



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

ROZŠÍŘENÁ REALITA S HAPTICKOU ODEZVOU

AUGMENTED REALITY WITH HAPTICAL FEEDBACK

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT

TERM PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB FRÝZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL BAMBUŠEK

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Frýz Jakub**
Program: Informační technologie
Název: **Rozšířená realita s haptickou odezvou**
Augmented Reality with Haptical Feedback
Kategorie: Uživatelská rozhraní

Zadání:

1. Prostudujte koncept rozšířené reality a aktuální trendy v oblasti haptické odezvy pro VR/AR. Seznamte se s zařízením Microsoft HoloLens 2 a Stratos Explore.
2. Prozkoumejte vhodné příklady a využití vizualizace virtuálních objektů, na které je možné "sáhnout".
3. Vyberte vhodné metody a nástroje a navrhnete aplikaci, která bude vizualizovat hmatatelné virtuální objekty v rozšířené realitě pomocí HoloLens a Stratos Explore.
4. Navrženou aplikaci implementujte.
5. Proveďte experimenty a vyhodnoťte vlastnosti výsledného řešení.
6. Vytvořte plakát nebo video prezentující klíčové vlastnosti výsledného řešení.

Literatura:

- SCHMALSTIEG Dieter, HÖLLERER Tobias. *Augmented Reality: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 2016. ISBN 978-0321883575.
- HARTSON Rex. *The UX Book: Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience*. 2012. ISBN 9780123852427.
- Dále dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1, 2, 3 a rozpracovaný bod 4.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Bambušek Daniel, Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 1. listopadu 2021

Abstrakt

Rozšířená realita postrádá haptiku (pocit hmatu). Tento problém se snažím vyřešit za pomoci brýlí pro rozšířenou realitu HoleLens 2 komunikující přes HTTP se Stratos Explore, deskou simulující hmat pomocí ultrazvuku. Vytvořil jsem dvě aplikace, hru „plácní krtka“ a audio přehrávač, na kterých demonstuji spojení těchto technologií. Nakonec bylo provedeno i testování na vzorku potenciálních uživatelů.

Abstract

Augmented reality lacks haptics. I try to solve this problem with the help of augmented reality glasses HoleLens 2 communicating via HTTP with Stratos Explore, a board simulating touch using ultrasound. I created two applications, the game Whack-A-Mole and the audio player, to demonstrate the connection between these technologies. Finally, testing was performed on a sample of potential users.

Klíčová slova

rozšířená realita, haptická odezva, Microsoft HoloLens 2, Stratos Explore, Whack-A-Mole

Keywords

augmented reality, haptic feedback, Microsoft HoloLens 2, Stratos Explore, Whack-A-Mole

Citace

FRÝZ, Jakub. *Rozšířená realita s haptickou odezvou*. Brno, 2022. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Daniel Bambušek

Rozšířená realita s haptickou odezvou

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana inženýra Bambuška. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Jakub Frýz
11. května 2022

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Danielu Bambuškoví za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval po dobu zpracování této práce.

Obsah

1	Úvod	2
2	Použité technologie	3
2.1	Prodloužená realita (XR)	3
2.1.1	Virtuální realita (VR)	3
2.1.2	Rozšířená realita (AR)	4
2.1.3	Mixovaná realita (MR)	6
2.2	Haptická odezva	7
2.3	Použité zařízení	9
2.3.1	Microsoft HoloLens 2	9
2.3.2	Stratos Explore	9
3	Návrh	11
3.1	Cíle	11
3.2	Návrhy demonstračních aplikací	11
3.3	Komunikace	12
3.4	Technologie Bluetooth	13
3.4.1	Bluetooth Low Energy (BLE)	13
3.4.2	Generic Attribute Profile (GATT)	13
3.5	Ukotvení objektů v prostoru	14
3.5.1	Sledování značek	14
3.6	Změna v návrhu	15
4	Implementace	16
4.1	Aplikace pro HoloLens 2	16
4.1.1	Whack-A-BlockMole	17
4.1.2	Audio přehrávač demo	18
4.2	Aplikace pro Stratos Explore	20
5	Testování a vyhodnocení	23
5.1	Testování uživatelského prožitku	23
5.2	Výsledky	23
5.3	Možná rozšíření a vylepšení	25
6	Závěr	26
	Literatura	27

Kapitola 1

Úvod

Rozšířená realita se dostává do povědomí široké veřejnosti čím dál víc. Tato technologie umožňuje umístit virtuální objekty do reálného prostředí. Komunikace aplikací využívající tuto technologii s uživatelem však zůstala víceméně nezměněná. Na displeji se zobrazují informace a interakce s nimi je omezena na klávesnici, myš nebo dotyk. Stávající zařízení pro rozšířenou realitu pracují pouze s vizuální stranou a nijak nepracují s hmatem uživatele, což je smysl, který ve virtuální a rozšířené realitě chybí a tím postrádá na uvěřitelnosti.

Úkolem této práce je pomocí HoloLens 2, brýlí pro rozšířenou realitu od firmy Microsoft umožňující zobrazení virtuálních objektů v prostoru uživatele, a Stratos Explore, vývojové sady pro generování haptické odezvy pomocí ultrazvuku od firmy Ultraleap, vytvořit uvěřitelnou aplikaci rozšířené reality s využitím haptické odezvy. Kombinací těchto zařízení jsem vytvořil dvě demonstrační aplikace, hru „plácní krtka“, která zobrazí uživateli prostor s opakovaně vylézajícím a schovávajícím krtkem a umožní uživateli pocítit plácnutí krtka, a audio přehrávač, který přehrává skladby a poskytne uživateli haptickou odezvu v rytmu spuštěné skladby.

V následující kapitole 2 jsou přiblíženy obě technologie, které tuto práci pohání – rozšířená realita a haptická odezva – a představená zařízení, která tyto technologie využívají. V kapitole 3 budou popsány návrhy aplikací a jejich vzájemná komunikace a v kapitole 4 jejich implementace. Nakonec v kapitole 5 budou shrnuty výsledky testování a návrhy pro vylepšení.

Kapitola 2

Použité technologie

Jak už název práce napovídá, použitými technologiemi jsou rozšířená realita a haptická odezva. Tato kapitola se pokusí obě tyto technologie dostatečně vysvětlit.

2.1 Prodloužená realita (XR)

Prodloužená realita (**eXtended Reality**), někdy také rozšířená realita, je zastřešující pojem pro technologie kombinující v různé míře reálné a virtuální prostředí [9]. Aktuálně mezi tyto technologie patří virtuální realita (VR), rozšířená realita (AR) a mixovaná realita (MR).

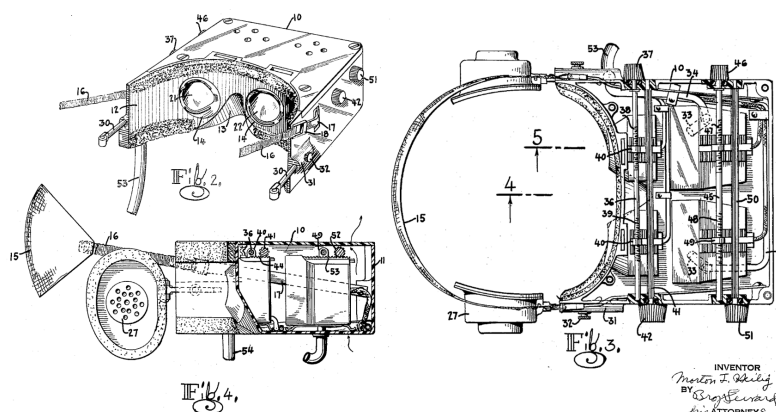
2.1.1 Virtuální realita (VR)

Virtuální realita (**Virtual Reality**) je první z XR technologií. Podle slovníku Merriam-Webster je virtuální realita definovaná jako umělé prostředí, které je vnímané prostřednictvím smyslových podnětů (nejčastěji zrak a sluch) poskytnuté počítačem a ve kterém něčí činy částečně určují dění v daném prostředí [5]. Stručně řečeno, jde o plně virtuální prostředí vygenerované počítačem, se kterým může uživatel interagovat. Jejím hlavním úkolem je vtáhnout (immerse) uživatele do virtuálního světa. Dělí se na tři typy: [3, 2]

1. **Nepohlcující** (non-immersive) – poskytuje počítačem vygenerované prostředí, ale uživatel má kontrolu nad svým fyzickým prostředím. Výstupním zařízením je displej, vstupním klávesnice, myš, ovladač, atd. Příkladem je hraní her na počítači či konzoli;
2. **Částečně pohlcující** (semi-immersive) – prostor kombinující fyzické a virtuální předměty v místnosti. Příkladem je kokpit letadla pro letecké simulátory;
3. **Plně pohlcující** (fully-immersive) – zcela zablokovan fyzický svět často pomocí na hlavu připevněného VR headsetu. Tento headset obsahuje rozdělený displej pro každé oko, čímž vytváří stereoskopický 3D efekt, a společně se vstupními zařízeními vytváří pohlcující a uvěřitelný zážitek.

V dnešní době, když se někde zmiňuje virtuální realita, jde často o plně pohlcující virtuální realita. První headset, tzv. „The Telesphere Mask“ (na obrázku 2.1), vznikl na počátku druhé poloviny 20. století. Byl určen pro Sensorama projektor, který měl umožnit zažít filmy stimulací všech pěti smyslů [3].

Nejznámějšími VR headsety jsou Oculus Rift a HTC Vive. Dalšími jsou např. Valve Index (obrázek 2.2) a PSVR. Všechny tyto brýle pro VR patří mezi klasické headsety a pro



Obrázek 2.1: The Telesphere Mask, předchůdce dnešních VR headsetů.

Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sensorama_morton_heilig_patent.png

svůj chod potřebují počítač (PSVR namísto PC potřebuje konzoli PS4 nebo PS5 od Sony) a pomocné stanice pro sledování polohy v prostoru. Dalším typem jsou „vše-v-jednom“ (all-in-one) headsety. Tyto headsety nepotřebují k chodu počítač a ani pomocné stanice, neboť vše je instalováno uvnitř headsetu. Nejznámějším příkladem je Oculus Quest a jeho nástupce Oculus Quest 2. Všechny doposud vypsané brýle jsou určeny primárně pro hraní, ale jsou použitelné i ve vzdělávání či povolání. Existují i headsety vytvořené specificky pro tyto úkony. Dnes už ani cena není takovou překážkou jako na začátku. Například na webu CZC.cz lze do 10 000 CZK sehnat právě už zmíněný Oculus Quest 2.



Obrázek 2.2: Valve Index VR Kit (headset, ovladače a stanice).

Zdroj: https://cdn.cloudflare.com/valvesoftware/images/about/hardware_index.jpg

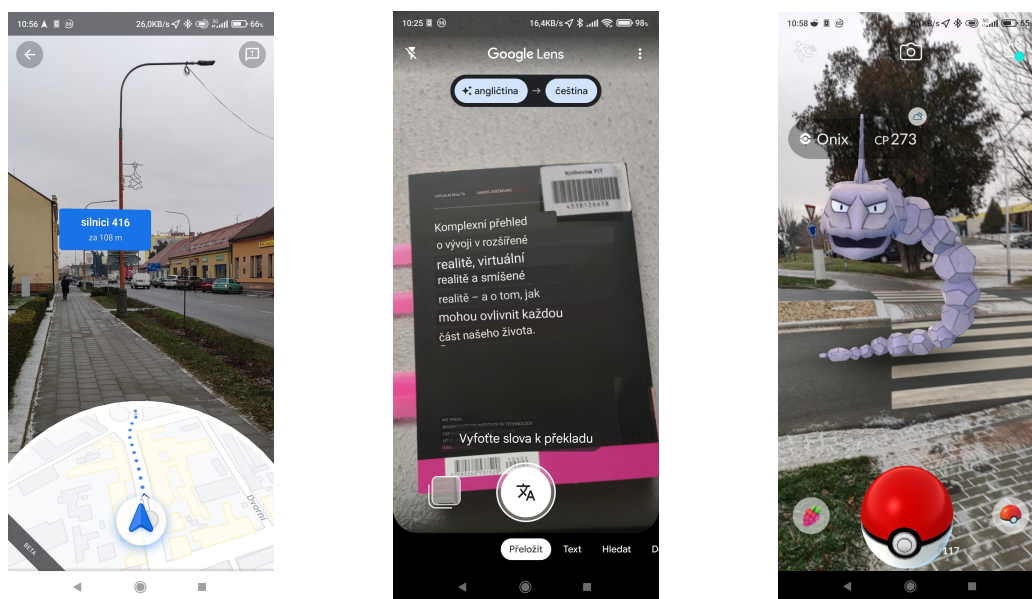
2.1.2 Rozšířená realita (AR)

Na rozdíl od virtuální reality je rozšířená technologie doplňková [3]. Ve slovníku Merriam-Webster je rozšířená realita definovaná jako vylepšená verze reality vytvořená použitím technologie k překrytí digitálními informacemi obraz něčeho, co je prohlíženo prostřednic-

tvím zařízení (jako je fotoaparát chytrého telefonu) [5]. Jednodušeji řečeno jde o přidání digitálních informací do fyzického světa, které se zobrazí většinou na displeji přístroje.

Pojem AR začal rezonovat na konci minulého tisíciletí až už debutem v televizi použitím při vysílání zápasu amerického fotbalu nebo vznikem ARToolkitu, otevřené sady nástrojů pro tvorbu AR aplikací, která se používá i dnes (např. v prohlížečích). V následujících letech se rozšířená realita začala používat častěji a dnes díky výkonu dnešní chytrých telefonů máme tuto technologii na dosah ruky [3].

Jelikož pro rozšířenou realitu postačí jakýkoliv v dnešní době vyráběný smartphone, je jednoduché zapomenout, že s rozšířenou realitou pracujeme. Na obrázcích 2.3a, 2.3b a 2.3c jsou jen některé ukázky příkladů rozšířené reality.



(a) Google Maps Live View. (b) Google Lens Translate. (c) Pokémon GO (AR Mode).

Obrázek 2.3: Ukázky AR aplikací

Mezi další příklady můžou být aplikace různé změny vzhledu uživatele (make-up, barva vlasů, filtry pro komunikační aplikace), dekorace domu (vlození modelu nábytku do prostoru, aplikace tapet na zdi) nebo zobrazení hvězdné mapy a samozřejmě i hry.

Mobily ovšem nejsou jediná zařízení používaná pro rozšířenou realitu. Pro AR lze využít téměř všechno, co má průhlednou plochu (přední sklo vozidla pro zobrazení rychlosti nebo GPS) nebo kameru s displejem. Dále může jít o chytré helmy pro motorkáře, které obsahují různé informace o stavu motorky (tachometr, množství paliva) nebo pohled dozadu pomocí kamery vsazené do helmy, holografické displeje (na obrázku 2.4), které využívají difrakce světla pro vytvoření virtuálního trojrozměrného objektu a *AR brýle*.

AR brýle, jinak chytré brýle (smartglasses), jsou často klasické brýle (nebo obroučky) s vlastním počítačem, který umožňuje rozšířenou realitu. Jsou myšleny tak, aby byly přenositelné a minimálně omezovaly uživatele (žádné kabely). Nikdy se ovšem nedostaly do mainstreamu jako chytré hodinky a zůstaly tak okrajovou záležitostí pro skalní fanoušky a ve vzdělávacím a pracovním segmentu. Zde totiž mají šanci pomáhat s různými úkony na stavbách, v lékařství i v armádě. Na trhu existuje momentálně několik modelů od různých výrobců a každé přichází se svým řešením. Jde jen o to, co po nich chce cílový uživatel. HoloLens od Microsoftu poskytuje plnohodnotný zážitek z rozšířené reality a podporují i



Obrázek 2.4: RealFiction Dreamoc, holografický displej od firmy Inition.

Zdroj: https://www.inition.co.uk/wp-content/uploads/2014/03/RealFiction-Dreamoc_1-740x415.jpg

sledování rukou, ale jsou velké, těžké a pro někoho nevhodné pro dlouhodobé nošení, zatímco Google Glass (na obrázku 2.5) poskytují malý heads-up displej, podporují pouze gesta, ale jsou miniaturní svým vzhledem. Dalšími příklady jsou Magic Leap, Vuzix Blade, Epson Moverio, Kopin SOLOS a další.



Obrázek 2.5: Google Glass Enterprise Edition 2, chytré brýle s malým displejem.

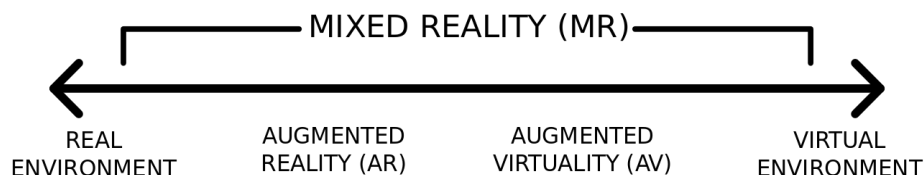
Zdroj: <https://lh3.googleusercontent.com/Ou9Evi903TdYzTO4G8wWvidEJZkQEBHEA0oCwivJj5ToMYMj7JJ7DwzuD6vF>

2.1.3 Mixovaná realita (MR)

Mixovaná realita (**Mixed Reality**), též hybridní realita (hybrid reality), spojuje reálné a virtuální světy k vytvoření nových prostředí a vizualizací, kde fyzické a digitální objekty spolu koexistují a interagují v reálném čase.

Pro vysvětlení, co přesně mixovaná realita obnáší, může posloužit kontinuum reality-virtuality (reality-virtuality continuum) (na obrázku 2.6). Úplně vlevo od kontinua je jakákoliv prostředí sestávající kompletně ze skutečných objektů a zahrnuje vše, co lze pozorovat při sledování scény reálného světa buď přímo osobně, nebo přes nějaký druh okna, nebo přes jakýsi displej. Naproti tomu úplně vpravo od kontinua je prostředí sestávající pouze

z virtuálních objektů, kde příklady zahrnují běžné počítačové grafické simulace, buď na monitoru, nebo pohlcující (immersive) zážitky. V tomto rámci je přímočaré definovat generické prostředí mixované reality jako prostředí, ve kterém jsou objekty reálného a virtuálního světa prezentovány společně na jediném displeji, to znamená kdekoli mezi extrémy kontinua RV [8].



Obrázek 2.6: Kontinuum reality-virtuality.

Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reality-Virtuality_Continuum.svg

Mezi těmito extrémy lze vidět už představenou rozšířenou realitu (podsekce 2.1.2) a automaticky vyplývající rozšířenou virtualitu (augmented reality). Tu si můžeme představit jakožto virtuální svět, do kterého jsou namapovány některé prvky reálného světa (např. ruce uživatele) [8].

2.2 Haptická odezva

Mezi nejnámější příklady haptiky patří pravděpodobně vibrace v mobilním telefonu nebo vibrační motůrky v herním ovladači, ale ve skutečnosti existuje obrovské množství aplikací: nositelná zařízení, zážitky pro AR/VR, automobilový infotainment (na obrázku 2.7) a špičkové vojenské a průmyslové simulační vybavení a další [13].



Obrázek 2.7: Využití haptické odezvy v automobilech.

Zdroj: https://cms.ultraleap.com/app/uploads/2022/04/Automotive-hero_1600x900.jpeg

V základě je „haptika“ vše, co nějak souvisí s hmatem (odvozeno od řeckého slova pro dotyk). Haptika ale jako věda a technologie je o přenosu a porozumění informací prostřednictvím hmatu. Jde však spíše o rodinu technologií než o jednu technologii, kdy každá komunikuje prostřednictvím hmatu různým způsobem [13].

Nejnámějšími typy haptiky jsou: [13]

- **Vibrotaktilní haptika** (vibrotactile haptics) – drobné motorčky vytvářející vibrace a další hmatové efekty v mobilních telefonech, herních a VR ovladačích (jako jsou ty v Playstation 5 a Nintendo Switch);
- **Ultrazvuková haptika ve vzduchu** (ultrasonic mid-air haptics) – algoritmy řídící ultrazvukové vlny tak, že kombinovaný tlak interagujících vln vytváří sílu, kterou lze cítit na ruku uživatele. Haptická technologie „virtuálního dotyku“ znamená, že uživatel ani nemusí být v kontaktu s fyzickým povrchem;
- **Mikrofluidika** (microfluidics) – vzduch nebo kapalina je vtlačována do malých komůrek v chytrém textilním nebo jiném zařízení a vytváří na kůži uživatele tlakové nebo teplotní kapsy;
- **Ovládání síly** (force control) – k vyvíjení síly na ruce, končetiny nebo celé tělo uživatele se používají páky nebo jiná velká mechanická zařízení;
- **Povrchová haptika** (surface haptics) – moduluje tření mezi prstem uživatele a dotykovou obrazovkou a vytváří tak hmatové efekty.

I přestože lidské bytosti mají pět smyslů, elektronická zařízení s námi komunikují převážně pomocí pouze dvou: zraku a sluchu. Haptická odezva to mění simulací hmatu. Nejen, že se uživatel může dotknout počítače nebo jiného zařízení, ale počítač se může dotknout nazpátek uživatele. Jde spíše o způsob komunikace mezi stroji a lidmi než o konkrétní technologii nebo aplikaci [13].

Hmatové vjemy, které si většina lidí představí, když se řekne „dotek“, jsou součástí toho, co je známé jako somatosenzorický systém. Ten zahrnuje obrovskou škálu vjemů, nejen pocity, jako jsou vibrace nebo tlak, ale také věci, jako je bolest, teplota a poloha a pohyb vašeho těla v prostoru. Somatosenzorický systém zahrnuje minimálně 12 specializovaných typů receptorů. Každý posílá do vašeho mozku jiné informace: jeden typ vysílá informace o vibracích, jeden o tlaku, jeden o bolesti a tak dále. Tyto receptory jsou po celém povrchu lidského těla a také uvnitř něj. Průměrný dospělý má 3 miliony receptorů bolesti. Teoreticky haptická zpětná vazba zahrnuje všechny tyto vjemy. Simulace somatosenzorického systému v jeho celistvosti je však obrovskou výzvou (podle Microsoftu je „složitější o spoustu řádů“ než zrak nebo zvuk). Existují také některé pocity (například bolest), které pravděpodobně nechcete, aby uživatelé zažili [13].

V praxi se haptická zpětná vazba vždy zaměřuje na konkrétní podmnožinu vašeho somatosenzorického systému. Velké množství haptických zařízení (od herních ovladačů přes mobilní telefony až haptiky „virtuálního dotyku“) komunikuje například pouze prostřednictvím receptorů na vašich rukou. Ale i velmi omezené využití haptické zpětné vazby může být velmi efektivní, jak ukazuje rozšířené používání relativně jednoduchých vibrací v mobilních telefonech [13].

Mezi některými lidmi existuje předpoklad (zejména v AR/VR), že funkcí haptiky je pouze zvýšit „realismus“ virtuálních zážitků. Ve skutečnosti je to pouze jeden z důvodů, proč lidé přidávají do aplikací haptiku. V interakčním designu například nepřidáváte haptiku ke zvýšení realismu, ale ke zlepšení uživatelské zkušenosti. Existuje mnoho důkazů, že přidání haptiky zkracuje dobu dokončení a míru chyb. Část uživatelů také důsledně preferují rozhraní, která zahrnují haptiku. Mezi další důvody, proč lidé přidávají haptiku, patří její použití jako alternativního komunikačního kanálu, když jsou vizuální nebo sluchové kanály zaneprázdněné, a emocionální složka dotyku. To je zvláště důležité v aplikacích, jako je marketing a pohlcující zábava [13].

Hmat je zcela nový způsob komunikace mezi lidmi a stroji a potenciál haptiky je neomezený. Dotek je jazyk, kterému všichni instinktivně rozumíme, ale slovník ještě nikdo nenapsal [13].

2.3 Použité zařízení

Pro realizaci této práce je použita kombinace dvou zařízení. HoloLens 2 od firmy Microsoft pro augmentovanou realitu a Stratos Explore od firmy Ultraleap pro haptickou odezvu.

2.3.1 Microsoft HoloLens 2

HoloLens 2 (na obrázku 2.8) je druhá generace brýlí určené pro mixovanou realitu od firmy Microsoft [6].



Obrázek 2.8: HoloLens 2, chytré brýle pro mixovanou realitu.

Zdroj: <https://docs.microsoft.com/cs-cz/windows/mixed-reality/out-of-scope/images/hololens2.jpg>

Jde o přenosný holografický počítač. Staví na základech, které postavily HoloLens první generace, aby poskytovaly pohodlnější a pohlcující zážitek spojený s více možnostmi spolupráce v mixované realitě. HoloLens 2 běží na Windows Holographic OS, který je založen na Windows 10, který poskytuje uživatelům, správcům a vývojářům robustní, výkonnou a bezpečnou platformu. Hlavní uplatnění mají ve výrobě, zdravotnictví a vzdělávání [6].

Přední část obsahuje: 4 kamery pro viditelné světlo pro sledování hlavy; 2 infračervené (IR) kamery pro sledování očí; hloubkový senzor; dále akcelerometr a gyroskop. Uvnitř je procesor postavený na 64-bitové ARM architektuře od firmy Qualcomm, 4 GB RAM a 64 GB uložení. Podpora Wi-Fi a Bluetooth nechybí. Jsou schopny sledovat obě ruce uživatele, se kterými lze interagovat s virtuálními objekty. Zároveň je možno je ovládat i hlasovými příkazy. Celé brýle váží něco přes půl kila [6].

2.3.2 Stratos Explore

STRATOS Explore (na obrázku 2.9) je flexibilní, škálovatelná špičková vývojová sada pro haptiku od firmy Ultraleap [13].

Stratos Explore využívá pro simulaci hmatu ultrazvukové haptiky ve vzduchu pomocí 256 ultrazvukových převodníků v poli 16x16. Nejjednodušším typem efektu je jeden tlakový



Obrázek 2.9: Stratos Explore, vývojová sada pro haptickou odezvu.

Zdroj: <https://cms.ultraleap.com/app/uploads/2020/02/stratos-explore.png>

bod o průměru pouhých 8,6 mm. S obnovovací frekvencí až 40 kHz se až 8 těchto tlakových bodů pohybuje velmi rychle ve 3D prostoru, aby se ve vzduchu vytvořily různé hmatové efekty [13].

Tyto efekty lze vytvořit pomocí dvou modulačních schémat, které Stratos Explore poskytuje: Amplitudová modulace (Amplitude Modulation) a streamování v čase (Time Point Streaming). Amplitudová modulace (AM) je modulační schéma první generace společnosti Ultrahaptics. Pozice a intenzita haptického ohniska se aktualizují na pevné frekvenci, která se používá k modulaci ultrazvuku tak, aby jej bylo možné detekovat na kůži. Obzvláště se dobře hodí pro jednoduché hmatové vjemy a aplikace ovládání rozhraní člověk-stroj. Streamování v čase (TPS) umožňuje zasílání plynule se měnícího signálu do pole Stratosu, kde lze v reálném čase vysílat pocíťovaný signál mnohem vyšší rychlostí (až 40 Hz) než u předchozího schématu [13].

Stratos Explore také obsahuje tzv. Leap Motion Controller, optický modul pro sledování rukou pro přesnější pocit hmatu [13].

Tabulka 2.1: Rozměry a váha Stratos Explore.

Délka [mm]	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Váha [kg]
242	207	34	0.7

Kapitola 3

Návrh

Hlavním cílem je vytvořit komunikující aplikace, které společně vytvoří uvěřitelné rozšířené prostředí využívající haptickou odezvu, jelikož AR samo haptiku neposkytuje. Vstupem bude uživatelská interakce s vytvořeným prostředím a výstupem je pak ono viděné prostředí a haptická odezva při interakci s digitálními předměty.

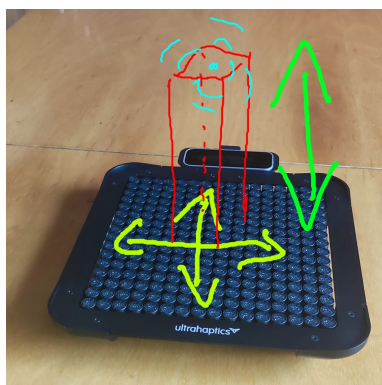
3.1 Cíle

Hlavní cíl lze rozdělit na tyto dílčí cíle:

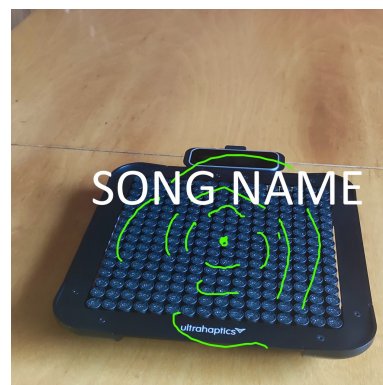
- Vytvořit spojení mezi HoloLens 2 a Stratos Explore pomocí technologie Bluetooth.
- Umístit a ukotvit virtuální objekty do reálného prostředí.
- Vygenerovat haptickou odezvu při interakci s objekty.

3.2 Návrhy demonstračních aplikací

V této sekci jsou vypsány návrhy příkladů, které se budou implementovat.



(a) Mockup hry „plácní krtka“.



(b) Mockup hudebního přehrávače.

Obrázek 3.1: Mockupy demonstračních aplikací.

Whack-A-Mole

Klasická hra „plácní krtka“ (Whack-A-Mole), kde hlavním úkolem je právě plácnout krtka, je ukázkový příklad pro tuto práci kvůli své nutné interakci uživatele s virtuálním objektem. Jak lze vidět na mockupu 3.1a uživatel nad oblastí Stratos Explore pomocí HoloLens 2 uvidí vylezajícího a znovu zalézajícího krtka. Ve chvíli, kdy se mu podaří daného krtka plácnout, měl by to uživatel být i schopen cítit díky haptické odezvě Stratos Explore. Na obrázku 3.2 je automat se hrou Whack-A-Mole.



Obrázek 3.2: Automat se hrou Whack-A-Mole.

Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Whac-A-Mole_machine.jpg

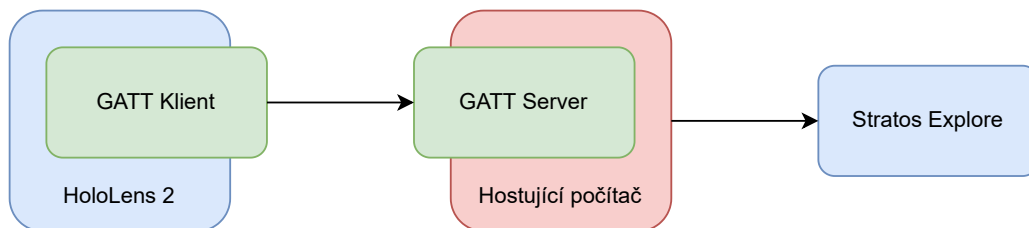
Audio přehrávač

Zde bude Stratos Explore figurovat jako reproduktor. Uživatel bude schopen skrze HoloLens 2 ovládat hudební přehrávač, kdy při přehrávání lze hudbu i cítit pomocí haptické odezvy. Mockup příkladu je na obrázku 3.1b, kde uživatel i vidí název skladby.

3.3 Komunikace

Vyřešení komunikace mezi HoloLens 2 a Stratos Explore je největším problémem celé práce. Do HoloLens 2 nelze přímo připojit jiné externí zařízení až na pár podporovaných jako jsou klávesnice nebo myš [7]. Zároveň se cílová aplikace spouští přímo na HoloLens 2, takže zbývá použít některou z bezdrátových metod komunikace – Wi-Fi nebo Bluetooth. V této práci bude použita technologie Bluetooth, přesněji Bluetooth Low Energy a protokol GATT pro klient-server komunikaci.

Na obrázku 3.3 je diagram komunikace, kde na hostujícím počítači, ke kterému je připojen Stratos Explore, poběží GATT server, který bude naslouchat pro komunikaci z HoloLens 2, na kterých zase pojedou GATT klient. Klientův úkol je odesílat informace potřebné pro haptickou odezvu, které převezme server a ten je pošle do Stratos Explore.



Obrázek 3.3: Diagram komunikace mezi HoloLens 2 a Stratos Explore.

3.4 Technologie Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie, která umožňuje zařízením jako jsou telefony, počítače a jiným periferiím přenášet data nebo hlas bezdrátově na krátké vzdálenosti. Hlavním účelem Bluetooth je nahradit kabely, které normálně spojují zařízení, a přitom zachovat komunikaci mezi nimi bezpečnou.

Tato technologie vznikla v roce 1994 a používá stejnou 2,4GHz frekvenci jako jiná bezdrátová zařízení (WiFi routery a bezdrátové telefony) pro vytvoření „osobní sítě“ (**P**ersonal **A**rea **N**etwork), ve které spolu může point-to-point komunikovat až 8 zařízení. Tato síť umožňuje posílat data mezi zařízeními, audio stream nebo odeslat dokument k tisku [14, 1]. Dne 13. července 2021 byla přijata verze 5.3 specifikace Bluetooth [1].

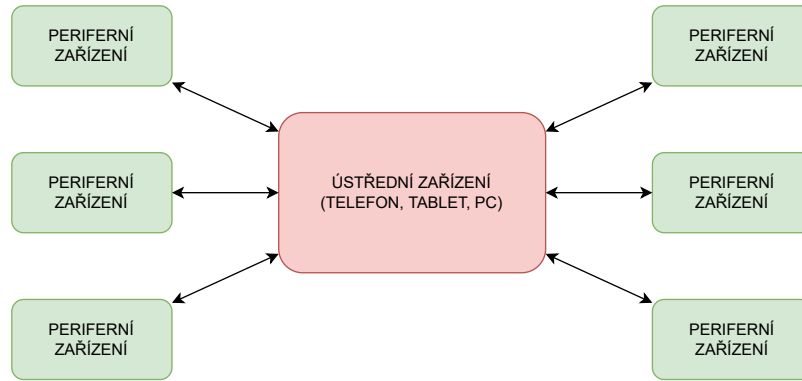
3.4.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE) je součástí čtvrté verze specifikace Bluetooth přijaté v červenci roku 2010. Byla navržena pro velmi nízkou spotřebu energie, kdy namísto kontinuálního spojení se vysílá jenom když je potřeba. Zároveň umožňuje nad rámec point-to-point komunikace i broadcast a smíšenou (mesh) topologii. Tím se cílí na chytrá zařízení, která ke svému běhu mohou používat jen knoflíkovou baterii. BluetoothLE kooexistuje se svým předchůdcem, nyní nazývaný Bluetooth Classic, který se stal standardem pro bezdrátové reproduktory, sluchátky a různé systémy obsažené v autech [14, 1].

3.4.2 Generic Attribute Profile (GATT)

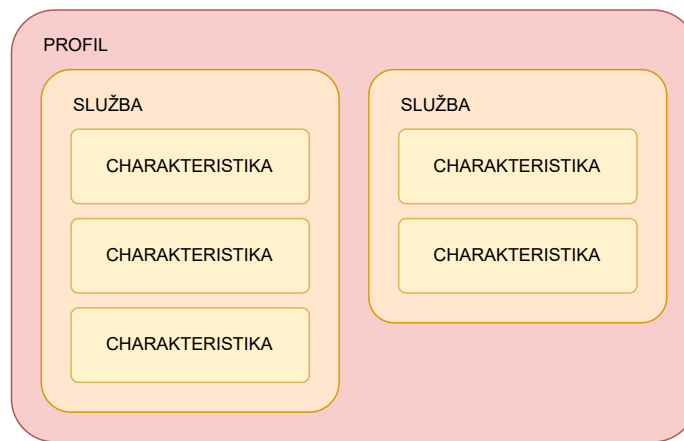
Specifikace BLE definuje protokoly pro objevení a komunikace mezi energeticky efektivní zařízeními. Objevení zařízení se provádí pomocí protokolu GAP (**G**eneric **A**ccess **P**rofile). Následná komunikace mezi zařízeními je zprostředkována pomocí protokolu GATT (**G**eneric **A**TTribute). Pro objevení zařízení jsou určeny dvě primární role: ústřední (central) a periferní (peripheral). Obdobně jako u komunikace Klient-Server i zde několik periferních zařízení komunikuje s jedním ústředním (na obrázku 3.4) [7].

Základem GATT protokolu jsou profily (profile). Ty jsou předdefinované ve specifikaci BT nebo výrobcem zařízení a jde o sérii služeb (service). Například profil pro měření tepové frekvence obsahuje dvě služby: službu měření tepové frekvence a službu obsahující informace o zařízení. Každá služba obsahuje 128-bitový unikátní identifikátor (UUID, též známy jako GUID). Služby, které jsou součástí specifikace BT, mají jenom 16-bitový identifikátor (Výsledný UUID je 128-bitový, kde zbylé bity jsou stejné pro všechny UUID, které jsou součástí specifikace). Služba obsahuje sérii charakteristik (characteristic), každou se svým UUID (16-bit nebo 128-bit). Charakteristika zapouzdřuje datový bod obsahující jednu hodnotu nebo pole souvisejících hodnot. Charakteristika může být například určena pouze pro



Obrázek 3.4: Komunikace mezi zařízeními za pomoci Bluetooth Low Energy.

čtení, zápis, čtení i zápis, notifikaci nebo indikaci. Posledními jsou popisovače (descriptor), které obsahují dodatečné informace a atributy některé z charakteristik [1, 7, 12, 4].



Obrázek 3.5: Struktura atributů GATT.

3.5 Ukotvení objektů v prostoru

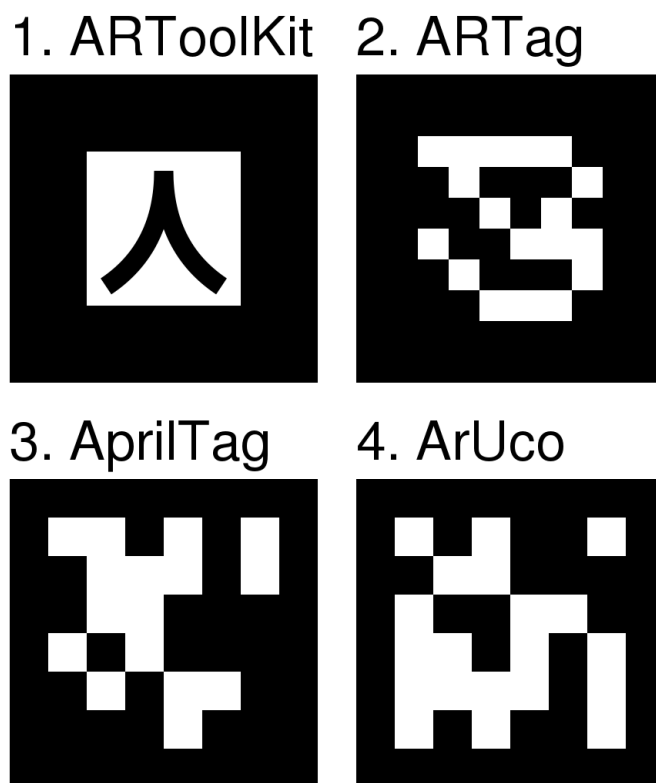
Dalším problémem, který je potřeba vyřešit je vložení a ukotvení virtuálních objektů v reálném prostředí. K tomu poslouží sledování značek.

3.5.1 Sledování značek

Sledování černobílých čtvercových značek (marker tracking) se stalo extrémně populární již od roku 1999, kdy byl vydán ARToolKit a následně v roce 2007 ARToolKitPlus jako open source software. Jde o výpočetně nenáročný algoritmus, který může dodat užitečné výsledky i s poměrně slabými kamerami. Jeho přitažlivost vychází z jeho jednoduchosti – detekce čtyř rohů ploché značky na snímku z jediné kamery poskytne dostatek informací pro získání pozice kamery vzhledem ke značce [10].

Značky jsou rozpoznatelné vzory umístěny na povrchu cílového objektu. Jsou navrženy tak, aby jejich detekce v obraze byla co nejjednodušší a co nejspolehlivější. Na obrázku 3.6 je zobrazeny některé typy používaných značek, ale v realitě se lze setkat i s dalšími typy

jako například QR kód nebo čárový kód. Značkou může být i barevný obrázek nebo objekt, pokud jsou dostatečně rozpoznatelné. Preferované jsou ale ty černobílé pro jejich barevný kontrast a jednoduchou výrobu pomocí tiskárny na nereflexivní papír [10].



Obrázek 3.6: Příklady AR značek používaných v praxi.

Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_of_augmented_reality_fiducial_markers.svg

3.6 Změna v návrhu

Při implementaci dříve popsaného návrhu bylo naraženo na překážku, kdy se nepodařilo zprovoznit BluetoothLE komunikaci na HoloLens 2. Proto se od toho upustilo a komunikace pomocí protokolu GATT byla nahrazena komunikací pomocí protokolu HTTP s využitím POST metody.

Kapitola 4

Implementace

V této kapitole budou vypsány všechny nástroje použité pro implementaci návrhů z minulé kapitoly a stručný popis implementovaných algoritmů.

4.1 Aplikace pro HoloLens 2

Aplikace spouštěná na HoloLens 2 bude komunikovat s kontrolorem Stratosu pomocí metody POST protokolu HTTP, přes který se budou odesílat data, a zároveň promítne scénu do prostoru uživatele, který s ní bude následně interagovat.

Vývojové prostředí

V tabulce 4.1 jsou použité nástroje a knihovny pro aplikaci, která byla použita pro implementaci aplikace na HoloLens 2.

Tabulka 4.1: Informace o projektu.

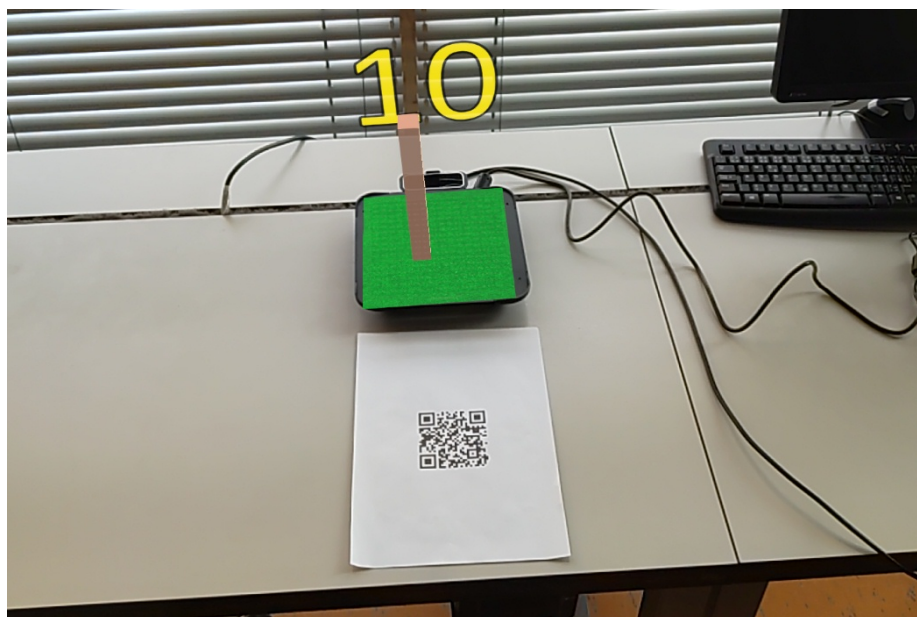
Použitý jazyk:	C#
Použitá platforma:	UWP
Cílová verze platformy:	10.0.19041.0
Cílová verze platformy (min):	10.0.17763.0
Použité prostředí (IDE):	Unity Editor 2020.3.33f1
Moduly:	Universal Windows Platform Build Support Windows Build Support (IL2CPP)
Balíčky:	MRTK OpenXR 1.4.0 MRTK Standard Assets 2.7.3 MRTK Foundation 2.7.3 MRTK Extensions 2.7.3 Vuforia Engine AR 10.6.3 + DB
	----- Nuget for Unity 3.0.4 Microsoft.SpatialAudio.Spatializet.Unity 1.0.176
Použité prostředí (IDE):	Visual Studio Community 2022 17.1.13

Obsah projektu

Všechny vlastní soubory jsou v projektu ve složce *Assets\xfryzj01*. V podřazené složce *Materials* jsou všechny vytvořené materiály, ve složce *NormalMaps* jsou normálové mapy pro materiály, ve složce *Scripts* vytvořená C# skripta a ve složce *Sprites* jsou 2D objekty. Ve složce *Assets\Scenes* jsou vytvořené scény a ve složce *Assets\AudioSources* jsou skladby jejichž autorem je Kevin MacLeod, který je uvolnil na svém webu incompetech.com pod licencí Creative Commons 3.0.

4.1.1 Whack-A-BlockMole

Na obrázku 4.1 je zobrazená výsledná podoba hry „plácní krtka“, která se spouští na HoloLens 2.



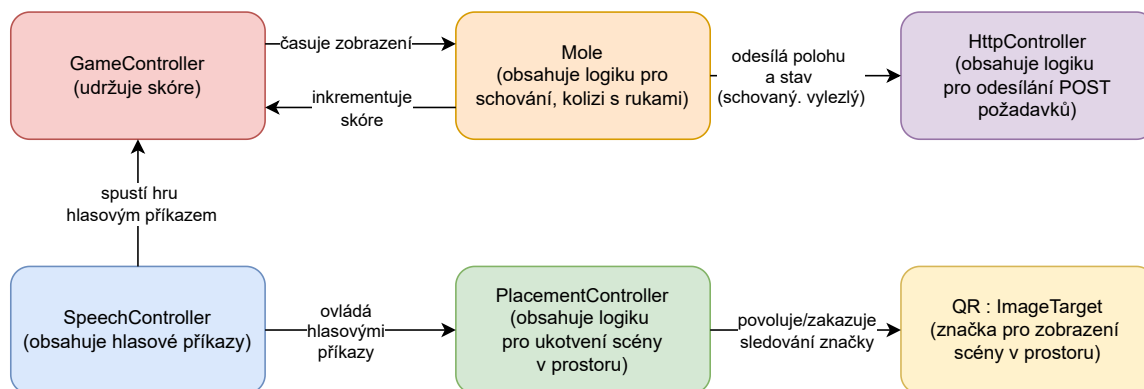
Obrázek 4.1: Výsledná podoba hry „plácní krtka“.

Pro vložení scény do prostoru je použit balíček Vuforia Engine AR s přidanou natrénovanou databází obsahující obrázek 4.2. Po nalezení QR kódu v prostoru uživatele, zobrazí se scéna na daném místě. Pro ukotvení a uvolnění pak slouží hlasové příkazy.



Obrázek 4.2: Použitý QR kód pro vložení scény do prostoru.

Na diagramu 4.3 jsou zobrazeny vztahy mezi objekty ve scéně. Scéna obsahuje navíc od objektů viditelné na obrázku 4.1 i neviditelné pomocné objekty, na kterých jsou spuštěny skripta ovládající zbytek scény. Objekt `GameController` obsahuje logiku pro spuštění hry, časování pro zobrazení krtka, udržuje skóre a aktualizuje skóre viditelné ve scéně. Krtka je objekt `Mole` obsahující logiku pro schování krtka (sebe), kolizi s rukami uživatele, ke které když dojde inkrementuje skóre. Před zobrazením si krtka vypočítá náhodně novou polohu v daném offsetu od středu (0;0). Dále objekt `PlacementController` obsahuje logiku pro ukotvení scény po tom, co byla vložena do prostoru, nebo uvolnění pro přesunutí scény (povoluje nebo zakazuje sledování značky). Hlasové příkazy obsahuje objekt `SpeechController` využívající třídu `KeywordRecognizer`, která je součástí Unity. V této scéně fungují tři příkazy: *stop tracking* slouží pro ukotvení scény, *start tracking* pro znovu uvolnění scény a příkazem *play game* se spustí samotná hra. Posledním důležitým objektem je `HttpController` obsahující logiku pro poslání požadavku (zprávy) na zvolenou IP adresu a port a umožňuje i odeslat výchozí nastavení pro Stratos při spuštění aplikace. Přes tento objekt také `Mole` odesílá svoji polohu a stav (schovaný/vylezlý) na HTTP server aplikace Stratos Controller. Lokální poloha krtka v Unity na souřadnicích X a Z (v Unity souřadnice Y směřuje vzhůru) je v poměru 1:10 pro polohu na souřadnicích X a Y (u Stratosu směřuje vzhůru souřadnice Z) pro Stratos. Třetí souřadnice je neměnná a proto je nastavena a odeslána na Stratos už při spuštění aplikace. Ve výsledku to znamená, že poloha (0.5;y;-0.2) v Unity je pro Stratos poloha (0.05;-0.02;z). Krtka tedy odesílá dvě zprávy: PX=poloha X v Unity krát 0.1;PY=poloha Z v Unity krát 0.1, když krtka vylézá a DISABLE při kolizi s rukou nebo při záležání. Význam zpráv je vysvětlen v sekci 4.2 o aplikaci pro Stratos.



Obrázek 4.3: Vztahy mezi objekty ve scéně hry „plácní krtka“.

4.1.2 Audio přehrávač demo

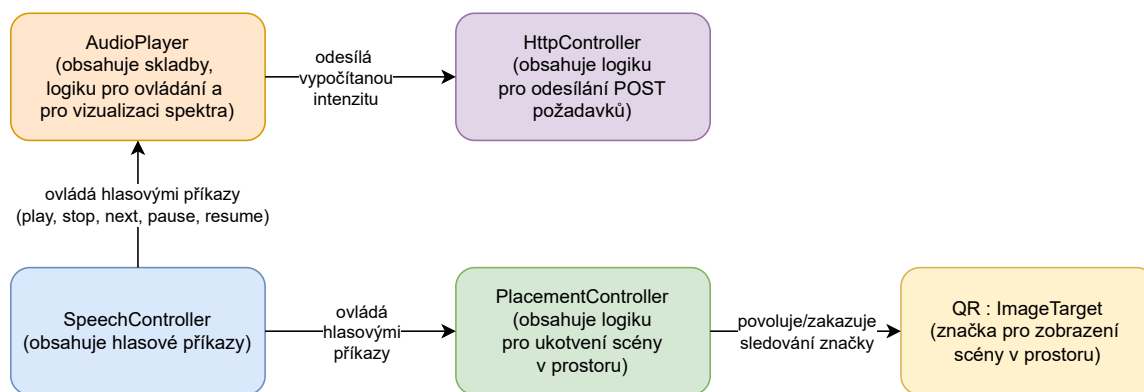
Na obrázku 4.4 je zobrazena výsledná podoba dema audio přehrávače, která se spouští na HoloLens 2. Demo umožňuje přehrávat tři skladby od autora Kevina MacLeoda, zobrazuje název skladby a vizualizaci spektra a odesílá intenzitu basové složky spektra skladby na Stratos.

Na diagramu 4.5 jsou zobrazeny vztahy mezi objekty ve scéně. Pro vložení scény do prostoru se používá stejného QR kódu 4.2. Objekty `HttpController` a `PlacementController` si zachovávají stejnou funkcionalitu jako u hry s krtkem. Rozšířenou funkcionalitu má ale objekt `SpeechController`. Nad rámec příkazů *start tracking* a *stop tracking* se stejnou funkcí obsahuje ještě hlasové příkazy *play song* pro spuštění zvolené hudby od začátku,



Obrázek 4.4: Výsledná podoba demo audio přehrávače.

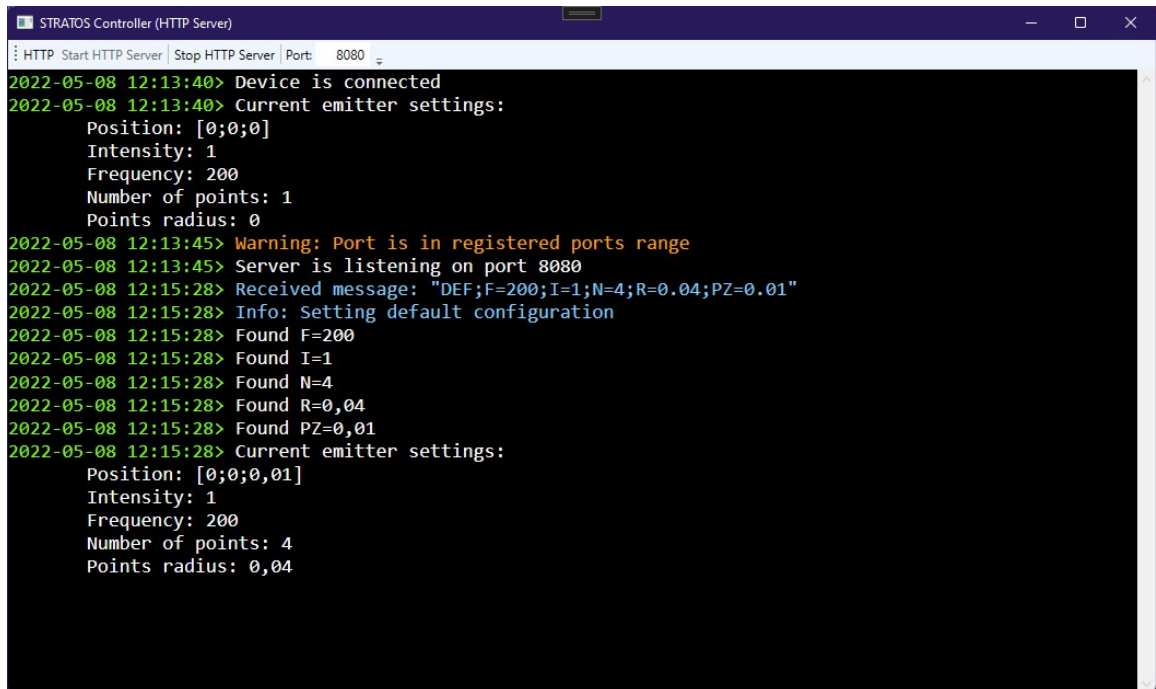
stop song pro zastavení skladby, *next song* pro zvolení další skladby, *pause song* pro pozastavení skladby a *resume song* pro obnovení přehrávání. Těchto pět nových příkazů ovládá objekt `AudioPlayer`, který obsahuje už zmíněné tři skladby, logiku přehrávače a pro zobrazení názvu skladby a vizualizaci spektra skladby. Pro získání spektra se používá metody `AudioSource.GetSpektrumData`, která je součástí Unity. Tato metoda pro získání hodnot spektra používá rychlou Fourierovu transformaci. Získané spektrum je následně zmenšené na osm skupin podle pásem (basy, středy a výšky), které slouží pro vizualizaci. Jedna z těchto skupin (preferovaně ta s basy, tedy první nebo druhou) odesílá svoji hodnotu zvětšenou o 0.6 (nižší hodnoty nelze pocítit) jako intenzitu do Stratosu. Demo má přidanou funkci, že název skladby a vizualizace spektra vždy směřuje směrem k uživateli.



Obrázek 4.5: Vztahy mezi objekty ve scéně demo audio přehrávače.

4.2 Aplikace pro Stratos Explore

Tato aplikace bude spuštěna na počítači a bude čekat na příchozí spojení skrze protokol HTTP. Příchozí data budou po dekódování odeslána na připojený Stratos Explore. Na obrázku 4.6 je finální grafické rozhraní aplikace.



```
STRATOS Controller (HTTP Server)
HTTP Start HTTP Server Stop HTTP Server Port: 8080
2022-05-08 12:13:40> Device is connected
2022-05-08 12:13:40> Current emitter settings:
    Position: [0;0;0]
    Intensity: 1
    Frequency: 200
    Number of points: 1
    Points radius: 0
2022-05-08 12:13:45> Warning: Port is in registered ports range
2022-05-08 12:13:45> Server is listening on port 8080
2022-05-08 12:15:28> Received message: "DEF;F=200;I=1;N=4;R=0.04;PZ=0.01"
2022-05-08 12:15:28> Info: Setting default configuration
2022-05-08 12:15:28> Found F=200
2022-05-08 12:15:28> Found I=1
2022-05-08 12:15:28> Found N=4
2022-05-08 12:15:28> Found R=0,04
2022-05-08 12:15:28> Found PZ=0,01
2022-05-08 12:15:28> Current emitter settings:
    Position: [0;0;0,01]
    Intensity: 1
    Frequency: 200
    Number of points: 4
    Points radius: 0,04
```

Obrázek 4.6: Grafické rozhraní aplikace pro ovládání Stratos Explore.

Vývojové prostředí

V tabulce 4.2 jsou použité nástroje a knihovny pro aplikaci, která poběží na hostujícím počítači, který bude komunikovat se Stratos Explore.

Tabulka 4.2: Informace o projektu.

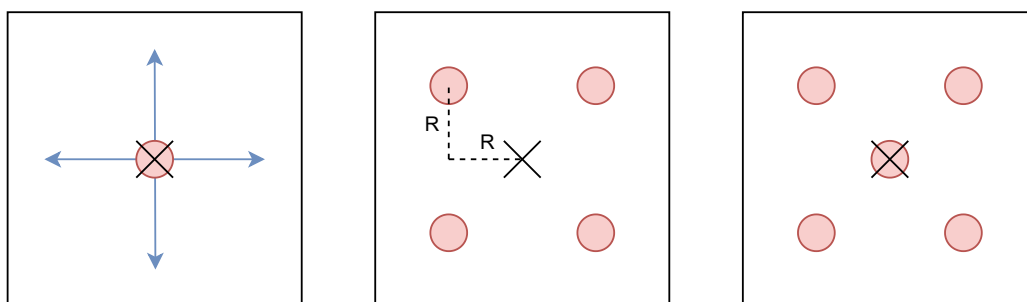
Použitý jazyk:	C# 8.0
Použitý framework:	.NET Framework v4.8
Cílová platforma:	64x
Použitě prostředí (IDE):	Visual Studio Community 2022 17.1.13
Použitě balíčky a knihovny:	Microsoft.Windows.SDK.Contracts 10.0.22000.196 PeanutButter.SimpleHTTPServer 2.0.76 ----- libusb-1.0.dll Ultrahaptics.dll UltrahapticsCSharp.dll UltrahapticsCSharp.NET40.dll

Narozdíl od aplikace pro HoloLens 2, pro Stratos se podařilo implementovat jak GATT server, tak i HTTP server. Celé řešení je rozděleno na tři projekty: jednu knihovnu a dvě WPF aplikace, jednu implementující GATT server pro komunikaci, druhou implementující HTTP server. Knihovna obsahuje položky společné pro obě aplikace, což je hlavně kontrolor pro Stratos. Aplikace musí používat starší .NET Framework v4.8 namísto aktuálně nejnovějšího .NET verze 6 kvůli knihovnám pro komunikaci se Stratos Explore. Jelikož tyto knihovny byly sestaveny pro 64-bitovou verzi operačního systému Windows, cílí na tuto verzi i zbytek řešení. Pro GATT verzi aplikace je potřeba balíček Microsoft.Windows.SDK.Contracts zpřístupní WinRT API, které je normálně přístupné pouze pro UWP aplikace. Pomocí tohoto API lze pracovat s Bluetooth a vytvořit GATT server. Jelikož je toto API součástí SDK od Windows 10 [7], nelze tuto aplikaci přeložit pro starší verze Windows či jiné operační systémy. Pro verzi aplikace s HTTP serverem bylo použito balíček PeanutButter.SimpleHTTPServer, který obsahuje jednoduchou implementaci HTTP serveru. Knihovny libusb-1.0.dll, Ultrahaptics.dll, UltrahapticsCSharp.dll a UltrahapticsCSharp.NET40.dll jsou součástí Ultrahaptics SDK a balíčky Microsoft.Windows.SDK.Contracts a PeanutButter.SimpleHTTPServer jsou k dispozici jako NuGet balíčky.

Aplikace jsou napsány tak, aby využívaly vkládání závislostí (dependency injection) skrze konstruktory. Zároveň se používají rozhraní namísto tříd při deklarování proměnné, což umožňuje jednoduché vložení vlastní implementace. Kód pro GATT server je inspirovaný kódem z dokumentace Microsoftu [7] a kódem z portálu jenx.si [4]. Kód pro ovládání Stratos Explore je inspirovaný příklady dodávané v SDK zařízení.

Třídy a rozhraní

HTTP varianta aplikace obsahuje dvě hlavní třídy: `EmitterController` a `HttpServer`. První z těchto tříd zabaluje třídu `AmplitudeModulationEmitter` z Ultrahaptics SDK, která slouží pro komunikaci se Stratos zařízením. `EmitterController` je kontrolor obsahující stav emitoru mezi nimiž jsou data jako pozice bodu v 3D prostoru pro emitování, intenzita a frekvence emitování, počet bodů k emitování (jeden, čtyři nebo pět) a jejich vzdálenost od pozice. Intenzita je hodnota typu `float` v intervalu od nuly do jedné a frekvence je obnovovací frekvence emitování zařízení Stratos. Na obrázku 4.7 jsou zobrazeny možné konfigurace bodů pro emitování.



Obrázek 4.7: Poloha bodů od pozice pro jednotlivý počet bodů (zleva jeden, čtyři a pět bodů). Křížek označuje určenou pozici. Zde tím je střed zařízení Stratos s pozicí 0,0 pro osy x,y. Osu z zde nelze určit. R označuje vzdálenost bodu od pozice.

Druhá třída `HttpServer` spustí HTTP server na určeném portu, na kterém bude probíhat komunikace s HoloLens 2. Obsahuje metodu `AddHandler`, která umožňuje přidat akci

pro přijaté požadavky. V tomto případě se očekává textový řetězec, který obsahuje příkaz nebo konfiguraci pro Stratos. Po dekodování zprávy a úpravě konfigurace se nad třídou `EmitterController` zavolá metoda `Update`, která aktuální konfiguraci odešle na emitor pro vytvoření (nebo ukončení) haptické odezvy. Podporované příkazy jsou: `ENABLE` pro spuštění haptické odezvy bez změny konfigurace, `DISABLE` pro ukončení emitování a `HI` pro testování komunikace (tento příkaz nijak nemění stav emitoru). V případě, že získaná zpráva obsahuje konfiguraci, musí obsahovat sérii párů klíč=hodnota oddělené středníkem (např. `PX=0.05;I=1;F=200;`). Podporované klíče jsou: příznak pro nastavování výchozích hodnot `DEF` (jediný nemá hodnotu), pozice podle osy `PX PY PZ`, intenzita `I`, frekvence `F`, počet bodů k vygenerování `N` a vzdálenost bodů od pozice `R`. Dále aplikace obsahuje rozhraní `IEmitterController` a `ILogger`, implementaci druhého rozhraní `TextBlockLogger`, která slouží pro zapisování zpráv do ovládacího prvku rozhraní typu `TextBlock`, a výčetové typy `MessageTypeEnum` pro určení typu zapisované zprávy a `NumberOfPointsFlags` pro určení počtu bodů k emitování.

Nepoužitá GATT varianta aplikace se liší v tom, že namísto třídy `HttpServer` obsahuje třídu `GattServer` implementující rozhraní `IGattServer`, která slouží pro vytvoření, konfiguraci a spuštění GATT serveru. Dále statickou třídu `GattCharacteristicIdentifiers`, ve které jsou uloženy všechny potřebné UUID. Formát očekávané zprávy je stejný jako u HTTP varianty a získávána je pomocí události `OnCharacteristicWrite`, která se spustí pokaždé, když vzdálené zařízení zapíše do charakteristiky. Zpráva je uložena ve třídě `CharacteristicEventArgs` společně s UUID změněné charakteristiky.

Kapitola 5

Testování a vyhodnocení

Po implementaci a vlastním testováním, byla první z aplikací, hra „plácní krtka“, otestovaná i na malém vzorku potenciálních uživatelů. Pro tento účel byl použit *User Experience Questionnaire* [11]. Tento dotazník měří atraktivitu, přehlednost, účinnost, spolehlivost, stimulaci a originalitu testovaného produktu. Význam těchto stupnic je následující:

- **Atraktivita** – Celkový dojem z produktu. Líbí nebo nelíbí se uživatelům produkt?
- **Přehlednost** – Je jednoduché se seznámit s produktem? Je jednoduché se naučit používat produkt?
- **Účinnost** – Mohou uživatelé řešit jejich úkoly bez zbytečného úsilí?
- **Spolehlivost** – Má uživatel pocit, že má interakci pod kontrolou?
- **Stimulace** – Je používání produktu vzrušující a motivující?
- **Originalita** – Je produkt inovativní a kreativní? Zaujme produkt uživatele?

5.1 Testování uživatelského prožitku

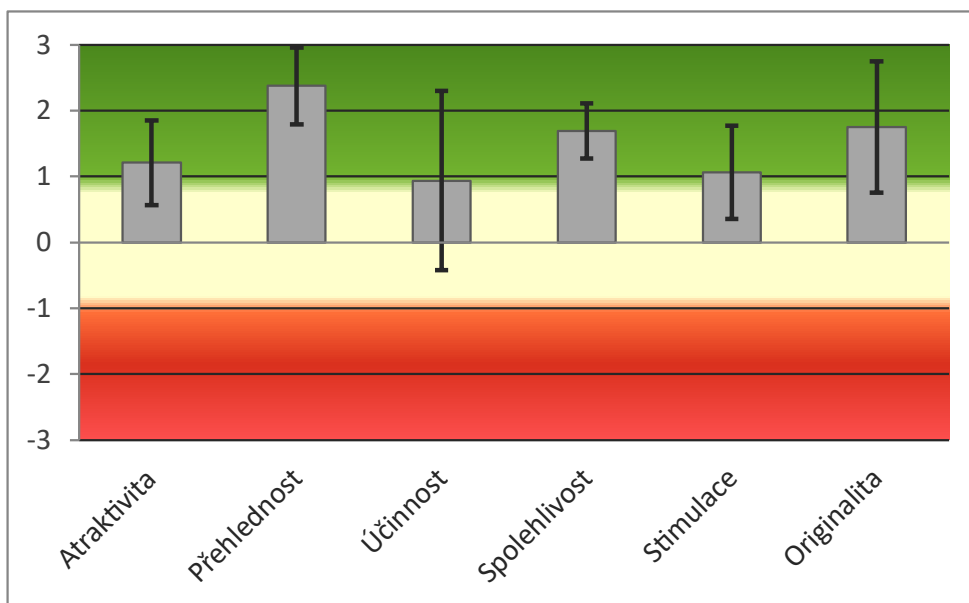
Vzorek sestával ze čtyř potenciálních uživatelů: žena (věk 19), žena (věk 46), muž (věk 25) a muž (věk 46). Výsledná aplikace jim byl nastavena, aby mohli hned hrát, a bylo jim vysvětleno základní ovládání HoloLens 2 a hry samotné. Následně si každý mohli aplikaci sami vyzkoušet. Po vyzkoušení jim byl dán dotazník pro vyplnění. Tento dotazník obsahuje 26 opačných vlastností se stupnicí 1-7. Tato stupnice představuje odstupňování mezi opaky a testovaný uživatel vyjádří míru svého souhlasu tím, že označí hodnotu, která je nejbližší jeho názoru.

5.2 Výsledky

Takto vyplněné dotazníky byly následně převedeny excelovské tabulky, která slouží pro jejich analýzu. Pro každou z 26 opačných vlastností je vypočítaná hodnota mezi -3 a +3, kde -3 znamená *opravdu špatné* a +3 *opravdu dobré*. Hodnoty mezi -0,8 a +0,8 jsou neutrální, pod -0,8 negativní a nad 0,8 pozitivní. Extrémní hodnoty -3 a +3 jsou brány jako nedosažitelné, proto stačí sledovat hodnoty na omezeném intervalu od -2 do +2. Každá z vlastností patří právě pod jednu ze šesti stupnic. V tabulce 5.1 a na obrázku 5.1 jsou zobrazeny střední hodnoty a rozptyly pro každou měřenou stupnici.

Tabulka 5.1: Střední hodnoty a rozptyly měřených stupnic.

Měřená veličina	Střední hodnota	Rozptyl
Atraktivita	1,208	0,43
Přehlednost	2,375	0,35
Účinnost	0,938	1,93
Spolehlivost	1,688	0,18
Stimulace	1,063	0,52
Originalita	1,750	1,04

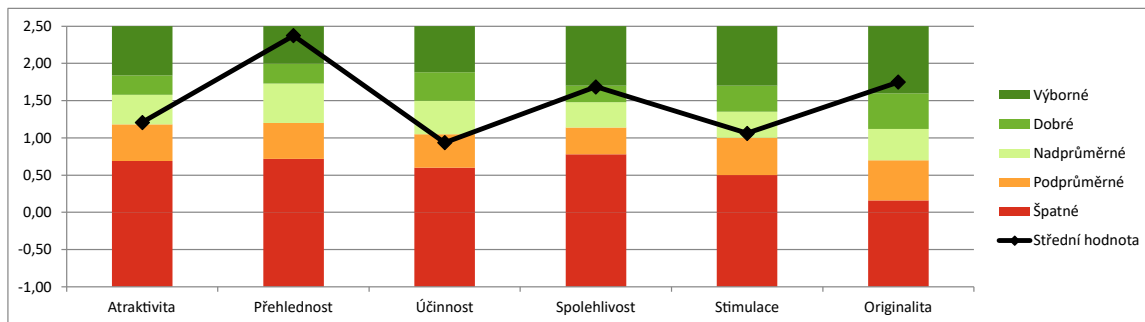


Obrázek 5.1: Graf středních hodnot a rozptylů měřených stupnic. Šedé sloupce označují střední hodnotu a černé úsečky rozptyl.

Všechny hodnoty jsou v pozitivní části intervalu. Dominantní je přehlednost, takže lze předpokládat, že aplikaci je jednoduché ovládat. Uživatelé ovšem nemuseli aplikaci nastavovat, což určitě má vliv na výslednou hodnotu. Nejhorší na tom je účinnost a stimulace, kde obzvláště u účinnosti je velmi velký rozptyl. To je hlavně ovlivněno malým vzorkem testovaných uživatelů a nemusí to být problémem samotné aplikace jako spíše použitého zařízení HoleLens 2, kdy starší členové vzorku s tím měli problém. I u originality je velký rozptyl, což může být ovlivněno věkovým rozdílem uživatelů ve vzorku, kdy starší část už mohli hrát variantu této hry např. pro automaty a mladší část se s ní ještě nesetkala.

Součástí analýzy je i vyhodnocení, jak si toto testování stojí oproti 468 provedených studií týkajících se různých produktů (webové stránky, e-shopy, sociální sítě a jiné) za přispění 21 175 osob.

Benchmark z obrázku 5.2 potvrzuje už získané informace. Produkt propadá v účinnosti, stimulaci a atraktivitě, ale vítězí obzvláště v přehlednosti, ale i spolehlivosti a originalitě v relativní kvalitě oproti jiným produktům.



Obrázek 5.2: Porovnání výsledků u hodnoceného produktu s údaji v benchmarku výše umožňuje učinit závěry o relativní kvalitě hodnoceného produktu ve srovnání s ostatními produkty. Testovaná aplikace v přehlednosti a originalitě patří mezi 10 % nejlepších výsledků, ale v účinnosti patří do třetí čtvrtiny výsledků.

5.3 Možná rozšíření a vylepšení

Rozšířené realitě se meze fantazie nekladou, pouze meze výkonnosti a možností aktuálních zařízení. I tak by určitě šlo vytvořit nepřeměrné množství jiných demonstračních aplikací, kde by rozšířené realitě prospělo přidání technologie haptické odezvy. Jedním možným vylepšením by určitě byla implementace komunikace přes Bluetooth, která se nepodařila realizovat a která by mohla vyřešit některé problémy komunikace přes HTTP. Aplikaci Stratos Controller by mohlo prospět implementace optického modulu pro sledování rukou Leap Motion Controller, který je součástí Stratos Explore.

Kapitola 6

Závěr

Cíl práce, vytvořit aplikace v rozšířené realitě s přidanou haptickou odezvou, se podařilo splnit, i když ne v předpokládaném stavu. Během vývoje jsem ale musel opustit od komunikace přes Bluetooth a nahradit ji komunikací přes protokol HTTP kvůli problémům s implementací v HoloLens 2. Vytvořil jsem dvě demonstrační aplikace, hru „plácni krtek“ a audio přehrávač, které se spustí na HoloLens 2 a komunikují přes HTTP s další aplikací spuštěné na počítači ovládající Stratos Explore pro vytváření haptické odezvy. Společně umocňují pocit z rozšířené reality. Nejslabší stránkou je ale právě komunikace přes HTTP, kterou je jednoduché zahltit a tím znemožnit další spojení. V budoucnu by bylo vhodné zaměřit se i na jiné možnosti spojení jako už zmíněná technologie Bluetooth. Aktuální řešení je celkem funkční a dá se na něm dále stavět.

S první z aplikací bylo provedeno i testování s malým vzorkem, ze kterého vzešly hodnotné poznatky, co by se mělo upravit a vylepšit. Uživatelům se líbilo, jak je aplikace jednoduchá na pochopení a dokázali se při ní odreagovat. To, co se jim nelíbilo, bylo spíše spojené s použitými zařízení nežli s aplikací samotnou, jako únava očí nebo přetrvávající efekt na dlani po haptické odezvě. Ve výsledku však odcházeli s pozitivním pocitem.

Literatura

- [1] BLUETOOTH SIG, INC.. *Bluetooth Technology Website* [online]. Bluetooth SIG, Inc. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/>.
- [2] GRECO, D. *The 3 Types of Virtual Reality* [online]. Heizenrader, 11. září 2019 [cit. 2022-01-24]. Dostupné z: <https://heizenrader.com/the-3-types-of-virtual-reality/>.
- [3] GREENGARD, S. *Virtual reality*. 1. vyd. The MIT Press, září 2019. 264 s. The MIT Press essential knowledge series. ISBN 9780262537520.
- [4] JENKOLE, J. *Bluetooth GATT server* [online]. JENX Consulting and Software Engineering, 9. srpna 2019 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.jenx.si/2019/08/09/bluetooth-gatt-server/>.
- [5] MERRIAM-WEBSTER, INC.. *Dictionary by Merriam-Webster: America's most-trusted online dictionary* [online]. Merriam-Webster, Inc. [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/>.
- [6] MICROSOFT. *Microsoft HoloLens: Mixed Reality Technology for Business* [online]. Microsoft [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/hololens>.
- [7] MICROSOFT. *Technická dokumentace Microsoft* [online]. Microsoft [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com>.
- [8] MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. a KISHINO, F. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telem manipulator and Telepresence Technologies* [online]. Leden 1994, sv. 2351. DOI: 10.1117/12.197321. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228537162>.
- [9] NORTH OF 41. *What really is the difference between AR / MR / VR / XR ?* [online]. North of 41, 20. března 2018 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://medium.com/@northof41/what-really-is-the-difference-between-ar-mr-vr-xr-35bed1da1a4e>.
- [10] SCHMALSTIEG, D. a HÖLLERER, T. *Augmented Reality: Principles and Practice*. 1. vyd. Addison-Wesley Professional, červen 2016. 528 s. ISBN 9780321883575.
- [11] SCHREPP, M., HINDERKS, A. a THOMASCHEWSKI, J. *User Experience Questionnaire (UEQ)* [online]. UEQ Team [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ueq-online.org>.
- [12] TOWNSEND, K. *Introduction to Bluetooth Low Energy* [online]. Adafruit, 20. března 2014 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/gatt>.

- [13] ULTRALEAP. *Ultraleap: Digital worlds that feel human* [online]. Ultraleap [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.ultraleap.com>.
- [14] UY, M. *What Is Bluetooth? The Ultimate Guide* [online]. Livewire, 30. ledna 2022 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/what-is-bluetooth-2377412>.