



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

**INTERAKCE S KOLABORATIVNÍM ROBOTEM POMOCÍ
ROZŠÍŘENÉ REALITY**

INTERACTION WITH A COLLABORATIVE ROBOT USING AUGMENTED REALITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL ZMRZLÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL BAMBUŠEK

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce



156558

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)
Student: **Zmrzlý Daniel**
Program: Informační technologie
Název: **Interakce s kolaborativním robotem pomocí rozšířené reality**
Kategorie: Uživatelská rozhraní
Akademický rok: 2023/24

Zadání:

1. Prostudujte koncept rozšířené reality a její využití v robotice. Seznamte se s brýlemi Microsoft HoloLens 2, fakultní experimentální platformou ARCOR2, jejími možnostmi a aplikačním rozhraním.
2. Vyberte vhodné metody a nástroje a navrhňte uživatelské rozhraní, které umožní pomocí HoloLens skrze platformu ARCOR2 programovat a interagovat s kolaborativním robotem.
3. Navrženou aplikaci implementujte.
4. Provedte experimenty a vyhodnoťte vlastnosti výsledného řešení.
5. Vytvořte 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.
- KAPINUS Michal, BERAN Vítězslav, MATERNA Zdeněk a BAMBUŠEK Daniel. Spatially Situated End-User Robot Programming in Augmented Reality. In: *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. New Delhi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, s. 1-9. ISBN 978-1-7281-2622-7.
- BAMBUŠEK Daniel, MATERNA Zdeněk, KAPINUS Michal, BERAN Vítězslav a SMRŽ Pavel. Combining Interactive Spatial Augmented Reality with Head-Mounted Display for End-User Collaborative Robot Programming. In: *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. New Delhi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, s. 1-9. ISBN 978-1-7281-2622-7.
- Dále dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:
Body 1, 2 a rozpracovaný bod 3.

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

Vedoucí práce: **Bambušek Daniel, Ing.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2023
Termín pro odevzdání: 9.5.2024
Datum schválení: 9.11.2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá implementací možnosti interakce s kolaborativním robotem za pomoci technologie Microsoft HoloLens 2 v prostředí rozšířené reality. Práce navazuje na existující řešení v podobě AREditoru pro tabletová zařízení a doplňuje chybějící funkcionalitu AREditoru do brýlí Microsoft HoloLens 2. Pomocí zmíněných brýlí a frameworku ARCOR2 je možné manipulovat s fyzickým robotem a jeho modelem. V prvotní fázi implementace bylo navrženo více přístupů, jakými by uživatel mohl interagovat s robotem, a následně bylo vybráno řešení s nejvíce kladnou odezvou. Výsledné řešení podlelo uživatelským experimentům, kde účastníci zhodnotili použitelnost a porovnali konečné řešení obou AREditorů.

Abstract

This thesis focuses on the implementation of the possibility of interaction with a collaborative robot using Microsoft HoloLens 2 technology in an augmented reality environment. The work builds on the existing AREditor solution for tablet devices and adds the missing AREditor functionality to Microsoft HoloLens 2 glasses. Using these glasses and the ARCOR2 framework, it is possible to manipulate the physical robot and its model. In the initial phase of the implementation, several approaches were proposed for the user to interact with the robot, and then the solution with the most positive response was selected. The final solution succumbed to user experiments where participants evaluated the usability and compared the final solution of the two AREditors.

Klíčová slova

rozšířená realita, Microsoft HoloLens 2, ARCOR2, AREditor, Unity, kolaborativní robot

Keywords

augmented reality, Microsoft HoloLens 2, ARCOR2, AREditor, Unity, collaborative robot

Citace

ZMRZLÝ, Daniel. *Interakce s kolaborativním robotem pomocí rozšířené reality*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Daniel Bambušek

Interakce s kolaborativním robotem pomocí rozšířené reality

Prohlášení

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

.....
Daniel Zmrzlý
6. května 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Danielovi Bambuškovvi za cenné rady, ochotu, čas a trpělivost po celou dobu práce. Dále si vážím vypůjčeného vybavení a poskytnutí místnosti s roboty od fakulty. V poslední řadě bych chtěl poděkovat rodině, přítelkyni a přátelům za podporu.

Obsah

1	Úvod	5
2	Rozšířená realita	6
2.1	Popis	6
2.2	Historie	7
2.3	Možnosti zobrazení	8
2.4	Microsoft Hololens 2	8
3	ARCOR2 – framework pro programování robotů	13
3.1	Architektura systému ARCOR2	13
3.2	AREditor	15
3.3	Jiná existující řešení	16
4	Návrh řešení	18
4.1	Porovnání manipulace tabletového řešení s možnostmi v HoloLens	18
4.2	Návrh manipulace s robotickým ramenem	18
4.3	Návrh přesného pozicování ramene robota	19
4.4	Návrh vizualizace limitů robota	21
5	Testování přesného pozicování robota	23
5.1	Popis testování	23
5.2	Experiment	24
5.3	Vyhodnocení	24
6	Implementace	28
6.1	Chod aplikace	28
6.2	Implementace manipulace	29
6.3	Implementace přesného umístění robota	31
6.4	Zobrazení a ošetření limitů robota	32
6.5	Notifikace	34
6.6	Nápady do budoucna	35
7	Závěrečný experiment	36
7.1	Popis a postup experimentu	36
7.2	Vyhodnocení	37
8	Závěr	43
	Literatura	44

A	Obsah přiloženého paměťového média	47
B	Demografický dotazník	48
C	Dotazník s doplňujícími otázkami	50

Seznam obrázků

2.1	Reprezentace smíšené reality.	7
2.2	Náhlavní displeje.	8
2.3	Zařízení Microsoft HoloLens 2. Převzato z [12].	9
2.4	Ovládání pomocí rukou. Převzato z [11].	12
3.1	Architektura ARCOR2. Převzato z [8].	14
3.2	Tabletová verze AREditoru.	15
3.3	Příklady existujících řešení.	17
4.1	Krokovací menu v tabletové verzi AREditoru.	19
4.2	Návrh s pohyblivou tabulkou.	20
4.3	Návrh s objekty u vybrané osy.	20
4.4	Návrh se sníženou citlivostí.	21
4.5	Návrh znázornění limitů robota.	22
5.1	Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při měření zátěže u jednotlivých návrhů.	26
5.2	Graf zobrazující porovnání návrhů pro přesnou manipulaci na stupnici od nejlepšího po nejhorší s počtem hlasů.	27
6.1	Obrázek zobrazující komponenty aplikace AREditor. Převzato z [7].	29
6.2	Vizualizace gizmo objektu.	30
6.3	Manipulační možnosti pro přesné umístění.	31
6.4	Znázornění limitů robota.	32
6.5	Znázornění výpočtu bodů pro objekt reprezentující rozsah robota na úrovni stolu. Průběh výpočtu je znázorněn krokově po směru hodin.	33
6.6	Zobrazení textu upozornění.	34
7.1	Vizuální zobrazení experimentu kreslení čtverce.	37
7.2	Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2 u skupiny A.	38
7.3	Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2 u skupiny B.	39
7.4	Graf zobrazující průměrné hodnoty obou skupin z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2.	40

7.5	Graf zobrazující data z vlastního dotazníku, kde účastníci vyjadřovali míru souhlasu s tvrzeními. Záporné hodnoty na levé straně vyjadřují míru nesouhlasu a kladné hodnoty na pravé straně míru souhlasu.	42
B.1	Demografický dotazník.	49
C.1	Dotazník s doplňujícími otázkami pro testování návrhů.	51

Kapitola 1

Úvod

V uplynulém desetiletí došlo k významným pokrokům v oblasti rozšířené reality. Největší vzrůst byl zaznamenán v rámci informačních technologií, kde probíhaly masivní výzkumné činnosti. Celkově lze říci, že v dnešní době má rozšířená realita stále větší vliv v mnoha aspektech každodenního života. V lékařském odvětví zlepšuje poskytovanou péči, přináší nové způsoby výuky ve vzdělání nebo nabízí nové zážitky v herním světě.

Své místo si rozšířená realita získala i v oblasti průmyslu nebo v automatizaci výroby, kde se používá pro programování robotických pracovišť, ať už v malých či velkých firmách. Spojení kolaborativních robotů a člověka používajícího rozšířenou realitu eliminuje proces, při němž se roboti programují za přítomnosti specializovaného pracovníka. Po krátkém seznámení s technologií zvládne přeprogramovat chování robotů i běžný člověk za kratší časový úsek.

Tato práce navazuje na projekt pro programování robotického pracoviště za využití rozšířené reality a náhlavního displeje Microsoft HoloLens 2 a přidává do něho chybějící možnost manipulace s robotickým ramenem. Kapitola 2 se věnuje teoretické části o rozšířené realitě. Je zde popsána její definice, historie nebo vztah se smíšenou realitou či pojem koncept kontinua smíšené reality. Dále se kapitola zabývá možnostmi zobrazení rozšířené reality a představení technologie Microsoft HoloLens 2 od společnosti Microsoft.

V kapitole 3 je popsán systém ARCOR2, který tvoří základní kámen pro implementovanou aplikaci. Kapitola obsahuje podrobný popis tohoto systému, jeho chování a nachází se zde i představení klientské aplikace pro zmíněný systém. V závěru kapitoly jsou představeny ještě jiná existující řešení pro programování v robotickém prostředí.

Dále se práce v kapitole 4 věnuje návrhu řešení pro manipulaci s robotem. V prvotní fázi probíhá porovnání mezi manipulací AREditoru pro tablet a potenciálním řešením pro brýle HoloLens 2. Pro přesné zadání pozice robota byly vytvořeny a implementovány tři návrhy, které se později podrobily uživatelskému testování. Popis experimentu, výsledky a celkové vyhodnocení je popsáno v kapitole 5.

Postup a úvod do implementace navrženého řešení je popsán v kapitole 6. Části v implementaci jsou logicky rozděleny dle problematiky. Výsledné řešení bylo porovnáno s tabletovým řešením AREditoru v závěrečném experimentu, kterému se věnuje kapitola 7. Závěr práce obsahuje shrnutí a celkový přínos implementovaného řešení.

Kapitola 2

Rozšířená realita

Kapitola o rozšířené realitě (AR, z angl. augmented reality) umožňuje získat obecný přehled o této oblasti. První část kapitoly se zabývá jejím obecným popisem 2.1 a jsou zde vysvětleny i pojmy virtuální a smíšené reality, které s rozšířenou realitou souvisí. Druhá sekce 2.2 je zaměřena na první zmínky v historii, významné milníky a jejich osobnosti. V sekci možnosti zobrazení 2.3 jsou popsány způsoby, jakými může být rozšířená realita promítána do reálného světa. Poslední sekce 2.4 se věnuje technologii Microsoft HoloLens 2.

2.1 Popis

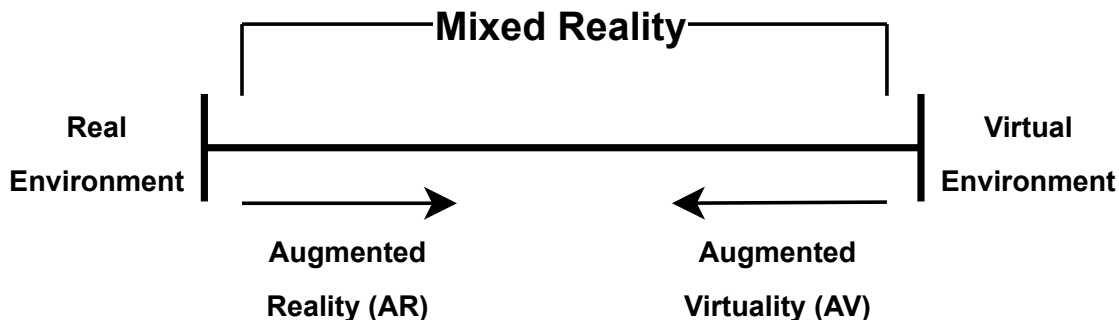
Rozšířená realita se dá popsat mnoha způsoby, nejpoužívanější definicí je však charakteristika od Ronalda Azumy [19]. Podle Azumy musí AR splňovat následující tři charakteristiky:

- Kombinace prvků z reálného i virtuálního světa.
- Možnost interakce v reálném čase.
- Děj se odehrává ve 3D prostoru.

Znamená to, že AR umožňuje vnímat reálný svět takový jaký je ve skutečnosti s přidanými digitálními prvky. Všechny digitální objekty či informace se odehrávají v reálném čase a ve všech případech musí mít uživatel zařízení, které je schopno rozšířenou realitu zobrazit (viz sekce 2.3).

Virtuální realita

Virtuální realita (VR, z angl. virtual reality) ponoří uživatele do plně virtuálního světa. Uživatel přitom musí mít nasazené virtuální brýle, které mu zobrazí imaginární svět. Oproti rozšířené realitě zde nejsou žádné prvky z reálného světa. Hlavním rozdílem těchto dvou realit je, že virtuální realita je tvořena s cílem uniknout do smyšleného prostředí, kde se uživatelé ocitají často v uzavřeném prostoru a nemají kontakt s reálným světem. Zatímco rozšířená realita je používána tak, že uživatel zůstává ve světě reálném, obohaceném o holografické objekty či jiné digitální informace. Virtuální objekty u AR pak vypadají jako by byly součástí daného prostředí.



Obrázek 2.1: Repräsentace smíšené reality.

Smíšená realita

Smíšenou realitu lze chápat jako spojení rozšířené a virtuální reality. Umožňuje manipulovat jak s digitálním obsahem, tak se i střídat s fyzickými objekty v reálném světě. Smíšená realita se vztahuje k pojmu koncept kontinua rozšířené reality – označení pro kontinuální škálu mezi realitou a virtuální realitou [13]. Principem je pochopení a způsob, jakým lze chápat rozdíl mezi reálným světem a světem virtuálním. V obrázku 2.1 levá strana spektra (Real Environment) představuje prostředí obsahující pouze skutečné objekty, které jsou viditelné pouhým okem, zatímco pravá strana spektra (Virtual Environment) představuje virtuální prostředí zahrnující objekty vytvořené počítačem. Mezi krajními body spektra se nachází prostor, který můžeme nazvat jako smíšenou realitu.

2.2 Historie

První myšlenka, která se dá považovat za představení rozšířené reality, vznikla v novele *The Master Key* na počátku 20. století [27]. V knize se píše o speciálních brýlích, které dokáží rozeznat charakter ostatních lidí. Osobě nesoucí brýle se zobrazují symboly na čelech kolemjdoucích, které mají každého zařadit do skupin podle povahy. V roce 1966 byl zapsán velmi důležitý milník v oblasti rozšířené reality. Profesor Ivan Sutherland a jeho student Bob Sproull z Harvardovy univerzity vyvinuli první náhlavní displej¹ s názvem *The Sword of Damocles* využívající počítač [22].

Pojem rozšířená realita byl poprvé použit při výzkumu a vývoji náhlavního displeje s účelem usnadnění montáže kabelů při výrobě letadel v roce 1992 [26]. Další pokrok byl zaznamenán v roce 2000, kdy vznikla první mobilní aplikace využívající rozšířenou realitu [25]. Jednalo se o *First-Person Shooter*² hru. O další velký skok v této oblasti se postarala společnost Google, která v roce 2012 představila moderní náhlavní displej *Project Glass*, který měl v sobě zabudované funkce pro hlasové ovládání, ovládání pohybem očí, nahrávání videa, pořizování fotek a další [23]. O 3 roky později se s náhlavním displejem představila i firma Microsoft, která vydala model *Microsoft HoloLens* běžící na operačním systému *Windows 10* [9]. Dále pak v průběhu 21. století vznikaly nové inovativní technologie v digitálním světě jako náhlavní displeje *Microsoft HoloLens 2* nebo *Apple Vision Pro* nabízející vylepšenou funkcionalitu oproti jejich předchůdcům.

¹Zařízení s displejem, které je připevněno na hlavě.

²Druh počítačové hry se střelnými zbraněmi, kdy hráč hraje z pohledu první osoby – vidí svět z perspektivy postavy ve hře.



(a) The Sword of Damocles. Převzato z [24].



(b) Project Glass. Převzato z [18].

Obrázek 2.2: Náhlavní displeje.

2.3 Možnosti zobrazení

Rozšířená realita je v dnešní době kdekoli kolem nás. Firmy ji používají pro marketing, je obsažena v některých navigačních aplikacích nebo je digitální obsah zobrazen ve večerním vysílání zpráv. Každý případ používající rozšířenou realitu má řadu variant pro zobrazení digitálního obsahu.

Náhlavní displeje

Pod pojmem náhlavní displej (Obrázek 2.2) si je možné představit zařízení v podobě klasických brýlí nebo technologii s komplikovanější konstrukcí, která se nasadí přímo na hlavu. Promítání je zobrazeno na přední části přímo před očima uživatele, což mu nabízí volnost při pohybu a interakci.

Ruční displeje

Mezi ruční displeje patří chytrá mobilní a tabletová zařízení, kde vyžadovanou vlastností je přítomnost kamery a senzorů. Díky velké dostupnosti těchto zařízení se jedná o nejrozšířenější formu zobrazení. Celý děj se odehrává na displeji, kde kamera pomocí senzorů mapuje reálné prostředí a to se zobrazuje na ploše displeje i s přidávanými virtuálními objekty. Oproti náhlavním displejům je uživatel nucen držet zařízení při práci, což může být v některých případech frustrující.

Projekce

Projektory jsou další možností k zobrazení digitálních informací. Obraz se promítá na pevné fyzické předměty jako jsou stěny či pracovní desky. Promítání vytvoří pracovní plochu, která se přizpůsobí prostředí. Nepříznivé pracovní podmínky mohou způsobit špatnou viditelnost promítaného obsahu.

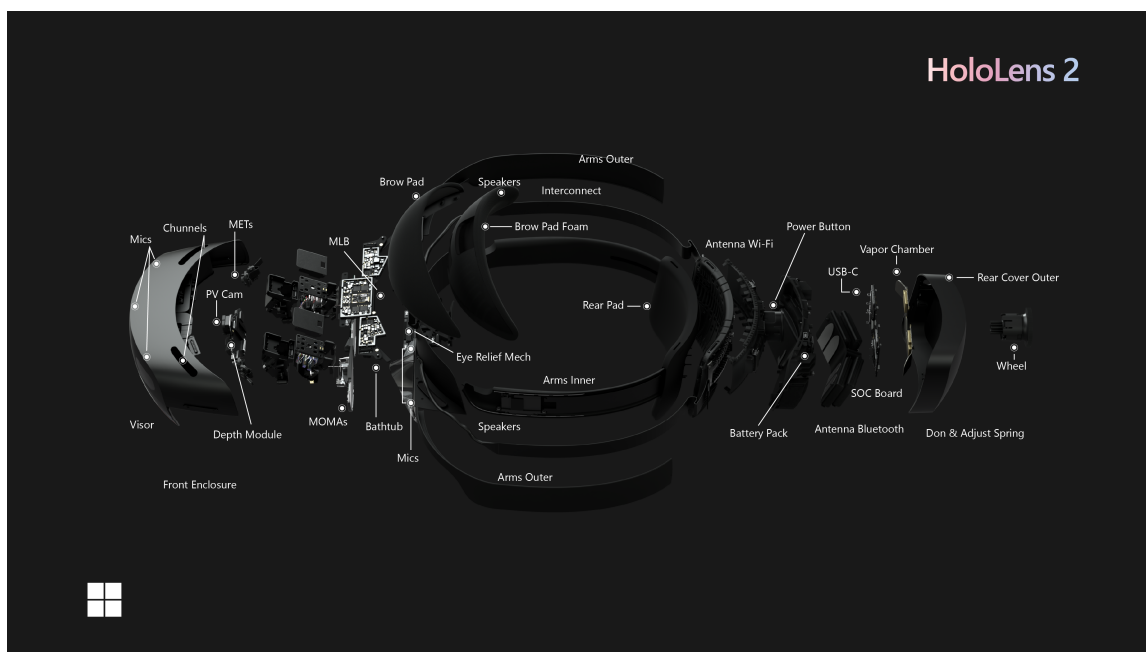
2.4 Microsoft HoloLens 2

Brýle Microsoft HoloLens 2 jsou zařízení pro rozšířenou realitu vyvinuté společností Microsoft. Jedná se o technologii vycházející z předchozího modelu Microsoft HoloLens oboha-

cenou o vylepšenou funkcionalitu. V sekci je popsáno, jak HoloLens 2 zjednodušují práci a jak jsou využívány v reálném světě. V následující části sekce je popsán vývoj aplikací a poslední část se věnuje podrobnému popisu možností interakce při používání brýlí.

Specifikace

Výrobce uvádí, že se jedná o bezdrátový holografický počítač (viz obrázek 2.3) poskytující pohodlný zážitek ve smíšené realitě. Oproti první generaci HoloLens 2 přišly s dvojitou obrazovkou s vyšším rozlišením a větším zorným polem, což umožňuje vidět rozsáhlý prostor bez nutnosti častého otáčení. Přesná orientace v prostoru je zaručena díky sensorům s hloubkovým vnímáním a sensorům pro sledování pohybu hlavy. Plynulý chod aplikací a efektů zajišťuje grafická jednotka spolu s výkonným procesorem. Zařízení pracuje s vnitřní pamětí 4 GB DRAM a úložištěm 64 GB. Zabudovaná kamera poskytuje rozlišení 8 Mpx a je schopna pořizovat záznamy v rozlišení 1080p ve 30 FPS³. Nechybí ani připojení pomocí WiFi a Bluetooth nebo možnost hlasové komunikace pomocí mikrofону a reproduktorů s vestavěným prostorovým zvukem [12].



Obrázek 2.3: Zařízení Microsoft HoloLens 2. Převzato z [12].

Využití

Tématu o vývoji aplikací během posledních let s využitím Microsoft HoloLens se ve své práci podrobně věnoval Park a spol. [16]. Především HoloLens mají využití v sektoru zdravotnictví, v oblasti strojírenství, vzdělání, ale můžeme jejich využití vidět i v herním průmyslu.

³FPS – frames per second (snímková frekvence)

Oblast medicíny

Ve zdravotnickém sektoru mají HoloLens velké využití. Pomáhají začínajícím lékařům rychleji získávat potřebné dovednosti, mohou promítat záběry z endoskopických kamer nebo částí těla a vnitřních orgánů. V oblasti chirurgie je technologie používána jako nástroj pro plánování operací srdečních vad [2] nebo pro vytvoření simulačního prostředí ortopedických zákroků [4].

Al Janabi a spol. [1] zkoumali, zda by HoloLens v budoucnu mohly nahradit konvenční monitor v oblasti endoskopické chirurgie. Výzkum byl proveden se 72 účastníky. 97 % z dotázaných souhlasilo, že by HoloLens hrály užitečnou roli v průběhu vzdělávání a 95 % uvedlo, že by uvítali klinické zavedení této technologie.

Kuhlemann a spol. [10] vyvinuli aplikaci, která poskytuje pohled na cévní systém během endovaskulárních zákroků. Aplikace je schopna zobrazit z rentgenových snímků 3D modely a její používání snižuje expozici rentgenového záření u pacientů.

Oblast vzdělání

Rozšířená realita má své místo i v oblasti vzdělání a mění způsob dosavadních metod učení. Díky svým prostředkům získává stále větší zájem studentů. Přináší nové způsoby interaktivní formy ve výuce a možnosti se učit pomocí realistických simulací.

Jak ve své práci uvedl Moro a spol. [14], HoloLens jsou využívány během výuky na lékařských a zdravotnických fakultách. Studenti pro svou potřebu vícerozměrných znalostí lidských orgánů s nimi interagují pomocí jejich interaktivních 3D modelů. Integrací rozšířené reality do výuky se projevil zvýšený zájem a ochota vzdělávat se pomocí této technologie. Objevováním nových možností za pomoci rozšířené reality v průběhu výuky vedlo k intenzivnějšímu zapojení do vzdělávacích aktivit, jak vyplývá ze studie zkoumané skupinou Wyss a spol. [28].

Další oblasti využití

I herní průmysl aplikoval rozšířenou realitu do svých děl, příkladem může být vzdělávací hra *Revolution to Reconstruction*, kterou ve své práci zmiňuje Karen Schrier [20]. Hráči prostřednictvím hry prozkoumávají bitvu u Lexingtonu a rozvíjí dovednosti kritického myšlení, mediální gramotnosti apod.

Ve strojírenském průmyslu rozšířená realita pomáhá zjednodušovat programování robotických pracovišť. Programy definují úkoly robotů, detekují kolizní objekty nebo sestavují programy, které se dají jednoduše přeprogramovat. Příkladem je aplikace ARRPS, jež ve své práci rozebírá Ong a spol. [15].

Vývoj aplikací pro Microsoft HoloLens 2

Z počátku vývoje aplikací je nutné si uvědomit podstatu HoloLens 2 a obeznámit se s technickými specifikacemi tohoto zařízení. Na trhu najdeme hned několik nástrojů, které podporují implementaci AR pro HoloLens 2. Mezi vhodné vývojové nástroje můžeme zařadit Mixed Reality Toolkit, Universal Windows Platform nebo jeden z herních enginů jako Unity nebo Unreal Engine.

Unity

Unity⁴ je široce používaný vývojový herní engine vydaný společností Unity Technologies. Umožňuje vývojářům vytvářet obsah napříč širokým výběrem platforem pro stolní počítače, mobilní zařízení, ale i dokonce pro konzole jako jsou PlayStation, Xbox, Nintendo Switch a další. Unity nabízí všestrannou tvorbu ať už pro 2D nebo 3D aplikace. Na výběr je zde ale i možnost vývoje aplikací v rozšířené či virtuální realitě za podpory UWP⁵. Vše je realizovatelné v programovacím jazyce C#⁶.

Mixed Reality Toolkit

Mixed Reality Toolkit⁷ (MRTK) je sada nezbytných nástrojů pro usnadnění vývoje v rozšířené nebo virtuální realitě od společnosti Microsoft. Toolkit obsahuje předpřipravené interakční modely a díky možnosti cross-platform je lze snadno zakomponovat v projektech využívajících různé náhlavní displeje. Výjimkou nejsou ani HoloLens 2. Najdeme zde komponenty pro uživatelské rozhraní i komponenty, které pokrývají funkce sledování ruky, rozpoznání gest nebo prostorové mapování. Nástroj obsahuje i možnost editace již existujících komponent nebo jejich úplné vytvoření.

Spatial Anchors

Spatial Anchors⁸ je technologie, s níž se běžně setkáme při vývoji aplikací pro rozšířenou realitu. Nabízí sadu nástrojů pro práci s objekty ve scéně, a proto jsme schopni udržovat virtuální objekty na určité pozici v místnosti.

Universal Windows Platform

Universal Windows Platform⁹ (UWP) přispívá vývoji aplikací pro operační systémy Windows. Díky UWP mohou aplikace běžet na různých platformách. Další užitečnou vlastností je, že obsahuje zabudované UI (z angl. user interface) elementy, které reagují na různé velikosti obrazovek u zařízení.

Manipulace

Společnost Microsoft se při návrhu HoloLens 2 snažila dbát na co nejjednodušší a nejpřirozenější interakci s touto technologií. Uživatel si může vybrat hned z několika možností při manipulaci s objekty v rozšířené realitě. Ať už zvolí ovládání pomocí gest, pohybem ruky, ovládání pohledem či ovládání hlasem, každá volba může mít své výhody i nevýhody.

Ovládání pomocí pohybu ruky a gest

S manipulací za pomoci pohybů rukou a gest se v HoloLens 2 setkáme nejběžněji. Pomocí zabudované kamery s hloubkovým snímáním je zařízení schopné určit, zda se uživatel například snaží stisknout tlačítko nebo se snaží přesunout holografický objekt na jiné místo.

⁴<https://unity.com/>

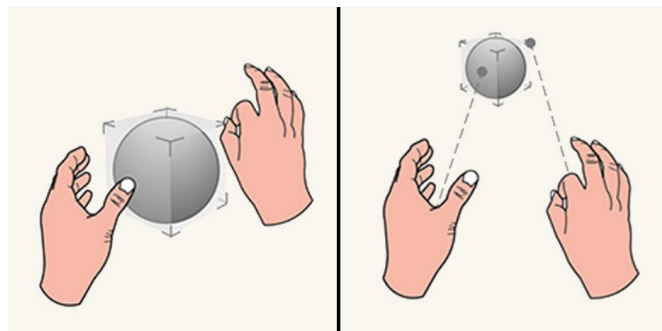
⁵UWP – Universal Windows Platform

⁶<https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>

⁷<https://github.com/microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>

⁸<https://azure.microsoft.com/en-us/products/spatial-anchors>

⁹<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/uwp/get-started/>



Obrázek 2.4: Ovládání pomocí rukou. Převzato z [11].

Uživatel může pro manipulaci s objekty využít přímý kontakt nebo mu zařízení umožňuje manipulovat s objekty i ze vzdálenosti pomocí kurzorů (Obrázek 2.4). Pro vykonání akce je zde možnost stisknutí, uchopování, přetahování nebo změny velikosti objektů ve scéně.

Ovládání pohledem

Oproti svému předchůdci, Hololens 2 nabízí i technologii sledování očí. Zařízení ví, kam se uživatel dívá, a díky tomu lze s holografickými objekty manipulovat pouhým pohledem. Je umožněno vybírat objekty, aktivovat prvky nebo spouštět akce nasměrováním pohledu na konkrétní body v prostředí rozšířené reality.

Ovládání hlasem

Pomocí zabudovaného mikrofonu lze se zařízením komunikovat i za pomoci hlasu. Uživatel může využít možnosti virtuálního asistenta Microsoft Cortana¹⁰, kde má na výběr hned z několika hlasových příkazů. Cortana uživateli umožní rychlé ovládání od spuštění aplikací nebo posouvání objektů po pořizování fotek a nahrávání videí. Další možností je využití jednoduše zapamatovatelného příkazu „select“, pomocí kterého je uživatel schopen označit objekty ve scéně a následně s nimi i pracovat. Dále je tu pro náročnější uživatele možnost vytvoření vlastních hlasových příkazů pro budoucí využití. U této zvolené ovládací metody vzniká problém v případě, kdy se uživatel ocitá v hlučném prostředí.

¹⁰<https://support.microsoft.com/en-us/cortana>

Kapitola 3

ARCOR2 – framework pro programování robotů

V dnešní době jsou primárně roboti v oblasti průmyslové výroby používáni k jedné stejnorodé činnosti po určitou dobu. Zastupují pracovní sílu lidí a po delší nebo kratší časový úsek vykonávají efektivně svoji práci, kterou by jeden člověk jen těžce zvládl. V mnoha případech je robot použit k vykonávání hned několika pracovních úloh. Pokud má u robota dojít k zastavení právě vykonávané úlohy a zadání nové pracovní činnosti, znamená to povolání školeného technika, který chod robota přeprogramuje. Vědecká skupina Robo@FIT¹ zkoumala tuto oblast a vytvořila systém ARCOR2², neboli framework pro správu robotického pracoviště za pomoci rozšířené reality [8]. Toto uživatelské rozhraní eliminuje nedostatky při práci s kolaborativním robotem a nabízí jednoduché ovládání bez potřeby odborného školení.

Kapitola se v její prvotní fázi 3.1 věnuje systému ARCOR2, popisuje jeho architekturu a základní služby. Dále je v kapitole zmíněno uživatelské rozhraní AREditor 3.2, které slouží jako klientská část zmíněného systému pro práci s robotickým pracovištěm. Na závěr kapitoly v sekci 3.3 jsou popsána existující řešení pro práci s roboty v rozšířené realitě.

3.1 Architektura systému ARCOR2

Systém ARCOR2 se skládá z klientské a serverové části. Klientská část je reprezentována aplikací AREditor³, která byla původně navržena pouze pro tabletové zařízení. Serverovou část (viz obrázek 3.1) reprezentuje několik na sobě nezávislých služeb, dále popsaných v této sekci.

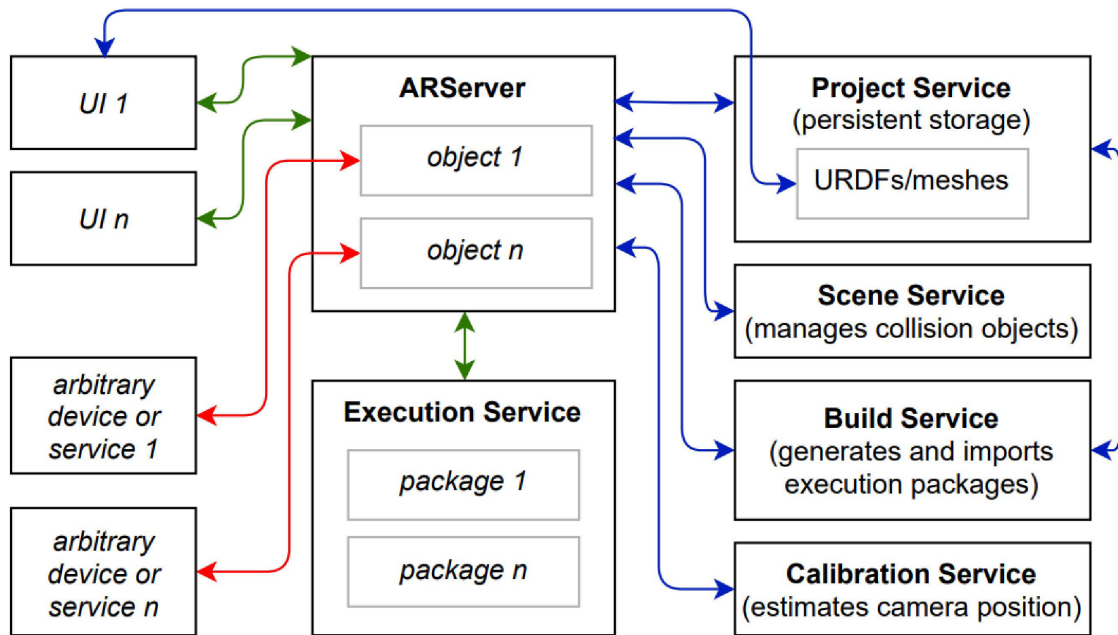
AR server

Hlavní komponentou celé architektury je AR server, který komunikuje se všemi ostatními službami pomocí WebSocketů a zpracovává jejich požadavky. Předpokládá se, že každé robotické pracoviště má jen jednu instanci AR serveru. Server je navržen tak, že při situaci, kdy s prostředím manipuluje více uživatelů, dochází ke sdílení stejných informací. Při otevření scény nebo projektu jedním uživatelem dojde k propojení ostatních uživatelů a všem aktuálně připojeným rozhraním se zobrazí stejné prostředí.

¹<https://www.fit.vut.cz/research/group/robo/.cs>

²<https://github.com/robofit/arcor2>

³https://github.com/robofit/arcor2_areditor



Obrázek 3.1: Architektura ARCOR2. Převzato z [8].

Project Service

Project Service patří mezi klíčové prvky systému. Nabízí perzistentní úložiště pro veškerá data robotického pracoviště. Ukládá data pro udržování scén, projektů, modelů a ostatních typů objektů. Díky této službě mohou uživatelé sdílet data mezi více zařízeními.

Scene Service

Scene Service je postavena na implementaci ROS⁴ (Robot Operating System). Služba spravuje a sleduje kolizní objekty v robotickém prostředí, což zajišťuje bezpečné podmínky pro práci ve scéně.

Build Service

Build Service vytváří pro aktuální projekt spustitelný balíček. Z JSON schématu generuje AST reprezentaci, která je následně zkompileována do kódu v Jazyce Python. Proces zahrnuje i generaci pomocných tříd zjednodušujících práci s objekty v rozšířené realitě.

Execution Service

Execution Service se stará o spuštění balíčků vytvořených při sestavovací službě. Během procesu jsou posílány data na ARServer, kde má uživatel možnost si zobrazit bližší informace. Služba může být podle vlastních potřeb pozastavena a poté znovu obnovena bez negativních efektů.

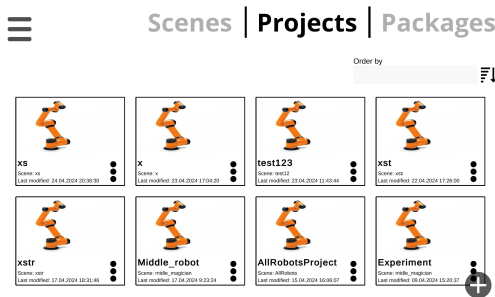
⁴<https://www.ros.org/>

Calibration Service

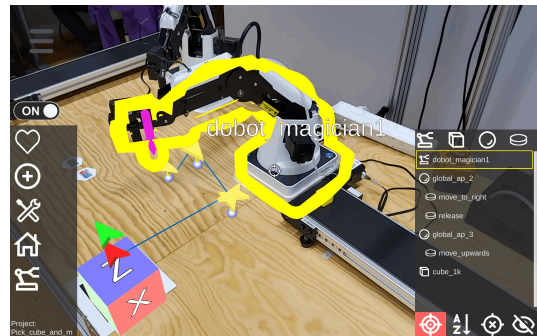
Kalibrační služba se stará o získání dat z kamery a ukotvení prostředí po přečtení informací z markeru. Pro požadavek kalibrace jsou skenována data z poskytnutého obrazu pomocí kamery zařízení. Poté proběhne výpočet pozic kamer a následně jsou data zprůměrována podle vzdálenosti snímající kamery od markeru. Po načtení všech dat marker zastupuje roli středového bodu pro ukotvení celého virtuálního prostředí. Roboti jsou umístěni do původní polohy definované ve scéně.

3.2 AREditor

AREditor je aplikace pro tabletová zařízení (Obrázek 3.2) vytvořená skupinou Robo@FIT z Fakulty Informačních technologií na univerzitě Vysoké učení technické v Brně. Aplikace využívá prostředí rozšířené reality pro práci s kolaborativními roboty. Záměrem aplikace je umožnit uživateli jednoduchou práci v robotickém prostředí za pomoci grafických objektů. AREditor nabízí veškeré funkce pro správu robotického pracoviště jako vytvoření nových scén s roboty včetně přidávání kolizních objektů, dovoluje uživateli vytvářet program pro chod robotů a následně ho i spouštět. Později byla aplikace vyvinuta i pro technologii Microsoft HoloLens 2 [7].



(a) Zobrazení menu projektů.



(b) Náhled otevřeného projektu.

Obrázek 3.2: Tabletová verze AREditoru.

Domovská obrazovka

Po otevření aplikace se zobrazí přihlašovací okno, které požaduje informace jako hostname nebo IP adresu, port a jméno uživatele. Po úspěšném přihlášení jsme v tabletové verzi přeměrování na domovskou obrazovku, kde je možné si vybrat mezi menu scén, projektů a balíčků. Pokud však již dříve byla otevřena scéna nebo projekt, ocitneme se rovnou v definovaném prostředí. V řešení pro náhlavní displeje není domovská obrazovka definována. V případě, že není otevřena scéna ani projekt, je nutné požadované prostředí načíst z menu ruky.

Scéna

V prostředí scény je možné definovat objekty reálného světa. Je zde umožněno přidávat modely robotů na jejich fyzická umístění. V případě vyskytujících se překážek v robotickém prostředí existuje možnost přidání kolizních objektů, jakými jsou krychle, koule a kvádr.

Projekt

Prostředí projektu vychází z definice scény, kterou si uživatel vybírá při jeho vytvoření. Projekt slouží pro vytvoření scénáře chování robotů. Akční body robota jsou reprezentovány virtuálními 3D objekty, nad kterými je později možnost přidat akci, tedy úkol pro robota, jako je zdvižení objektu, položení objektu, přesun a další. Jednotlivé akce se dají mezi sebou propojit. V projektu jsou hned od začátku definované akce START a END. START slouží jako vstupní bod programu a END jako bod výstupní. Pro vytvoření programu je nutné, aby první spoj vycházel ze vstupního bodu a poslední spoj směřoval do bodu výstupního.

Online režim

Online režim značí, zda jsou k robotickému pracovišti připojeni roboti. V režimu offline se pracuje pouze se scénou nebo projektem bez možnosti využití robotů. Pokud je online režim aktivní, je možné s roboty manipulovat nebo přidávat akční body přes jejich koncový bod.

Kalibrace prostředí

Pro zobrazení robotického pracoviště si musí aplikace projít procesem kalibrace prostředí. Kalibrace načítá informace z dostupného markeru (značky) a zároveň tento bod značí středový bod celé okolní scény. Kalibrační marker slouží k ukotvení holografických prvků do reálného světa a měl by být pevně uchycen, jinak s jeho posunem dojde k posunu celého virtuálního prostředí.

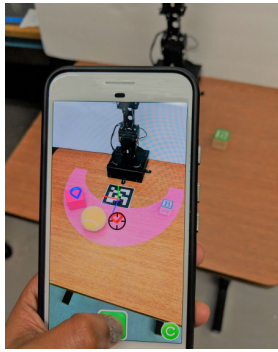
Komunikace

Komunikace mezi serverem a klientskou aplikací AREditor probíhá za použití WebSocketů. Po připojení ARServer posílá do klientské části události a odpovídá na zaslané RPC (Remote Procedure Calls) požadavky. Událost pro představu reprezentuje otevření scény nebo její aktualizaci v případě změn. RPC zpráva slouží k zaslání informací, které se mají vykonat na straně serveru, může se jednat o výpočet a aktualizaci poloh kloubů robota. Zprávy jsou reprezentovány JSON objekty a jsou posílány v obou směrech.

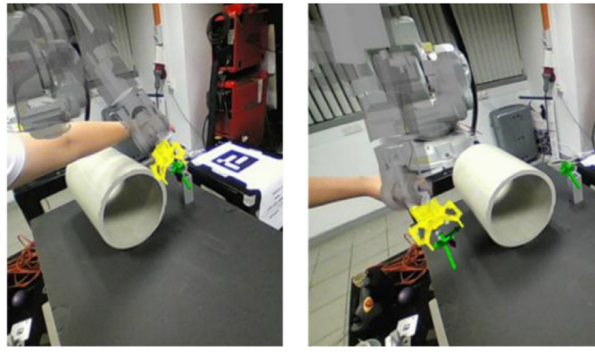
3.3 Jiná existující řešení

Rozšířená realita nabízí obrovský potenciál ve všech směrech a výjimkou není ani oblast interakce mezi robotem a člověkem. Tento trend v poslední době získává stále větší pozornost, jelikož nabízí mnoho efektivních možností, jak urychlit proces výroby. Právě proto můžeme vidět rostoucí zájem vědeckých týmů o zkoumání této oblasti.

Kromě systému ARCOR2 existují další aplikace s podobným principem. Jako příklad lze uvést systém HRI vyvinutý vědeckou skupinou Chacko a spol. [3]. Jedná se o rozhraní pro mobilní zařízení navrženo pro použití v průmyslových a obchodních oblastech, které umožňuje jednoduchou interakci mezi robotem a člověkem. Dalším zajímavým řešením je systém ARRPS, který ve své práci popisuje Ong a spol. [15]. Rozhraní ARRPS slouží k programování robotů a definování jejich úkolů v rozšířené realitě.



(a) Systém HRI. Převzato z [3].



(b) Systém ARRPS. Převzato z [15].

Obrázek 3.3: Příklady existujících řešení.

Hashimoto a spol. [6] ve své práci prezentovali systém TouchMe pro ovládání robota v rozšířené realitě. Systém sleduje robotické pracoviště ze třetí osoby a promítá obraz na dotykovou obrazovku. Systém umožňuje vzdáleně ovládat jednotlivé části robota pouhým dotykem prstu obrazovky.

Další možnosti ovládání robota ve své práci představil Peppoloni a spol. [17]. Základem rozhraní je snímání těla člověka pomocí nasazeného zařízení. Robot se následně vzdáleně ovládá pomocí pohybů ruky a svalové kontrakce.

Kapitola 4

Návrh řešení

První část kapitoly 4.1 se zabývá porovnáním manipulace robota v existujícím řešení tabletového AREditoru a příležitostmi, jakými by se stejná funkcionality dala implementovat do AREditoru podporující Microsoft HoloLens 2. Sekce 4.2 popisuje obecný návrh manipulace v prostoru robotického pracoviště a následně je tato problematika obohacena o tři návrhy přesného pozicování robota popsaného v sekci 4.3.

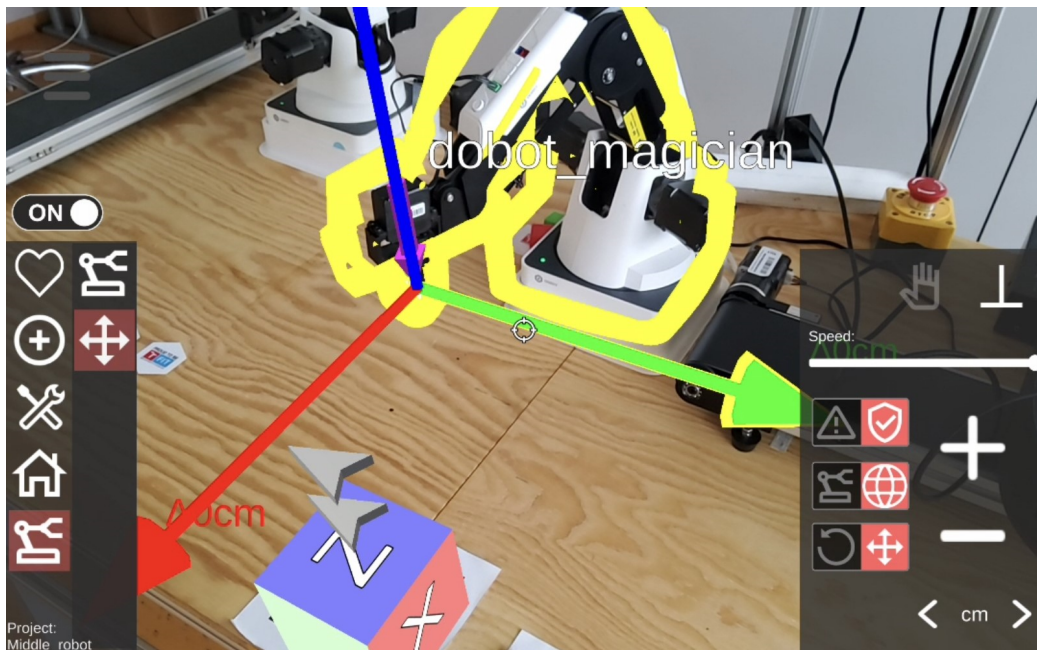
4.1 Porovnání manipulace tabletového řešení s možnostmi v HoloLens

Původní tabletové řešení nabízí možnost manipulace s robotem pomocí krokovacího menu. Krokovací menu (viz obrázek 4.1) je dostupné v hlavním menu v záložce robota. Uživatel zde najde v první řadě možnost změny rychlosti posunu robota a výběr jednotek s hodnotou, o jaký kus se má robot přemístit. Dále se zde nachází i tlačítka pro přepínání mezi lokálním a globálním způsobem transformace, pro bezpečný a potenciálně nebezpečný pohyb, kdy v režimu bezpečného pohybu jsou kontrolovány kolizní objekty, a v poslední řadě možnost přepínání mezi pohybem nebo otáčením ve vybrané ose. Samotná manipulace pak probíhá pomocí tlačítek (+, -), kde tlačítko (+) posouvá robota ve směru osy a tlačítko (-) proti směru osy. Výběr osy je umožněn přejetím kurzoru, nacházejícího se uprostřed obrazovky, přes objekt osy.

Spojení rozšířené reality s brýlemi Microsoft HoloLens 2 nabízí oproti tabletu hned několik výhod. Kromě volných rukou uživatel stále vidí okolní svět před sebou bez nutnosti natáčení tabletového zařízení. Jako možné způsoby pro interakci se nabízí přímá manipulace dotykem nebo ovládání na dálku pomocí kurzoru. Ať už uživatel využije ovládání 3D objektů na dálku nebo pomocí přímého kontaktu, tato možnost mu poskytne větší pohodlí než nutnost držet tablet a současně mačkat tlačítka na displeji. Řešení v HoloLens by mělo vyřešit dlouhotrvající proces pozicování robota v tabletu. Díky přímé manipulaci s 3D modelem bude uživatel schopen přemístit robota během pár vteřin bez nutnosti čekání u krokování.

4.2 Návrh manipulace s robotickým ramenem

Intuitivnost a jednoduchost jsou dvě důležité vlastnosti, které by měly klást velký důraz při návrhu manipulace s robotickým ramenem. Pohyblivé robotické rameno kolaborativního robota se skládá z více částí a každá část je spojena kloubem. Manuální pozicování



Obrázek 4.1: Krokovací menu v tabletové verzi AREditoru.

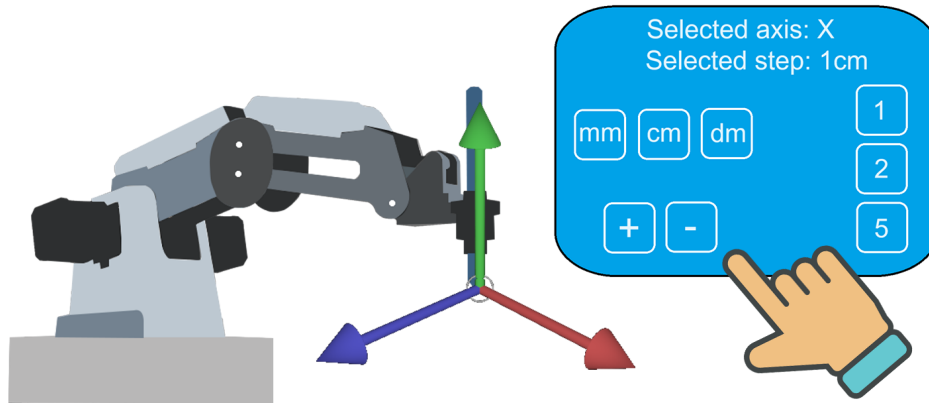
jednotlivých částí by přinášelo značné komplikace a ani zdaleka by se celkový proces nepřiblížil k jednoduchosti. Proto byl v návrhu zvolen způsob, při kterém bude manipulace probíhat pomocí koncového bodu robotického ramene. Uživatel uchopí koncový bod robota a táhnutím ho přemístí na vhodné místo v prostoru. Takovým způsobem je schopen pohybovat všemi robotickými částmi zároveň. Pro případ pohybu ve 3D prostoru pouze jedním směrem byla do návrhu integrována možnost trojosého objektu (gizma), který je zobrazen na pozici koncového bodu. Po uchycení jedné z jeho os by objekt umožňoval tah daným směrem.

4.3 Návrh přesného pozicování ramene robota

V praxi dost pravděpodobně nastane situace, kdy bude nutné robota naprogramovat tak, aby jeho koncový bod byl přesně umístěn v prostoru robotického pracoviště. Pro tento problém byly vytvořeny tři návrhy, které umožňují přesné pozicování robotického ramene. Každý návrh má odlišný přístup, jak této funkcionality dosáhnout. Zároveň návrhy využívají manipulaci za pomoci osy a uchytitelného bodu blíže popsané v předchozí sekci 4.2.

Návrh přesného pozicování pomocí tabulky

Tento návrh pracuje s pohyblivou tabulkou (Obrázek 4.2). V pracovním prostředí má uživatel možnost si přesunout tabulku do prostoru dle vlastních potřeb tak, aby nebránila při pozicování robotického ramene. Tabulka v sobě obsahuje textové znázornění vybrané osy a délku posunu včetně jednotek. Jednotlivé osy lze vybrat přímou manipulací nebo přejetím kurzoru přes jejich prostorový model. Délku posunu si uživatel vybírá v tabulce, v níž má možnost zvolit jednotky a číselnou hodnotu. Tabulka obsahuje i tlačítka pro posun do kladných a záporných souřadnic na vybrané ose. Pro intuitivní vnímání je posun na pozici do kladných souřadnic ve směru osy, do záporných souřadnic pak proti směru osy. Návrh

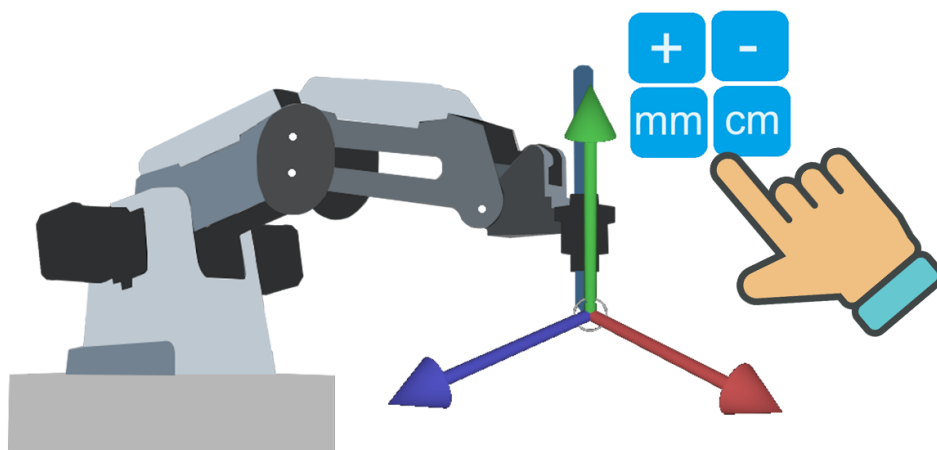


Obrázek 4.2: Návrh s pohyblivou tabulkou.

nabízí možnost pracovat s robotickým prostředím prakticky odkudkoliv. Pokud se uživatel nachází ve větší vzdálenosti od robota, má stále k dispozici okno s ovládacími prvky. Díky výběru jednotek a číselných hodnot délky posunu návrh poskytuje širokou nabídku možností pro manipulaci.

Návrh přesného pozicování pomocí tlačítek u osy

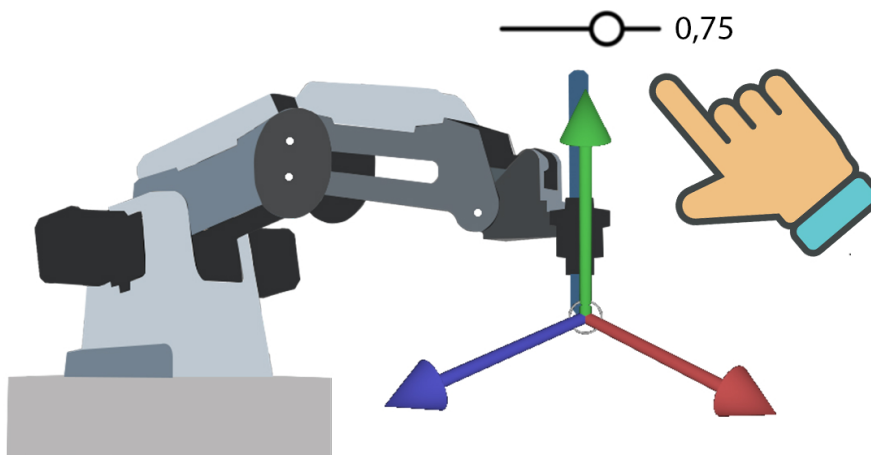
Tento návrh pracuje s digitálními tlačítky přímo v prostoru pracoviště. Při manipulaci s robotickým ramenem jsou digitální tlačítka zobrazena u vybrané osy, což usnadňuje identifikaci, se kterou osou uživatel právě pracuje (Obrázek 4.3). Stejně jako v prvním návrhu je zde možnost vybrat osu přímou manipulací nebo přejetím kurzoru přes její model. Délku posunu si uživatel vybírá z menu zobrazeného vedle os, kde se také nachází tlačítka pro posun do kladných a záporných souřadnic se stejnou uživatelskou přívětivostí jako v prvním návrhu. Tento návrh představuje jednoduchou variantu při manipulaci s robotickým ramenem pomocí zobrazení digitálních prvků v prostoru, díky nimž je snadné rozpoznat, se kterou osou se právě manipuluje. Návrh představuje zjednodušení předchozího návrhu, avšak poskytuje dostačující prvky pro manipulaci.



Obrázek 4.3: Návrh s objekty u vybrané osy.

Návrh přesného pozicování se sníženou citlivostí

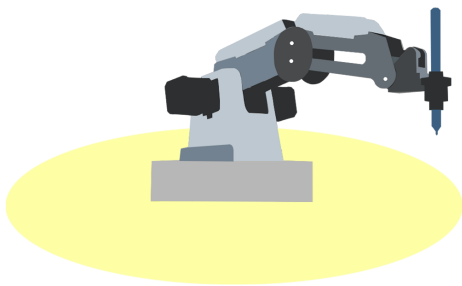
Tento návrh je založen na přímé manipulaci uživatele s osou a vychází z původního návrhu manipulace za pomoci os a uchytitelného bodu. V prostředí nad interakčním objektem os je hned od začátku zobrazen pohyblivý posuvník, pomocí kterého je dána citlivost při manipulaci (Obrázek 4.4). Na posuvníku je možné si vybrat hodnotu od 0 do 1. Výchozí hodnotou je číslo 1, což znamená, že manipulace probíhá s normální rychlostí. Nižší hodnoty posuvníku snižují rychlost, a to vyžaduje od uživatele delší pohyb ruky k dosažení stejného posunu objektu. Pokud je na posuvníku zvolena hodnota 0, je zabráněno kterémukoliv pohybu. Návrh přesného pozicování pomocí pohyblivého posuvníku uživateli nabízí přirozené chování, při kterém nemusí přesouvat model robota prostřednictvím tlačítek. V tomto případě po zvolení hodnoty je uživatel schopen manipulovat s robotem bez nutnosti interakce s jinými holografickými objekty nebo bez nutnosti nadměrného otáčení hlavy.



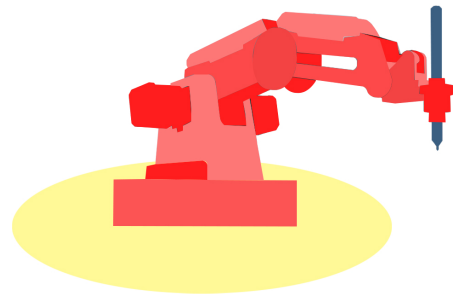
Obrázek 4.4: Návrh se sníženou citlivostí.

4.4 Návrh vizualizace limitů robota

Jednou z variant pro grafické zobrazení dosažení limitů robotického ramene je zobrazení vyskakovacího okna se zprávou. V tomto případě by však byl uživatel nucen číst a celý proces by byl zbytečně zdlouhavý. Proto při dosažení limitů jsem se rozhodl pro dočasnou změnu barvy materiálu robota. Další pomůckou by byl viditelný rozsah znázorňující plochu na pracovním stole, kam by robot mohl umístit zdvižený objekt (Obrázek 4.5).



(a) Vizualizace rozsahu robotického ramena na ploše stolu.



(b) Vizualizace změny barvy robota při pokusu o pohyb mimo rozsah.

Obrázek 4.5: Návrh znázornění limitů robota.

Kapitola 5

Testování přesného pozicování robota

Pro přesné umístění robotického ramene v pracovním prostředí byla navržena a později implementována tři řešení. Každé z řešení má trochu odlišný přístup, jak umístit robota do prostoru pracoviště. Návrhy byly implementovány do existujícího projektu AREditoru pro HoloLens 2. V aplikaci do hlavního menu ruky byla přidána tlačítka, kde každé tlačítko reprezentovalo přepnutí do prostředí za využití zvoleného návrhu. Pro ponechání nejlepšího řešení v aplikaci byl vytvořen experiment, který měl za úkol zkoumat použitelnost jednotlivých návrhů. V první sekci kapitoly 5.1 je objasněn experiment a popsán harmonogram průběhu testování. V druhé sekci 5.2 je popsán jednoduchý úkol, který byl potřeba vykonat za použití všech návrhů. Poslední sekce 5.3 kapitoly je věnována vyhodnocení celého experimentu.

5.1 Popis testování

Před samotným testováním byl vytvořen harmonogram průběhu celého experimentu:

1. Vyplnění demografického dotazníku.
2. Seznámení s experimentem.
3. Seznámení s technologií HoloLens 2 pomocí aplikace Tips¹.
4. Seznámení s aplikací AREditor pro HoloLens 2.
5. Tréninkový proces návrhu A.
6. Provedení experimentu za použití návrhu A.
7. Vyplnění dotazníku pro návrh A.
8. Tréninkový proces návrhu B.
9. Provedení experimentu za použití návrhu B.
10. Vyplnění dotazníku pro návrh B.

¹<https://www.microsoft.com/en-us/p/hololens-tips/9pd4cxkklc47?activetab=pivot:overviewtab>

11. Tréninkový proces návrhu C.
12. Provedení experimentu za použití návrhu C.
13. Vyplnění dotazníku pro návrh C.
14. Vyplnění dotazníku s doplňujícími otázkami.

Uživatel před začátkem testování dostal k vyplnění demografický dotazník (viz příloha B.1). Po vyplnění dotazníku byl uživatel obeznámen se stručným popisem experimentu a následně byl seznámen s technologií Microsoft HoloLens 2. Uživatel podstoupil krátký výcvik pro ovládání holografických prvků a kalibraci očí v rozšířené realitě. Poté se účastník seznámil s aplikací pro přesné testování a dostal prostor se zeptat na nejasnosti. V další fázi účastník podstoupil experiment, který je podrobně popsán v sekci 5.2 a na konci každé jeho části subjekt vyplnil dotazník NASA-TLX [5]. Po dokončení celého experimentu účastník zodpověděl doplňující otázky, jenž se týkaly na celkové porovnání návrhů (práce s jednotlivými návrhy, hodnocení UI).

Během průběhu testování byl nahráván video záznam, který byl přenášený přes desktopovou aplikaci Microsoft HoloLens² a byla také nahrávána zvuková stopa, vše se souhlasem účastníka. Záznam sloužil pro potřeby experimentu, abych mohl zpětně sledovat, jak účastník využíval daných možností u jednotlivých návrhů.

5.2 Experiment

Experiment byl rozdělen do tří částí. Každá část se věnovala jednomu z návrhů popsáných v sekci 4.3. V jednotlivých částech účastník absolvoval nejprve tréninkový proces a poté se snažil splnit zadaný úkol. V tréninkovém procesu se účastník seznámil s prostředím a vybraným návrhem a po dobu maximálně 5 minut mu bylo umožněno manipulovat s robotem. V rámci druhé fáze bylo nezbytné splnit jednoduchý úkol, který spočíval v přemístění koncového bodu robotického ramene na pozici digitální kostky, vytvořené právě pro tento experiment. Digitální kostka v rozšířené realitě reprezentovala bod, od kterého bylo snadné dopočítat pomocí Unity funkce *Vector3.Distance* vzdálenost od koncového bodu robota. V průběhu plnění úkolů byl měřen čas a přesnost pozice robotického ramene vůči digitální kostce. Čas byl zastaven v době, kdy byl účastník spokojen s umístěním robotického ramene a odklikl tlačítko „Confirm“ zobrazené ve scéně poblíž manipulační osy. Digitální kostka na své horní straně měla znázorněný střed, odkud byla poté měřena přesnost. Každý z účastníků experimentu dostal jiné pořadí návrhů, pomocí kterých se snažil dokončit zadaný úkol. Důvodem bylo zamezení případů, kdy se v první části účastník ještě mohl seznamovat s manipulací a při vykonávání posledního úkolu by mu manipulace po předchozích zkušenostech už nemusela dělat problém. V takovém případě by mohlo dojít k ovlivnění výsledků experimentu.

5.3 Vyhodnocení

Experimentu se zúčastnilo 8 dobrovolníků ve věku 20 – 25 let. 87,5 % účastníků uvedlo, že nemají žádnou, nebo mají minimální zkušenost s rozšířenou realitou a brýlemi pro rozšířenou realitu, jako jsou například Microsoft HoloLens 2. To samé platí i se zkušenostmi

²<https://apps.microsoft.com/detail/9nblggh4qwnx?hl=cs-CZ&gl=CZ>

	Tabulka		Objekty u os		Slider	
	Čas	Vzdálenost	Čas	Vzdálenost	Čas	Vzdálenost
Subjekt 1	115,82	2,4	59,17	1,8	80,54	1,6
Subjekt 2	94,9	4	54,15	2,2	51,32	5,9
Subjekt 3	106,53	2	96,8	1,9	124,8	0,5
Subjekt 4	62,1	4,3	106,04	3,2	72,17	5,5
Subjekt 5	16,9	6,3	33,1	6,1	28,53	3,1
Subjekt 6	126,34	1	80,57	0,4	47,63	1,9
Subjekt 7	74,2	1,3	47,97	1,4	73	1,5
Subjekt 8	71,21	3,6	49,15	5,4	50,91	2,7
Průměr	83,5	3,1	65,87	2,8	66,11	2,8

Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty získané při porovnání návrhů. Měřený čas je vyjádřen v sekundách, vzdálenost je vyjádřena v milimetrech.

s roboty. Dva z nich v demografickém dotazníku uvedli, že trpí krátkozrakostí. Během plnění úloh byla měřena přesnost pozicování a délka trvání celého procesu. Součástí testování byl dotazník NASA-TLX [5], který zkoumá pracovní zátěž při vykonávání úkolů. V tomto případě ho účastníci vyplnili po každém absolvovaném řešení. Pro zhodnocení návrhů a zpětnou vazbu byl vytvořen vlastní dotazník, který se zaměřil na uživatelskou přívětivost jednotlivých návrhů (viz příloha C.1).

Naměřené hodnoty

V příložené tabulce 5.1 jsou zobrazeny naměřené hodnoty, na jejichž základě jsou následně z těchto dat dopočítány časové průměry a průměrné vzdálenosti. Řešení s tabulkou účastníkům zabralo průměrně 83,5 sekund a průměrná vzdálenost dvou měřených bodů byla 3,1 mm. V řešení s objekty u os z dat vyplývá, že průměrný čas dosáhl na necelých 66 sekund a vzdálenost se průměrně lišila o 2,8 mm. V řešení se sníženou citlivostí byla naměřena stejná průměrná vzdálenost jako u předchozího řešení, ale průměrný čas byl delší než u již zmíněné varianty.

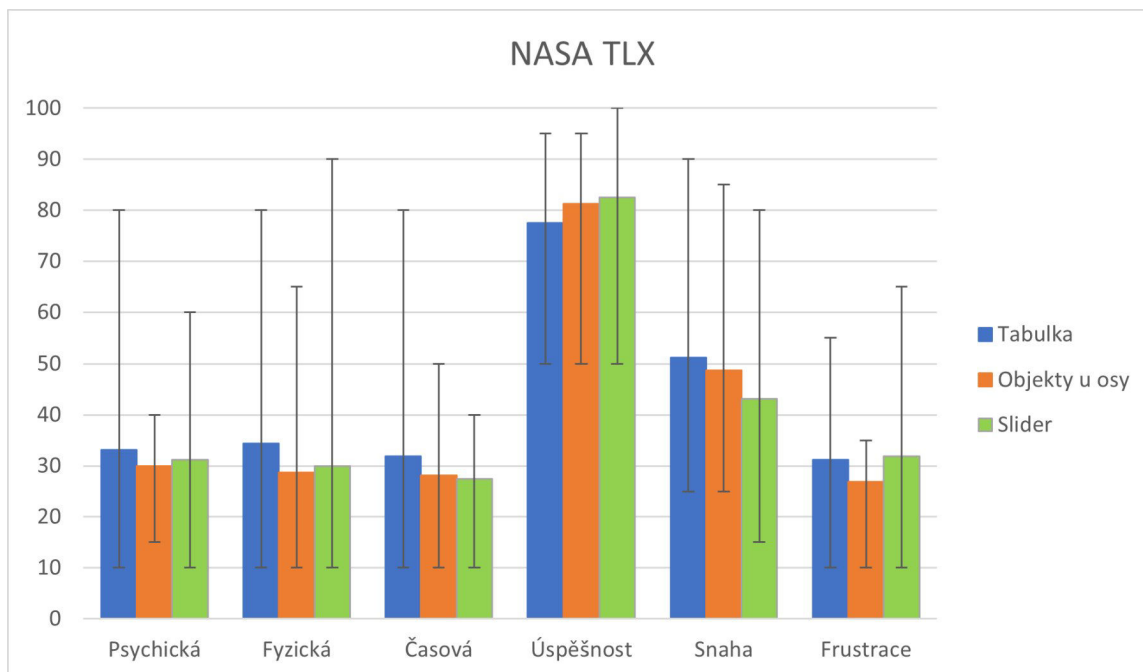
Zátěž při plnění úloh

Z výsledků dotazníku NASA-TLX (Obrázek 5.1) dopadlo řešení s tabulkou téměř ve všech případech nejhůře. Toto řešení mělo nejvyšší psychickou a fyzickou zátěž a potřebovalo nejvíce snahy, která se také projevila na časové náročnosti. Z dat u tohoto řešení vyplývá i nejmenší úspěšnost a obsadilo druhé místo v oblasti frustrace, kde jen o malý kousek „vyhrálo“ řešení se sliderem.

Naopak nejlépe hodnocená v oblasti psychické a fyzické zátěže dopadla metoda s objekty u os a také byla tato metoda nejméně frustrující. V ostatních pozorovaných oblastech však trochu zaostávala s porovnáním se sliderem, který měl nejmenší časovou náročnost, největší pocitovou úspěšnost a účastníci se u tohoto postupu museli nejméně snažit.

Porovnání

V celkovém porovnání jednotlivých řešení mezi sebou (Obrázek 5.2) vyplývá, že nejlépe hodnoceným řešením je slider, který získal v přepočtu nejvíce kladných ohlasů. O druhé



Obrázek 5.1: Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při měření zátěže u jednotlivých návrhů.

místo se dělí zbylé dva přístupy. Pro vyhodnocení byly přiřazeny hodnoty pro každé umístění (nejlepší = 1, střední = 0,5, nejhorší = 0). Výpočet koeficientu je daný následovně:

$$koeficient = pocetNejlepsi * 1 + pocetStredni * 0,5 + pocetNejhorsi * 0$$

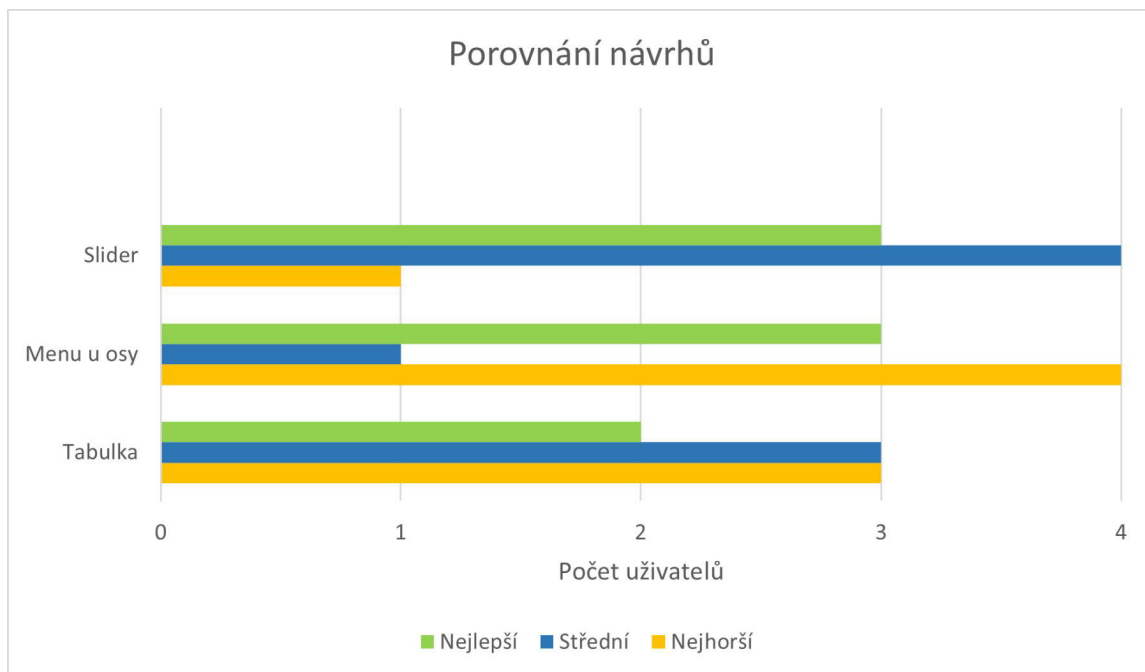
Po dosazení do vzorce koeficientu vyjde hodnota pro tlačítka u os a tabulku shodně s hodnotou 3,5.

Poznatky účastníků

V poslední fázi testování dostali účastníci prostor pro jejich poznatky. Vyjádřit se mohli jak k jednotlivým návrhům, tak i k celkovému řešení. Slider byl na základě zpětné vazby zvolen jako nejlepší řešení pro manipulaci díky možnosti snížení rychlosti. Pro přesné doladění pozice robotického ramene byl zvolen návrh s tlačítky u vybrané osy. Zajímavým poznatkem však bylo spojení slideru a objektů u os dohromady do jednoho řešení. Tato informace se vyskytla u 62,5 % výpovědí. Dále účastníci přišli s návrhem, u kterého by objekt reprezentující koncový bod robota měl větší manipulační pole, tedy by ho bylo snazší v rozšířené realitě uchytit. V tabulkovém řešení padly návrhy ohledně zvolené hodnoty skoku. Místo tlačítek s variantou čísel 1–5 by tabulka měla spíše obsahovat možnost si zvolit hodnotu dle vlastních potřeb pomocí posuvníku nebo tlačítek pro přidání a odebrání hodnoty.

Závěr

Do celkového vyhodnocení návrhů byly brány v potaz všechny data a informace, které byly během testování shromážděny. Statisticky řešení s tabulkou dopadlo nejhůře. Ze shromážděných dat jednoznačně vyplývá její náročnost při použití a další parametry jako časová náročnost či uživatelská zkušenost se dají považovat za neuspokojivé.



Obrázek 5.2: Graf zobrazující porovnání návrhů pro přesnou manipulaci na stupnici od nejlepšího po nejhorší s počtem hlasů.

Objekty umístěné u os spolu se sliderem získaly poměrně podobné hodnocení. Časová náročnost u těchto dvou způsobů byla v podstatě shodná a naměřená přesnost totožná. Slider sice o něco lépe dopadl v porovnání návrhů, ale pro přesné zadávání pozice robotického ramene se ukázalo, že je nejvíce vyhovující řešení s manipulačními tlačítky u os. Avšak na základě zpětné vazby od účastníků experimentu bylo jako finální řešení vybráno sjednocení právě těchto dvou zmíněných variant s menšími změnami.

Během testování se ukázalo, že výběr jiných jednotek než milimetrů není potřeba, ve všech případech se využití pro centimetry nebo decimetry nenašlo. Proto ve výsledném řešení bude odstraněna možnost výběru jednotek, takže z původního menu tlačítek z návrhu objektů u os bude zachována jen vizualizace tlačítek (+, -) pro přesunutí robotického ramene o jeden milimetr. Následně do finálního sjednocení bude přidáno větší manipulační pole pro pohyb koncového bodu ramene ve všech směrech, protože se převážně u lidí s malou zkušeností s rozšířenou realitou vyskytl problém s uchycením tohoto objektu. Funkcionalita slideru s volbou rychlosti pohybu bude zachována beze změn.

Kapitola 6

Implementace

Kapitola se věnuje implementaci manipulace s robotem v projektu AREditor pro Microsoft HoloLens 2 [7], na který tato práce navazuje. Před samotnou implementací zadání bylo nutné aktualizovat projekt a aplikovat nové změny pro zajištění kompatibility u stále vyvíjejícího se systému ARCOR2¹. V kapitole je popsáno finální řešení manipulace, které vzniklo na základě výstupu z testování 5.3 při porovnání rozdílných způsobů, jak docílit přesného pozicování robotického ramene. Ostatní nevyhovující řešení byla po vyhodnocení odstraněna.

Pro vývoj aplikace byl použit herní engine Unity s podporou programovacího jazyka C#. Unity nabízí podporu nástrojů pro rozšířenou realitu jako je sada nástrojů MRTK², která má v řešení důležitou roli. Během procesu implementace bylo pro vývojářské potřeby využíváno možnosti Holographic Remoting³, která umožňuje vývojářům streamovat a ladit obsah z počítače bez opakovaného nasazování aplikace na HoloLens zařízení.

Kapitola ve svém začátku 6.1 popisuje chování a moduly AREditoru. Následuje sekce věnována implementaci manipulace 6.2, kde je vysvětlen obecný princip manipulování. Dále je v sekci popsána implementace přesného umístění 6.3, která popisuje koncept přesouvání robota za pomoci manipulačních tlačítek a slideru. O realizaci ošetření limitů robota se věnuje sekce 6.4. Do řešení byla přidána možnost zobrazení zpráv a její podrobnosti jsou popsány v sekci 6.5. V závěru kapitoly v sekci 6.6 jsou doplněny poznatky, jež by zlepšily či doplnily další prvky pro manipulaci.

6.1 Chod aplikace

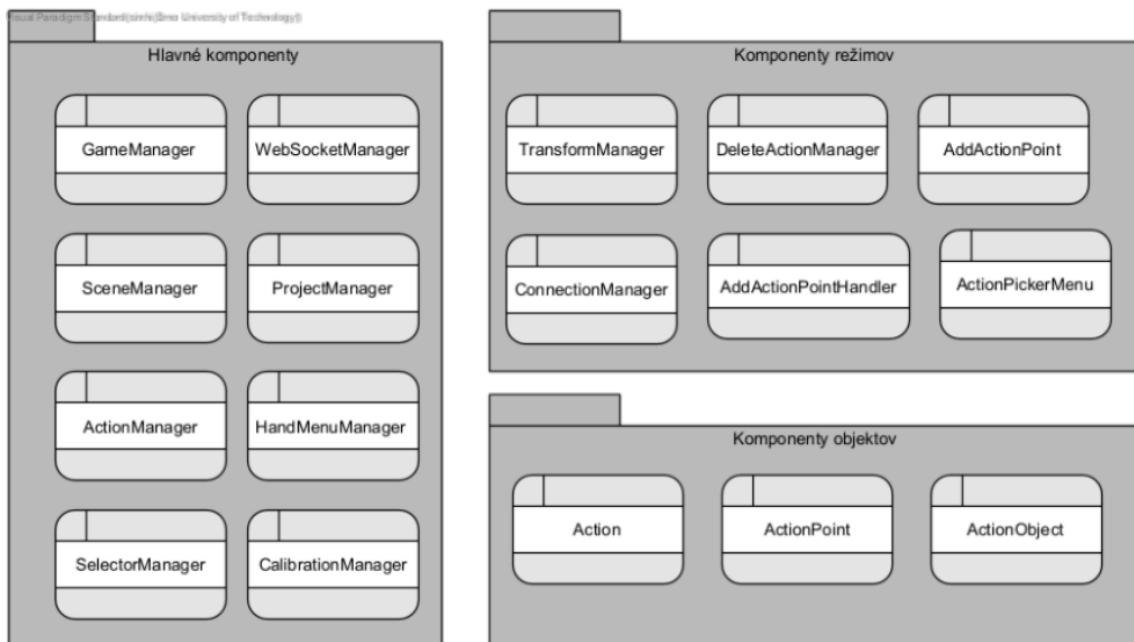
Jak už bylo zmíněno dříve, implementace navazuje na již existující projekt AREditoru pro Microsoft HoloLens 2. Aplikace je ve stavu, kdy je možné vytvářet scény robotických pracovišť, přidávat roboty, přepínat mezi scénou a projektem a vytvářet akční body spolu s akcemi. O celé fungování aplikace se stará několik hlavních komponent (viz obrázek 6.1).

- **GameManager** – Hlavní řídicí orgán aplikace. Stará se o aktuální stav, připojení do aplikace nebo načítá prostředí scény a projektu.
- **WebSocketManager** – Hlavní komponenta pro komunikování se serverem. Posílá na server požadavky a zachytává odpovědi v JSON formátu.

¹<https://github.com/robofit/arcor2>

²MRTK - Mixed Reality Toolkit

³<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/develop/native/holographic-remoting-overview>

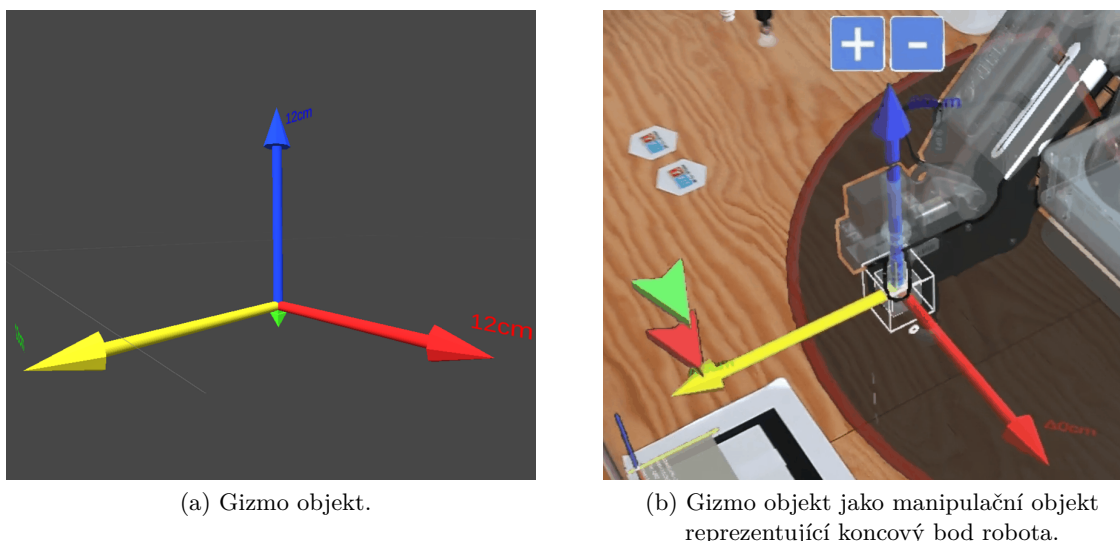


Obrázek 6.1: Obrázek zobrazující komponenty aplikace AREditor. Převzato z [7].

- **CalibrationManager** – Stará se o načtení dat z markeru a následné ukotvení prostředí.
- **HandMenuManager** – Slouží jako hierarchická struktura pro přepínání mezi různými částmi aplikace (přidání objektu, zobrazení scén, apod.).
- **SceneManager** – Stará se o správu scény, umožňuje přidávat/odstraňovat roboty a kolizní objekty.
- **ProjectManager** – Stará se o správu projektu, přidává/odstraňuje akční body spolu s akcemi (pick, place, move, apod.), které po propojení vytváří spustitelný program.
- **ActionManager** – Uchovává si záznam pro všechny typy objektů (robot, posuvný pás, apod.).
- **SelectorManager** – Stará se o přepínání režimů a spouští potřebné funkce pro vykonání zvoleného režimu.

6.2 Implementace manipulace

Pro vytvoření logiky manipulace s koncovým bodem robota byl vytvořen nový manager s názvem *HEndEffectorTransform*. V prvotní fázi však bylo potřeba doplnit funkce i do ostatních komponent. Do objektu menu ruky bylo mezi hlavní nabídku přidáno tlačítko výběru manipulace. Stejně jako pro každé tlačítko je v manageru *HandMenuManager* přidán *Listener*, který naslouchá událostem stisknutí tlačítka. Protože zde dochází k selekci robota, je nutné přidat operační schopnost i do skriptu *SelectorManager*, jenž při výběru robota zamezí ostatním uživatelům souběžně pracovat s tímto objektem.



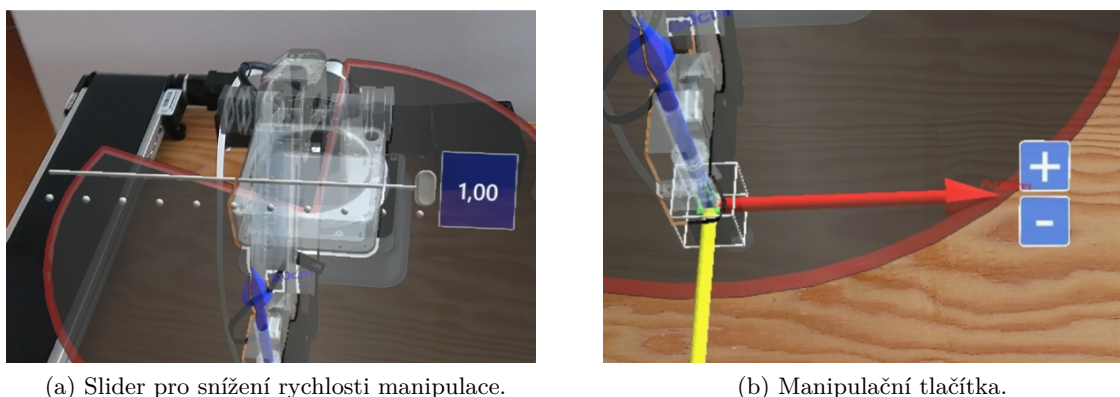
Obrázek 6.2: Vizualizace gizmo objektu.

Manipulace

Pro začátek manipulace je nutné stisknout tlačítko manipulace a následně vybrat robota, kterého máme v plánu ovládat. Zároveň se musí aplikace nacházet v online režimu. Jestliže není online režim aktivní, je zasláno uživateli oznámení s příslušnou zprávou. Protože manipulace s robotickým ramenem probíhá za pomoci koncového bodu, je na jeho pozici po vybrání robota zobrazen tříosý objekt (gizmo viz obrázek 6.2), který má ve svém průsečíku os znázorněn holografický objekt reprezentující virtuální koncový bod robota. Gizmo se skládá ze tří os (X, Y, Z), kde každá jeho osa v sobě obsahuje skripty *ObjectManipulator* a *NearInteractionGrabbable* ze sady nástrojů MRTK pro umožnění manipulace v rozšířené realitě. Pro zabránění pohybu os ve všech směrech je ke každé ose k jejímu objektu připojen skript *MoveAxisConstraint* a jsou nastaveny jeho vlastnosti tak, aby omezil pohyb v souladu s požadovaným směrem. Kromě toho má každá osa svůj vlastní objekt indikátoru pohybu v podobě textu nacházejícího se na konci každé osy. Hodnota indikátoru se mění v závislosti na pohybu a slouží pro znázornění délky vykonaného pohybu. Jak už bylo zmíněno dříve, v průniku tří os se nachází objekt, který znázorňuje koncový bod robota. Tento objekt má v sobě obsažen skript *ObjectManipulator* a umožňuje pohyb do všech směrů bez omezení.

Model robota

V průběhu manipulace se hýbe pouze holografický objekt robota. Důvodem je bezpečnější přístup, při kterém se přesune fyzický robot až po potvrzení polohy holografického zobrazení. Velkou roli zde hraje výpočet inverzní kinematiky na straně serveru. Klient pošle na server RPC požadavek s parametry jako je ID robota, koncový bod robota, jeho polohu a orientaci v prostoru a server po úspěšném výpočtu vrátí hodnoty kloubů robota. Parametr polohy v prostoru je dán souřadnicemi manipulačního objektu. Pokud server nezvládl vypočítat hodnoty kloubů, znamená to, že se robot není schopný do daného místa přemístit.



(a) Slider pro snížení rychlosti manipulace.

(b) Manipulační tlačítka.

Obrázek 6.3: Manipulační možnosti pro přesné umístění.

Potvrzovací menu

Potvrzovací menu bylo vytvořeno jako bezpečnostní prvek při manipulaci. Holografický objekt robota je ve scéně umístěn na stejném místě jako fyzický robot a v případě, kdy by se reálný robot hned od začátku přesouval s modelem robota, by nemusel být jeho koncový bod přes holografické zobrazení vidět. To by mohlo v krajních případech způsobit kolizi s ostatními objekty. Proto uživatel manipuluje v prvotní fázi jen s modelem robota a jeho fyzické přesunutí musí potvrdit tlačítkem „Confirm“ v potvrzovacím menu. Dále se v menu nachází tlačítko „Reset“, které vrátí model robota na jeho poslední umístění v prostoru před začátkem manipulace.

6.3 Implementace přesného umístění robota

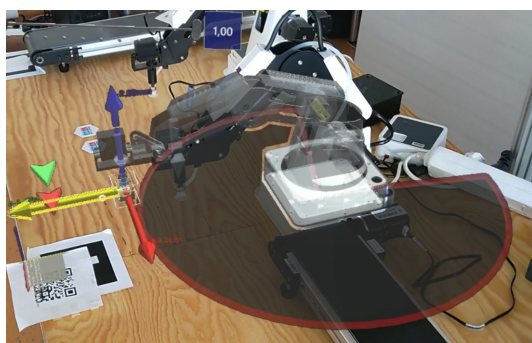
Implementace přesného umístění vychází z vyhodnocení experimentu 5.3, který zkoumal použitelnost návrhů pro přesné zadávání pozice robotického ramena. Přemístění robota na místo s milimetrovou přesností by sice šlo i v případě základní manipulace, ale proces by byl značně delší a náročnější zejména pro méně zkušené uživatele.

Jednou z možností je manipulace za pomoci tlačítek (+, -), které posouvají model robota skokově, dalším přístupem je snížení rychlosti základního manipulačního objektu (viz obrázek 6.3).

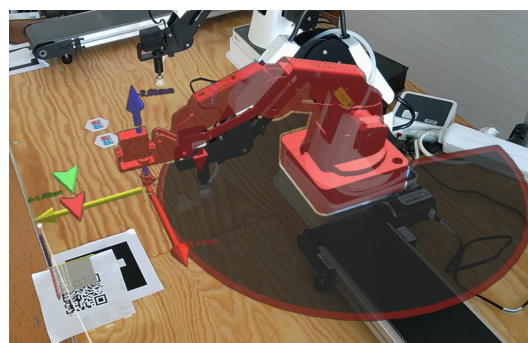
Tlačítka u os

Pro přesouvání modelu robota za pomoci tlačítek byl vytvořen skript *HAQxisMenu*. Manipulační tlačítka jsou zobrazena pouze u vybrané osy. Vybrat osu je možné přímým kontaktem s objektem nebo namířením vzdáleného kurzoru na objekt. Skript využívá třídu *CoreServices* k detekci objektů. Tato třída poskytuje informace o kolizních objektech ve scéně pomocí detekce kurzoru.

Manipulační tlačítka pak posouvají koncový bod robota o 1 mm daným směrem, kde tlačítko (+) přesouvá skokově model vždy se směrem osy a tlačítko (-) proti směru osy.



(a) Vizualizace rozsahu robotického ramena na ploše stolu.



(b) Vizualizace změny barvy materiálu.

Obrázek 6.4: Znázornění limitů robota.

Snížená citlivost

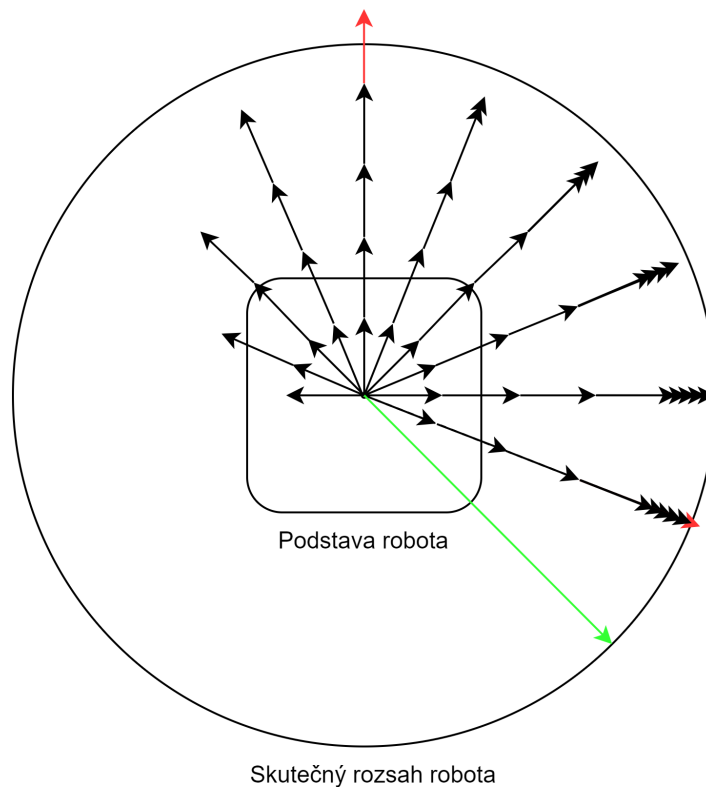
Další variantou pro účely přesného pozicování robotického ramene je snížení rychlosti původního manipulačního objektu. Uživatel si vybírá míru rychlosti pomocí slideru, který se nachází nad osou Y. Slider má definované hodnoty od 0 do 1. Hodnota 1 je základní rychlost manipulace, hodnota 0 zase zamezí jakémukoliv pohybu a model zůstane stát na stejném místě. Čím nižší bude zvolená hodnota, tím pomalejší bude přesouvání modelu robota.

Pro přesouvání objektů v rozšířené realitě se používá třída *ObjectManipulator*. Bohužel tato třída nenabízí možnou úpravu rychlosti nebo zaseknutí objektu na určitém místě. Právě z těchto důvodů bylo změněno chování základní manipulace. Kromě výchozího gizmo objektu byl vytvořen další gizmo objekt, který v sobě neobsahuje žádnou třídu ze sady MRTK nástrojů. Namísto toho byla k objektu připojena třída *HFollowObject*, jež umožní pohyb v závislosti na jiném objektu, který má následovat. Třída sleduje a v prostoru následuje pohyb jiného objektu. Mimo jiné dokáže měnit rychlost v závislosti na zvolené hodnotě pomocí slideru.

Manipulace tedy probíhá za využití dvou gizmo objektů. Původní gizmo objekt obsahuje sadu MRTK tříd a je možné s ním manipulovat, druhý gizmo objekt následuje pohyb původního gizmo objektu a dokáže měnit rychlost pohybu v závislosti na vybrané hodnotě slideru. Na začátku manipulace dochází ke skrytí původního gizma a vytvoření objektu „falešného“ gizma. Falešné gizmo simuluje pohyb toho skrytého. V případě nastavené hodnoty 1 v objektu slideru by oba gizmo objekty byly současně na stejné pozici po celou dobu. V jiném případě se však původní gizmo nachází na jiných souřadnicích než gizmo, které je při manipulaci vidět. Po ukončení manipulace se aktualizuje poloha původního gizmo objektu na pozici falešného a dochází k jeho zviditelnění, aby při další interakci bylo možné opět zahájit manipulaci. Falešný gizmo objekt je odstraněn.

6.4 Zobrazení a ošetření limitů robota

Aktuální projekt nenabízí možnost znát rozsah robotického ramene dopředu. Vše je založeno na výpočtu inverzní kinematiky na straně serveru. Pokud klient po zaslání požadavku pro výpočet inverzní kinematiky obdrží hodnoty pro jednotlivé klouby, znamená to, že do daného místa je pro robota možné se přesunout. V opačném případě je zpracována chyba o výpočtu. Řešení obsahuje dvě možnosti zobrazení limitů (Obrázek 6.4). Při dosažení li-



Obrázek 6.5: Znázornění výpočtu bodů pro objekt reprezentující rozsah robota na úrovni stolu. Průběh výpočtu je znázorněn krokově po směru hodin.

mitů v prostoru při manipulaci je robot obarven červenou barvou, další zobrazovací prvek je vytvořen na podstavě robota, jenž znázorňuje rozsah robotického ramene na pracovním stole.

Změna materiálu

Na začátku manipulace se ukládá poslední validní pozice, pro kterou byl úspěšně proveden výpočet inverzní kinematiky. S manipulačním objektem (gizmem) je volně umožněno se pohybovat v prostoru i přesto, že se robot na danou pozici není schopen přesunout. To může být z pozice uživatele matoucí, a proto je manipulační objekt při chybě výpočtu inverzní kinematiky vrácen na poslední validní pozici. Mimo jiné je dosažení limitů ramene znázorněno i změnou barvy materiálu robota. Po krátký časový úsek jsou všechny části robota obarveny červenou barvou.

Zobrazení rozsahu na stole

Rozsah na úrovni podstavy robota je znázorněn transparentním objektem s barevnou hranou, jež se zobrazí po kliknutí na daného robota. Jeho rozsah je vypočítán pomocí inverzní kinematiky. Jelikož výpočet celého objektu trvá značně déle, rozsahy pro všechny roboty nacházející se ve scéně projektu jsou vypočteny při načítání pracovního prostředí. Aplikace si ukládá typ robota a jeho poslední validní vzdálenosti od středu robota pro specifikované úhly. Pro zrychlení výpočtu nejsou počítány vzdálenosti pro každý úhel. V aktuálním řešení



Obrázek 6.6: Zobrazení textu upozornění.

probíhá výpočet pro každý osmý stupeň. Výpočet vzdáleného bodu je krokově znázorněn na obrázku 6.5. Od středu robota pod aktuálním úhlem je do výpočtu inverzní kinematiky poslána pozice, která je posunuta vždy o 5 cm do doby, než vrátí výpočet chybu. Pokud výpočet proběhne úspěšně, aktualizuje se nejvzdálenější platná pozice v daném úhlu. V případě neúspěchu dochází k překročení rozsahu robota. Vzhledem k tomu, že první fáze hledání pracovala s krokem 5 cm, nemusí být poslední validní bod v rozsahu toho nejvzdálenějšího. Výpočet je proto proveden ještě jednou s menším krokem (5 mm), se začátkem výpočtu na poslední validní pozici. Pokud scéna projektu již obsahuje typy robotů, které má aplikace uloženy, výpočet je přeskočen a hodnoty jsou použity z úložiště.

Po vybrání robota za účelem manipulace jsou z úložiště načteny hodnoty pro zobrazení rozsahového objektu. Na základě informací jsou dopočteny souřadnice bodů, které jsou následně propojeny a vykresleny komponentou *LineRenderer*. Pro vykreslení obsahu je vytvořen objekt složený z trojúhelníků, ke kterému je později přiřazen transparentní materiál.

6.5 Notifikace

Do řešení byla přidána možnost vizualizace zpráv z aplikace (Obrázek 6.6). Notifikace slouží jako předání informací o stavu aplikace pro uživatele. V aktuálním řešení je notifikace použita k upozornění uživatele na potřebu zapnutí online režimu nebo v případech, kdy se robot nemůže přesunout na danou pozici. Řešení notifikací je nicméně univerzální a může být aplikováno v široké škále situací.

Přímo do scény v Unity byl vytvořen objekt obsahující text, ke kterému byl následně připojen skript *HNotificationWindow*. Tento skript obsahuje dvě metody. Pro zobrazení upozornění je volána metoda *ShowNotification*, která zviditelní objekt ve scéně a zároveň nastaví text upozornění. Tato metoda současně volá *HideNotification* metodu, jež za použití rozhraní *IEnumerator* asynchronně nastaví čas, po který bude upozornění skryto.

6.6 Nápady do budoucna

V této sekci jsou popsány postřehy, které by zlepšily proces manipulování s robotem. Poznámky ke zlepšení jsou jak mé vlastní, tak i posbírané od účastníků během obou testování.

Ukotvení robotů

V aktuálním řešení AREditoru se robot do scény přidává ručně. Člověk se snaží umístit jeho holografický model na pozici fyzického robota, ale ve většině případů se mu nepodaří umístit jeho model přesně na požadované místo. Objekt, který má znázornit rozsah robota na pracovním stole je počítán ve výšce stolu podle přiloženého markeru. V případě, kdy byl model robota umístěn v jiné výšce, nebude vizualizace limitů změnou materiálu spolu s rozsahem za pomoci objektu kompatibilní. Koncový bod robota by v tomto případě mohl být přesunut až za hranici zobrazeného objektu rozsahu.

Výpočet inverzní kinematiky

Aktuální řešení ARCOR2 systému nabízí výpočet inverzní kinematiky pouze pro robota typu Dobot Magician. V prostředí se však nachází i robot typu Dobot M1, se kterým se aktuálně nedá manipulovat. Pro budoucí využití celého robotického pracoviště je zapotřebí doplnit možnost výpočtu inverzní kinematiky i pro zbylého robota, nebo najít existující framework, který by byl kompatibilní a doplnil by chybějící funkčnost manipulace pro robota M1.

Dále je potřeba upravit výpočet inverzní kinematiky pro robota Magiciana. Při manipulaci může být model robota nastaven do poloh, kterých skutečný robot nedosáhne. Chybovost jde například vidět u zobrazení objektu, jenž má simulovat rozsah robota na pracovním stole. Dle technických informací by měl být rozsah souměrný, avšak aktuální výpočet inverzní kinematiky pro model robota vrací validní hodnoty i pro polohy dávno za limitem fyzického robota.

Kapitola 7

Závěrečný experiment

Tato práce měla za úkol implementovat možnost manipulace s robotickým ramenem v rozšířené realitě za pomoci technologie Microsoft HoloLens 2 a následně porovnat výsledek s existujícím řešením AREditoru pro tablet. Pro porovnání byl vytvořen experiment zahrnující jednoduchý úkol, který spočíval v nakreslení čtverce za pomoci robota. Časový průběh testování s jeho harmonogramem se nachází v sekci 7.1. Vyhodnocení experimentu a získaných dat během testování je popsáno v sekci 7.2 spolu s poznatky účastníků.

7.1 Popis a postup experimentu

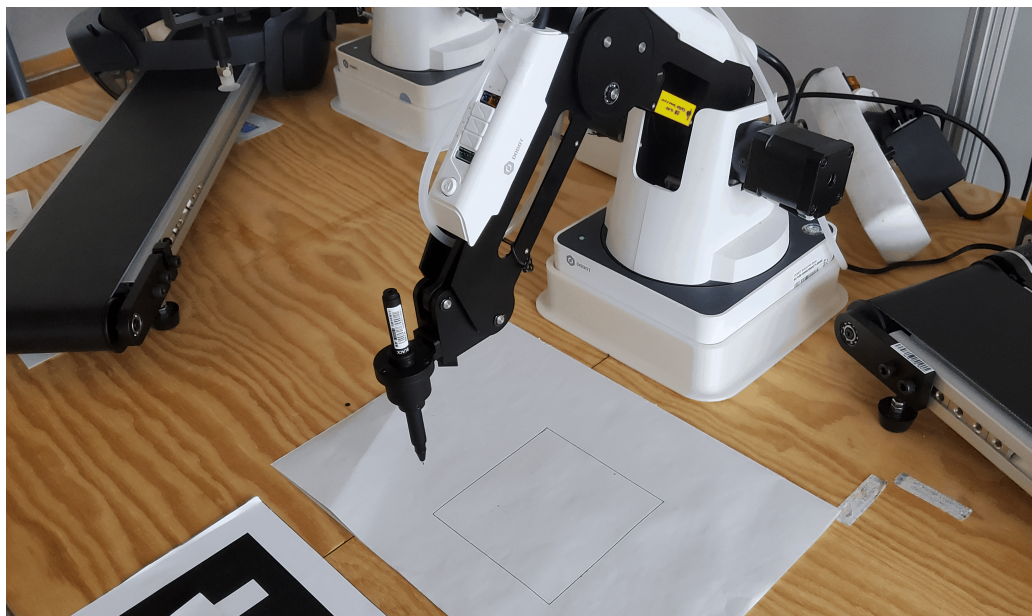
Experiment byl koncipován s cílem provést srovnání ovládání robotickým ramenem mezi dvěma rozhraními AREditoru. Jako prostředek pro tabletové použití bylo zvoleno zařízení Samsung Galaxy Tab S6, zatímco ve druhém případě bylo testování realizováno s využitím zařízení Microsoft HoloLens 2. Použitým robotem pro testování byl Dobot Magician, který byl umístěn uprostřed robotického pracoviště. Ke koncovému bodu robota byl připevněn nástavec s fixem. Před začátkem testování byl vytvořen plán, jenž určuje průběh celého experimentu:

1. Vyplnění demografického dotazníku.
2. Seznámení s experimentem.
3. Seznámení s aplikací A.
4. Tréninkový proces v aplikaci A.
5. Provedení experimentu ve zvolené aplikaci.
6. Vyplnění dotazníků NASA-TLX a SUS pro zvolenou aplikaci.
7. Seznámení s aplikací B.
8. Tréninkový proces v aplikaci B.
9. Provedení experimentu ve zvolené aplikaci.
10. Vyplnění dotazníků NASA-TLX a SUS pro zvolenou aplikaci.
11. Vyplnění dotazníků s doplňujícími otázkami.

Na začátku testování dostal každý z účastněných k vyplnění demografický dotazník (viz příloha B.1). Po jeho vyplnění došlo k vysvětlení záměru porovnávací studie. Následně byl každý z účastněných rozdělen do jedné ze dvou skupin. První skupina začínala se zařízením Microsoft HoloLens 2 a poté přešla na manipulaci s tabletovým zařízením. Druhá skupina naopak začínala s tabletem a končila s HoloLens.

V prvotní fázi se účastník seznámil s aplikací na daném zařízení a prošel si tréninkovým procesem. Po seznámení absolvoval jednoduchý úkol spočívající v propojení čtyř bodů na kusu papíru, které po propojení vytvořily čtverec. Poté subjekt vyplnil dva dotazníky týkající se práce s aktuální aplikací. Prvním dotazníkem byl NASA-TLX (NASA Task Load Index), ve kterém byla zkoumaná celková zátěž během vykonávání úlohy. Druhým nástrojem byl SUS (The System Usability Scale) dotazník, který je zaměřen na použitelnost aplikace.

Celý předchozí proces od seznámení s aplikací až po vyplnění dotazníků subjekt podstoupil ještě jednou s rozhraním na rozdílném zařízení. Konečnou částí byl dotazník vytvořený z několika vlastních tvrzení a subjekt měl vyjádřit míru souhlasu s těmito otázkami (otázky je možné vidět v grafu 7.5). Poté se mu dostalo prostoru vyjádřit svůj postoj k rozhraním.



Obrázek 7.1: Vizuální zobrazení experimentu kreslení čtverce.

Samotný experiment měl kromě zátěže a použitelnosti zkoumat více odlišných aspektů. Jedním z nich byla časová náročnost, která se měřila od přesunutí robotického ramene doboty Magiciana volně do prostoru až po propojení všech bodů vzniklého čtverce. Dalším faktorem byl počet vykonaných kroků přesunu robota nebo měřená přesnost propojených bodů.

7.2 Vyhodnocení

Testování se zúčastnilo 8 lidí ve věku 20 – 23 let, z toho 7 subjektů bylo mužského pohlaví. Tento počet účastníků byl rozdělen do dvou skupin. Skupina A začínala s manipulací se zařízením HoloLens a skupina B s tabletem. V obou skupinách se vyskytli lidé s aspoň ně-

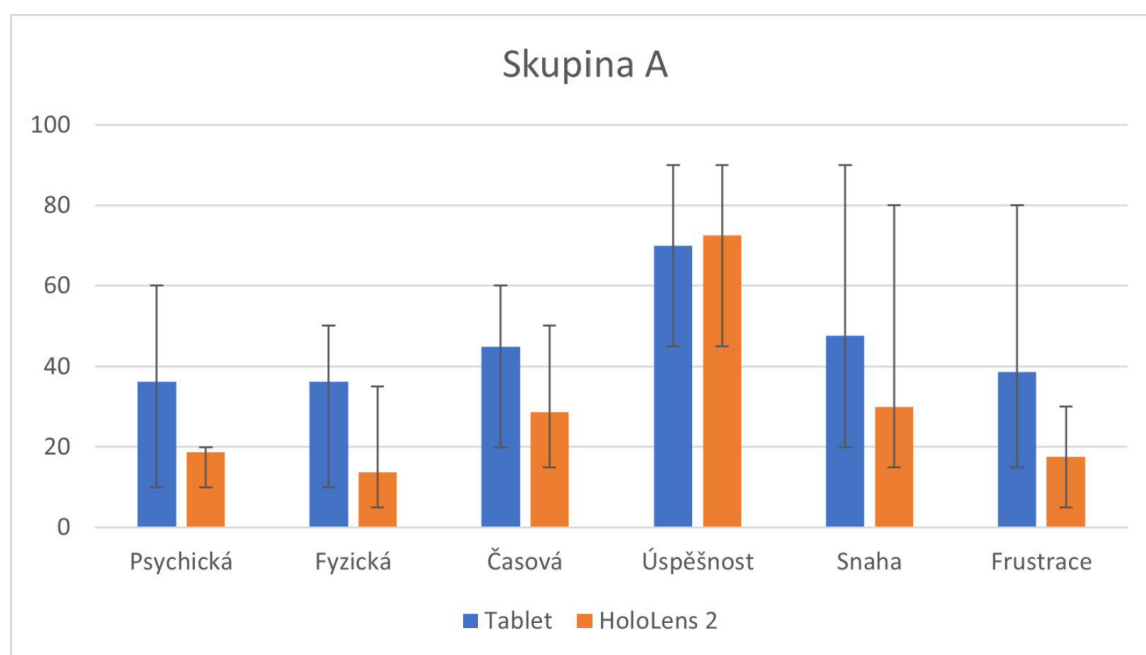
jakou zkušeností s roboty, rozšířenou realitou nebo náhlavními zařízeními. Bližší informace jsou uvedeny v tabulce 7.1

Skupina	Účastník	Věk	Pohlaví	Vzdělání
Skupina A	Subjekt 1	23	Žena	středoškolské (maturita)
	Subjekt 2	20	Muž	středoškolské (maturita)
	Subjekt 3	20	Muž	středoškolské (maturita)
	Subjekt 4	22	Muž	bakalářské
Skupina B	Subjekt 5	23	Muž	bakalářské
	Subjekt 6	23	Muž	bakalářské
	Subjekt 7	23	Muž	středoškolské (maturita)
	Subjekt 8	23	Muž	středoškolské (maturita)

Tabulka 7.1: Tabulka zobrazující data z demografického dotazníku a rozdělení účastníků do skupin.

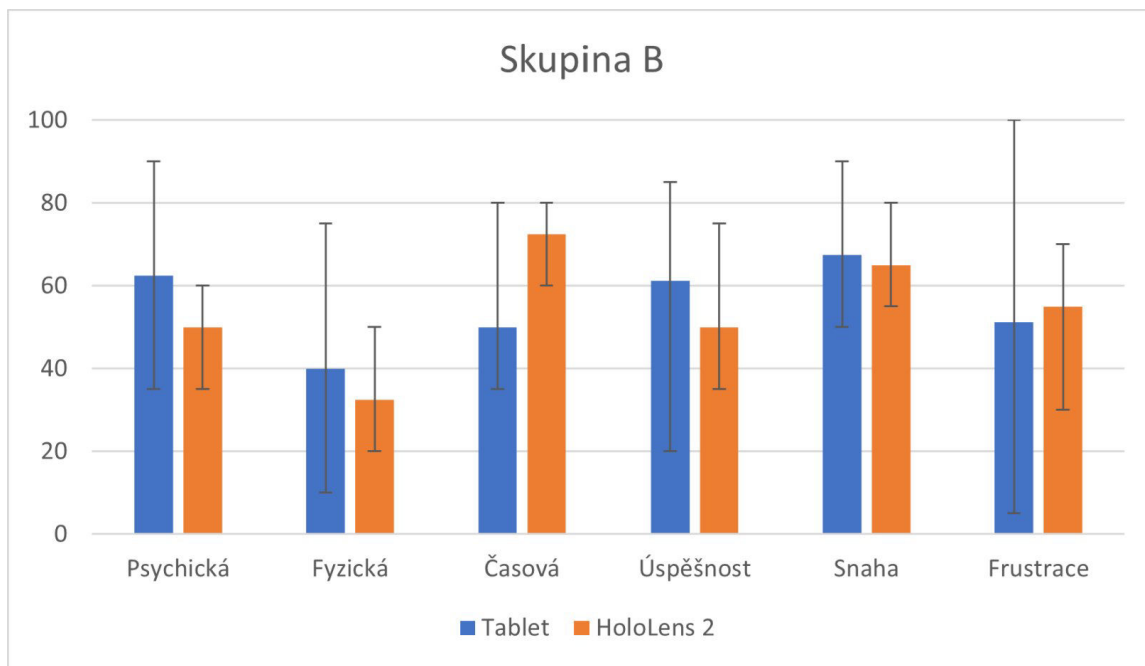
Zátěž

Zátěž byla vyhodnocena pomocí dotazníku NASA-TLX bez přidané váhy k jednotlivým aspektům. Jak lze vidět v grafu 7.2 pro skupinu A, uživatelům přišlo ve všech aspektech tabletové řešení náročnější a cítili se s ním i o něco málo úspěšnější.



Obrázek 7.2: Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2 u skupiny A.

Oproti tomu skupina B (Obrázek 7.3), která začínala s tabletem, shledala v určitých stránkách řešení v HoloLens 2 jako problémovější. Sice jim toto řešení přišlo méně náročné z pohledu psychické a fyzické stránky, ale časová náročnost, úspěšnost nebo frustrace dopadla v porovnání hůře.



Obrázek 7.3: Graf zobrazující průměrné hodnoty spolu s rozsahem minimální a maximální hodnoty získané z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2 u skupiny B.

Po zprůměrování dat obou skupin dochází k závěru, že se účastníkům s tabletem v průběhu testování zdálo, že byli schopni vykonat úlohu v kratším časovém úseku a také s ním byli o něco úspěšnější. Ve všech ostatních aspektech měla manipulace v AREditoru pro HoloLens kladnější hodnocení (Obrázek 7.4).

Použitelnost

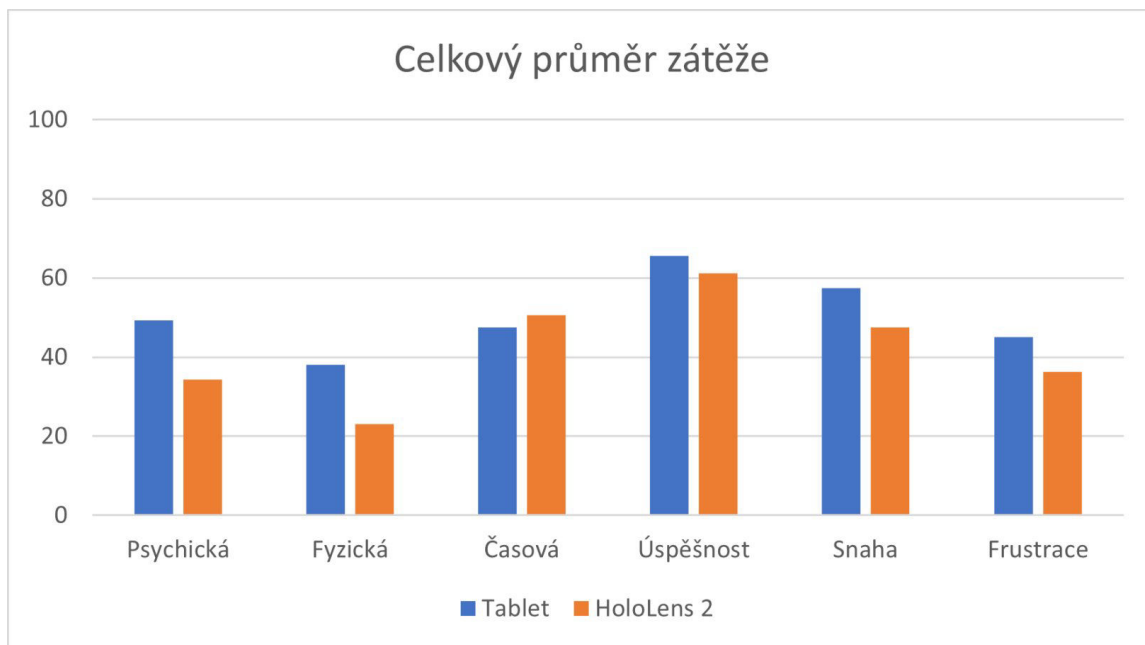
Použitelnost rozhraní byla zkoumána dotazníkem SUS, jenž se zabývá k měření použitelnosti softwarových systémů a aplikací. Dotazník se skládá z 10 tvrzení, která se týkají obecných aspektů použitelnosti [21]. Odpovědi jsou zaznamenávány na výběrové škále 1 až 5 dle míry souhlasu. Ze shromážděných odpovědí je vypočítáno celkové SUS skóre v rozmezí 0 až 100. Výpočet skóre je dán následujícím vztahem:

$$score = ((oddstatements - 5) + (25 - evenstatements)) * 2,5$$

K dosažení skóre z odpovědí jsou sečteny hodnoty lichých otázek a od nich je odečteno číslo 5. Hodnota sudých otázek je odečtena od čísla 25. Celkové skóre je vypočteno součtem koeficientů pro sudé a liché otázky a vynásobeno hodnotou 2,5. Toto skóre je dále porovnáno se skórem SUS (Tabulka 7.2) určujícím použitelnost systému. Vyšší skóre naznačuje vyšší úroveň použitelnosti.

SUS skóre	Interpretace
< 50	Nedostačující
50 – 70	Okrajové
> 70	Přijatelné

Tabulka 7.2: Tabulka zobrazující interpretaci skóre SUS dotazníku [21].



Obrázek 7.4: Graf zobrazující průměrné hodnoty obou skupin z dotazníku NASA-TLX při porovnání manipulace mezi tabletem a technologií Microsoft HoloLens 2.

Z dat poskytnutých v tabulce 7.3 je vidět, že rozhraní pro HoloLens 2 získalo lepší hodnocení v porovnání použitelnosti. Rozmezí SUS skóre pro tablet se pohybovalo od 27,5 do 80,5 a jeho průměrné skóre činilo po zaokrouhlení 60,6 bodů, což se řadí do prostřední skupiny použitelnosti. O rozhraní pro HoloLens 2 lze díky jeho průměrnému skóre 74,1 říct, že patří do skupiny přijatelných aplikací.

	Tablet	HoloLens 2
Subjekt 1	52,5	62,5
Subjekt 2	57,5	70
Subjekt 3	77,5	95
Subjekt 4	80,5	95
Subjekt 5	65	67,5
Subjekt 6	50	60
Subjekt 7	27,5	52,5
Subjekt 8	75	90
Průměr	60,6	74,1

Tabulka 7.3: Tabulka zobrazující SUS skóre jednotlivých účastníků a celkové průměrné SUS skóre ze všech dotazníků.

Naměřené hodnoty

Jiným faktorem při porovnávání těchto dvou rozhraní jsou naměřené hodnoty získané během testování (Tabulka 7.4). Čas byl měřen od chvíle, kdy bylo ručně přesunuto robotické rameno na startovací pozici, do doby, než byly propojeny všechny body. Z dat je vidět, že

při použití tabletového zařízení se účastněným podařilo splnit úkol o necelých 46 sekund rychleji.

Další měřenou hodnotou byl počet kroků, které musel robot při kreslení vykonat. V tomto případě se u tabletového řešení robot přesouval dvakrát více než u HoloLens. Příčinou tak vysokého počtu kroků u tabletu je omezení pohybu pouze v šesti směrech (nahoru, dolů, dopředu, dozadu, doprava, doleva). V brýlích je umožněna manipulaci všemi směry bez omezení.

Přesnost byla měřena výpočtem obsahu z rohů nakresleného útvaru. Důvodem byl mírně nahnutý stůl a nerovnosti na jeho povrchu, jež občasně způsobovaly, že robot místo rovné čáry nakreslil půloblouk. Na papíře byl znázorněn čtverec čtyřmi body, které byly od sebe umístěny 7,5 cm. Tablet v tomto porovnání dopadl o něco lépe, kreslení s jeho použitím bylo s přesností 99,8 %. S technologií HoloLens 2 byla průměrná úspěšnost uživatelů 97,5 %. Míra nepřesnosti v procentech je určena tak, že nejdříve byl vyjádřen rozdíl mezi obsahem nakresleným a obsahem původním ($56,25 \text{ cm}^2$), který jsem vydělil původním obsahem ($56,25 \text{ cm}^2$) a převedl na procenta (hodnota * 100). Přesnost měření jsem určil tak, že jsem nepřesnost uvedenou v procentech odečetl od maximální přesnosti (100 %).

	Tablet	HoloLens 2
Čas (s)	310,5	356
Kroky	56,25	28,25
Přesnost (%)	99,8	97,5

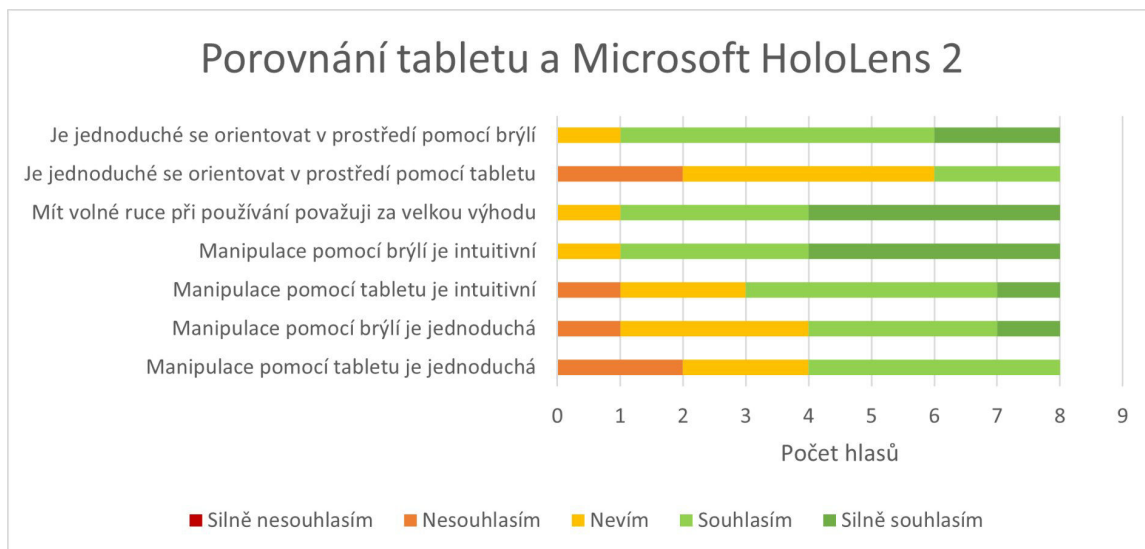
Tabulka 7.4: Tabulka zobrazující zprůměrované naměřené hodnoty z testování pro tablet a HoloLens 2.

Porovnání

Po vyhodnocení zátěže a použitelnosti měl účastník vyplnit dotazník složený ze 7 tvrzení a vyjádřit míru souhlasu na stupnici 1 až 5. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 7.5. Při porovnávání jednoduchosti u manipulace o něco lépe dopadly brýle. Není tomu jinak ani ve stránce intuitivnosti, tam tablet zaostával o něco více. S tvrzením „*Mít volné ruce při používání považuji za velkou výhodu*“ uživatelé poměrně souhlasili, což trochu předchází následující otázce, která se zaměřila na orientaci v robotickém pracovišti. V orientaci suverénně zvítězily brýle, u tabletového řešení uživatele odrazovala nutnost držení tabletu a následný pohyb či natočení v případě, kdy potřebovali vidět větší obsah než ten, který byl zobrazený na displeji.

V poslední části, ve které byl podán dotaz na zpětnou vazbu a celkové zhodnocení těchto dvou rozhraní, odpovídaly dotazované osoby následovně. Mezi častou odpovědí se vyskytovalo tvrzení, že si tabletové rozhraní uživatelé osvojili rychleji než to v podání HoloLens. Mobilní zařízení jsou v dnešní době používána na denní bázi, a proto se hned od začátku cítili lépe, než když se jako začátečníci teprve seznamovali s rozšířenou realitou v brýlích HoloLens.

Pokud bude brána v potaz pouze orientace v reálném světě, tabletové řešení se tázajícím zamlouvalo více. V experimentu kreslení čtverce, ve kterém bylo potřeba si dávat pozor na tenký hrot fixy, aby nedošlo k jeho ulomení nebo poškození při pokládání na stůl, měli účastníci přímé vidění prakticky hned po mírném odklonění tabletu. U brýlí bylo nutné si odkrýt displej nebo si brýle sundat. Pokud však poté účastníci vyzkoušeli manipulaci pouze



Obrázek 7.5: Graf zobrazující data z vlastního dotazníku, kde účastníci vyjadřovali míru souhlasu s tvrzeními. Záporné hodnoty na levé straně vyjadřují míru nesouhlasu a kladné hodnoty na pravé straně míru souhlasu.

pomocí tabletové kamery, bez možnosti náhledu mimo displej, došli k závěru, že je orientace srovnatelná s náhlavním displejem, co se týče obtížnosti.

Vizualizace pohybu v rozhraní HoloLens sklidila kladnou odezvu. Výhoda spočívala v tom, že člověk prvotně musí nastavit model robota a až poté stisknout tlačítko pro přesun fyzického robota. V tabletu se přesouvá po stisknutí tlačítka zároveň model i s robotem, a tak hrozí v krajních případech havárie s ostatními objekty. Během testování párkrát nastala situace, ať už z nepozornosti nebo omylem, že subjekt stiskl tlačítko pro posun směrem dolů, i když se už hrot fixy dotýkal stolu. To způsobovalo zbytečné obavy a po zpětném dotázní to byl jeden z aspektů, který hrál velkou roli v psychické náročnosti zkoumané v dotazníku NASA-TLX. Uživatel pak musel více přemýšlet, zda skutečně mačká správné tlačítko.

Kapitola 8

Závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl navrhnout a implementovat funkční řešení pro manipulaci s robotem v prostředí rozšířené reality. Implementované řešení doplňuje funkcionalitu do již existujícího rozhraní AEditoru pro Microsoft HoloLens 2. Před samotnou implementací byl navržen způsob manipulace a tři přístupy pro přesné zadávání pozice robotického ramene. Tyto přístupy byly otestovány skupinou 8 účastníků, kteří prověřili použitelnost návrhů. Na základě zpětné vazby účastníků bylo v práci ponecháno sjednocení návrhů přesného zadávání pozice za použití tlačítek u os a slideru s drobnými úpravami.

Samotná manipulace pak probíhá dvěma způsoby. Uživatel si může vybrat, zda bude manipulovat s holografickými objekty přímým dotykem, nebo využije možnosti interakce s objekty na dálku. K přesnému zadání pozice má na výběr možnost posouvání tlačítka, nebo za pomoci slideru, který určuje míru rychlosti přesouvání manipulačního objektu. Manipulace probíhá pouze s modelem robota, jenž zobrazuje jeho umístění v prostoru. Pro přesunutí fyzického robota je potřeba pozici potvrdit.

Jako vizualizace limitů robotického ramene na úrovni jeho podstavy je v řešení implementováno holografické zobrazení rozsahu. Jelikož aktuální řešení neumožňuje znát dopředu rozsah robota, souřadnice objektu jsou vypočítány při načítání scény a ukládány tak, aby se výpočet neopakoval při selekci stejného typu robota. Znázornění limitů robota v prostoru je založeno na výpočtu inverzní kinematiky, která je počítána na straně serveru. Při neúspěchu (dosazení limitů) je model robota obarven červenou barvou.

Výsledné řešení bylo na závěr porovnáno s řešením v tabletové verzi. Experiment byl navržen jako jednoduchý úkol kreslení čtverce. Hlavními sledovanými aspekty byly vyhodnocení zátěže a použitelnosti. Zátěž byla sledována dotazníkem NASA-TLX a použitelnost nástrojem SUS. Uživatelům připadalo řešení v náhlavním displeji jako použitelnější, ze získaných dat dopadlo v interpretaci SUS skóre jako přijatelné. Ve vyhodnocení zátěže vyplynulo, že tabletové řešení je méně časově náročné a dosahuje lepších výsledků. U ostatních aspektů však dopadlo lépe rozhraní v brýlích. Největší rozdíl se projevil ve fyzické a psychické náročnosti. Rozdíl po fyzické stránce byl dán nutností držení tabletu v obou rukách. Rozdíl v psychické náročnosti způsoboval stres při rozhodování, zda uživatel kliká na správné tlačítko tak, aby robot nehavaroval.

Celkově lze říci, že manipulaci v rozhraní HoloLens 2 se dá považovat za použitelnou i přes mírné nedostatky. V závěrečném experimentu bylo ze zpětné vazby účastníků zjištěno pár poznatků, které by mohly vést k zamyšlení a případnému vylepšení manipulace u obou porovnávaných rozhraní.

Literatura

- [1] AL JANABI, H. F., AYDIN, A., PALANEER, S., MACCHIONE, N., AL JABIR, A. et al. Effectiveness of the HoloLens mixed-reality headset in minimally invasive surgery: a simulation-based feasibility study. *Surgical Endoscopy*. Springer Science and Business Media LLC. červen 2019, sv. 34, č. 3, s. 1143–1149. ISSN 1432-2218.
- [2] BRUN, H., BUGGE, R. A. B., SUTHER, L. K. R., BIRKELAND, R., PELANIS, E. et al. Mixed reality holograms for heart surgery planning: first user experience in congenital heart disease. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. Oxford University Press (OUP). prosinec 2018, sv. 20, č. 8, s. 883–888. ISSN 2047-2412.
- [3] CHACKO, S. M. a KAPILA, V. An augmented reality interface for human-robot interaction in unconstrained environments. In: IEEE. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019, s. 3222–3228.
- [4] CONDINO, S., TURINI, G., PARCHI, P. D., VIGLIALORO, R. M., PIOLANTI, N. et al. How to Build a Patient-Specific Hybrid Simulator for Orthopaedic Open Surgery: Benefits and Limits of Mixed-Reality Using the Microsoft HoloLens. *Journal of Healthcare Engineering*. Hindawi Limited. listopad 2018, sv. 2018, s. 1–12. ISSN 2040-2309.
- [5] HART, S. G. a STAVELAND, L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: *Advances in psychology*. Elsevier, 1988, sv. 52, s. 139–183.
- [6] HASHIMOTO, S., ISHIDA, A., INAMI, M. a IGARASHI, T. Touchme: An augmented reality based remote robot manipulation. In: *The 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Proceedings of ICAT2011*. 2011, sv. 2.
- [7] HIADLOVSKÁ, S. *Programování robotického pracoviště pomocí Microsoft HoloLens 2*. 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce BAMBUŠEK, D. [cit. 2024-25-04]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145445>.
- [8] KAPINUS, M., MATERNA, Z., BAMBUŠEK, D., BERAN, V. a SMRŽ, P. ARCOR2: Framework for Collaborative End-User Management of Industrial Robotic Workplaces using Augmented Reality. *ArXiv preprint arXiv:2306.08464*. 2023.
- [9] KARTHIKA, P. a GOKILAMANI, M. Hololens. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2017, sv. 6, č. 2, s. 41–50.
- [10] KUHLEMANN, I., KLEEMANN, M., JAUER, P., SCHWEIKARD, A. a ERNST, F. Towards X-ray free endovascular interventions – using HoloLens for on-line holographic

- visualisation. *Healthcare Technology Letters*. Institution of Engineering and Technology (IET). září 2017, sv. 4, č. 5, s. 184–187. ISSN 2053-3713.
- [11] MICROSOFT. *Hands and motion controllers* [online]. Březen 2022. [cit. 2024-10-02]. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/hands-and-tools>.
- [12] MICROSOFT. *About HoloLens 2* [online]. únor 2024. [cit. 2024-12-03]. Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware>.
- [13] MILGRAM, P. a KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. 1994, sv. 77, č. 12, s. 1321–1329.
- [14] MORO, C., PHELPS, C., REDMOND, P. a STROMBERGA, Z. HoloLens and mobile augmented reality in medical and health science education: A randomised controlled trial. *British Journal of Educational Technology*. Wiley. prosinec 2020, sv. 52, č. 2, s. 680–694. ISSN 1467-8535.
- [15] ONG, S.-K., YEW, A., THANIGAIVEL, N. K. a NEE, A. Y. Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Elsevier. 2020, sv. 61, s. 101820.
- [16] PARK, S., BOKIJONOV, S. a CHOI, Y. Review of Microsoft HoloLens Applications over the Past Five Years. *Applied Sciences*. MDPI AG. srpen 2021, sv. 11, č. 16, s. 7259. ISSN 2076-3417.
- [17] PEPPOLONI, L., BRIZZI, F., RUFFALDI, E. a AVIZZANO, C. A. Augmented reality-aided tele-presence system for robot manipulation in industrial manufacturing. In: *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 2015, s. 237–240.
- [18] RODRÍGUEZ, A. N. *Project Focus – Google Glass* [online]. June 7, 2017. [cit. 2024-23-03]. Dostupné z: <https://antonionietorodriguez.com/project-focus-google-glass/>.
- [19] SCHMALSTIEG, D. a HOLLERER, T. *Augmented reality: principles and practice*. Addison-Wesley Professional, 2016.
- [20] SCHRIER, K. Using augmented reality games to teach 21st century skills. In: *ACM SIGGRAPH 2006 Educators program on - SIGGRAPH '06*. ACM Press, 2006. SIGGRAPH '06.
- [21] SUJITO, F., ARIFUDIN, R. a ARINI, F. Y. An Analysis of User Interface and User Experience Using System Usability Scale and GOMS Method. *Journal of Advances in Information Systems and Technology*. 2019, sv. 1, č. 1, s. 65–73.
- [22] SUTHERLAND, I. E. A head-mounted three dimensional display. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*. 1968, s. 757–764.
- [23] SÜNGER, I. a ÇANKAYA, S. Augmented Reality: Historical Development and Area of Usage. *Journal of Educational Technology and Online Learning*. Journal of Educational Technology and Online Learning. září 2019, sv. 2, č. 3, s. 118–133. ISSN 2618-6586.

- [24] TABUSCA, A. Present and Future Economics of Augmented Reality. *Journal of Information Systems & Operations Management*. Romanian-American University, Scientific Research Department. 2015, s. 482.
- [25] THOMAS, B., CLOSE, B., DONOGHUE, J., SQUIRES, J., BONDI, P. D. et al. First person indoor/outdoor augmented reality application: ARQuake. *Personal and Ubiquitous Computing*. Springer. 2002, sv. 6, s. 75–86.
- [26] THOMAS, P. C. a DAVID, W. Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: ACM SIGCHI Bulletin. *Hawaii international conference on system sciences*. 1992, sv. 2, s. 659–669.
- [27] WOODS, B. *How augmented reality is augmenting its own future* [online]. Leden 2014. [cit. 2024-23-03]. Dostupné z:
<https://thenextweb.com/news/augmented-reality-augmenting-future#!t4WKQ>.
- [28] WYSS, C., DEGONDA, A., BÜHRER, W. a FURRER, F. The Impact of Student Characteristics for Working with AR Technologies in Higher Education—Findings from an Exploratory Study with Microsoft HoloLens. *Information*. MDPI AG. únor 2022, sv. 13, č. 3, s. 112. ISSN 2078-2489.

Příloha A

Obsah přiloženého paměťového média

/	
xzmrz100.pdf/	Text práce
tex/	L ^A T _E X zdrojové kódy
src/	Zdrojové kódy aplikace
video.mp4	Video aplikace
README.txt	Textový soubor s návodem spuštění aplikace

Příloha B

Demografický dotazník

Demografický dotazník

Pohlaví *

žena

muž

Věk *

Dosažené vzdělání *

středoškolské

bakalářské

magisterské

vyšší

Zkušenost s roboty *

	1	2	3	4	5	
žádná	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	S roboty pracuji denně, nebo jsem expert na robotiku

Zkušenost s rozšířenou/virtuální realitou *

	1	2	3	4	5	
žádná	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	používám denně, nebo jsem expert

Už jste někdy použil(a) brýle pro rozšířenou realitu? *

Ano

Ne

Problémy s viděním, oční vady, jiné zdravotní problémy

Obrázek B.1: Demografický dotazník.

Příloha C

Dotazník s doplňujícími otázkami

Manipulace za pomoci tabulky

V řešení se mi dobře pracovalo s tabulkou *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení mi tabulka během práce nepřekážela *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení bych ocenil funkcionalitu z jiného návrhu (stručně popsat)

Manipulace za pomoci digitálních objektů u osy

V řešení se mi dobře pracovalo s objekty u os *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení mi objekty u os během práce nepřekážely *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení bych ocenil funkcionalitu z jiného návrhu (stručně popsat)

Manipulace za pomoci slíderu

V řešení se mi dobře pracovalo se slíderem *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení mi slíder během práce nepřekážel *

	1	2	3	4	5	
silně nesouhlasím	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	silně souhlasím

V řešení bych ocenil funkcionalitu z jiného návrhu (stručně popsat)

Vlastní názor

Zhodnoťte celkový experiment a seřadte varianty od nejlepší po nejhorší *

Obrázek C.1: Dotazník s doplňujícími otázkami pro testování návrhů.