



Zadání bakalářské práce

Název:	Aplikace ARDesk - manipulace s objekty
Student:	Oliver Szöllösi
Vedoucí:	Ing. Jiří Chludil
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Webové a softwarové inženýrství, zaměření Softwarové inženýrství
Katedra:	Katedra softwarového inženýrství
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Aplikace ARDesk je vzdělávací mobilní aplikace pro OS Android využívající rozšířenou realitu pro výuku matematiky se zaměřením na oblasti využívající třídimenzionální prostor.

1. Analyzujte možnosti interakce s objekty a manipulaci objektů v rozšířené realitě.
2. Analyzujte dostupné existující technologie.
3. Pomocí metod softwarového inženýrství navrhnete prototyp pro manipulaci s objekty.
4. Implementujte prototyp pro manipulaci s objekty.
5. Implementovaný prototyp podrobte akceptačním a uživatelským testům.

Táto práce má týmový charakter.



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Aplikácia ARDesk - manipulace s objekty

Oliver Szöllösi

Katedra softwarového inženýrství

Vedúci práce: Ing. Jiří Chludil

13. mája 2021

Pod'akovanie

V prvom rade, by som chcel pod'akovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Jiřímu Chludilovi za jeho odbornú pomoc, konštruktívnu kritiku a návrhy na zlepšenie počas konzultácii. Taktiež by som chcel pod'akovať mojim rodičom a mojej priateľke za psychickú podporu. Špeciálna vďaka patrí Matejovi Kubnovi za zapožičanie mobilného telefónu, vďaka ktorému mohol byť prototyp manipulácie s objektmi vyvinutý.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval(a) samostatne a že som uviedol(uviedla) všetky informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o etickej príprave vysokoškolských záverečných prác.

Beriem na vedomie, že sa na moju prácu vzťahujú práva a povinnosti vyplývajúce zo zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, v znení neskorších predpisov, a skutočnosť, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavrenie licenčnej zmluvy o použití tejto práce ako školského diela podľa § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Prahe 13. mája 2021

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta informačních technologií

© 2021 Oliver Szöllösi . Všetky práva vyhradené.

Táto práca vznikla ako školské dielo na FIT ČVUT v Prahe. Práca je chránená medzinárodnými predpismi a zmluvami o autorskom práve a právach súvisiacich s autorským právom. Na jej využitie, s výnimkou bezplatných zákonných licencií, je nutný súhlas autora.

Odkaz na túto prácu

Szöllösi , Oliver. *Aplikácia ARDesk - manipulace s objekty*. Bakalárska práca. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2021.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa venuje vývoju nového spôsobu manipulácie s virtuálnymi objektmi v aplikácii ARDesk. Aplikácia ARDesk je výuková aplikácia určená pre študentov základných a stredných škôl využívajúca rozšírenú realitu na vizualizáciu 3D geometrických útvarov s cieľom pomôcť študentom pri preberaní stereometrie. Práca analyzuje spôsoby manipulácie s objektmi v rozšírenej realite ako alternatívu k manipulácii pomocou dotykového displeja, navrhuje a implementuje vhodné riešenie pre aplikáciu ARDesk. Analýza ukázala, že najvhodnejším spôsobom manipulácie pre aplikáciu ARDesk bude manipulácia pomocou ukazovátka osadeného pozičnou značkou typu ArUco. Prototyp je implementovaný pomocou modulu ArUco knižnice OpenCV v jazyku Java.

Kľúčová slova rozšírená realita, hmatateľné užívateľské rozhranie, interakcia s rozšírenou realitou, ARCore, OpenCV, ArUco

Abstract

This bachelor's thesis deals with the development of a new way of manipulating virtual objects in ARDesk application. ARDesk application is an educational application for highschool students which is using augmented reality to visualize 3D geometric shapes in order to help the students when learning stereometry. This thesis analyzes different approaches of object manipulation in augmented reality as an alternative to manipulation via touch screen, proposes and implements a solution specific for ARDesk application. Analysis showed that manipulation using a physical paddle fitted with an ArUco fiducial marker is the most suitable for ARDesk application. The prototype is implemented using ArUco module of the OpenCV library in programming language Java.

Keywords augmented reality, tangible user interface, interaction with augmented reality, ARCore, OpenCV, ArUco

Obsah

Úvod	1
1 Cieľ práce	3
2 Analýza	5
2.1 Možnosti interakcie s rozšírenou realitou	5
2.1.1 Požiadavky aplikácie ARDesk	6
2.1.2 Interakcia pomocou dotykovej obrazovky	6
2.1.3 Interakcia pomocou hlasových pokynov	7
2.1.4 Interakcia pomocou rúk	8
2.1.5 Interakcia pomocou fyzického predmetu	10
2.1.6 Interakcia pomocou ukazovátka	10
2.2 Analýza existujúcich technológií	11
2.2.1 VRgineers XTAL	11
2.2.2 Microsoft HoloLens	12
2.2.3 Magic Paddle	14
2.2.4 Portal-ble	14
2.2.5 IKEA Place	15
2.3 Výsledná voľba prístupu	16
2.4 Analýza technológií na detekciu pozičných značiek	18
2.4.1 QR kód	19
2.4.2 ArUco	20
2.4.3 OpenCV	20
2.4.4 Modul ArUco knižnice OpenCV	21
2.4.5 ChiliTags	22
2.4.6 ARToolKit	22
2.4.7 ARCore	24
2.5 ARDesk	25
2.5.1 Súčasný stav aplikácie	25

3	Návrh	27
3.1	Funkčné a nefunkčné požiadavky	27
3.2	Zvolená metóda manipulácie s objektmi	28
3.3	Kalibrácia	29
3.3.1	Optické skreslenie	29
3.3.2	Kalibrácia	30
3.3.2.1	Kalibračná aktivita	31
3.4	Detekcia pozíčnej značky ArUco	32
3.5	Návrh GUI a aktivity s rozšírenou realitou	33
4	Implementácia	35
4.1	Kalibrácia	35
4.2	Získanie polohy značky	36
4.3	Použitie knižnice OpenCV s modulom ArUco v Android Studiu	37
4.4	Prepojenie so službami Google Firebase	38
4.5	Výsledný implementovaný prototyp	38
5	Testovanie	41
5.1	Užívatelia a testovacie podmienky	41
5.2	Výsledky testovania	42
5.2.1	Celkový dojem	42
5.2.2	Porovnanie pôvodného rozhrania s manipuláciou pomocou ukazovátka	42
6	Komplikácie spojené s pandémiou Covid-19	45
6.1	Komplikácie pri implementácii	45
6.2	Komplikácie pri testovaní	46
	Záver	49
	Literatúra	51
A	Zoznam použitých skratiek	55
B	Obsah priloženého CD	57

Zoznam obrázkov

2.1	Manipulácia pomocou dotykového displeja na tablete	7
2.2	Okuliare s rozšírenou realitou Google Glass	7
2.3	Sledovanie rúk v zariadení Microsoft HoloLens 2	9
2.4	Použitie guľového predmetu na interakciu s virtuálnou realitou . . .	10
2.5	Headset XTAL od spoločnosti VRgineers	12
2.6	Okuliare Microsoft HoloLens	13
2.7	Technológia Magic Paddle	14
2.8	Technológia Portal-ble	15
2.9	Aplikácia IKEA Place	16
2.10	Rôzne druhy pozičných značiek	19
2.11	QR kód	20
2.12	Screenshot z aplikácie ARDesk (vľavo pred rozrezaním modelu, vpravo po rozrezaní)	26
3.1	Funkčné a nefunkčné požiadavky	28
3.2	ArUco značky umiestnené na ukazovátku	29
3.3	Kalibračná šachovnica ChArUco	32
3.4	Návrh tried umožňujúcich manipuláciu pomocou ukazovátka	33
3.5	Návrh aktivity zobrazujúcej scénu rozšírenej reality	34
4.1	Komunikácia medzi aplikáciou ARDesk a službami Google Firebase	38
4.2	Ukazovátok osadené značkami ArUco	39
4.3	Screenshot z aplikácie ARDesk (vľavo - pôvodné rozhranie, v strede - prepnutie módu manipulácie, vpravo - manipulácia ukazovátkom)	39
5.1	Zábery z užívateľského testovania	43
6.1	Prepojenie zariadení pri vzdialenom vývoji	46

Zoznam tabuliek

2.1	Porovnanie rôznych prístupov k interakcii s aplikáciami rozšírenej reality	18
2.2	Bodový zisk knižnice ArUco	21
2.3	Bodový zisk knižnice OpenCV s modulom ArUco	22
2.4	Bodový zisk knižnice ChiliTags	23
2.5	Bodový zisk knižnice ARToolKit	23
2.6	Bodový zisk knižnice ARCore	24
2.7	Bodový zisk knižnice ARToolKit	25
5.1	Informácie o užívateľoch podieľajúcich sa na užívateľskom testovaní	41

Úvod

V posledných rokoch sa medzi najzaujímavejšiu technológiu považuje virtuálna a rozšírená realita. Vďaka rýchlemu technologickému pokroku sú tieto technológie čoraz dokonalejšie a dostupnejšie aj širokej verejnosti. Nielenže si môžeme dedikovaný headset na virtuálnu alebo rozšírenú realitu kúpiť za cenu lacnejšieho laptopu, dokonca môžeme využívať aj naše vlastné smartfóny. Práve mobilná rozšírená realita sa stáva čoraz populárnejšou a to zásluhou frameworkov ARKit spoločnosti Apple a ARCore spoločnosti Google, ktoré uľahčujú vývoj aplikácií zameraných na rozšírenú realitu.

Možnosti využitia rozšírenej reality sú rozsiahle, no medzi najzaujímavejšie patrí využitie vo vzdelávacom procese. V rámci predmetu BI-SP1 a BI-SP2 softwarového tímového projektu nás táto možnosť zaujala, a tak sme vytvorili koncept a základnú verziu výukovej aplikácie ARDesk pre Android zariadenia, ktorej hlavnou úlohou je zobrazovanie a manipulácia priestorových geometrických útvarov za využitia rozšírenej reality. Cieľom aplikácie je pomôcť žiakom základných a stredných škôl s pochopením často problematickej učebnej látky, akou je stereometria.

Častým nedostatkom mobilných aplikácií využívajúcich rozšírenú realitu je spôsob, akým s nimi interagujeme. Väčšina existujúcich aplikácií pre Android alebo iOS je ovladaná iba pomocou dotykového displeja, čo je v istých prípadoch ideálne riešenie, no pri iných aplikáciách ako aj pri aplikácii ARDesk by vhodný alternatívny prístup k interakcii mohol priniesť výhody v porovnaní s klasickou interakciou čisto pomocou dotykového displeja. Výhody plynúce z takejto interakcie by mohli byť lepšia ovládateľnosť, väčšia precíznosť pri manipulácii s virtuálnymi objektmi a v neposlednom rade aj väčšia pútavosť najmä v prípade aplikácie ARDesk, ktorá je primárne určená pre žiakov základných a stredných škôl.

Práca sa zameriava na vývoj prototypu nového spôsobu manipulácie s virtuálnymi objektmi pre aplikáciu ARDesk ako alternatívy k pôvodnému spôsobu manipulácie pomocou dotykového displeja.

Táto práca je rozdelená do 6 kapitol. V prvej kapitole su zhrnuté ciele práce. Druhá kapitola je venovaná teoretickej analýze. V nej sú analyzované rôzne možnosti interakcie s digitálnymi informáciami dôraz je kladený predovšetkým na rozšírenú ako aj virtuálnu realitu taktiež sú v nej analyzované súčasné existujúce technológie a aplikácie využívajúce zaujímavé prístupy k interakcii s rozšírenou a virtuálnou realitou. Tretia kapitola je venovaná návrhu prototypu manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk. Vo štvrtej kapitole je popísaná implementácia prototypu manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk. Piata kapitola sa zaoberá testovaním vzniknutého prototypu a analýzou výsledkov tohto testovania. V poslednej kapitole sú zhrnuté komplikácie spojené s vývojom aplikácie spôsobené pandémiou ochorenia Covid-19 a ich riešenia.

Cieľ práce

Cieľom tejto práce je analyzovať rôzne možnosti manipulácie s objektmi v rozšírenej realite, vybrať vhodný prístup vzhľadom k použitiu aplikácie ARDesk, navrhnuť a implementovať prototyp na manipuláciu s objektmi v tejto aplikácii. Následne tento prototyp podrobiť akceptačným a užívateľským testom, ktorých výsledky vyhodnotiť. Výsledok tejto práce môže poslúžiť ako základ pre ďalší vývoj aplikácie ARDesk.

Analýza

Táto kapitola sa venuje analýze technológii na manipuláciu objektov v rozšírenej realite. V prvej časti analyzuje existujúce riešenia a dostupné aplikácie využívajúce rôzne prístupy k tejto problematike. Druhá časť je venovaná analýze dostupných knižníc a frameworkov vhodných na vývoj prototypu manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk. Na konci sa nachádza stručný popis súčasného stavu aplikácie ARDesk.

2.1 Možnosti interakcie s rozšírenou realitou

Využitie rozšírenej reality je veľmi široké od herného priemyslu cez predaj až po tréning doktorov a chirurgov. V hrách sa využíva napríklad na zatraktívnenie niektorých úkonov alebo aj celej hry. Populárna mobilná hra Pokémon GO využíva rozšírenú realitu na zobrazovanie pokémonov do reálneho sveta pri ich chytaní a hra Minecraft Earth prináša tvorivý svet počítačovej hry Minecraft do reálneho sveta pomocou rozšírenej reality, v ktorej hráč môže ukladať virtuálne stavebné kocky do scény rozšírenej reality.

Veľký potenciál má rozšírená realita vo vzdelávaní alebo zaúčaní pracovníkov vo fabrikách, kde táto technológia môže slúžiť na vizualizáciu potrebných objektov. V školách napríklad na vizualizáciu orgánov alebo kostí v ľudskom tele a pri zaúčaní nových pracovníkov na vizualizáciu súčiastok, a práce s nimi na montážnych linkách.

Vhodný návrh spôsobu interakcie s rozšírenou realitou vedie k intuitívnemu a efektívnemu využitiu a otvára potenciálne nové možnosti jej využitia. Na rozšírenú realitu sa využívajú rôzne typy zariadení. Môže ísť o špeciálny headset, okuliare, projektor alebo čoraz častejšie používané smartfóny a tablety. Každý typ zariadenia má svoje špecifické požiadavky a prináša so sebou rôzne možnosti využitia. S tým súvisí aj spôsob, akým s rozšírenou realitou interagujeme pri použití rôznych zariadení. Pri aplikáciách využívajúcich dedikovaný headset ma užívateľ voľné obidve ruky, v ktorých môže držať napríklad špeciálny ovládač, pomocou ktorého môže s rozšírenou

či virtuálnou realitou interagovať alebo s ňou môže interagovať iba pomocou holých rúk. Avšak pri používaní smartfónu musí užívateľ v jednej ruke zariadenie držať, a tak mu ostáva voľná len jedna ruka, tým pádom sú možnosti v oblasti interakcie o niečo chudobnejšie.

2.1.1 Požiadavky aplikácie ARDesk

Požiadavky na interakciu s rozšírenou realitou sa pri rôznych aplikáciách môžu líšiť. Niektoré požiadavky plynú zo špeciálnych potrieb aplikácie a ďalšie z obmedzení technológie rozšírenej reality, ktorá je v danej aplikácii využívaná.

Hlavnou úlohou aplikácie ARDesk je zobrazovanie virtuálnych modelov priestorových geometrických útvarov a manipulácia s nimi. Preto je dôležité, aby interakcia s touto aplikáciou zvládala intuitívnu ale precíznu manipuláciu. Aplikácia ARDesk je vyvinutá pre platformu Android a je určená pre smartfóny a tablety, z čoho plynie už spomínané obmedzenie na možnosť využitia len jednej ruky na interakciu. Keďže sa jedná o vzdelávaciu aplikáciu, jej dostupnosť by mala byť jednou z priorít, a preto by bolo vhodné, ak by bola interakcia s ňou navrhnutá bez nutnosti použitia ďalšej cenovo náročnej techniky. Ideálne by k tejto interakcii nemal žiak potrebovať nič iné, ako smartfón či tablet alebo pomôcku či predmet, o ktorom sa predpokladá, že väčšina žiakov vlastní, alebo ktorý môže zapožičať škola.

2.1.2 Interakcia pomocou dotykovej obrazovky

Interakcia pomocou dotykovej obrazovky je špecifická pre smartfóny a tablety. Užívateľ na interakciu využíva dotykovú obrazovku, kde sa buď dotýka priamo virtuálneho objektu zobrazeného na obrazovke, alebo s virtuálnym modelom interaguje pomocou ovládacích prvkov, ako sú tlačidlá či slidery. Tento prístup je veľmi priamočiary, intuitívny a jednoduchý na implementáciu. [1]

V súčasnej podobe využíva takýto prístup aj aplikácia ARDesk, kde na manipuláciu s objektmi slúžia tlačidlá a slidery. Na implementáciu nie sú potrebné externé knižnice poskytujúce komplikovanú funkcionálnosť ako napríklad rozpoznávanie hlasu či strojové videnie. Pomocou tohto prístupu sa dá jednoducho dosiahnuť ľubovoľná potrebná manipulácia.

V niektorých aplikáciách je tento prístup najlepšou voľbou. Tento prístup je vhodný najmä pri aplikáciách, ktoré sa orientujú na vizualizáciu virtuálnych objektov v reálnom prostredí ako napríklad aplikácia IKEA Place spomínaná v kapitole 2.2.5. Tieto aplikácie sa nesústredia na manipuláciu so zobrazenými objektmi alebo manipuláciu vôbec nepodporujú, pretože nie je v danej aplikácii potrebná.



Obr. 2.1: Manipulácia pomocou dotykového displeja na tablete

2.1.3 Interakcia pomocou hlasových pokynov

Reč je pre ľudí najprirodzenejšou formou komunikácie. Umožňuje interakciu bez použitia rúk a je vhodná najmä v situáciách, kedy užívateľ nemá voľné ruky ako napríklad pri použití špeciálnych okuliarov na rozšírenú realitu vo fabrikách.

Funkciou rozpoznania hlasu disponuje väčšina dnešných smartfónov, ale často na svoje fungovanie využíva internetové pripojenie, pomocou ktorého prijíma textovú podobu reči zo vzdialeného serveru. Na tomto princípe funguje aj rozpoznávanie hlasu spoločnosti Google. [2]. V rozšírenej realite bolo rozpoznávanie hlasu využité pri projekte Google Glasses. Ide o okuliare využívajúce rozšírenú realitu na zobrazovanie užitočných informácií a vykonávanie jednoduchých úkonov v každodennom živote ako napríklad zobrazenie času alebo zhotovenie fotografie. Zariadenie sa ovláda výhradne pomocou hlasových príkazov. Podobné hlasové rozhranie ponúkajú aj okuliare na rozšírenú realitu Microsoft HoloLens spomínané v kapitole 2.2.2.



Obr. 2.2: Okuliare s rozšírenou realitou Google Glass

Takéto hlasové rozhranie môže pozostávať z jednoduchých príkazov v podobe jedného či viacerých slov vzhľadom na konkrétnu aplikáciu. V aplikácii ARDesk by mohlo ísť o príkazy „zväčši“ na zväčšenie modelu alebo „rozrež“ na vykonanie rezu modelu. Niektoré úkony sú priamočiare ako napríklad vykonanie rezu, no k vykonaniu iných je potrebný aj parameter ako napríklad pri rotácii je treba poznať uhol rotácie. S tým súvisí aj potenciálna zložitnosť príslušných hlasových príkazov. Jedným riešením je pridanie konštantných hodnôt, ktoré by slúžili ako parametre k jednotlivým úkonom, napríklad uhol rotácie by bol vždy 45° , a ak by chcel užívateľ vykonať rotáciu objektu o 90° , musel by tento hlasový príkaz vysloviť dvakrát za sebou. Táto možnosť je pri veľkých hodnotách nepresná a pri malých zas pomalá. Druhou možnosťou je vysloviť parameter ako súčasť hlasového príkazu. S tým sa ale spája možná nepresnosť pri zadávaní parametru spojená s neschopnosťou presne tento parameter určiť predtým ako sa vykoná. Táto forma interakcie síce ponúka zaujímavé možnosti, no v školskom prostredí s viacerými žiakmi, ktorí by aplikáciu používali súčasne, by mohol vzniknúť veľký komunikačný šum, ktorý by sťažoval rozpoznávanie reči, a taktiež by mohlo dochádzať k rozpoznaniu príkazov jedného žiaka zariadením iného žiaka, a teda pre aplikáciu ARDesk nie je vhodná.

2.1.4 Interakcia pomocou rúk

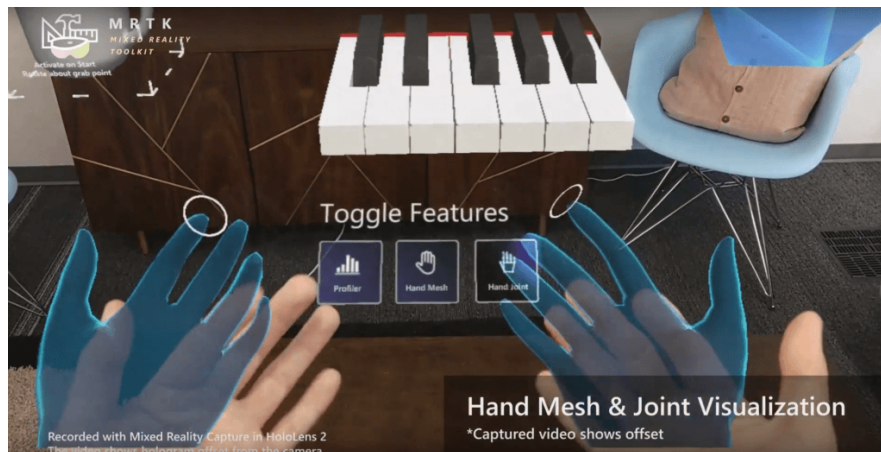
Existujú viaceré prístupy k tomuto spôsobu interakcie s rozšírenou realitou. Jedným z nich je využitie špeciálneho zariadenie v podobe rukavice alebo násadiiek na prsty. V oboch prípadoch ide o zariadenie osadené senzormi zrýchlenia a gyroskopom. Údaje z týchto senzorov slúžia na vypočítanie presnej polohy ruky aj jednotlivých prstov. Tento prístup je ale v mobilnej rozšírenej realite nepraktický z dôvodu potreby dodatočného vybavenia, ktorého cena sa môže pohybovať v niekoľkých stovkách eur. Z tohto dôvodu nie je táto varianta vhodná pre použitie v aplikácii ARDesk.

Niektoré technológie pri aplikácii na rozšírenú realitu so sebou prinášajú isté obmedzenia, napríklad pri interakcii hlasovými pokynmi je problémom najmä jemná manipulácia, ktorá môže byť dosiahnutá jemnou motorikou prstov. Preto majú systémy založené na technológii špeciálnych rukavíc, ktoré dokážu túto jemnú motoriku rozpoznať, veľkú výhodu pri precíznej manipulácii s objektmi a ponúkajú viacero stupňov voľnosti pohybu.

Ďalším možným prístupom je sledovanie rúk pomocou kamery. Pri tomto prístupe sa dá tiež vydať viacerými smermi. Konkrétne sledovaním špeciálnych pozíčných značiek umiestnených na ruke alebo na rukavici, ktorú má užívateľ nasadenú [3], alebo sledovaním holej ruky.

Prvý prístup má výhodu v tom, že sa dá implementovať bez použitia stereo kamier alebo iného hĺbkového senzoru. Na určenie pozície pozičnej značky stačí obraz z jednej kamery.

Sledovanie holých rúk sa dá dosiahnuť aj za použitia obrazu z jednej kamery [4], ale problémom je v tomto prípade detekcia hĺbky. Na detekciu hĺbky je potreba obrazu minimálne z dvoch kamier alebo je potrebné použiť iný senzor, ktorý vie získať informácie o hĺbke. Aj keď je tento prístup určený a vhodný najmä pre dedikované headsety alebo okuliare, existuje aj aplikácia pre smartfóny využívajúca tento prístup spomínaná v kapitole 2.2.4.



Obr. 2.3: Sledovanie rúk v zariadení Microsoft HoloLens 2

Tangible User Interface

Hmatateľné užívateľské rozhranie z anglického tangible user interface ďalej len TUI je užívateľské rozhranie, ktoré v sebe prepája digitálny a fyzický svet. Užívateľ interaguje s digitálnou informáciou prostredníctvom fyzického prostredia.

TUI vzniklo ako alternatíva ku klasickému grafickému užívateľskému rozhraniu GUI s uplatnením najmä vo sférach virtuálnej a rozšírenej reality. Zakladajúc na užívateľovej schopnosti interagovať s fyzickým prostredím, TUI má potenciál vylepšiť spôsob, akým ľudia s digitálnymi informáciami interagujú.

Medzi jedného z najväčších priekopníkov v tejto oblasti patrí Hiroshi Ishii, ktorý je profesorom na MIT a zakladateľom Tangible Media Group, ktorá sa už vyše 20 rokov venuje vývoju v oblasti HCI so zameraním na TUI [5]. Jeden z ich prvých projektov a jeden z prvých projektov v rámci vývoja TUI vôbec, je projekt Bricks, ktorý predstavuje „uchopiteľné užívateľské rozhranie, ktoré umožňuje priamu manipuláciu elektronických alebo virtuálnych objektov pomocou fyzických držiadiel“. Autori tohto projektu, George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii a William Buxton, nazývajú tieto fyzické objekty „tehly“, lebo majú tvar malých kvádrov. Ide o špeciálny typ vstupného zariadenia, ktoré je úzko spojené s virtuálnym objektom, a pomocou ktorého sa dá tento virtuálny objekt manipulovať [6].

2.1.5 Interakcia pomocou fyzického predmetu

V tomto prípade sa tiež dá vybrať viacerými smermi. Jedným z nich je použitie fyzického objektu ako fyzickú reprezentáciu virtuálneho objektu. Tento fyzický objekt môže mať tvar podobný virtuálnemu objektu alebo môže mať tiež univerzálny tvar ako napríklad guľa [7]. Pomocou pozičných značiek alebo senzorov umiestnených na fyzickom objekte je monitorovaná jeho poloha v priestore, ktorá sa priamo prejavuje na polohe virtuálneho objektu, s ktorým sa manipuluje. Týmto spôsobom sa dá vykonávať translácia a rotácia virtuálneho objektu. Ďalšia manipulácia ako napríklad zväčšenie alebo zmenšenie objektu je možná pomocou iných metód napríklad pomocou tlačidla umiestneného na fyzickom objekte určenom na manipuláciu virtuálneho objektu.



Obr. 2.4: Použitie guľového predmetu na interakciu s virtuálnou realitou

Ďalšou možnosťou je použitie objektu, ktorý nebude reprezentovať virtuálny objekt priamo, ale iba niektorú z jeho vlastností ako napríklad rotáciu okolo zvislej osi, ktorá by sa dala ovládať pomocou otáčania nejakého fyzického objektu. V podstate ide prenesenie ovládacích prvkov ako sú tlačidlá, slidery alebo otočné gombíky z digitálneho prostredia do fyzického. Obdobný prístup bol použitý aj pri projekte Bricks. Kombináciou viacerých fyzických objektov slúžiacich na manipuláciu jednotlivých vlastností sa dá získať komplexné rozhranie, pomocou ktorého sa dá s virtuálnym objektom ľubovoľne manipulovať [8].

Pri tomto prístupe odpadá nutnosť sledovania všetkých vlastností fyzického objektu, ktoré by mohlo byť náročné sledovať. Namiesto toho stačí sledovať iba jednotlivé parametre ako rotáciu po zvolenej osi alebo pozíciu na zvolenej osi.

2.1.6 Interakcia pomocou ukazovátka

Tento koncept spočíva v použití predmetu osadeného špeciálnou značkou, ktorý slúži ako ukazovátka. Vhodným predmetom môže byť napríklad

pravítko s prilepenou pozičnou značkou na jednom konci alebo podlhovastý kus kartónu. Pomocou takéhoto ukazovátka sa dá s virtuálnymi objektmi rôzne manipulovať. Výhodou tejto metódy je nízka technologická náročnosť. Užívateľ nepotrebuje žiadne dodatočné zariadenia a stačí mu len pravítko alebo podobný predmet, a vytlačená špeciálna pozičná značka.

Koncept virtuálneho ukazovátka v súvislosti s rozšírenou realitou sa objavil už v roku 2000 v práci [9], na ktorú neskôr naviazal projekt Magic Paddle, o ktorom sa píše viac v kapitole 2.2.3. V oboch projektoch bola manipulácia s virtuálnymi objektmi navrhnutá veľmi podobne. Pre uchopenie virtuálneho objektu ho musí užívateľ ukazovátkom podobrať, predmet sa následne prichití na ukazovátka a užívateľ s ním môže voľne pohybovať. Pre polozenie objektu užívateľ nakloní ukazovátka a virtuálny objekt akoby sklzáne z naklonenej roviny ukazovátka. Virtuálny objekt sa dá taktiež posúvať tlačением ukazovátkom.

2.2 Analýza existujúcich technológií

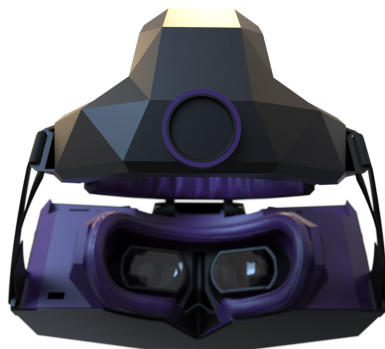
Táto časť sa venuje analýze existujúcich zariadení a mobilných aplikácií, ktoré prinášajú inovatívny spôsob manipulácie s objektmi v rozšírenej a virtuálnej realite.

2.2.1 VRgineers XTAL

VRgineers je česká firma zaoberajúca sa vývojom vysoko kvalitnej virtuálnej reality pre použitie v profesionálnej sfére za účelom školenia nových pracovníkov či dokonca chirurgov. Ich produkty sú taktiež ciele pre sféru vizualizácie virtuálnych prototypov napríklad v automobilovom priemysle či na vizualizáciu ešte neuskutočnených návrhov domov alebo iných stavieb. Ich virtuálny headset s názvom XTAL je jedným z technicky najpokročilejších headsetov na virtuálnu realitu na súčasnom trhu. Ponúkajú dve verzie tohto zariadenia, kdežto tá výkonnejšia verzia disponuje dvomi obrazovkami so 4K rozlíšením a obnovovacou frekvenciou 75 Hz, jednou pre každé oko, ktorá prináša veľmi detailný a ostrý obraz, ktorý umocňuje pocit preniknutia do virtuálneho prostredia. Interakcia s týmto virtuálnym headsetom prebieha pomocou rúk a ich gest. Sledovanie pohybu rúk zabezpečuje pohybový senzor spoločnosti Ultraleap s názvom Rigel, ktorý umožňuje presne zaznamenávať pohyby rúk v zornom poli 180 ° ako horizontálne, tak aj vertikálne. Tento senzor má veľmi nízku odozvu, čo prispieva k celkovému vnímaniu virtuálneho prostredia pri manipulácii s virtuálnymi objektmi.

Zariadenie sa tiež dá ovládať pomocou hlasových pokynov, čo v kombinácii s interakciou pomocou rúk vytvára efektívne a kvalitné užívateľské rozhranie. Zariadenia XTAL sa modifikujú na mieru zákazníkovi, aby spĺňali aj náročné požiadavky veľkých technologických firiem. Zákazník si môže dokonca vybrať

aj možnosť dodatočného spôsobu interakciu pomocou ovládačov HTC Vive. [10]



Obr. 2.5: Headset XTAL od spoločnosti VRgineers

2.2.2 Microsoft HoloLens

HoloLens je produkt spoločnosti Microsoft, ktorý vznikol pod názvom Project Baraboo ako pokus preniknúť na trh technológie zmiešanej reality. Jedná sa o takzvané smartglasses, čiže inteligentné okuliare. Tieto okuliare disponujú rôznymi senzormi a pokročilou optikou. Na zobrazovanie využívajú holografickú technológiu, ktorá sa stará o spĺyvanie virtuálneho obrazu s okolitým prostredím.

Na oboch stranách majú kamery slúžiace na periférne spracovanie okolitého prostredia. V strede je umiestnená jedna hĺbková kamera otočená nadol, snímajúca pohyby rúk. Okuliare sú tiež osadené špeciálnym reproduktorom, ktorý dokáže simulovať zvuky prichádzajúce z rôznych strán. Okuliare využívajú platformu Windows Mixed Reality, ktorá beží pod Windows 10. Pri interakcii kombinujú viaceré prístupy. Využívajú pokročilú technológiu rozpoznávania hlasu, ktorá zaručí rozpoznanie príkazu aj v prostrediach s vysokou hladinou hluku. Okrem základných príkazov na operáciu okuliarov ako spúšťanie aplikácií či zmeny hlasitosti, disponujú okuliare aj hlasovým asistentom Cortana spoločnosti Microsoft. Microsoft zašiel pri hlasovej interakcii ešte ďalej a vyvinul rozhranie, pomocou ktorého dokáže užívateľ manipulovať s virtuálnymi objektmi pomocou jednoduchých hlasových príkazov. Na manipuláciu s virtuálnymi objektmi (3D modely, okná aplikácií) podporuje 6 príkazov:

- „Bigger“ / „Smaller“ - slúžia na zmenu veľkosti objektu,
- „Face Me“ - pomocou tohto príkazu sa objekt otočí smerom k užívateľovi,

- „Follow Me“/„Stop Following“ - slúži na vypnutie alebo zapnutie funkcie sledovania. Táto funkcia zaisťuje, že objekt sa bude vo virtuálnom priestore pohybovať spolu s užívateľom,
- „Move this“ - pomocou tohto príkazu môže užívateľ objekt posúvať. Využíva technológiu sledovania očí a premiestni objekt tam, kam sa užívateľ pozrie.

Pre zvolenie objektu, s ktorým chce užívateľ manipulovať, sa užívateľ pred vyslovením príkazu na daný objekt pozrie [11]. Manipulovať virtuálnymi objektmi sa s HoloLens dá aj pomocou pohybu rúk. Vďaka hĺbkovému senzoru vedia presne rozoznávať rôzne gestá, vďaka ktorým je táto manipulácia intuitívna a presná. Rozoznávajú napríklad „air tap“, spojenie palca a ukazováka, ktoré má podobný význam ako kliknutie ľavého tlačidla myši alebo „hand ray“ - predpaženie ruky s otvorenou dlaňou, ktoré slúži ako ukazovátka, pomocou ktorého užívateľ môže manipulovať s objektmi, ktoré vo virtuálnom prostredí nemá v dosahu [12].

Na vykonávanie určitých úkonov sa dá využiť aj samotná technológia sledovania očí. Pomocou nej sa dajú voliť objekty, s ktorými chce užívateľ manipulovať. Dlhší uprený pohľad na tlačidlo alebo iný prvok užívateľského rozhrania má podobnú funkciu ako stlačenie ľavého tlačidla myši. Tento spôsob interakcie sa dá využiť pri písaní textu s pomocou virtuálnej klávesnice alebo pri rôznych hrách. Toto ovládanie je podporované len pri modeli HoloLens 2. Technológia HoloLens 2 nie je primárne určená pre bežných spotrebiteľov ale najmä pre väčšie spoločnosti. Primárne by ich mali využívať pracovníci alebo robotníci na uľahčenie práce. Možnosti ich využitia sú však širšie. Veľký potenciál majú napríklad pri vzdelávaní. Použitie spomínanej technológie má ale za následok veľmi vysokú cenu zariadenia, ktorá sa pohybuje na úrovni 3 000 – 5 000 amerických dolárov.



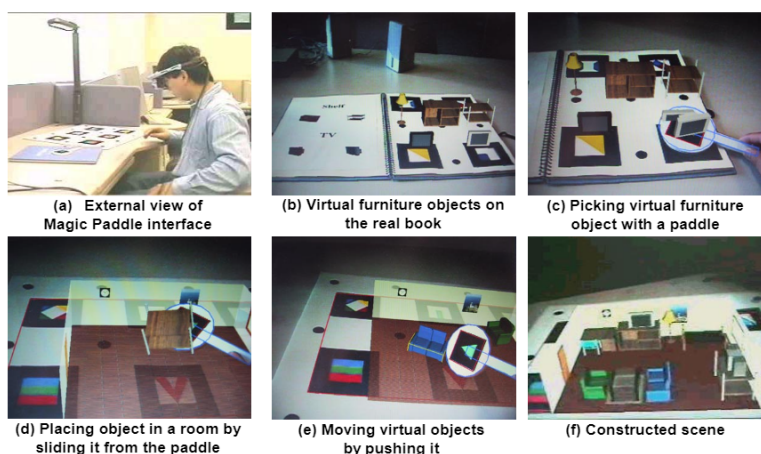
Obr. 2.6: Okuliare Microsoft HoloLens

2.2.3 Magic Paddle

Magic Paddle je systém na manipuláciu s objektmi rozšírenej reality pomocou takzvaného magického pádla, ktoré užívateľ drží v ruke. Užívateľ môže s pádlom vytvárať a meniť 3D scénu manipuláciou s virtuálnymi objektmi, akoby boli skutočné.

Systém Magic Paddle sa skladá z viacerých fyzických častí. Konkrétne ide o knihu, papier so špeciálnymi pozičnými značkami, kartónové pádlo alebo ukazovátka a headset na rozšírenú realitu. Kniha slúži ako virtuálny katalóg 3D objektov, ktoré sa dajú umiestniť do scény (v originálnej ukážke ide o nábytok, elektrospotrebiče a bytové zariadenie). Papier so špeciálnymi značkami vymedzuje scénu rozšírenej reality, na ktorý sa scéna aj zobrazuje. Kartónové pádlo slúži na manipuláciu s virtuálnymi objektmi.

Aplikácia zobrazuje miestnosť, do ktorej užívateľ pomocou pádla a knihy môže vložiť a premiestňovať nábytok a rôzne bytové zariadenie. Táto technológia môže byť samozrejme použitá aj v iných sférach ako zariaďovanie miestnosti. [13]



Obr. 2.7: Technológia Magic Paddle

2.2.4 Portal-ble

Portal-ble je systém na priamu manipuláciu s virtuálnymi objektmi v rozšírenej realite na smartfónoch iba pomocou rúk. Systém využíva externý infračervený snímač, ktorý je umiestnený na zadnej strane smartfónu tak, aby nezakrýval šošovku hlavného fotoaparátu. Tento senzor zabezpečuje snímanie rúk a získanie informácií o polohe rúk vzhľadom k smartfónu. Táto technológia umožňuje užívateľom uchopiť virtuálne predmety do rúk, akoby boli skutočné. Portal-ble tiež využíva vibrácie a vizuálne zvýraznenia objektu na obrazovke smartfónu pri uchopení predmetu, čo uľahčuje interakciu.

Testovanie tejto technológie ukázalo, že takáto interakcia je pre užívateľov veľmi intuitívna a manipulácia s objektmi veľmi precízna.



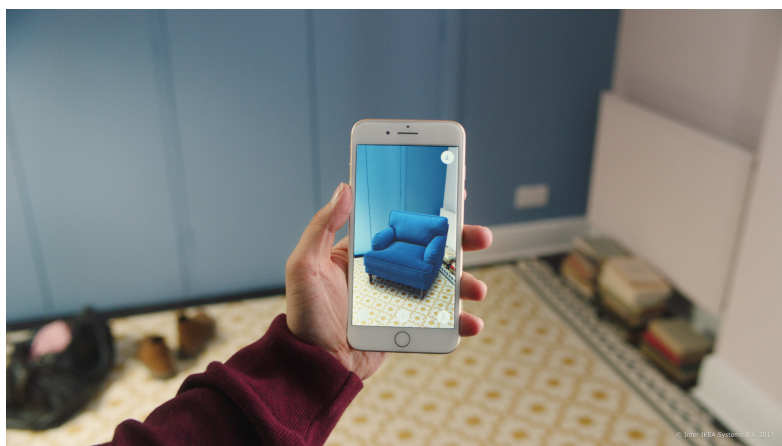
Obr. 2.8: Technológia Portal-ble

2.2.5 IKEA Place

IKEA Place je aplikácia spoločnosti IKEA využívajúca rozšírenú realitu na umiestňovanie virtuálnych produktov IKEA do reálnych interiérov, s cieľom uľahčiť výber zariadenia interiérov. Aplikácia bola vydaná pre platformy iOS a Android, ale k dátumu 14.3.2021 nie je k dispozícii verzia pre operačný systém Android z dôvodu vývoja novej verzie, ktorá by podľa uvedených informácií mala vyjsť v roku 2021.

Ku dňu 14.3.2021 má aplikácia na AppStore 5 600 hodnotení s priemerným hodnotením 4,6 z 5 bodov. Z čítania recenzií je známe, že medzi hlavné negatíva aplikácie patrí katalóg nábytku, v ktorom najväčšiu frustráciu spôsobuje absencia vyhľadávania a relatívne malý sortiment oproti celkovej ponuke spoločnosti IKEA. Na druhej strane užívateľské rozhranie a zážitok z rozšírenej reality a manipulácie s ňou sú hodnotené veľmi pozitívne.

Aplikácia využíva priamočiary prístup k interakcii. Celá aplikácia sa ovláda pomocou dotykového displeja. Táto interakcia je veľmi intuitívna a precízna. V aplikácii je zohľadnená gravitačná sila, ktorá zabezpečí, že virtuálne objekty sa zobrazujú, akoby boli položené na zemi. Zohľadnením gravitačnej sily odpadá potreba translácie objektu po zvislej osi, čím je uľahčený návrh interakcie, keďže pozícia v rovine podlahy je jednoznačne daná pozíciou prsta na dotykovej obrazovke.



Obr. 2.9: Aplikácia IKEA Place

Pri nábytku a zariadení interiéru je jednoznačne určené, ktorou stranou hore má byť umiestnený napríklad stôl je navrhnutý tak, že stolová doska má byť hore a nohy stola dole. Z tohto dôvodu je zbytočné, aby bola v aplikácii možnosť rotácie objektov okolo všetkých 3 osí. V aplikácii je možná rotácia iba okolo zvislej osi, a teda nie je potreba nijako rozlišovať medzi rotáciami okolo rôznych osí. Užívateľ vie teda jednoducho otočiť objekt pomocou otočenia dvoch prstov na dotykovej obrazovke. Takýto návrh interakcie s aplikáciou je veľmi efektívny a spĺňa všetky potrebné požiadavky pre takýto typ aplikácie. V aplikácii ARDesk je však potrebná aj translácia po zvislej osi, aj rotácia okolo jednej vodorovnej osi, a preto je takáto podoba interakcie nevhodná a potrebovala by doplniť o určité ovládacie prvky, čo by mohlo spôsobiť viaceré komplikácie.

2.3 Výsledná voľba prístupu

Prístup zvolený pre implementáciu v aplikácii ARDesk by mal spĺňať 4 kritéria.

Prvým z nich je precíznosť manipulácie s virtuálnymi objektmi. Táto vlastnosť je kľúčová pre aplikáciu ARDesk.

Druhým kritériom pri porovnaní rôznych prístupov interakcie je odhadovaná náročnosť, respektíve jednoduchosť na implementáciu vzhľadom na použitú technológiu. Keďže sa jedná o bakalársku prácu, mala by tomu zodpovedať aj náročnosť na implementáciu zvoleného prístupu, aby sa implementácia a následne testovanie dalo stihnúť v rámci času určeného na vypracovanie práce.

Tretím kritériom, ktoré by mal zvolený prístup spĺňať, je dostupnosť. Pri dostupnosti je myslené, či je k použitiu potrebná nejaká extra pomôcka alebo dodatočná technológia, ktorú nie každý vlastní alebo si ju môže dovoliť zakúpiť kvôli vysokým nákladom.

Keďže je hlavným cieľom tejto práce vymyslieť a implementovať nový spôsob interakcie s aplikáciou ARDesk, ktorý má viac prepojiť reálny svet s virtuálnym a tým umocniť celkový zážitok z rozšírenej reality, posledným kritériom je interaktivita, ktorú so sebou daný prístup prináša. Pod interaktivitou sa myslí miera zapojenia reálneho sveta alebo reálnych fyzických objektov do interakcie. Použitie iba dotykového displeja bude hodnotené 1 bodom.

Pri každom prístupe budem pred každé kritérium pridelovať od 1 do 5 bodov. Výsledné bodové ohodnotenie konkrétneho prístupu sa vypočíta ako suma bodových ohodnotení vo všetkých 4 kritériách.

Pri interakcii pomocou dotykového displeja môže byť precíznosť manipulácie vysoká, ako je to pri aplikácii IKEA Place, kde je v niektorých smeroch manipulácia obmedzená, aby sa celková precíznosť manipulácie zvýšila. V aplikácii ARDesk je precíznosť manipulácie dostačujúca, no nie ideálna, a preto bude hodnotená 3 bodmi. V aplikácii ARDesk bolo nenáročné implementovať interakciu pomocou tlačidiel a sliderov na dotykovom displeji, a preto je jednoduchosť, respektíve náročnosť hodnotená 5 bodmi. K takejto forme interakcie stačí iba samotné zariadenie a užívateľ nepotrebuje žiadne ďalšie príslušenstvo, preto v kategórii dostane 5 bodov. Keďže interaktivita hodnotí prepojenosť s reálnym svetom, pri použití iba dotykového displeja je to žiadne, a teda bude hodnotená 1 bodom.

Interakcia pomocou hlasových pokynov nezabezpečuje vysokú precíznosť manipulácie, a teda bude hodnotená 2 bodmi. Keďže nemám žiadne skúsenosti s rozpoznávaním reči predpokladám, že implementovať funkčný prototyp by bolo náročnejšie, ako to bolo v prípade interakcie pomocou dotykového displeja, a preto bude náročnosť hodnotená 3 bodmi. Dostupnosť je pri tomto prístupe hodnotená 5 bodmi, lebo k interakcii stačí samotné zariadenie. Síce sa pri tomto prístupe nevyužíva dotykový displej nejde zrovna o prepojenie s reálnym svetom v zmysle rozšírenia reality, a tak bude tento prístup v tomto kritériu hodnotený 2 bodmi.

Interakcia pomocou rúk prináša vysokú precíznosť vychádzajúcu z prirodzenej ľudskej schopnosti uchopiť predmety a z jemnej motoriky prstov. Precíznosť manipulácie virtuálneho objektu pomocou tohto prístupu ale závisí aj od technológie, ktorá bude použitá pri snímaní pohybov rúk a prstov. V tomto kritériu bude tento prístup hodnotený 4 bodmi. Náročnosť na implementáciu sa tiež odvíja od technológie, ktorá bude použitá pri snímaní rúk. V každom prípade bude implementácia náročná, lebo bude treba použiť strojové videnie, a preto bude tento prístup ohodnotený 2 bodmi. Dostupnosť je tiež závislá od použitej technológie. V prípade snímania holých rúk iba pomocou jednej kamery nie sú potrebné žiadne dodatočné predmety a pri snímaní pomocou špeciálnej rukavice je rukavica nevyhnutná a môže byť finančne náročné zaobstaráť si ju, preto dostane v tejto kategórii 3 body. Interaktivita tohto prístupu je z princípu vysoká, a teda bude ohodnotená 5 bodmi.

Interakcia pomocou fyzického predmetu je v precízności veľmi podobná interakcii pomocou rúk, avšak vďaka fyzickému predmetu, ktorý užívateľ môže

uchopiť a sledovať jeho pozíciu a rotáciu v reálnom svete je v precízności o niečo lepšia, a preto bude ohodnotená 5 bodmi. Náročnosť na implementáciu je stredná a bude hodnotená 3 bodmi. Dostupnosť je hodnotená iba 1 bodom, lebo na implementáciu a použitie je potrebný špeciálny predmet, ktorý by monitoroval svoju pozíciu a rotáciu v priestore. Interaktivita je tiež vysoká ako to bolo pri interakcii pomocou rúk a dostane teda 5 bodov.

Interakcia pomocou ukazovátka má veľkú precíznosť manipulácie, keďže využíva technológiu pozičných značiek, ktorých detekcia je presná a rýchla. Nevýhodou je to, že pozičná značka sa nedá rozpoznať keď je odvrátená od kamery, čo môže v niektorých prípadoch limitovať možnosti manipulácie s objektmi. Vo väčšine prípadov je ale toto obmedzenie zanedbateľné, a teda precíznosť bude hodnotená 4 bodmi. Tento prístup by mal byť implementačne nenáročný, keďže stačí využiť funkcionality knižnice na detekciu pozičných značiek a na základe získaných údajov vypočítať pozíciu a rotáciu potrebnú na manipuláciu, a tak dostane 4 body. K takejto interakcii potrebuje užívateľ iba vytlačенú pozičnú značku a pravítko alebo kúsok papiera, na ktorý značku prilepí. Tieto možnosti má väčšina ľudí, a teda dostupnosť bude hodnotená 4 bodmi. Interaktivita je o niečo slabšia v porovnaní s interakciou pomocou rúk alebo fyzického predmetu, no stále sa jedná o prístup využívajúci reálny svet a priestor, a bude teda hodnotený 4 bodmi.

Druh interakcie	Precíznosť	Náročnosť	Dostupnosť	Interaktivita	Spolu
dotykový displej	3	5	5	1	14
hlasové pokyny	2	3	5	2	12
ruky	4	2	3	5	14
fyzický predmet	5	1	1	5	12
ukazovátka	4	4	4	4	16

Tabuľka 2.1: Porovnanie rôznych prístupov k interakcii s aplikáciami rozšírenej reality

2.4 Analýza technológií na detekciu pozičných značiek

Z tabuľky ?? je evidentné, že najvhodnejším prístupom bude interakcia pomocou ukazovátka. Ukazovátka bude pozostávať z dlhého rovného predmetu napríklad vyrezaného kusu kartónu alebo z rovného pravítka, na ktorom bude umiestnená pozičná značka. Táto sekcia sa venuje analýze rôznych druhov pozičných značiek a technológii na ich detekciu v digitálnom obraze.

Pozičná značka Pozičná značka je objekt na obrázku, ktorý slúži ako referenčný bod na určenie pozície, veľkosti, rotácie iných predmetov na obrázku alebo na určenie skreslenia obrazu spôsobeného nedokonalou optikou. Pozičná značka môže mať rôznu podobu a tvar. Môže sa jednať o pravítko, z ktorého sa dajú vyčítať približné rozmery iných objektov na fotke alebo o špeciálne čiernobiele značky určené pre rozšírenú realitu. Pozičné značky sa v rozšírenej realite používajú na zistenie relatívnej polohy v reálnom svete a ako záchytný bod, na ktorý sa zobrazuje scéna rozšírenej reality. Tieto pozičné značky môžu mať v sebe zakódované aj užitočné informácie ako napríklad informácie o identite alebo informácie o samotnom modeli, ktorý sa má zobraziť.



Obr. 2.10: Rôzne druhy pozičných značiek

2.4.1 QR kód

QR kód je typ čiarového kódu vo forme štvorcovej značky, ktorý bol vyvinutý za účelom využitia v automobilovom priemysle v Japonsku. Keďže sa jedná o čiarový kód, obsahuje v sebe zakódovanú informáciu. Táto informácia je väčšinou vo forme webovej adresy alebo kontaktných údajov ako e-mailová adresa alebo telefónne číslo. V praxi sa využíva napríklad na bankové prevody, sledovanie času alebo identifikáciu a sledovanie produktov. Špecifikácia QR kódu spĺňa základné náležitosti a umožňuje využitie QR kódu ako pozičnú značku pre implementáciu rozšírenej reality. Keďže táto technológia existuje už vyše 25 rokov, algoritmy na detekovanie QR kódu sú optimalizované a veľmi rýchle. Existujú rôzne knižnice na rozpoznávanie QR kódov, medzi ktoré patrí aj knižnica OpenCV alebo knižnica Quirc.



Obr. 2.11: QR kód

2.4.2 ArUco

ArUco je open source knižnica, ktorá slúži k detekcii štvorcových pozičných značiek. Vďaka detekovaným značkám vie zistiť pozíciu kamery v reálnom priestore vzhľadom na detekovanú značku. Knižnica je vydaná pod licenciou GPLv3 pre osobné, výskumné a edukačné účely. ARDesk je výuková aplikácia, a teda spadá do tretej kategórie čiže knižnica je vhodná pre našu aplikáciu. Knižnica je napísaná v jazyku C++ vďaka čomu je veľmi efektívna a rýchla. Jedná sa o cross-platformovú knižnicu a je použiteľná na Windows, Linux, Mac OS a Android. Podporuje viaceré typy pozičných značiek ako napríklad ArTag, ArToolKit+, AprilTags a samozrejme aj vlastné pozičné značky ArUco. Knižnica je implementovaná s pomocou knižnice OpenCV a eigen3. Tieto závislosti sú súčasťou knižnice ArUco. Dokumentácia ku knižnici je na nešťastie vo forme textového dokumentu, v ktorom sa ťažko orientuje. Dokument obsahuje popis princípov, pomocou ktorých sú pozičné značky detekované. Taktiež obsahuje popis tried s ich rozhraním a dokonca aj niekoľko vzorových príkladov. Absencia informácií k použitiu knižnice na platforme Android je značným mínusom, keďže podobná informácia sa momentálne nedá vyhľadať ani nikde inde.

2.4.3 OpenCV

OpenCV je open source knižnica orientovaná na strojové videnie. Knižnica implementuje širokú škálu základných algoritmov na spracovanie obrazu a tiež aj mnoho pokročilejších algoritmov ako napríklad rozpoznávanie tváre. S celkovým počtom stiahnutí presahujúcim 18 miliónov sa jedná o najpoužívanejšiu knižnicu na spracovanie obrazu. Užívateľskú komunitu tvorí vyše 40 000

Kategória	Bodový zisk
Dokumentácia	3
Podpora jazykov	2
Komunita	2
Pozičné značky	4

Tabuľka 2.2: Bodový zisk knižnice ArUco

vývojárov z celého sveta. Knižnica je napísaná v jazyku C++ no má API aj pre Java(Android), Matlab a Python, v ktorom je obzvlášť populárna.

Knižnica podporuje aj detekovanie QR kódov, ktoré je implementované v triede `QRCodeDetector`. Rozhranie triedy tvoria viaceré metódy, medzi ktoré patrí metóda `detect`, ktorá detekuje QR kód na obrázku a metóda `decode`, ktorá dokáže extrahovať informácie zakódované v QR kóde. Kombinovaná funkcionálnosť oboch metód je obsiahnutá v metóde `detectAndDecode`. QR kód neslúži primárne ako pozičná značka, no má charakteristiky, ktoré ho robia vhodným na využitie ako pozičnú značku.

Rozšírená verzia taktiež obsahuje extra funkcionálnosť obsiahnutú v rôznych moduloch. Medzi modulmi je aj modul ArUco, ktorý disponuje vlastnými funkciami na rozpoznávanie pozičných značiek.

2.4.4 Modul ArUco knižnice OpenCV

Knižnica OpenCV má možnosť pridania dodatočného modulu ArUco, ktorý vychádza priamo z knižnice ArUco spomínanej v predošlej kapitole 3.4.2.

Oproti použitiu knižnice ArUco prináša modul ArUco knižnice OpenCV viacero výhod. Jednou z nich je získanie podpory viacerých programovacích jazykov, keďže knižnica OpenCV ponúka rozhranie pre viacero programovacích jazykov ako napríklad C, C++, Python, Java alebo Scala. Ďalšou výhodou použitia modulu ArUco knižnice OpenCV je jednoduchšie pridanie závislostí. Knižnica je napísaná v jazyku C++, pre ktorý ponúka aj rozhranie. Rozhranie pre ostatné jazyky je generované z pôvodnej implementácie v C++. Jazyky založené na java virtual machine používajú rozhranie knižnice OpenCV pre jazyk Java. Toto rozhranie využíva Java Native Interface. Java Native Interface umožňuje programu bežiacemu na Java virtual machine volať funkcie a metódy napísané v iných jazykoch ako napríklad C alebo C++, v ktorom je napísaná aj knižnica OpenCV s modulom ArUco.

Detekovanie ArUco značiek je možné pomocou jedného riadku zdrojového kódu. Slúži na to funkcia `detectAruco`, ktorá na vstupe prijíma zdrojový obrázok, v ktorom ArUco značky hľadá a špeciálny slovník pozičných značiek, v ktorom sú zakódované rôzne pozičné značky. Na výstupe vždy vracia pole rohov detekovaných značiek a pole ich číselných identifikátorov. Ďalej je možné,

aby funkcia vrátila aj kandidátov na pozičné značky, ktoré ale boli detekčným algoritmom nakoniec zamietnuté z dôvodu nesprávnej informácie zakódovanej v značke.

Funkcionalita modulu ArUco knižnice OpenCV je identická s tou z pôvodnej knižnice ArUco. Dokumentácia k tomuto modulu je veľmi dobrá a je súčasťou dokumentácie knižnice OpenCV. Stránka, na ktorej sa dokumentácia nachádza je veľmi prehľadná a rozsiahla. Sú na nej zreteľne oddelené časti dokumentujúce rozhranie pre jazyk C++ a rozhranie pre jazyky založené na Java virtual machine. Dokumentácia modulu ArUco sa nachádza v dokumentácii modulov medzi ostatnými modulmi, ktoré OpenCV obsahuje.

Kategória	Bodový zisk
Dokumentácia	4
Podpora jazykov	4
Komunita	3
Pozičné značky	4

Tabuľka 2.3: Bodový zisk knižnice OpenCV s modulom ArUco

2.4.5 ChiliTags

ChiliTags je cross-platformová knižnica na detekciu a identifikáciu dvojdimenzionálnych pozičných značiek s cieľom poskytnúť základ pre tvorbu aplikácií využívajúcich rozšírenú realitu. Knižnica ChiliTags bola vyvinutá pre projekty ako MetroScope alebo TapaCarp. Projekt TapaCarp vznikol za účelom precvičovať a zlepšiť priestorovú predstavivosť u ľudí. Využíva špeciálny projektor, ktorý zobrazuje obraz kolmo na vodorovnú plochu. Tento projektor má v sebe zabudovanú kameru, ktorá sníma značky ChiliTag umiestnené na fyzickom objekte a projektor zobrazuje jednotlivé pohľady ako pôdorys a nárys fyzického objektu vzhľadom na jeho rotáciu.

Knižnica je napísaná v jazyku C++ s podporou platforiem Windows, Linux, Mac OSX a Android. [14] Posledný commit v repozitári na github je z roku 2017 a k dnešnému dňu (10.3.2021) má 103 hviezdíčiek (pre porovnanie, repozitár ARToolKitX má 271). Dokumentácia ku knižnici je slabá, iba vo forme ukážky zdrojového kódu v jazyku C++ v jednom súbore, ktorý je okomentovaný.

2.4.6 ARToolKit

ARToolKit je open source knižnica na tvorbu aplikácií s využitím rozšírenej reality, ktorá bola vydaná v roku 2001. Pod vedením spoločnosti ARToolWorks knižnica pokračovala ako open-source projekt do roku 2015, kedy bola predaná

2.4. Analýza technológií na detekciu pozičných značiek

Kategória	Bodový zisk
Dokumentácia	2
Podpora jazykov	3
Komunita	1
Pozičné značky	3

Tabuľka 2.4: Bodový zisk knižnice ChiliTags

na komerčné účely. Po roku 2015 klesla aj aktivita užívateľov na fórach, čoho si všimli aj pôvodný riaditelia spoločnosti ARToolWorks a v snahe zachrániť túto knižnicu vytvorili ARToolKitX, ktorá je dodnes spravovaná a vyvíjaná. V súčasnej dobe je pod vedením spoločnosti Realmx Inc., ktorá sa radí medzi popredné spoločnosti na vývoj hardware a software zameraných na rozšírenú realitu.

Ponúka funkcionality sledovania pozičných značiek vo videozázname v reálnom čase. Jedná sa o multiplatformovú knižnicu, ktorá podporuje operačné systémy Windows, Mac OS, Linux a IRIX. ARToolKit implementuje sledovanie priestoru na základe pozičných značiek ako aj sledovanie na základe prirodzených črt reálneho prostredia. Taktiež existuje aj verzia pre mobilné zariadenia, v ktorej je zachovaná všetka funkcionality desktopovej verzie. Mobilná verzia podporuje ako Android, tak aj iOS. Dokumentácia ku knižnici je dostupná na stránke [15] a obsahuje množstvo užitočných informácií. Okrem popisu tried a ich rozhraní, ktoré sa v knižnici nachádzajú obsahuje aj vysvetlenia problematiky, ktorú knižnica rieši. Na stránke dokumentácie je tiež niekoľko návodov k vytvoreniu jednoduchých aplikácií. [16] Táto stránka ale pôsobí neaktuálne, keďže najnovšia verzia OS Windows uvedená na tejto stránke je Windows XP, ktorej posledné vydanie je z roku 2008.

V repozitári ARToolKitX [17] je dostupná aktuálna dokumentácia ku knižnici s detailným popisom API pre jazyky C/C++ a Java. Dokumentácia tiež obsahuje návody na nastavenie vývojového prostredia k vývoju pre Android.

Kategória	Bodový zisk
Dokumentácia	1
Podpora jazykov	3
Komunita	3
Pozičné značky	3

Tabuľka 2.5: Bodový zisk knižnice ARToolKit

2.4.7 ARCore

ARCore je open source framework vytvorený spoločnosťou Google, ktorý slúži na rýchly a efektívny vývoj mobilných aplikácií využívajúcich rozšírenú realitu. V dnešnej dobe je veľmi rozšírený vďaka podpore dvoch najpopulárnejších mobilných platforiem iOS a Android. Vývojári majú taktiež možnosť vybrať si či chcú aplikáciu vyvíjať v JVM IDE ako napríklad IDEA alebo Android Studio, alebo v Unity či dokonca v Unreal Engine. Táto knižnica má detailnú a veľmi jasnú dokumentáciu a je využívaná rozsiahlou komunitou vývojárov. Existuje veľa textových návodov dokonca aj videí vysvetľujúcich postup tvorby aplikácie s využitím ARCore. Knižnica ponúka rôzne možnosti vnímania prostredia reálneho sveta ako napríklad špeciálny modul Augmented Faces, ktorý ponúka funkcionality rozpoznania a sledovania rôznych črtov tváre a následne na ne zobrazovať vlastné textúry či predmety. Táto technológia má využitie napríklad vo vizualizácii módných doplnkov ako slnečné okuliare alebo náušnice. Modul Augmented Images ponúka možnosť rozpoznania a sledovania obrázkov v reálnom svete. Pomocou optimalizovaných algoritmov vie zistiť polohu a orientáciu až 20 detekovaných obrázkov v reálnom čase. Detekované obrázky môžu slúžiť ako záchytné body pre zobrazovanie virtuálnych textúr a objektov. Pre aplikáciu ARDesk je vyhovujúca fyzická veľkosť pozičnej značky menšia ako 10x10 cm. Modul Augmented Images podporuje obrázky o minimálnych fyzických rozmeroch 15x15 cm, a teda aj napriek tomu, že aplikácia ARDesk je vyvinutá s použitím frameworku ARCore, nie je vhodným kandidátom na technológiu rozpoznávania značiek.

Kategória	Bodový zisk
Dokumentácia	4
Podpora jazykov	2
Komunita	4
Pozičné značky	1

Tabuľka 2.6: Bodový zisk knižnice ARCore

Konečný výber technológie na detekciu pozičných značiek

Pri výbere technológie na detekciu pozičných značiek bude hlavným kritériom súčet bodov v kategóriách pre jednotlivé technológie. Ako najvhodnejšia technológia podľa celkového súčtu bodov vyšla technológia modulu ArUco knižnice OpenCV.

Technológia na detekciu pozičných značiek	Celkový bodový zisk
ArUco	11
Modul ArUco knižnice OpenCV	15
ChiliTags	9
ARToolKit	10
ARCore	11

Tabuľka 2.7: Bodový zisk knižnice ARToolKit

2.5 ARDesk

Výuková aplikácia ARDesk bola vytvorená pod vedením Ing. Jiřího Chludila v rámci predmetov BI-SP1 a BI-SP2. Úlohou bolo vytvoriť vzdelávaciu aplikáciu pre základné alebo stredné školy, ktorá by využívala technológiu rozšírenej reality.

2.5.1 Súčasný stav aplikácie

Prototyp aplikácie ARDesk bol vyvinutý rámci predmetu BI-SP1. Výstupom bola aplikácia, ktorá dokázala zobrazovať AR scénu, umiestniť do nej zvolený 3D model a pomocou horizontálneho slideru od seba vzdaliť alebo priblížiť časť modelu vytvorené rovinným rezom modelu.

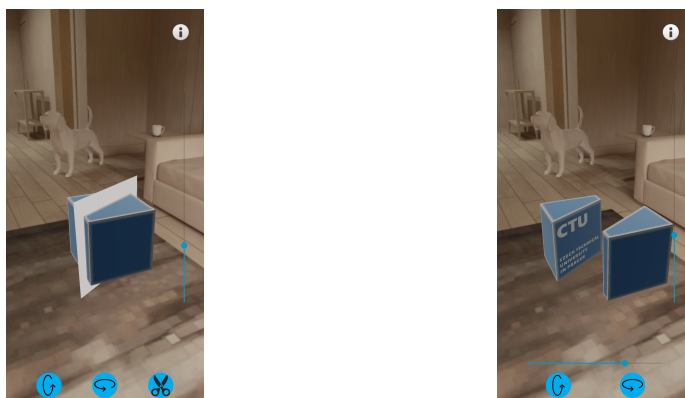
V predmete BI-SP2 sa pokračovalo s vývojom aplikácie ARDesk. Okrem odstránenia bugov a refaktorizácie zdrojových kódov boli implementované aj nové prvky manipulácie s objektmi. Išlo o vertikálny slider, pomocou ktorého užívateľ môže meniť výšku, v ktorej sa 3D model nad zvoleným kotevným bodom zobrazoval. Ďalej boli pridané dve tlačidlá, pomocou ktorých užívateľ môže rotovať 3D model okolo zvislej a vodorovnej osi a jedno tlačidlo, pomocou ktorého sa vykonal rez 3D modelu podľa zobrazenej reznej roviny.

Požiadavka na možnosť rotácie 3D modelu okolo zvislej osi bola odôvodnená obmedzenou možnosťou pohybu okolo modelu z pozície žiaka sediaceho v školskej lavici. Bez tejto možnosti by sa žiak musel postaviť a prejsť okolo lavice, aby si mohl model pozrieť zo všetkých strán, čo by mohlo mať nepriaznivý vplyv na proces výuky.

Požiadavka na rotáciu okolo vodorovnej osi bola odôvodnená technickým obmedzením technológie ARCore. Toto obmedzenie sa prejaví, keď sa užívateľ snaží prezrieť si model od spodu. V momente keď zo záberu kamery zmizne plocha, na ktorú sa AR scéna zachytávala, zmizne aj samotná AR scéna, a teda bez možnosti rotácie okolo vodorovnej osi by si užívateľ nemohol dôkladne prezrieť model zo všetkých strán.

Tlačidlo na vykonanie rezu modelu bolo pridané z dôvodu nezretelnosti reznej roviny. V pôvodnej verzii sa model zobrazoval už rozrezaný bez

2. ANALÝZA



Obr. 2.12: Screenshot z aplikácie ARDesk (vľavo pred rozrezaním modelu, vpravo po rozrezaní)

znázornenej reznej roviny, čím sa čiastočne strácal pôvodný účel aplikácie. S pridaním tlačidla na vykonanie rezu sa upravilo aj zobrazovanie modelu, ktorý sa v súčasnom stave zobrazí najprv vcelku s reznou rovinou prechádzajúcou cez model a po stlačení tlačidla sa zobrazia časti rozrezaného modelu už bez reznej roviny.

Návrh

Táto kapitola sa zaoberá návrhom spôsobu manipulácie s objektmi pre aplikáciu ARDesk. V návrhu sú spomenuté aktivity a triedy potrebné na implementáciu funkčného prototypu, ktoré sa starajú ako o kalibráciu fotoaparátu, tak aj o samotné detekovanie ukazovátka a získanie parametrov pre manipuláciu. Cieľom tohto návrhu je splniť požiadavky aplikácie a rozšíriť možnosť manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk.

3.1 Funkčné a nefunkčné požiadavky

Výstupom tejto práce má byť prototyp manipulácie s objektmi, ktorý má rozšíriť pôvodný spôsob manipulácie v aplikácii ARDesk o nový, alternatívny prístup. Funkčné a nefunkčné požiadavky budú teda vychádzať z pôvodných funkčných a nefunkčných požiadaviek aplikácie ARDesk v kategórii AR scény.

Medzi hlavné funkčné požiadavky plynúce z pôvodného projektu z predmetov BI-SP1 a BI-SP2 je zobrazenie scény rozšírenej reality s možnosťou umiestnenia 3D modelov. Táto požiadavka bude zachovaná v pôvodnom zmysle a nebudú v nej vykonané žiadne zmeny. Zvyšné požiadavky sú namierené na manipuláciu 3D modelu umiestneného do scény rozšírenej reality. Medzi nebudú patriť požiadavky, v ktorých bude zachovaný pôvodný rozsah manipulácie prenesený do manipulácie pomocou ukazovátka.

Nefunkčné požiadavky budú orientované najmä na nízku odozvu medzi detekovaním pohybu ukazovátka a prenesením týchto zmien do pohybu virtuálneho objektu, lebo nízka odozva je kľúčová pre zabezpečenie ako precíznej, tak aj zaujímavej formy manipulácie s virtuálnymi objektmi.

3. NÁVRH

Požiadavka	Typ	Priorita
1.) Aplikácia		
1.1) Aplikácia by mala byť dostupná pre všetky Android zariadenia s podporou ARCore	N	Vysoká
1.2) V aplikácii by mala byť možnosť prepínania medzi spôsobmi manipulácie s virtuálnymi objektmi	F	Vysoká
1.3) Prepínanie medzi spôsobmi manipulácie by malo byť pomocou prepínača v rámci aktivity rozšírenej reality	N	Stredná
2.) Manipulácia s objektmi		
2.1) Prototyp manipulácie s objektmi bude detekovať pozičnú značku a na základe jej polohy bude meniť polohu virtuálneho objektu	F	Vysoká
2.2) Prototyp manipulácie s objektmi bude detekovať pozičnú značku a na základe jej rotácie bude meniť rotáciu virtuálneho objektu	F	Vysoká
2.3) Zmeny pozície virtuálneho objektu na základe zmien pozície ukazovátka sa musia prejaviť okamžite bez viditeľnej odozvy	N	Vysoká
2.4) Zmeny rotácie virtuálneho objektu na základe zmien rotácie ukazovátka sa musia prejaviť okamžite bez viditeľnej odozvy	N	Vysoká
2.5) Prototyp manipulácie s objektmi bude meniť vzdialenosť rozrezaných častí objektu na základe pohybu ukazovátkom	F	Nízka
3.) Kalibrácia fotoaparátu		
3.1) Aplikácia by mala byť schopná kalibrovať fotoaparát na základe snímání kalibračnej dosky	F	Vysoká
3.2) Aplikácia by mala byť schopná údaje získané pri kalibrácii uložiť a neskôr načítať z pamäte	F	Stredná

Obr. 3.1: Funkčné a nefunkčné požiadavky

3.2 Zvolená metóda manipulácie s objektmi

Z analýzy vyplynulo, že najvhodnejšia metóda manipulácie s objektmi pre aplikáciu ARDesk je manipulácia pomocou ukazovátka. Na ukazovátke bude umiestnená pozičná značka ArUco, ktorá bude detekovaná pomocou knižnice OpenCV. Na základe pozície pozičnej značky bude určená pozícia virtuálneho modelu v scéne rozšírenej reality.

Oblasť, kde sa dá vybrať viacerými smermi je označenie modelu alebo vykonanie akcie obdobnej kliknutiu, ktorá by mohla započatť pohyb virtuálneho objektu na základe pohybu ukazovátka. Jednou možnosťou je kliknutie vypustiť a využiť priblíženie ukazovátka k modelu. Pri prekonaní zvolenej minimálnej vzdialenosti od modelu by sa model ako keby prichytil na ukazovátko a začal by sa pohybovať a otáčať podľa neho. Pre ukončenie akcie presúvania by užívateľ ukazovátkom mierne zatriasol, model by sa uvoľnil a zostal stáť na mieste v priestore. Problémom pri takomto návrhu je nechcená manipulácia s objektom. Užívateľ by si musel dávať pozor, aby sa náhodou ukazovátkom nepriblížil k virtuálnemu objektu a ten by sa tým pádom prichytil na ukazovátko a začal by sa posúvať s ním, čo by bolo nežiadúce.



Obr. 3.2: ArUco značky umiestnené na ukazovátku

Alternatívou by mohlo byť použitie dotykového displeja ako plochy na detekciu kliknutia. V tomto prípade nebudú použité konvenčné tlačidlá, ale celý displej by slúžil ako plocha, ktorá by detekovala dotyk, na základe ktorého by sa funkcia manipulácie objektu podľa ukazovátka aktivovala. Aktivovaná by zostala po celú dobu dotyku displeja a skončila by zdvihnutím prsta užívateľa z dotykovej obrazovky.

Na zvyšné úkony a to vykonanie rezu a oddialenie, respektíve priblíženie vzniknutých častí modelu. Na vykonávanie týchto úkonov bude tiež využitá kombinácia ukazovátka s dotykovým displejom. Na rozrezanie modelu bude slúžiť dvojité kliknutie na dotykový displej. Na následné oddialenie a priblíženie bude slúžiť ArUco značka na opačnej strane ukazovátka a jeho pohyb zľava doprava a naopak. Na aktiváciu bude opäť slúžiť dotyk jedným prstom, ako to je v prípade translácie s rotáciou.

V aplikácii bude zachovaná aj pôvodná manipulácia s objektmi pomocou tlačidiel a sliderov, ktorá bude predvolená s možnosťou prepnutia do módu manipulácie pomocou ukazovátka.

3.3 Kalibrácia

3.3.1 Optické skreslenie

Optické senzory a objektívy nie sú dokonalé a môžu mať rôzne vady. Medzi časté vady objektívov patrí optické skreslenie, ktoré spôsobuje nedokonalosť projektovaného obrazu. Tieto vady sú zreteľné najmä pri lacnejších objektívoch s menej kvalitnými šošovkami, aké sa nachádzajú aj na fotoaparátach smartfónov alebo tabletov.

Optické skreslenie môže byť rôznych druhov. Medzi najčastejšie patrí radiálne a tangenciálne skreslenie.

Radiálne skreslenie sa môže prejavovať dvomi spôsobmi. Prvým z nich je súdkovité skreslenie, ktoré sa prejavuje zmenšením reálnych rozmerov v miestach obrazu vzdialených od stredu. Takéto skreslenie pripomína súdok, ktorého vrch aj spodok sú užšie ako stred. Druhým prípadom je poduškovité

skreslenie, pri ktorom sa s väčšou vzdialenosťou od stredu reálne rozmery zväčšujú. To pripomína tvar podušky, ktorej rohy bývajú často pretiahnuté. [18]

Je spôsobené tvarom objektívu, ktorého šošovky majú kruhový tvar a jeho optické vlastnosti sa smerom od stredu k okrajom zhoršujú.

K tangenciálnemu skresleniu dochádza, keď objektív a snímač nie sú umiestnené paralelne ale pod miernym uhlom. Môže to byť spôsobené napríklad použitím nekvalitného lepidla vo výrobnom procese. Tangenciálne skreslenie sa prejavuje predĺžením na jednej strane obrazu a naopak skrátením na protiľahlej strane obrazu. [18] Ak by sme teda pozorovali dokonalý štvorec umiestnený paralelne s rovinou objektívu, obraz tohto štvorca by bol deformovaný, ako keby bol snímaný pod uhlom a neboli by tak zachované reálne pomery strán.

V oboch prípadoch dochádza k zmene pomerov medzi rozmermi v obraze a reálnymi rozmermi, čo znemožňuje presné zistenie polohy objektov o známych rozmeroch, akými sú napríklad aj pozičné značky, a preto ak chceme zaisťiť presné získavanie údajov o polohe pozičných značiek, treba tieto optické vady digitálne eliminovať. [19] Proces eliminácie optických väd nie je univerzálny pre všetky zariadenia, lebo rôzne smartfóny a tablety disponujú rôznymi snímačmi s rôznou optikou, ktorá spôsobuje rôznu mieru skreslenia. Aj pri rovnakých zariadeniach s rovnakými snímačmi a optikou môžu existovať rozdiely v skreslení, ktoré produkujú. Tieto rozdiely sú často spôsobené malými nepresnosťami vo výrobnom procese. [20]

3.3.2 Kalibrácia

Pre dosiahnutie presnej eliminácie optického skreslenia sa musí fotoaparát zariadenia kalibrovať. Pri kalibrácii sa z fotografií nejakého referenčného obrázku o známych rozmeroch zistia parametre optického skreslenia a tiež parametre snímača, ktoré slúžia na elimináciu optického skreslenia z jednotlivých obrázkov. [19]

Samotný proces kalibrácie fotoaparátu v knižnici OpenCV spočíva v analýze snímok kalibračnej dosky, ktorou môže byť šachovnica, rovnomerne rozmiestnené ArUco značky alebo kombinácia obidvoch. Na to slúži funkcia `calibrateCamera`, ktorá k úspešnej kalibrácii potrebuje množinu aspoň 10 snímok kalibračnej dosky. Na výstupe vracia táto metóda maticu fotoaparátu a koeficienty skreslenia. Koeficientov skreslenia je 5 pričom 3 z nich slúžia na elimináciu radiálneho skreslenia a zvyšné 2 na elimináciu tangenciálneho skreslenia.

Matica fotoaparátu je štvorcová matica s rozmerom 3x3, ktorá obsahuje informácie ako ohniskovú vzdialenosť objektívu a pozíciu optického stredu objektívu.

Po úspešnej kalibrácii sa už fotoaparát nemusí znovu kalibrovať. Stačí ak sa použijú parametre z prvej kalibrácie. [20]

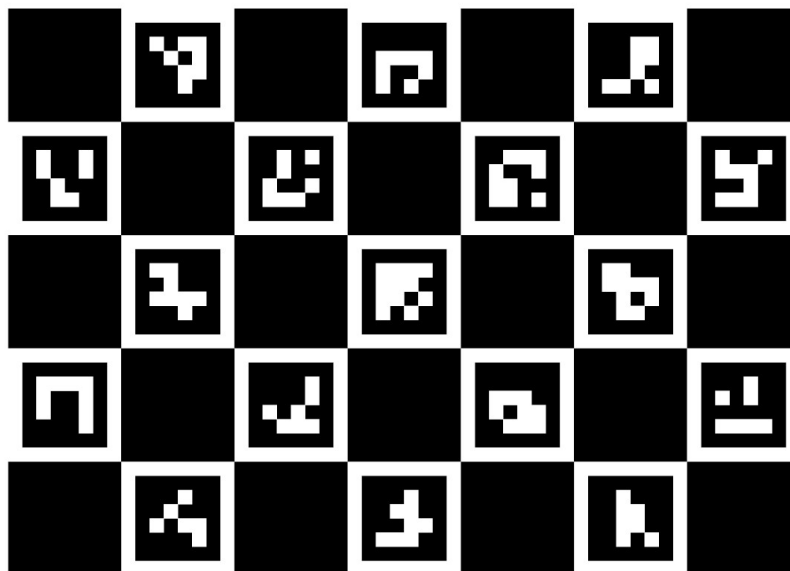
Modul `ArUco` knižnice `OpenCV` môže byť tiež použitý na kalibráciu fotoaparátu. Kalibračné funkcie modulu `ArUco` sú všestrannejšie v porovnaní s funkciou `calibrateCamera` knižnice `OpenCV`. Ku kalibrácii využívajú kalibračné dosky tvorené pozičnými značkami `ArUco`, pri ktorých k zisteniu koeficientov skreslenia a matice fotoaparátu na rozdiel od funkcie `calibrateCamera`, pri ktorej treba na kalibráciu zábery celej kalibračnej dosky, postačujú aj zábery zachytávajúce iba časť z kalibračnej dosky. Modul `ArUco` disponuje dvomi funkciami na kalibráciu fotoaparátu. `CalibrateCameraAruco`, ktorá ku kalibrácii využíva kalibračnú dosku tvorenú iba `ArUco` značkami a `calibrateCameraCharuco`, ktorá využíva kalibračnú šachovnicu osadenú dodatočnými `ArUco` značkami. V dokumentácii sa ale udáva, že pre presnejšie výsledky je vhodné použiť funkciu `calibrateCameraCharuco`. [21]

Po úspešnej kalibrácii sa môžu využívať funkcie knižnice `OpenCV` určené na vypočítanie pozície a rotácie pozičných značiek v priestore, ktoré sú potrebné pre ďalší vývoj prototypu na manipuláciu s objektmi v aplikácii `ARDesk` ale aj iné funkcie knižnice, ktoré pre ich fungovanie potrebujú presnú kalibráciu.

3.3.2.1 Kalibračná aktivita

Pri prvom zapnutí funkcie manipulácie objektov pomocou ukazovátka v aplikácii `ARDesk`, prebehne potrebná kalibrácia. Pri kalibrácii bude potrebné nasnímať kalibračnú šachovnicu ?? a pritom mierne pohybovať zariadením, aby bol kalibračný algoritmus schopný zistiť údaje o optickom skreslení. Kalibrácia bude sprostredkovaná pomocou aktivity `CameraCalibrationActivity`, ktorá bude spustená pomocou `startActivityForResult` a ako výsledok bude vracať získané parametre detekovaného optického skreslenia. Po úspešnej kalibrácii sa zistené parametre optického skreslenia uložia aj do zdieľanej pamäte aplikácie. Podľa dostupnosti týchto údajov v zdieľanej pamäti, sa bude dať zistiť, či kalibrácia už na zariadení prebehla alebo ešte nie. Trieda `CameraCalibrationActivity` bude využívať triedu `ArFragment` na zobrazenie obrazu z fotoaparátu, aby sa zachovala konzistentnosť obrazu s aktivitou, ktorá slúži na samotné zobrazovanie virtuálnych objektov. Určovanie pozície značky `ArUco` sa vykonáva na obraze získanom z triedy `Camera` a tá je získaná z triedy `ArFragment` a teda môžeme využiť ten istý kód na konverziu a predspracovanie obrazu získaného z triedy `ArFragment` aj pri kalibračnej aktivite. Na spracovanie snímok z fotoaparátu a na vykonanie kalibrácie bude slúžiť trieda `CameraCalibrator`. Táto trieda bude mať na starosti aj načítanie a uloženie kalibračných parametrov z pamäti po vykonaní kalibrácie.

Pre uľahčenie práce s kalibračnými parametrami bude vytvorená trieda `CalibrationParameters`, ktorá v sebe bude združovať všetky kalibračné parametre v jednej štruktúre.



Obr. 3.3: Kalibračná šachovnica ChArUco

3.4 Detekcia pozičnej značky ArUco

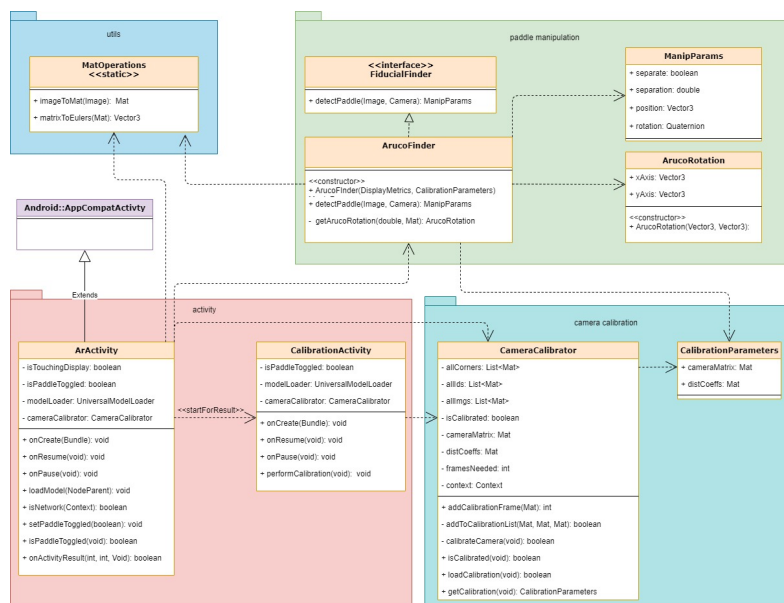
Funkcionalita detekcie pozičnej značky ArUco bude implementovaná v triede `ArucoFinder`. Pre možnosti budúceho rozšírenia na iný druh pozičných značiek bude existovať rozhranie `FiducialFinder` s metódou `detectPaddle`. Trieda `ArucoFinder` bude toto rozhranie implementovať.

Trieda `ArucoFinder` bude implementovať metódy potrebné na detekciu pozičnej značky ArUco ako aj metódy potrebné na určenie parametrov potrebných na vykonanie translácie a rotácie virtuálneho modelu v scéne rozšírenej reality podľa pohybu ukazovátka. Jej metóda na detekciu pozičnej značky a určenie parametrov translácie a rotácie bude volaná pri každom volaní metódy `onUpdate` triedy `ArFragment` z knižnice `ARCore`, ktorá zabezpečuje celý beh od snímania prostredia po renderovanie virtuálnych objektov do scény rozšírenej reality. Táto metóda by mala byť zavolaná s každou novou snímkom obrazovky a teda približne 30krát za sekundu v závislosti od výkonu procesoru zariadenia. V rovnakej frekvencii sa budú tieto zmeny polohy pozičnej značky prejavovať aj na polohe virtuálneho objektu v scéne rozšírenej reality. Táto frekvencia je postačujúca, keďže je to presne tá istá frekvencia, s akou sa obnovuje aj obraz scény zobrazujúci sa na displeji.

Metóda `detectPaddle` z rozhrania `FiducialFinder` bude potrebovať na detekciu ArUco značky aktuálnu snímku z fotoaparátu zariadenia a tiež objekt `Camera` z knižnice `ARCore`, z ktorej sa dajú získať informácie o polohe

zariadenia v priestore.

Detekovaná manipulácia môže byť dvoch druhov. Môže sa jednať o transláciu spojenú s rotáciou objektu alebo o odd'áľovanie, respektíve priblíženie dvoch častí objektu po vykonaní rezu. Na združenie týchto druhov manipulácie bude slúžiť trieda **ManipParams**, ktorá v sebe bude uchovávať informáciu o druhu manipulácie, ktorá bola detekovaná a tiež parametre danej manipulácie.



Obr. 3.4: Návrh tried umožňujúcich manipuláciu pomocou ukazovátka

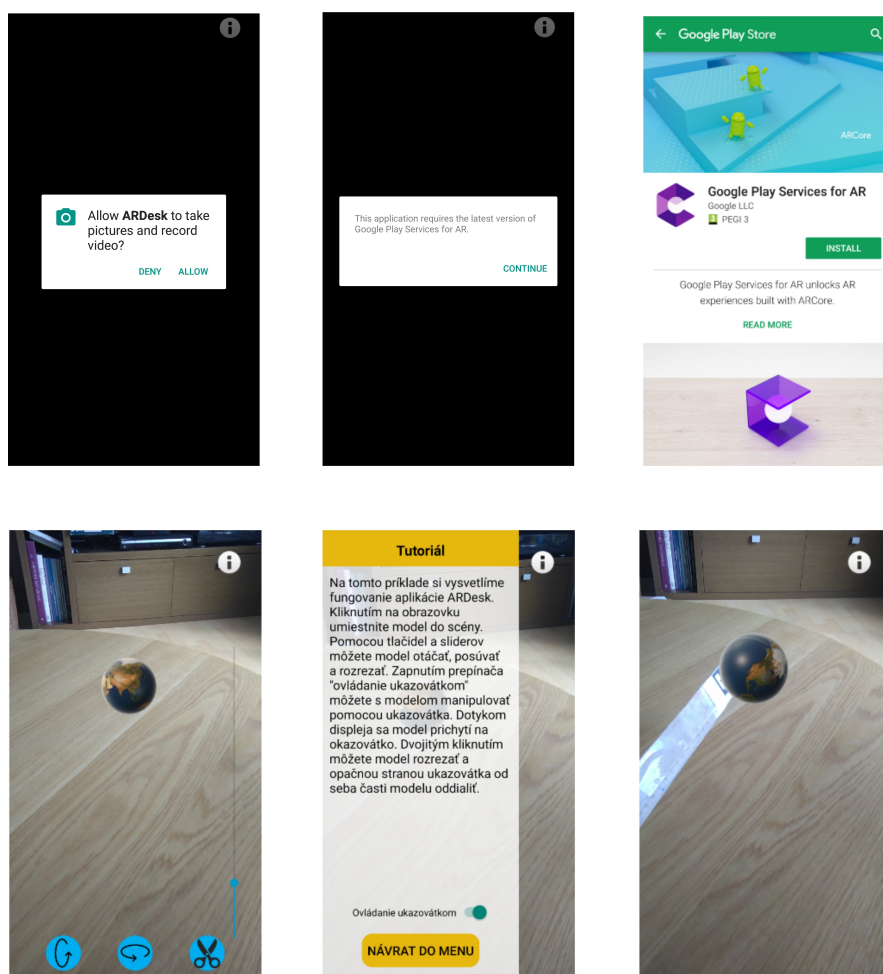
3.5 Návrh GUI a aktivity s rozšírenou realitou

GUI aplikácie ARDesk vzniklo už v rámci predmetov BI-SP1 a BI-SP2 a je veľmi jednoduché a čisté. Integrácia nového prototypu manipulácie s objektmi si nevyžaduje žiaden zásah do pôvodného GUI okrem aktivity zobrazujúcej rozšírenú realitu **ARActivity**. Z pôvodného GUI v aktivite zobrazujúcej rozšírenú realitu budú zachované všetky pôvodné prvky a všetky zmeny budú len vo forme pridaných prvkov.

Pri prvom spustení aplikácie a spustení **ARActivity** je treba povoliť prístup k fotoaparátu zariadenia. Na to sa zobrazí dialógové okno, kde treba kliknúť na tlačidlo „ALLOW“. Následne sa užívateľovi zjaví správa informujúca o tom, že aplikácia potrebuje najnovšiu verziu Google Play Services for AR. Kliknutím na tlačidlo „CONTINUE“ je užívateľ presmerovaný do aplikácie Google Play Store, kde si užívateľ môže nainštalovať Google Play Services for AR. Ak v zariadení už boli nainštalované Google Play Services for AR pred spustením aplikácie, tento krok sa vynecháva. Následne sa už užívateľovi zobrazí scéna rozšírenej reality.

3. NÁVRH

Do fragmentu s informáciami o vizualizovanom príklade bude pridaný prepínač, ktorého funkciou bude prepínať medzi spôsobmi manipulácie pomocou pôvodného rozhrania a pomocou ukazovátka. Ak bol virtuálny objekt umiestnený do scény v predvolenom móde, na obrazovke sa zjavia ovládacie tlačidlá a slidery. Pri prepnutí do módu manipulácie pomocou ukazovátka tieto ovládacie prvky zmiznú a pri prepnutí naspäť do pôvodného módu sa znovu objavia.



Obr. 3.5: Návrh aktivity zobrazujúcej scénu rozšírenej reality

Implementácia

Táto kapitola sa venuje implementácii prototypu manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk podľa návrhu z kapitoly 3. V tejto kapitole sú tiež zhrnuté body, ktoré sa podarilo implementovať, a ktoré nie, a v čom sa implementácia od návrhu líši. Taktiež sa tu nachádza príručka, ktorá popisuje ako použiť knižnicu OpenCV s modulom ArUco v programe Android Studio.

4.1 Kalibrácia

Pri kalibrácii bolo odchýlenie sa od návrhu značné a to tým, že nebola implementovaná zvláštna kalibračná aktivita a namiesto toho sú metódy triedy `CameraCalibrator` volané z hlavnej aktivity na zobrazovanie scény rozšírenej reality `ArActivity`. Osobitná kalibračná aktivita by musela používať istú formu zobrazovania fotoaparátu, akou je napríklad `JavaCameraView` z knižnice OpenCV alebo `ArFragment` z knižnice ARCore, ktorý je ale už v čase začiatku kalibrácie inicializovaný v hlavnej aktivite na zobrazovanie scény rozšírenej reality. Táto nová inicializácia by mala zbytočnú réžiu a taktiež by sa pôvodne inicializovaný `ArFragment` musel znovu inicializovať po návrate do pôvodnej aktivity na zobrazovanie scény rozšírenej reality.

Keďže je užívateľské rozhranie manipulácie s objektmi v aplikácii ARDesk navrhnuté tak, že predvolený spôsob ovládania je pôvodný pomocou tlačidiel a sliderov s možnosťou prepnutia do módu ovládania pomocou ukazovátka, nie je na použitie aplikácie kalibrácia potrebná. Potrebná začne byť v momente, keď sa užívateľ prepne do módu ovládania pomocou ukazovátka. Pri prepnutí do módu ovládania pomocou ukazovátka sa zavolá metóda `calibrateCamera` triedy `CameraCalibrator`, ktorá sa najprv pokúsi načítať kalibračné údaje z kalibračného súboru uloženého v pamäti aplikácie. Pri prvom prepnutí módu tento kalibračný súbor neexistuje, a tak trieda `CameraCalibrator` zistí, že ide o prvé prepnutie do módu ovládania pomocou ukazovátka, a tak treba vykonať kalibráciu. Na obrazovke sa následne zjaví text informujúci užívateľa o počte ostávajúcich snímok kalibračnej šachovnice potrebných na vykonanie

kalibrácie. Po dokončení kalibrácie sa získané kalibračné údaje uložia do kalibračného súboru v pamäti aplikácie a pri ďalších spusteniach aplikácie sa už kalibračné údaje načítajú z pamäte aplikácie.

Po dokončení kalibrácie z obrazovky zmizne informácia o počte snímok potrebných na vykonanie kalibrácie a užívateľ môže bez ďalšieho nastavenia pokračovať v používaní aplikácie.

4.2 Získanie polohy značky

Pri translácii virtuálnych objektov sa využívajú údaje získané z pozičnej značky ArUco umiestnenej na jednom konci ukazovátka. V prvom kroku sa detekujú pozičné značky ArUco v obraze získanom pomocou API ARCore. Tento obraz zvyčajne pokrýva väčšie zorné pole ako obraz, ktorý sa v aplikácii zobrazuje na obrazovke, keďže väčšina displejov smartfónov má pomer strán 16:9 alebo dokonca až 19:9 a väčšina snímačov zachytáva obraz s pomerom strán 4:3. Tento nepomer ale nie je treba v implementácii nijako riešiť, keďže 3D priestor knižnice ARCore, v ktorom je virtuálny objekt umiestnený, nie je vymedzený zorným poľom, ktoré je zobrazované na displeji zariadenia, ale pokračuje ďalej za jeho hranice. Preto nie je problém, ak je pozičná značka ArUco detekovaná v časti obrazu, ktorý sa nezobrazuje na displeji.

Ak je na obraze detekovaná značka ArUco, tak sa následne pomocou funkcionality modulu ArUco knižnice OpenCV zistí pozícia a rotácia značky v priestore vzhľadom na fotoaparát zariadenia. Pri zisťovaní týchto informácií je nutné funkciám poskytnúť údaje získané pri kalibrácii fotoaparátu a to maticu fotoaparátu ako aj koeficienty skreslenia.

Pri zisťovaní pozície a rotácie ArUco značky v priestore som použil aj kalibračné údaje získané z iného zariadenia zo zvedavosti ako veľmi sú tieto kalibračné údaje špecifické pre jednotlivé zariadenia a v akom rozsahu sa prejavajú pri detekcii pozície a rotácie. Ukázalo sa, že pri použití kalibračných údajov zo zariadenia Xiaomi Mi Note 3 na zariadenie Motorola Moto G5s boli nepresnosti nielenže veľké, ale aj nekonzistentné s každým záberom. Takto získané informácie o pozícii a rotácii pozičnej značky sa nedali nijako použiť.

Pri translácii sú využité len údaje o pozícii pozičnej značky na obraze z fotoaparátu, ktoré sú následne upravené, aby korešpondovali s pozíciou ArUco značky na displeji zariadenia. Táto pozícia sa pomocou funkcií knižnice ARCore transformuje do takzvaného lúča, ktorý udáva istú pomyselnú priamku smerujúcu od fotoaparátu do priestoru snímaného fotoaparátom. Z tohto lúča je následne získaný bod v priestore vo vzdialenosti určenej vzdialenosťou pozičnej značky ArUco od fotoaparátu. Tento bod je následne použitý na aktualizáciu pozície virtuálneho objektu. Všetky hlavné úkony sa vykonávajú v rámci metódy `detectPaddle` triedy `FiducialFinder`.

4.3 Použitie knižnice OpenCV s modulom ArUco v Android Studiu

Použitie knižnice OpenCV na vývoj Android aplikácii v Android Studiu môže byť zdĺhavý a komplikovaný proces, ak sa programátor snaží linkovať závislosti podľa návodu na stránke openCV [22]. Návod na spomínanej stránke popisuje postup pre vývojové prostredie Eclipse a nie pre Android Studio. Existujú aj iné návody určené priamo pre Android Studio, no aj tak sa jedná o komplikovanejší proces akým je jednoduché použitie závislosti v súbore `build.gradle`. Proces linkovania knižnice OpenCV popisuje vo svojej bakalárskej práci Václav Čermák [23], kde je tento proces popísaný v 11 krokoch. Existuje však projekt spoločnosti QuickBird Studios, ktorý tento proces značne uľahčuje. Upravená knižnica OpenCV od spoločnosti QuickBird Studios sa nachádza v repozitári JCenter a teda ju stačí pridať do súboru `build.gradle`. Nevýhodou tohto prístupu môže byť nedostupnosť najnovšej verzie knižnice OpenCV, keďže vývojári na novej verzii začnú pracovať až po vyjdení novej verzie OpenCV. Momentálne je najnovšia verzia knižnice OpenCV 4.5.2 a najnovšia verzia od spoločnosti QuickBirds Studio je OpenCV 4.3.0, ktorá bola originálne vydaná približne 1 rok pred verziou 4.5.2. Postup pridania knižnice OpenCV do Android Studia je nasledovný:

1. v súbore `build.gradle` je treba do sekcie dependencies pridať riadok:

```
implementation 'com.quickbirdstudios:opencv:4.3.0'
```

Pre použitie knižnice OpenCV aj s extra modulmi, medzi ktorými sa nachádza aj modul ArUco je treba do sekcie dependencies pridať riadok:

```
implementation 'com.quickbirdstudios:opencv:4.3.0-contrib'
```

2. Do projektového súboru `build.gradle` je potrebné pridať:

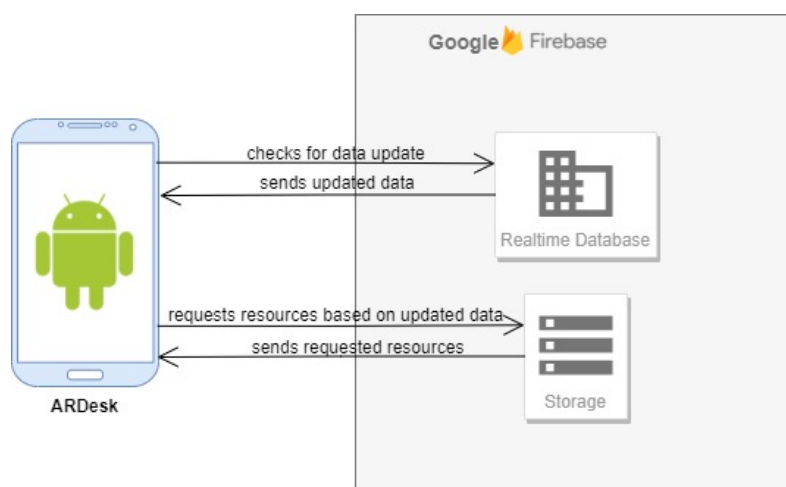
```
repositories {  
    jcenter()  
}
```

3. v Android aktivite, v ktorej sa bude OpenCV používať vykonať inicializáciu knižnice pomocou obdobného konštruktú:

```
if (!OpenCVLoader.initDebug())  
    Log.e("OpenCv", "Unable to load OpenCV");  
else  
    Log.d("OpenCv", "OpenCV loaded");
```

4.4 Prepojenie so službami Google Firebase

Aplikácia komunikuje so službami Google Firebase. Z rôznych funkcionalít tejto platformy využíva aplikácia ARDesk službu Realtime Database, v ktorej sa nachádzajú informácie ku príkladom a službu Storage, v ktorej sú uložené všetky potrebné súbory, a teda najmä 3D modely, ktoré sú v aplikácii zobrazované.



Obr. 4.1: Komunikácia medzi aplikáciou ARDesk a službami Google Firebase

4.5 Výsledný implementovaný prototyp

Prototyp manipulácie s objektmi sa podarilo implementovať v plnom rozsahu a boli splnené všetky funkčné aj nefunkčné požiadavky.

Výsledný implementovaný prototyp disponuje dvomi spôsobmi manipulácie s objektmi, medzi ktorými môže užívateľ prepínať v rámci aktivity zobrazujúcej scénu rozšírenej reality. Predvolený spôsob manipulácie je nastavený na manipuláciu pomocou tlačidiel a sliderov a prepnutím prepínača sa spôsob manipulácie zmení.

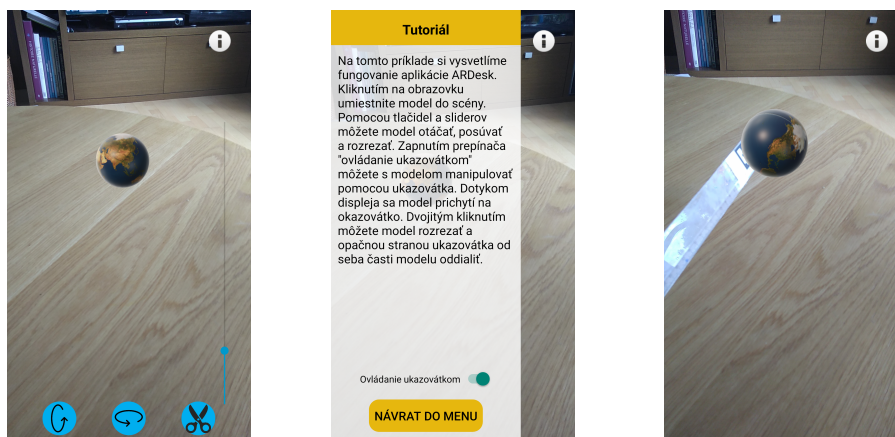
Na manipuláciu sa využíva ukazovátka osadené dvomi rôznymi pozičnými značkami typu ARUco umiestnenými z oboch strán ukazovátka. Jedna značka slúži na presun a rotáciu virtuálneho objektu a druhá slúži na odd'áľovanie častí objektu po vykonaní rezu.



Obr. 4.2: Ukazovátko osadené značkami ArUco

Virtuálny objekt sa do scény umiestni rovnako ako pri pôvodnom spôsobe manipulácie, a to kliknutím na ľubovoľné miesto na displeji. Ak chce užívateľ presunúť alebo otočiť virtuálny objekt, tak položí jeden prst na ľubovoľné miesto na displeji a podľa potreby pohybuje ukazovátkom. Keď je užívateľ spokojný s polohou objektu, jednoducho zdvihne prst z displeja.

Ak chce užívateľ vykonať rez objektu, klikne na ľubovoľné miesto na displeji dvakrát po sebe. Ak chce užívateľ následne časti rozrezaného objektu od seba oddialiť, aby lepšie vidieť vzniknutý rez, položí jeden prst na ľubovoľné miesto na displeji a podľa potreby pohybuje ukazovátkom otočeným opačnou stranou, aby bolo vidieť druhú pozíčnú značku. Keď je užívateľ spokojný so vzdialenosťou medzi časťami objektu, zdvihne prst z displeja.



Obr. 4.3: Screenshot z aplikácie ARDesk (vľavo - pôvodné rozhranie, v strede - prepnutie módu manipulácie, vpravo - manipulácia ukazovátkom)

Testovanie

Výstupom tejto bakalárskej práce je prototyp novej manipulácie s objektmi pomocou ukazovátka integrovaný do aplikácie ARDesk. Tento prototyp bol nakoniec podrobený akceptačným testom, ktorých cieľom bolo zistiť či nový spôsob manipulácie s objektmi pomocou ukazovátka je vhodný pre aplikáciu ARDesk a či pracuje správne. Všetky materiály súvisiace s testovaním sa nachádzajú v prílohách tejto bakalárskej práce.

5.1 Užívatelia a testovacie podmienky

Kvôli aktuálnej pandémie Covid-19 nebolo možné vykonať testovanie v takom rozsahu ako bolo plánované. Testovania sa zúčastnilo celkovo 5 užívateľov z čoho jeden užívateľ bol z vekovej kategórie, pre ktorú je aplikácia primárne určená. Testovanie prinieslo aj napriek týmto podmienkam zaujímavé výsledky a ukázalo ako silné, tak aj slabšie stránky implementovaného prototypu.

Užívateľ	Pohlavie	Vek	Povolanie
Užívateľ 1	, žena	18	študent
Užívateľ 2	muž	23	študent
Užívateľ 3	, žena	55	podnikateľ
Užívateľ 4	muž	56	produktový technik
Užívateľ 5	muž	22	študent

Tabuľka 5.1: Informácie o užívateľoch podieľajúcich sa na užívateľskom testovaní

Testovanie bolo vykonané na jednom zariadení, na ktorom sa pred každým testovaním vyčistila pamäť aplikácie, aby sa dala otestovať aj kalibrácia fotoaparátu. Užívatelia používali predpripravené ukazovátka s nalepenou pozíčnou

značkou, keďže proces výroby takéhoto ukazovátka z rovného pravítka je veľmi jednoduchý a nemal by spôsobovať problémy. Výroba by však mohla zabráť niekoľko minút a nepriniesla by žiadne relevantné výsledky. Užívatelia počas celého testovania sedeli na stoličke za stolom, aby bolo simulované školské prostredie, pre ktoré je aplikácia určená.

5.2 Výsledky testovania

Výsledky testovania poukázali na nedostatky, o ktorých sa vedelo už pred testovaním, ale taktiež odhalilo aj nové problémy a prinieslo návrhy na zmeny a zlepšenie.

5.2.1 Celkový dojem

Najväčšie problémy a frustráciu spôsobovali užívateľom pády aplikácie, ktoré boli početné najmä pri snímaní kalibračnej šachovnice, ale aj občasné pády aplikácie, ktoré sa objavili pri manipulácii s objektom.

Medzi iné aspekty, ktoré by užívatelia zlepšili, patrí kalibrácia. Tá by sa mohla výraznejšie odlíšiť a oboznámiť o nej užívateľa.

Na aplikácii sa užívateľom páčila najmä možnosť výberu spôsobu manipulácie s virtuálnymi objektmi a tiež interaktivita manipulácie pomocou ukazovátka.

Užívateľom prišla aplikácia prehľadná a ľahko pochopiteľná. Menší problém robila už spomínaná kalibrácia, pri ktorej chýbal jasne označený začiatok aj koniec.

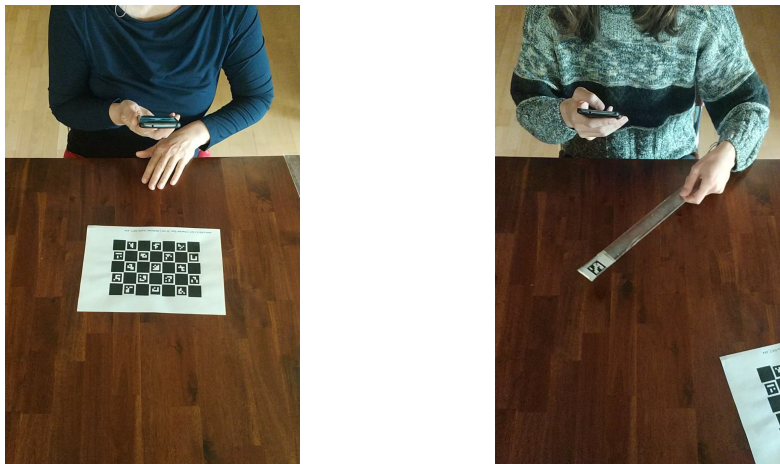
Bolo tiež uvedené, že tlačidlo na rotáciu pri pôvodnom rozhraní niektorí užívatelia vôbec nevyužili a prišlo im teda prebytočné.

Medzi návrhy na pridanie nových prvkov bolo spomenuté pridanie možnosti kombinovaného prístupu k manipulácii, kde by užívateľ medzi týmito prístupmi nemusel prepínať, ale ich plná funkcionálna by bola zhrnutá v jednom.

5.2.2 Porovnanie pôvodného rozhrania s manipuláciou pomocou ukazovátka

V precíznosti užívatelia hodnotili manipuláciu pomocou ukazovátka lepšie, keďže v pôvodnom rozhraní aplikácie ARDesk nie je možné pohybovať s virtuálnym objektom v žiadnom horizontálnom smere.

V jednoduchosti vyšli obidva prístupy skoro totožne, avšak niektorí užívatelia k hodnoteniu uviedli aj fakt, že sa do bodového hodnotenia zahrnuli aj komplikácie spojené s kalibráciou. Tá sa však musí vykonať iba pri prvom prepnutí do módu manipulácie ukazovátkom a môžeme teda odvodiť, že pri dlhšom používaní by ovládanie pomocou ukazovátka vyšlo ako víťaz v jednoduchosti ovládania.



Obr. 5.1: Zábery z užívateľského testovania

Pri otázke kde si mali užívatelia vybrať nimi preferovaný spôsob manipulácie neboli výsledky jednohlasné, no väčšina respondentov si zvolila ovládanie pomocou ukazovátka.

Komplikácie spojené s pandémiou Covid-19

Táto kapitola sa venuje komplikáciám spojeným s pandémiou ochorenia Covid-19 a podmienkam, ktoré boli kvôli vládnym opatreniam a ich dopadom na túto bakalársku prácu.

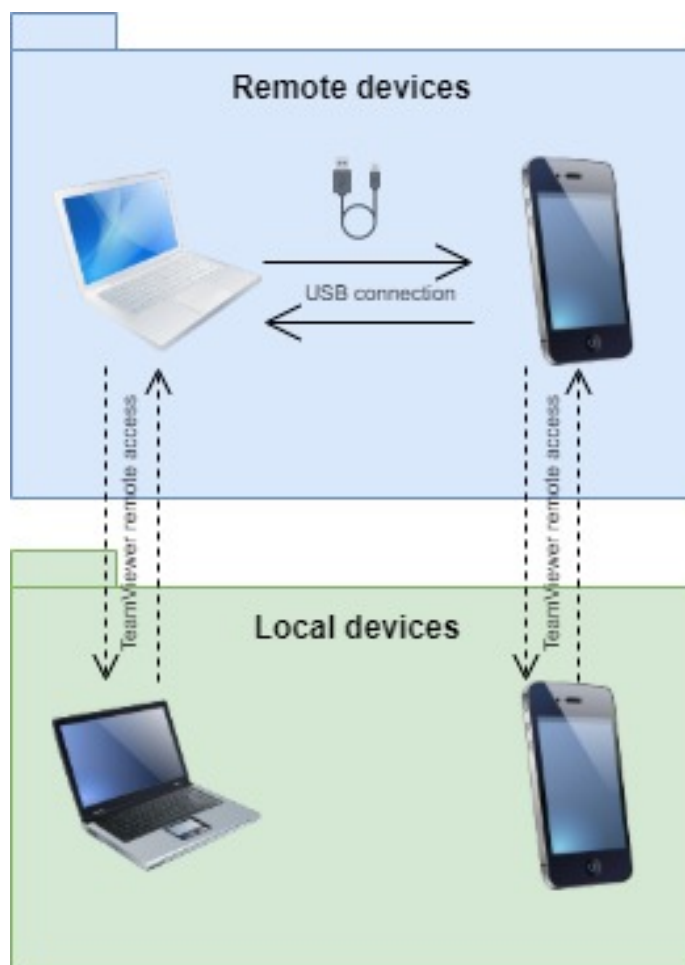
6.1 Komplikácie pri implementácii

Aplikácia bola v prvých týždňoch implementácie vyvíjaná vo vývojovom prostredí Android Studio s využitím virtuálneho zariadenia Google Pixel 3XL emulovaného v Android Studiu. Toto virtuálne zariadenie disponuje fotoaparátom, v ktorom sa namiesto obrazu z kamery zobrazujú virtuálne priestory. Do týchto virtuálnych priestorov je možné umiestniť statický obraz na dve určené miesta. To bolo postačujúce v prvej fáze implementácie, kedy bolo treba zaistiť kalibráciu a snímanie statickej pozičnej značky. Toto virtuálne zariadenie však neumožňovalo simulovať ukazovátka osadené pozičnou značkou a jeho pohyb v priestore, a preto bolo nutné pokračovať s implementáciou na fyzickom zariadení s podporou knižnice ARCore. Takýmito zariadeniami disponuje aj Fakulta informačných technológií no pre pandemické opatrenia som k nim nemal umožnený prístup, keďže som sa v čase práce na bakalárskej práci nachádzal na Slovensku.

Ako alternatívu sme s vedúcim tejto bakalárskej práce, Ing. Jiřím Chludilom, navrhli a otestovali formu vzdialeného vývoja Android aplikácie na fyzickom zariadení s pomocou software TeamViewer. Software TeamViewer umožňuje vzdialený prístup a ovládanie zariadenia cez internet. Pomocou tejto aplikácie sme zriadili vzdialený prístup z môjho laptopu na laptop, ku ktorému bol pomocou usb kábla pripojený mobilný telefón podporujúci knižnicu ARCore. K tomuto mobilnému telefónu bol taktiež zriadený vzdialený prístup z môjho telefónu, aby ho bolo možné na diaľku ovládať. Cez vlastný laptop som

následne mohol písať zdrojové kódy na vzdialenom laptopu, z ktorého som výslednú aplikáciu mohol spustiť na vzdialenom telefóne, ktorý som mohol pomocou vlastného telefónu ovládať.

Aplikácia bola na konci implementovaná s pomocou telefónu, ktorý mi zapožičal Matej Kubena.



Obr. 6.1: Prepojenie zariadení pri vzdialenom vývoji

6.2 Komplikácie pri testovaní

Pri testovaní znemožnila pandémia testovanie prototypu v školskom prostredí s reálnymi študentmi. Namiesto toho bola aplikácia testovaná v domácom prostredí, kde bola snaha o simuláciu podmienok podobných tým školským. Medzi užívateľmi, ktorí sa podieľali na testovaní prototypu sa nachádzal len jeden študent strednej školy. Výsledky testovania, teda nezahŕňovali postrehy užívateľov, pre ktorých je aplikácia primárne určená no zhrnuli postrehy

užívateľov širšieho vekového spektra s rôznejšími technickými zručnosťami, čo je tiež veľkým prínosom.

Záver

Cieľom tejto práce bolo analyzovať spôsoby manipulácie s objektmi v rozšírenej realite a následne navrhnúť vhodný spôsob manipulácie s objektmi pre aplikáciu ARDesk, navrhnutý prototyp implementovať a následne užívateľsky otestovať. Všetky ciele práce boli splnené. Z analýzy bol vybraný prístup, ktorý bol najvhodnejším pre použitie v aplikácii ARDesk. V tomto spôsobe manipulácie boli navrhnuté všetky manipulačné úkony podporované v pôvodnom spôsobe manipulácie. Tento prototyp bol implementovaný pomocou modulu ArUco knižnice OpenCV. Aplikácia teraz disponuje dvomi spôsobmi manipulácie s objektmi, medzi ktorými si užívateľ môže vybrať.

Implementovaný prototyp bol podrobený užívateľskému testovaniu. Výsledky užívateľského testovania ukázali, že sa jedná o spôsob manipulácie, ktorý je precízny a tiež pre užívateľov zaujímavý, no je ešte treba prototyp zdokonaľiť a zamedziť občasným pádom aplikácie. V aplikácii je treba vyriešiť problém pri kombinovaní spôsobov manipulácie s virtuálnymi objektmi, kde môže dochádzať k problémom z dôvodu rôznych spôsobov ukotvenia objektov v priestore. Oblasť, na ktorej je ešte treba popracovať, je kalibrácia pri prvom spustení aplikácie. Pri nej treba vylepšiť spôsob akým sa vyberajú snímky kalibračnej šachovnice, aby sa zamedzilo nežiadúcim pádom aplikácie. Taktiež je treba do aplikácie pridať informácie o kalibrácii s jasnými inštrukciami pre užívateľa.

Táto práca ukázala, že neexistuje univerzálny spôsob manipulácie s virtuálnymi objektmi, ktorý by vyhovoval každej aplikácii, a že vhodný prístup závisí od použitej technológie rozšírenej reality, od špecifikácii a požiadaviek aplikácie. Taktiež ukázala, že je možné navrhnúť a implementovať alternatívny spôsob manipulácie s virtuálnymi objektmi v mobilnej rozšírenej realite ku klasickému spôsobu pomocou dotykového displeja.

Vo vývoji a zdokonaľovaní tohto spôsobu manipulácie s objektmi by som chcel pokračovať či už v rámci aplikácie ARDesk, alebo aj v rámci úplne novej aplikácie využívajúcej rozšírenú realitu. Rád by som tiež vyvinul podobný prototyp pre operačný systém iOS s využitím knižnice ARKit.

Literatúra

- [1] Pascoal, R.; Ribeiro, R.; Batista, F.; aj.: Handheld Augmented Reality Interaction Technique. [online]. In *Advances in Visual Informatics. IVIC 2013. Lecture Notes in Computer Science*, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-02958-0_38.
- [2] Ahmad Chowdhury, S.; Arshad, H.; Parhizkar, B.; aj.: Adapting Speech Recognition in Augmented Reality for Mobile Devices in Outdoor Environments. [online]. In *SLATE'17 Symposium on Languages Applications and Technologies*, Porto, Portugal, June 2017, doi:10.4230/OASIS.SLATE.2017.21.
- [3] Volkert, B.; Stephen, V.; Mark, B.; aj.: FingARtips: gesture based direct manipulation in Augmented Reality. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia 2004*, NordiCHI, Singapore: Association for Computing Machinery, June 2004, str. 212–221.
- [4] Byung-sung, L.; Junchul, C.: Interactive Manipulation of Augmented Objects in Marker-Less AR Using Vision-Based Hand Interaction. In *Conference: Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*, Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, April 2010, doi:10.1109/ITNG.2010.36.
- [5] Group, T. M.: Tangible Media Group. <https://tangible.media.mit.edu/contact-admission/>, accessed: 2021-03-12.
- [6] W. Fitzmaurice, G.; Ishii, H.; A. S. Buxton, W.: Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. [online]. In *CHI '95: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Sys-*

- tems*, Denver, CO, United States, May 1995, str. 442–449, doi:10.1145/223904.223964.
- [7] David, E.; Julia, D.; Andreas, B.; aj.: A Tangible Spherical Proxy for Object Manipulation in Augmented Reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Atlanta, GA, USA: IEEE, March 2020, doi:10.1109/VR46266.2020.00041.
- [8] Ullmer, B.; Ishii, H.: The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces. [online]. In *UIST '97: Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 1997, str. 223–232, doi:10.1145/263407.263551.
- [9] Kato, H.; Billingham, M.; Poupyrev, I.; aj.: Virtual object manipulation on a table-top AR environment. [online]. In *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, Munich, Germany, October 2000, doi:10.1109/ISAR.2000.880934.
- [10] Inc., V.: VRgineers XTAL. [online]. <https://vrgineers.com/xtal/>, accessed: 2021-04-12.
- [11] Microsoft: Use your voice to operate HoloLens. [online]. <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens-cortana>, accessed: 2021-03-14.
- [12] Microsoft: HoloLens 2 gestures for authoring and navigating in Dynamics 365 Guides. [online]. <https://docs.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/authoring-gestures-hl2/>, accessed: 2021-03-14.
- [13] Kawashima, T.; Imamoto, K.; Kato, H.; aj.: Magic Paddle: A Tangible Augmented Reality Interface for Object Manipulation. [online]. In *Proc. on ISMR2001*, Yokohama, Japan, January 2001, str. 194–195.
- [14] ChiliTags. [online]. <https://github.com/chili-epfl/chilitags>, accessed: 2021-02-20.
- [15] ARToolKit Documentation. [online]. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/>, accessed: 2021-02-23.
- [16] ARToolKit. [online]. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, accessed: 2021-02-23.
- [17] ARToolKitX. [online]. <https://github.com/artoolkitx/artoolkitx/wiki>, accessed: 2021-02-23.

- [18] Príručka k ďalekohľadom. https://www.astropresov.sk/files/nastiahnutie/ine/prirucka_k_dalekohladom.pdf, accessed: 2021-03-24.
- [19] Bradski, G.; Kaehler, A.: *Learning OpenCV*. O'Reilly Media, prvné vydanie, ISBN 05-9651-613-0, 370–403 s.
- [20] OpenCV: Camera Calibration. [online]. https://docs.opencv.org/master/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html, accessed: 2021-03-24.
- [21] OpenCV: Calibration with ArUco and ChArUco. [online]. https://docs.opencv.org/master/da/d13/tutorial_aruco_calibration.html, accessed: 2021-03-24.
- [22] OpenCV: OpenCV for Android. [online]. <https://opencv.org/android/>, accessed: 2021-04-20.
- [23] Čermák, V.: *Refactoring aplikace Myšák 2*. Bakalárska práca, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, Praha, 2020.

Zoznam použitých skratiek

- GUI** Graphical user interface
- XML** Extensible markup language
- AR** Augmented reality [rozšírená realita]
- TUI** Tangible user interface
- API** Application programming interface
- JNI** Java native interface
- HCI** Human-Computer Interaction
- BI-SP1** Tímový softwarový projekt 1
- BI-SP2** Tímový softwarový projekt 2
- JVM** Java Virtual Machine
- IDE** Integrated development environment

Obsah priloženého CD

readme.txt	stručný popis obsahu CD
exe.....	adresár so spustiteľnou formou implementácie
src	
impl	zdrojové kódy implementácie
thesis	zdrojová forma práce vo formáte L ^A T _E X
text	text práce
thesis.pdf	text práce vo formáte PDF
thesis.ps	text práce vo formáte PS
testing	materialy k testovaniu