechny pohyby	93	4.95	2.11	4.67	2.39	-1.32	0.192
Chození	31	5.32	2.02	5.19	2.26	-0.33	0.738
PC	31	5.19	2.21	4.74	2.72	-1.24	0.221
Sezení	31	4.32	2.02	4.07	2.01	-0.696	0.492

Tabulka 2 - Výsledky studentova párového t-test pro porovnání počtu úspěšných pokusů mezi pokusy se všemi zvuky a pokusy s chybějícím zvukem

### 3.5.2. Ovlivňující faktory

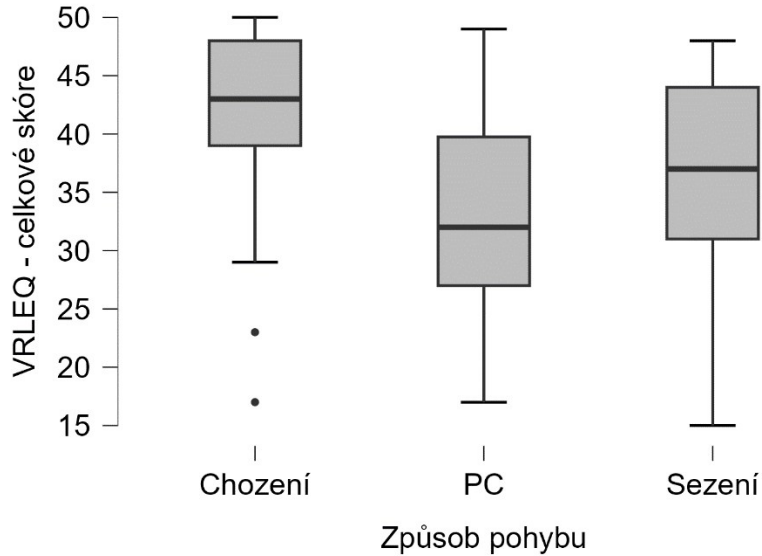
Při analýze SSQ dotazníku na nevolnost bylo analyzováno skóre subkategorie nevolnosti pro jednotlivé pohyby. Při tomto testu ANOVA nalezla signifikantní rozdíl mezi pohyby ( $F(2, 90) = 3.21, p = 0.045$ ). Post hoc analýza používající Tukeyho kritérium významnosti však signifikantní rozdíl mezi dvěma specifickými pohyby nenašla. Dále byla provedena Pearsonova korelační analýza mezi subkategorií nevolnosti a celkovým počtem úspěšných pokusů, aby bylo

zjištěno, zda míra nevolnosti ovlivnila výkon při plnění úlohy. Tato analýza nenašla signifikantní korelaci  $r(90) = -1.9, p = 0.069$ .



Graf 1 - SSQ skóre nevolnosti pro jednotlivé pohyby

Při analýze VR Locomotion Experience Questionnaire dotazníku zkoumajícího subjektivní preferenci pohybů bylo porovnáváno celkové skóre pro jednotlivé pohyby. ANOVA nalezla signifikantní rozdíl mezi skupinami ( $F(2, 90) = 14.09, p = < 0.001$ ). Post hoc analýza používající Tokeyho kritérium významnosti ukázala signifikantní rozdíl mezi Chozením ( $M = 43.96, SD = 4.26$ ) a Sezením ( $M = 36.2, SD = 9.08$ ),  $p = < 0.001$  a mezi Chozením a PC ( $M = 33.41, SD = 8.74$ ),  $p = < 0.001$ . Pro zjištění, zda preference pohybů ovlivnila výkonnost, byla použita Pearsonova korelační analýza mezi počtem úspěšně splněných pokusů a VRLQ skóre. Signifikantní korelace mezi však nebyla nalezena  $r(90) = 0.185, p = 0.085$ .



Graf 2 – VRLEQ skóre pro jednotlivé pohyby

Z dotazníku na herní zkušenosti byly analyzovány dvě otázky: „Hrajete hry?“, „Používali jste někdy VR?“. U obou otázek byl následně u skupin porovnáván celkový počet úspěšných pokusů. Nejdříve první zkoumaná otázka „Hrajete hry?“ rozdělila vzorek na dvě skupiny podle odpovědí „Ano“ (A = 19) nebo „Ne“ (N = 12). Tyto dvě skupiny byly opět porovnány na základě celkového počtu úspěšných pokusů pomocí studentova t-testu, který však mezi skupinami „Ano“ (M = 9.74, SD = 3.72) a „Ne“ (M = 9.41, SD = 4.51) nenalezl signifikantní rozdíl mezi skupinami ( $t(90) = 0.37$ ,  $p = 0.711$ ).

Druhou testovanou otázkou byla otázka: „Používali jste někdy VR?“. Počet participantů, co zvolili jednotlivé možnosti, je vidět v tabulce 3. Tento vzorek měl značně nerovnoměrné zastoupení, a tak jsme pro účely této práce rozhodli spojit skupinu, co na sobě měla VR párkrát a tu, co měla na sobě VR více než pětkrát do jedné skupiny, čímž jsme vytvořili skupinu, co na sobě měla VR víckrát než jednou. Pomocí studentova T-testu tak byl porovnán celkový počet úspěšných pokusů u skupiny, co měla VR jednou (M = 9.91, SD = 9.53) se skupinou, co ho měla víckrát než jednou (M = 9.53, SD = 3.99). Studentův T-test nenalezl mezi těmito dvěma skupinami signifikantní rozdíl ( $t(90) = 0.376$ ,  $p = 0.708$ ).

Používali jste někdy VR?	Počet	procenta
Jednou	24	75
Párkrát	5	15.63
Více než pětkrát	3	9.38

Tabulka 3 - Četnost odpovědí na otázku „Používali jste někdy VR?“

### 3.6. Diskuse

#### 3.6.1. Porovnání pohybů

Z výsledků porovnání celkového počtu úspěšných pokusů mezi jednotlivými pohyby se nepotvrdil předpoklad, že při pohybování způsobem s vyšší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím naleznou účastníci vícekrát cílovou oblast v časovém limitu. Signifikantní rozdíl v počtu úspěšných pokusů se neprokázal ani mezi jednou možnou skupinou pohybů.

Tyto výsledky jsou překvapivé. Existující výzkumy ukazují, že propriocepční a vestibulární zpětná vazba má pozitivní vliv na lokalizaci zvuků a výzkumníci se domnívají, že tato vazba hraje silnou roli v našem prostorovém vnímání zvuku (Carlile et al., 2014, Honda et al. 2013). Tento efekt se navíc projevuje, i pokud je účastníkům před lokalizační úlohou umožněn krátký pasivní trénink, při kterém se mohou volně hýbat a poslouchat (Blum et al., 2004). Na základě těchto studií se výzkumníci domnívají, že propriocepční a vestibulární zpětná vazba pomáhá kalibrovat náš auditorní systém. Z toho by se dalo předpokládat, že přístup k propriocepčním a vestibulárním informacím bude mít pozitivní vliv i v navigačních úlohách. Tento předpoklad ve své studii diskutovali i Viaud-Delmon a Warusfel (2014) a došli ke stejným závěrům.

Při porovnání ušlé vzdálenosti úspěšných pokusů se navíc ukázalo, že účastníci ušli signifikantně menší vzdálenost při pohybu PC, než při Sezení. Při porovnání délky trvání úspěšných pokusů se zase projevilo, že pohyb Sezení byl signifikantně pomalejší než pohyb Chození. Pohyb Sezení byl tak jediný, který se projevil jako signifikantně horší v obou kategoriích, ačkoliv bylo předpokládáno, že výkonem bude ležet mezi pohyby PC a Chození, a to kvůli tomu, že poskytoval informace o vlastním otáčení a dovoval volně otáčet hlavou. Specificky je to totiž kalibrativní funkce volného pohybu hlavou na vnímání zvuku, která byla

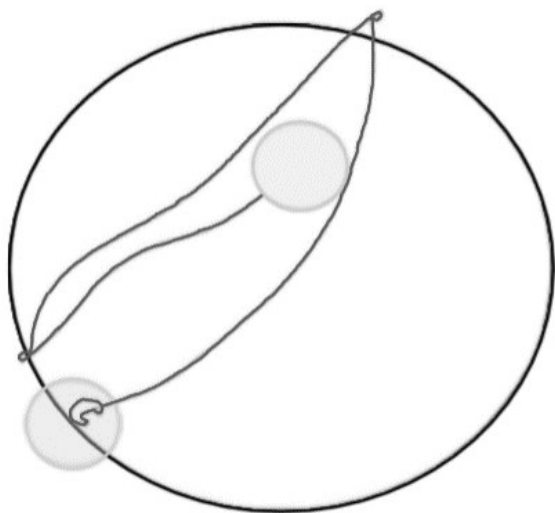
opakovaně prozkoumána (Parseihian & Katz, 2012, Honda et al. 2013). Z tohoto důvodu je tak nejpřekvapivější, že mezi pohyby Chození a PC se nenalezl signifikantní rozdíl ani v jedné z porovnávaných kategorií, ačkoliv u pohybu PC byl veškerý vlastní pohyb tělem i hlavou zcela abstrahován pomocí joysticků a bylo tedy předpokládáno, že bude mít nejvíce negativní efekt na výkon participantů.

Na základě těchto výsledků je dokonce možné hypotetizovat, že při navigaci podle zvuku jsou lidé schopni obejít se bez propriocepčních a vestibulárních informací, nebo že se jejich absence alespoň neprojevuje na jejich výkonu. Tuto hypotézu bude ještě nutné důkladně prozkoumat. Jako jedním z dalších možných experimentů je opakovat design se třemi různými způsoby pohybu v jiné navigační úloze. Jednou z možných úloh může například být zvukové bludiště používané ve Fialho a kolegové (2021). K výsledkům tohoto experimentu je však nutné přistupovat opatrně, jelikož v jeho designu bylo nalezeno několik limitací.

Celkově vzato byl počet úspěšných pokusů menší, než bylo předpokládáno. Participantů nalezli úspěšně cíl pouze zhruba v 50 % pokusů. Za tento fakt může do jisté míry relativně krátká 30 vteřinová hranice, která byla vybrána hlavně kvůli časové náročnosti. Tento předpoklad se prokázal jako správný, jelikož experiment se projevil jako opravdu velmi náročný na čas. Průměrná délka pokusu (úspěšných i neúspěšných) činila zhruba 24 minut, do tohoto času však nejsou započítány mezičasy mezi pokusy. Celková délka tak pravděpodobně přesahovala 30 minut. Ačkoliv tento čas oddělovaly pauzy, ve kterých participantů vyplňovali dotazníky, délka ve VR se blížila maximální doporučené délce pobytu ve VR, pro lidi, co s VR nemají zkušenosti (Stanney, 2003). Pokud by v možných budoucích opakováních experimentu byla nastavena vyšší maximální délka pokusu, bylo by pravděpodobně nutné uměle prodloužit přestávky mezi způsoby pohybu či omezit počet pohybů pouze na dva.

Předpoklad, že při pohybování způsobem s vyšší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím naleznou participantů vícekrát cílovou oblast v časovém limitu, pokud jim bude odstraněna část zvukových vodítek, se nakonec vůbec neukázal jako relevantní. Signifikantní rozdíl v počtu úspěšných pokusů se neprojevil ani v jednom ze zkoumaných pohybů a neprojevil se ani při analýze všech pohybů najednou. Z těchto výsledků se tak dá usuzovat, že odstranění jednoho ze zvukových vodítek nepředstavovalo dostatečně silnou změnu, aby to narušilo schopnost participantů nalézt skrytou oblast.

Možným limitem se zpětně zdají i rozdílné možnosti pohybu do stran u pohybu Sezení. Tento krok byl zprvu určen k donucení participantů používat otáčení a zároveň k omezení možné nevolnosti. Nutnost otáčet se na židli, však měla neočekávaný důsledek. Mohlo se totiž stát, že sice participant vyrazil správným směrem, avšak o kousek jej minuli. Podobný scénář je možné vidět na trase jednoho z participantů na obr. 10. Participant kvůli nemožnosti pohnout se kousek do strany, musel dojít dopředu, trochu se otočit a vyrazit zpět. Tento proces tak mohl prodloužit jak délku, tak ušlou vzdálenost pokusu.



Obrázek 9 - vyobrazení trasy jednoho z participantů u pohybu Sezení

Je také nutné říci, že participant nebyli žádným způsobem motivováni k tomu, aby ušli co nejkratší vzdálenost. Mohli se tedy úmyslně pohybovat co nejrychleji a nebrat ohledy na ušlou vzdálenost. Tento problém se celkově dotýká toho, že počet úspěšných pokusů a jejich délka spolu s ušlou vzdáleností možná sama o sobě nejsou dostatečně přesná kritéria pro porovnání navigačního výkonu v této úloze. Jednou z možností analýzy pro budoucí výzkum je vytvořit postup, kterým by se testoval například směr vyražení.

Posledním nalezeným limitem může být fakt, že participant při úloze viděli zelené krychle, které jim dodávaly povědomí o jejich pohybu. Studie ukazují, že optický tok může být dostatečným vodítkem pro informace o vlastním pohybu při virtuálním pohybu ve VR (Redlick et al. 2001). Je tedy možné, že při absenci propriocepčních a vestibulárních informací se participant zaměřili na krychle a z nich získávali dostatečné informace o vlastním pohybu. v budoucích experimentech tak bude třeba zkoumat, do jaké míry je optický tok pro podobné úlohy zásadní.



### 3.6.2. Ovlivňující faktory

Výsledky analýzy SSQ dotazníku pro nevolnost sice našly signifikantní rozdíl mezi všemi pohyby, ale mezi žádnou dvojicí se signifikantní rozdíl neprojevil. K tomu došlo pravděpodobně kvůli malému vzorku dat. Korelační analýza, však nepoukázala na to, že by zvýšená nevolnost souvisela s počtem úspěšně splněných pokusů. Celkově vzato se tedy neukázalo, že by rozdílná míra nevolnosti u pohybů ovlivnila plnění testovací úlohy.

To, že VR Locomotion Experience Questionnaire, který zkoumal vnímanou složitost, pohodlnost a celkovou příjemnost pohybů, ukázal pohyb Chození jako více preferovaný, než byly pohyby Sezení s PC, se dalo očekávat. Pohyb Chození byl totožný s normální chůzí, na kterou je běžný člověk zvyklý. Preference pohybu Chození se však neprokázala jako faktor, který by ovlivňoval počet úspěšných pokusů.

Dále se neukázalo, že by zkušenosti s hraním her, či předešlé zkušenosti s používáním VR měly efekt na výkonnost participantů při plnění úlohy. Tento výsledek je relativně nečekaný. ve výzkumech ve VR se dlouhodobě ukazuje, že hráči her si v úlohách počínají lépe (Sobczyk et al., 2015). Tento fakt je specificky zajímavý, protože při pohybu PC se participanté pohybovali pomocí dvou joysticků, tedy způsobem, který se při hraní her používá velice často. Při studiu lokalizace prostorového audia se navíc ukazuje, že poslech prostorového audia může mít i několikaměsíční efekt na lokalizaci zvuků (Majdak et al., 2010; Parseihian & Katz, 2012). Jak u hráčů her, tak uživatelů VR, by se dalo očekávat, že do styku se simulovaným prostorovým zvukem přijdou častěji. Obě tyto skutečnosti pak nasvědčovaly tomu, že zkušenosti s hraním her a VR by mohly mít pozitivní efekt na výkon. Výsledky analýzy herních zkušeností a VR je však třeba brát s rezervou jelikož, že pro účely této práce jsem se zaměřil pouze na dvě velmi všeobecné otázky, které nemusely zcela zachytit to, jak často se participanté dostávají do styku se simulovaným zvukem. V dalších experimentech by bylo tedy žádoucí vytvořit dotazník, který by to přímo zkoumal, jak často hrají participanté hry, ve kterých je používáno prostorové audio a jsou s ním nuceni interagovat. Předkládané výsledky však určitě ukazují na to, že studium toho, jakým způsobem hraní her ovlivňuje naši schopnost zvuky lokalizovat a navigovat se podle nich, zůstává další možnou a zajímavou oblastí výzkumu.

### 3.6.3. Schrnutí diskuse

Ani jedna z hypotéz nebyla potvrzena. Tyto výsledky nasvědčují tomu, že domnělá vazba mezi našim vnímáním zvuku a propiocepčními a vestibulárními informacemi není tak silná, jak bylo předpokládáno. Následná analýza dotazníku poté ukázala, že tyto výsledky nebyly ovlivněny rozdílnou mírou v nevolnosti, preferenci pohybů a zkušeností s hrami či VR. Ačkoliv bylo v designu experimentu nalezeno několik limitací, tyto výsledky jsou zajímavé a otevírají otázku, zda se lidé při navigaci podle zvuku obejdou bez propiocepčních a vestibulárních informací o vlastním pohybu.

Tato výzkumná otázka je určitě prospektivní a vyžaduje další výzkumy. Při zkoumání limitací tohoto experimentu se vyjevily další možné úpravy stávajícího experimentu, které by mohly přinést další cenné poznatky o funkci propiocepčních a vestibulárních informací o vlastním pohybu. Asi jako nejdůležitější se jeví rozšířit kritéria, podle kterých jsou pohyby porovnávány, jelikož počet úspěšných pokusů, ušlá vzdálenost a délka trvání možná nejsou dostatečně citlivá na to, aby se v nich rozdíly projevíly. Jednou z možností je již zmíněná analýza směru vyražení. Bylo by také žádoucí zjistit, jak přesné si participanti vytvořili prostorové povědomí o konstelaci zvukových vodiček a cílové oblasti. K tomuto účelu by se do dotazníku mohla přidat slepá mapa, kam by je participanti zakreslovali. Co se možných úprav experimentu týká, jednoduchá obměna, při které byly odstraněny optické krychle, už byla vytvořena, administrována a momentálně je ve fázi analýzy výsledků. Při porovnání výsledků této obměny s výsledky tohoto experimentu, bude možné zjistit, jak výraznou roli při navigaci podle zvuku hraje optický tok.

#### 4. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval způsobem pohybu podle zvuku ve VR. v teoretické části byla nejprve věnována pozornost tématu navigace, navigačním vodítkům a strategiím a otázce, zda je navigace vizuocentrická. Následovala část o lokalizaci zvuku, co ji ovlivňuje, o simulaci prostorového zvuku a navigaci podle zvukových vodítek. Závěr teoretické části patřil testování ve VR a výhodám i rizikům s tím spojeným.

V praktické části jsme představili experiment, který měl za cíl zjistit, jakým způsobem je navigace podle zvuku ovlivněna přístupem k propriocepčním a vestibulárním informacím o vlastním pohybu. Experiment byl vytvořen ve VR a úkolem participantů v něm bylo opakovaně najít skrytou oblast na základě tří zdrojů zvuku rozmístěných do prostoru. Participantů tento úkol plnili postupně ve třech různých způsobech pohybu, které se lišily sestupnou mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím. Na základě výsledků experimentu se předpokládá, že pohyby s vyšší mírou přístupu k propriocepčním a vestibulárním informacím budou při plnění úlohy počínat lépe, se nevyplní.

Tento výsledek otevírá zajímavou otázku, a to zda se lidé při navigaci podle zvuku obejdou bez propriocepčních a vestibulárních informací o vlastním pohybu. V diskusi byla popsána řada dalších směrů, kam se při zkoumání této otázky vydat. Doufám, že tento výzkum a budoucí výzkumné projekty v této oblasti, kterým bych se rád v budoucnu věnoval, alespoň malým kouskem pomohou prozkoumat nové a zajímavé možnosti, jak mohou lidé interagovat se zvukovým světem kolem nás.

## Bibliografie

- Aytekin, M., Moss, C. F., & Simon, J. Z. (2008). A sensorimotor approach to sound localization. *Neural Computation*, 20(3), 603-635.
- Bertelson, P., & Radeau, M. (1981). Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Perception & psychophysics*, 29(6), 578-584.
- Blum, A., Katz, B. F., & Warusfel, O. (2004). Eliciting adaptation to non-individual HRTF spectral cues with multi-modal training. In *Proceedings of Joint Meeting of the German and the French Acoustical Societies (CFA/DAGA'04)*, Strasbourg, France (pp. 1225-1226).
- Bonato, F., Bubka, A., & Palmisano, S. (2009). Combined pitch and roll and cybersickness in a virtual environment. *Aviation, space, and environmental medicine*, 80(11), 941-945.
- Bruns, P. (2019). The ventriloquist illusion as a tool to study multisensory processing: An update. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 13, 51.
- Burkins, A., & Kopper, R. (2015). Wayfinding by auditory cues in virtual environments. In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 155-156). IEEE.
- Cheng, C. I., & Wakefield, G. H. (1999). Introduction to head-related transfer functions (HRTFs): Representations of HRTFs in time, frequency, and space. In *Audio Engineering Society Convention 107*. Audio Engineering Society.
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2013). Active and passive spatial learning in human navigation: acquisition of survey knowledge. *Journal of experimental psychology: learning, memory, and cognition*, 39(5), 1520.
- Clemenson, G. D., Maselli, A., Fiannaca, A. J., Miller, A., & Gonzalez-Franco, M. (2021). Rethinking GPS navigation: creating cognitive maps through auditory clues. *Scientific reports*, 11(1), 1-10.
- Colombo, D., Serino, S., Tuena, C., Pedroli, E., Dakanalis, A., Cipresso, P., & Riva, G. (2017). Egocentric and allocentric spatial reference frames in aging: a systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 80, 605-621
- Committeri, G., Galati, G., Paradis, A. L., Pizzamiglio, L., Berthoz, A., & LeBihan, D. (2004). Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object-,

and landmark-centered judgments about object location. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(9), 1517-1535.

Dużmańska, N., Strojny, P., & Strojny, A. (2018). Can simulator sickness be avoided? A review on temporal aspects of simulator sickness. *Frontiers in psychology*, 9, 2132.

Ekstrom, A. D. (2015). Why vision is important to how we navigate. *Hippocampus*, 25(6), 731-735.

Ekstrom, A. D., Spiers, H. J., Bohbot, V. D., & Rosenbaum, R. S. (2018). *Human spatial navigation*. Princeton University Press.

Ellmore, Timothy M., & Bruce L. McNaughton. "Human path integration by optic flow." *Spatial Cognition and Computation* 4.3 (2004): 255-272.

Emmelkamp, P. M., & Meyerbröker, K. (2021). Virtual reality therapy in mental health. *Annual review of clinical psychology*, 17, 495-519.

Galati, G., Pelle, G., Berthoz, A., & Committeri, G. (2010). Multiple reference frames used by the human brain for spatial perception and memory. *Experimental brain research*, 206, 109-120.

Gentry, G., Brown, W. L., & Lee, H. (1948). Spatial location in the learning of a multiple-T maze. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 41(5), 312.

Gillner, S., & Mallot, H. A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of cognitive neuroscience*, 10(4), 445-463.

Giudice, N. A. (2018). Navigating without vision: Principles of blind spatial cognition. In *Handbook of behavioral and cognitive geography* (pp. 260-288). Edward Elgar Publishing.

Grant, S. C., & Magee, L. E. (1998). Contributions of proprioception to navigation in virtual environments. *Human Factors*, 40(3), 489-497.

Grothe, B., Pecka, M., & McAlpine, D. (2010). Mechanisms of sound localization in mammals. *Physiological reviews*, 90(3), 983-1012.

Haas, J. K. (2014). A history of the unity game engine. Diss. Worcester Polytechnic Institute, 483(2014), 484.

- Hejtmánek, L., Oravcová, I., Motýl, J., Horáček, J., & Fajnerová, I. (2018). Spatial knowledge impairment after GPS guided navigation: Eye-tracking study in a virtual town. *International Journal of Human-Computer Studies*, 116, 15-24.
- Hejtmánek, L. (2020). Virtual environments as a tool to study human navigation. [Doctoral thesis, Charles University]. Charles University Digital Repository. <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/147555/140089491.pdf>
- Heller, F., & Schöning, J. (2018, April). Navigatone: Seamlessly embedding navigation cues in mobile music listening. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-7).
- Jacobs, L. F. (2012). From chemotaxis to the cognitive map: the function of olfaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(supplement\_1), 10693-10700.
- Jot, J. M., & Warusfel, O. (1995). a real-time spatial sound processor for music and virtual reality applications. In *ICMC: International Computer Music Conference* (pp. 294-295).
- Kawaura, J. I., Suzuki, Y., Asano, F., & Sone, T. (1991). Sound localization in headphone reproduction by simulating transfer functions from the sound source to the external ear. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 12(5), 203-216.
- Kern, A. C., & Ellermeier, W. (2020). Audio in VR: effects of a soundscape and movement-triggered step sounds on presence. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 20.
- King, A. J. (2009). Visual influences on auditory spatial learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1515), 331-339.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Beall, A. C., Chance, S. S., & Golledge, R. G. (1998). Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. *Psychological science*, 9(4), 293-298.
- Kobián, O. (2022). Dopad metody pohybu na navigaci a prostorovou paměť ve virtuální realitě [Faculty of Humanities, Charles University]. Charles University Digital Repository. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/177749>
- Kumpik, D. P., Campbell, C., Schnupp, J. W., & King, A. J. (2019). Re-weighting of sound localization cues by audiovisual training. *Frontiers in neuroscience*, 13, 1164.

- Larsen, M. L., & Kraus, M. (2021). 3D Localisation of Sound Sources in Virtual Reality. In *Interactivity and Game Creation: 9th EAI International Conference, ArtsIT 2020, Aalborg, Denmark, December 10–11, 2020, Proceedings (Vol. 367, p. 307)*. Springer Nature.
- Lokki, T., & Gröhn, M. (2005). Navigation with auditory cues in a virtual environment. *IEEE MultiMedia*, 12(2), 80-86.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(1), 73.
- Makous, J. C., & Middlebrooks, J. C. (1990). Two-dimensional sound localization by human listeners. *The journal of the Acoustical Society of America*, 87(5), 2188-2200.
- Marples, D., Gledhill, D., & Carter, P. (2020). The effect of lighting, landmarks and auditory cues on human performance in navigating a virtual maze. In *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games* (pp. 1-9).
- Majdak, P., Goupell, M. J., & Laback, B. (2010). 3-D localization of virtual sound sources: Effects of visual environment, pointing method, and training. *Attention, perception, & psychophysics*, 72(2), 454-469.
- McMullen, K. A., & Wakefield, G. H. (2014). 3D sound memory in virtual environments. In *2014 IEEE symposium on 3D user interfaces (3DUI)* (pp. 99-102). IEEE.
- Merleau-Ponty, M. (1962), *Phenomenology of Perception*, London: Routledge and Kegan Paul.
- Middlebrooks, J. C. (2015). Sound localization. *Handbook of clinical neurology*, 129, 99-116.
- Morris, R. (1984). Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of neuroscience methods*, 11(1), 47-60.
- Nardi, D., Carpenter, S. E., Johnson, S. R., Gilliland, G. A., Melo, V. L., Pugliese, R., ... & Kelly, D. M. (2022). Spatial reorientation with a geometric array of auditory cues. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 75(2), 362-373.
- Newman, M. C., & Kaszniak, A. W. (2000). Spatial memory and aging: performance on a human analog of the Morris water maze. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7(2), 86-93.

- O'Keefe, J., & Nadel, L. (1979). Précis of O'Keefe & Nadel's The hippocampus as a cognitive map. *Behavioral and Brain Sciences*, 2(4), 487-494.
- Parseihian, G., & Katz, B. F. (2012). Rapid head-related transfer function adaptation using a virtual auditory environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 2948-2957.
- Poirier-Quinot, D., Lawless, M. S., Stitt, P., & Katz, B. F. (2022). HRTF Performance Evaluation: Methodology and Metrics for Localisation Accuracy and Learning Assessment.
- Ráčková, V. (2022). Dopad herních zkušeností na navigační schopnosti ve VR [Faculty of Humanities, Charles University]. Charles University Digital Repository. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/177754>
- Redlick, F. P., Jenkin, M., & Harris, L. R. (2001). Humans can use optic flow to estimate distance of travel. *Vision research*, 41(2), 213-219.
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., Bowerly, T., Van Der Zaag, C., Humphrey, L., Neumann, U., ... & Sisemore, D. (2000). The virtual classroom: a virtual reality environment for the assessment and rehabilitation of attention deficits. *CyberPsychology & Behavior*, 3(3), 483-499.
- Skelton, R. W., Ross, S. P., Nerad, L., & Livingstone, S. A. (2006). Human spatial navigation deficits after traumatic brain injury shown in the arena maze, a virtual Morris water maze. *Brain Injury*, 20(2), 189-203.
- Sobczyk, B., Dobrowolski, P., Skorko, M., Michalak, J., & Brzezicka, A. (2015). Issues and advances in research methods on video games and cognitive abilities. *Frontiers in Psychology*, 6, 1451.
- Spagnol, S. (2020). HRTF selection by anthropometric regression for improving horizontal localization accuracy. *IEEE Signal Processing Letters*, 27, 590-594.
- Stanney, K. M., Hale, K. S., Nahmens, I., & Kennedy, R. S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience. *Human factors*, 45(3), stránky 504-520
- Tabry, V., Zatorre, R. J., & Voss, P. (2013). The influence of vision on sound localization abilities in both the horizontal and vertical planes. *Frontiers in psychology*, 4, 932.



- Tiippana, K. (2014). What is the McGurk effect?. *Frontiers in psychology*, 5, 725.
- Ungar, S., Blades, M., & Spencer, C. (1996). The construction of cognitive maps by children with visual impairments. *The construction of cognitive maps*, 247-273.
- Viaud-Delmon, I., & Warusfel, O. (2014). From ear to body: the auditory-motor loop in spatial cognition. *Frontiers in neuroscience*, 8, 283.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55(4), 189.
- Yoder, R. M., & Taube, J. S. (2014). The vestibular contribution to the head direction signal and navigation. *Frontiers in integrative neuroscience*, 8, 32.
- Yost, W. A., Loisel, L., Dorman, M., Burns, J., & Brown, C. A. (2013). Sound source localization of filtered noises by listeners with normal hearing: a statistical analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(5), 2876-2882.
- Wenzel, E. M., Arruda, M., Kistler, D. J., & Wightman, F. L. (1993). Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(1), 111-123.
- Whishaw, I. Q., & Brooks, B. L. (1999). Calibrating space: exploration is important for allothetic and idiothetic navigation. *Hippocampus*, 9(6), 659-667.
- Zwiers, M. P., Van Opstal, A. J., & Paige, G. D. (2003). Plasticity in human sound localization induced by compressed spatial vision. *Nature neuroscience*, 6(2), 175-181.

## Seznam obrázků, tabulek a grafů

### Seznam obrázků

Obrázek 1 – Základní schéma testovací úlohy .....	24
Obrázek 2 - Schéma průběhu experimentu .....	25
Obrázek 3 - Schéma, které ukazuje možné pootočení cíle a zvukových vodítek .....	26
Obrázek 4 - Ukázka vizuálního prostředí při pohybu Chození a Sezení.....	27
Obrázek 5 - Ukázka vizuálního prostředí při pohybu PC .....	27
Obrázek 6 - pohled testovací prostředí z dálky .....	29
Obrázek 7 - produktová fotografie VR headsetu Oculus Quest 2 .....	30
Obrázek 8 - Fotografie testovací místnosti.....	31
Obrázek 9 - vyobrazení trasy jednoho z participantů u pohybu Sezení .....	40

### Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní výsledky pro porovnávané kategorie .....	35
Tabulka 2 - výsledky studentova párového t-test pro porovnání počtu úspěšných pokusů mezi pokusy se všemi zvuky a pokusy s chybějícím zvukem.....	35
Tabulka 3 - Četnost odpovědí na otázku „Používali jste někdy VR?“ .....	38

### Seznam grafů

Graf 1 - SSQ skóre nevolnosti pro jednotlivé pohyby .....	36
Graf 2 – VRLEQ skóre pro jednotlivé pohyby.....	37