



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Petr Kocián

MOŽNOSTI VYUŽITÍ VIRTUÁLNÍ A ROZŠÍŘENÉ
REALITY V MĚTSKÉM PROSTŘEDÍ

Bakalářská práce

2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K620 **Ústav dopravní telematiky**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Petr Kocián

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Možnosti využití virtuální a rozšířené reality
v městském prostředí**

Název tématu (anglicky): Possibilities of utilizing virtual and augmented reality in
urban environment

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Popis základních principů technologie virtuální a rozšířené reality
- Analýza aktuálně dostupného hardwarového vybavení
- Příklady realizací využívající technologie virtuální a rozšířené reality
- Vlastní návrh systému využívajícího technologie virtuální a rozšířené reality v městském prostředí
- Zhodnocení navrhovaného řešení a návrh postupu implementace

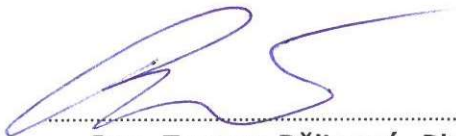




- Rozsah grafických prací: dle požadavků vedoucích práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: DUBOIS, E., GRAY, P., NIGAY, L., et al.: The Engineering of Mixed Reality Systems. London: Springer London, 2010. ISBN 1571-5035.
SVÍTEK, M., POSTRÁNECKÝ, M. a kol.: Města budoucnosti. Praha: NADATUR, 2018. ISBN 978-80-7270-058-5

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viktor Beneš, MSc.**
Ing. Kristýna Navrátilová

Datum zadání bakalářské práce: **1. října 2022**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **7. srpna 2023**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

.....
Petr Kocián
jméno a podpis studenta

V Praze dne 1. října 2022

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji mým vedoucím Ing. Kristýně Navrátilové a Ing. Viktoru Benešovi, MSc. za odborné vedení a vždy podnětné konzultace v průběhu celého procesu zpracování. Poděkování též náleží mé rodině a blízkým, kteří mě po celou dobu studia jak finančně, tak morálně podporovali.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonu (autorský zákon).

V Praze dne 7.srpna 2023

.....

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MOŽNOSTI VYUŽITÍ VIRTUÁLNÍ A ROZŠÍŘENÉ REALITY V MĚSTSKÉM PROSTŘEDÍ

Bakalářská práce

srpen 2023

Petr Kocián

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce „Možnosti využití virtuální a rozšířené reality v městském prostředí“ je analyzovat aktuální technické možnosti rozšířené reality a její možné využití v městském prostředí. Na základě této analýzy poté navrhnout navigační aplikaci využívající prvky rozšířené reality a dále implementaci této aplikace v Praze.

ABSTRACT

The subject of the bachelor's thesis "Possibilities of utilizing virtual and augmented reality in urban environment" is to analyze the current technical possibilities of extended reality and its potential utilization in urban settings. Based on this analysis, the thesis aims to propose a navigation application incorporating augmented reality elements, and subsequently, to implement this application in Prague.

Obsah

1	Úvod	7
2	Vymezení základních pojmů	9
2.1	Nejčastěji využívané pojmy	9
2.2	Reality-Virtuality continuum	9
2.3	Trojrozměrný taxonomický rámec	11
2.4	Definice pojmů v kontextu této práce	13
3	Historie vývoje a první příklady užití smíšené reality	15
3.1	Sensorama a telesférická maska	15
3.2	Boeing a prvotní užití XR v průmyslu	17
3.3	Prvotní užití XR v herním průmyslu	18
3.4	Průhledové displeje	19
3.5	Průlom technologie XR a její větší komerční využití	20
4	Základní principy fungování technologií XR	21
4.1	Zobrazovací komponenta	21
4.1.1	Neprůhledové displeje	21
4.1.2	Průhledové displeje	22
4.2	Prostorově-orientační komponenta	24
4.2.1	Marker-based XR	25
4.2.2	Marker-less XR	27
4.2.3	Lokalizace pomocí GNSS	28
4.2.4	Room-scale point cloud map	28
4.2.5	Srovnání prostorově-orientačních metod	29
4.3	Typické použití jednotlivých komponent	32
4.3.1	Augmented reality (AR) – rozšířená realita	32
4.3.2	Rozšířená virtualita (AV) a virtuální realita (VR)	32
5	Analýza aktuálně dostupného vybavení	34
5.1	Komerčně dostupné HMD pro XR	34
5.1.1	HMD primárně určené pro AR	34
5.1.2	HMD primárně určené pro VR	36
5.2	Porovnání parametrů	38
5.3	Mobilní zařízení podporující rozšířenou realitu	40
6	Analýza vybraných aplikací	41
6.1	Příklady aplikací z vybraných oblastí lidské činnosti	41
6.2	Příklady aplikací z městského prostředí	43
6.2.1	Navigační aplikace	43
6.2.2	Městské plánování	46
7	Vlastní návrh navigační aplikace	47
7.1	Definice základních funkcí	48
7.1.1	Navigační funkce	48
7.1.2	Bezpečnostní funkce	50
7.2	Definice doplňkových funkcí	50
7.3	Zjednodušený návrh grafického zpracování aplikace	52
7.3.1	Uživatelské rozhraní	52
7.3.2	Navigační objekty	55
7.4	Diagramy chování aplikace	55

7.4.1	Diagram aktivit základních funkcí	55
7.4.2	Diagram aktivit doplňkových funkcí	59
7.5	Návrh implementace AR navigační aplikace v Praze	62
8	Zhodnocení návrhu	65
8.1	Zhodnocení možností implementace.....	65
8.2	Zhodnocení četnosti využití jedním uživatelem	66
8.3	SWOT analýza	67
9	Závěr.....	69
10	Citovaná literatura	71
11	Seznam obrázků	76
12	Seznam tabulek	78

Seznam zkratek

AR	Augmented reality – rozšířená realita
AV	Augmented virtuality – rozšířená virtualita
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CGI	Computer-Generated Imagery
CRT	Cathod Ray Tube – katodová trubice, obrazovka s katodovou trubicí
EPM	Extent of Presence Metaphor – rozsah přítomnosti
EWK	Extend of World Knowledge – míra znalosti okolního světa
GNSS	Globální družicový polohový systém
HMD	Head-Mounted-Display – headset
HUD	Head-Up displej – průhledový displej
IMU	Inertial Measurement Unit – inerciální měřicí jednotka
IoT	Internet of things
IR	Infračervené senzory
OOSPO	Osoby s omezenou schopností pohybu a orientace
OST	Optical-See-Through displej
PCM	Point Cloud Map – mračno bodů
PtA	Point to Area navigace
PtP	Point to Point navigace
RF	Reproduction Fidelity – věrohodnost obrazové reprodukce
RV	Reality-Virtuality continuum
ToF	Time-of-Flight sensor – senzor hloubky obrazu
UML	Unified Modeling Language
VR	Virtual reality – virtuální realita
VST	Video-See-Through displej
WoW	Window-on-the-World
WWDC	Worldwide Developers Conference
XR	Extended reality – rozšířená realita

1 Úvod

Mimořádná rychlost vývoje technologií ve 20.století se v tom současném nikterak nesnižuje, naopak v mnoha oborech se stále zvyšuje. Jedním z takových oborů je především výpočetní technika. Dnešní společnost sbírá, zpracovává a sdílí data mimořádných objemů, a to hlavně za účelem činění lepších rozhodnutí, která nejsou založena již pouze na historických zkušenostech, ale jsou též podložena naměřenými daty.

V soukromém sektoru takový přístup bývá označován termínem „Industry 4.0“, jejímž cílem je vytvoření sítě vzájemně datově propojených zařízení (IoT – „Internet of things“) a procesů za účelem maximalizace produkce za současné minimalizace nákladů.

Ve veřejném sektoru může být takový typ řízení označen termínem „Smart city“, který se podobně jako termín „Industry 4.0“ poměrně obtížně definuje, neboť lze tvrdit, že zastřešuje každé řešení využívající určitou senzorku pro sběr dat, jež jsou následně automaticky zpracována, vyhodnocena a na jejich podkladě je učiněno rozhodnutí.

Koncept Smart city je založen na třech pilířích – informační technologie, chytrá energetika a doprava. Příkladem aplikace konceptu Smart city v dopravě může být např. systém informování o skutečné poloze spojů hromadné dopravy, který lze dále rozvinout o systém informování cestujících o předpokládaném času příjezdu vozidla na zastávku, aktuálním zpoždění nebo třeba o systém vyhodnocující plynulost průjezdu vozidel trasou, což může vést k lepšímu rozhodování o infrastrukturních úpravách v trase linky.

Bylo naznačeno, že s konceptem Smart city se pojí sběr a vyhodnocování velkého množství dat. Při práci s velkými objemy dat je ovšem nezbytné tato data dobře prezentovat, a to co možná nejpřímější, nejjednodušší cestou. S přibývajícím komplexností dat je jejich prezentace standardními dvojrozměrnými metodami čím dál tím složitější. Toto omezení může řešit využití rozšířené reality, která dokáže komplexní data, například o hlukové zátěži, prezentovat velmi jednoduše a přirozeně pro lidské vnímání v podobě trojrozměrného interaktivního modelu.

S jistou mírou nadsázky lze město označit za tolik chytré, jak jsou chytří jeho obyvatelé. S narůstajícími nároky na naši dopravní infrastrukturu jsou vytvářeny stále složitější dopravní cesty a prostory, ve kterých je čím dál tím složitější se vyznat. Toto platí především pro nepravidelné cestující, zahraniční návštěvníky, ale také například pro maminky s kočárky a osoby s omezenou schopností pohybu a orientace (OOSPO), které jsou často nuceni použít výrazně jinou trasu než většina běžných cestujících. Pro pomoc v orientaci bývá v těchto prostorech umístěn informační a navigační systém, který se ale omezuje velmi často na použití neměnných navigačních tabulí a proměnné, digitální tabule užívá většinou například pouze k informování o nejbližších odjezdech spojů.

Tato práce si klade za cíl analyzovat aktuální možnosti využití technologie rozšířené reality, především v oblasti aktuálně dostupných metod technické implementace, dostupnosti hardwarového vybavení a aktuálního využití v konkrétních aplikacích. Na základě získaných poznatků navrhnout navigační aplikaci pro použití při navigaci po dopravních terminálech, která využívá prvky rozšířené reality, přičemž součástí návrhu je definice základních funkcí a procesů, základní návrh uživatelského rozhraní a způsoby implementace takové aplikace v Praze. Celý návrh bude poté podroben zhodnocení.

2 Vymezení základních pojmů

Technologie rozšířené reality je velmi dynamicky se rozvíjejícím technologickým odvětvím, a to do té míry, že stále nedošlo k ustálení pojmenování jednotlivých směrů vývoje. Pro další postup je tedy nezbytné nejprve jednotlivým pojmům přiřadit jasnou definici a jejich užití zasadit do kontextu této práce.

S tím souvisí problematika neexistence dostatečně výstižných českých překladů těchto pojmů, proto se dále tato práce bude omezovat na využití převážně anglických výrazů. Pokud k některému z uváděných anglických pojmů existuje alespoň částečně ustálený český překlad, pak bude tento překlad uváděn v závorkách.

2.1 Nejčastěji využívané pojmy

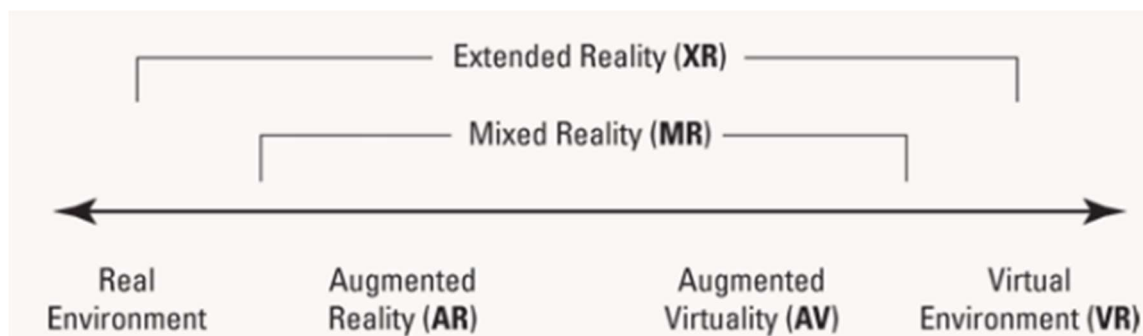
Jak již bylo naznačeno, autoři jednotlivých publikací většinou sami definují, co jednotlivé termíny v kontextu jejich práce reprezentují a řídí se při tom jen velmi obecnými zásadami jako např. zda je zařízení mobilní (ve smyslu možnosti fyzického přenášení při běžném použití) nebo stacionární, zda je zařízení průhledové a tady je možné vidět reálný svět nebo zda objekty virtuálního světa podléhají fyzikálním principům a dokážou interagovat s objekty v reálném světě.

Nezřídka se literatura, zejména naučně-publikační, omezuje při popisu rozšířené reality na užívání pouze dvou, resp. tří pojmů, a to *Virtual reality (Virtuální realita; VR)* označující obecně veškeré aplikace vytvářející virtuální prostředí kterým je uživatel zcela obklopen a má tak omezenou možnost interakce s objekty reálného světa. A označení *Augmented reality (Rozšířená realita; AR)* pro aplikace promítající do reálného světa digitální obsah se kterým může jak uživatel, tak předměty reálného světa interagovat. Obě tyto technologie zastřešuje termín *Extended reality (Rozšířená realita; XR)*.

2.2 Reality-Virtuality continuum

V roce 1994 publikoval profesor Paul Milgram z University of Toronto společně s jeho kolegy článek, který měl za cíl zpřehlednit a kategorizovat dostupné technologie rozšířené reality podle míry virtualizace reálného světa. Definoval termín *Reality-Virtuality continuum (RV)* [1].

Jedná se o spektrum (Obr. 1), v jehož levé části se nachází reálné prostředí, tak jak jsme ho schopni vnímat lidskými smysly. V pravé části se nachází virtuální prostředí, které je zcela oproštěno o vazby na reálný svět. Nemusí zde platit přírodní zákony, může popírat gravitaci, plynutí času, vlastnosti materiálů a podobně. Obecně každý parametr v této části může být jakkoliv definován uživatelem, resp. tvůrcem tohoto virtuálního prostředí [1].



Obr. 1 Reality-Virtuality continuum

Mezi těmito extrémy se nachází spojité spektrum, na kterém mohou být definovány jednotlivé technologie, a to na základě několika parametrů. Jedním z parametrů je míra vazby simulovaného prostředí na prostředí reálné. Tímto je myšlena především vizuální vazba ve smyslu poměru počítačově generovaného obrazu (CGI) simulovaného světa k reálnému světu a měřítko simulovaných objektů [1].

Vzhledem k technologickému pokroku souvisejícího s narůstajícím prolínáním reálného a virtuálního světa a s tím, že CGI je stále více k nerozeznání od reálných objektů, lze soudit, že tento parametr bude mít do budoucna stále nižší relevanci.

Dalším parametrem je jakým způsobem obklopuje simulované prostředí uživatele. V zásadě nabývá dvou hodnot. Buď uživatel nahlíží do simulovaného světa prostřednictvím mobilního zařízení (WoW; window-on-the-world) podobně jako by užíval optickou lupu pro četbu knihy, a tedy je možné se prostým odhlédnutím od zobrazovacího zařízení vrátit do reálného světa. Nebo má zobrazovací zařízení nasazeno na hlavě (HMD; head-mounted-display), které ho tak kompletně uzavírá v simulovaném světě a v závislosti na použitém zařízení stimuluje jeho smysly (nejčastěji zrak, sluch a hmat). Pro opuštění takto simulovaného světa je třeba zařízení sejmout [1].

2.3 Trojrozměrný taxonomický rámec

Přestože je koncept RV vhodný pro základní orientaci mezi jednotlivými technologiemi, užívá pro kategorizaci v podstatě pouze binární parametry. Pro podrobnější kategorizaci je tedy jeho využití omezené, a to především proto, že zařazení určité technologie závisí ve velké míře na její konkrétní aplikaci [1].

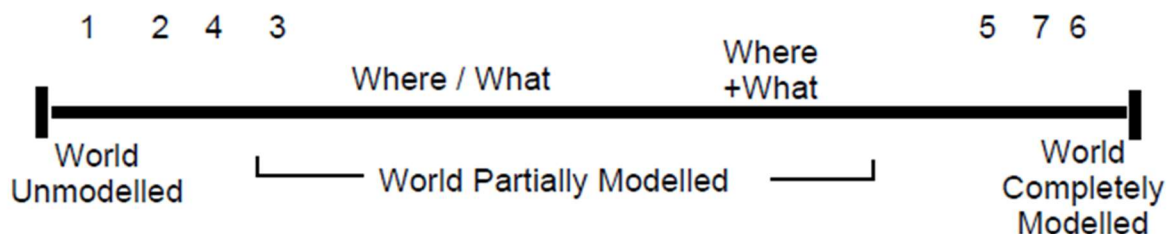
Příkladem budiž aplikace, ve které návštěvník muzea uvidí po nasazení HMD rekonstrukci historické nádoby, u které se v reálném světě dochovala pouze její část. Uživatel může model v omezené míře obcházet, ale nedokáže s ním interagovat, model je statický a je zobrazován na pevně definované pozici. V takovém případě bychom mohli tvrdit, že aplikace využívá technologii rozšířené reality – AR. Pokud ovšem uživateli při užití stejného hardwarového vybavení umožníme nádobu například uchopit a přemístit, pak v takovém případě potřebujeme znát určité vazby simulovaného světa na svět reálný a na spektru se posouváme směrem k rozšířené virtualitě – AV.

Pro lepší kategorizaci definuje profesor Milgram tři osy kategorizačních parametrů, které rozvádějí jednotlivé binární parametry RV.

První osou je osa *Extend of World Knowledge (Míra znalosti okolního světa; EWK)*, která definuje, do jaké míry jsou nám známé informace o objektech, a to jak simulovaných, tak reálných. Opět se jedná o spojité spektrum (Obr. 2), na jehož jedné straně leží zcela nemodelovaný svět a na opačné svět naopak zcela modelovaný. Mezi těmito extrémy se nachází různé stupně poznání světa, a to především ve smyslu informací kde se objekty nacházejí, o jaké objekty se jedná a v jaké poloze se vůči nim nachází uživatel [1].

Příkladem z nemodelovaného světa může být např. *Head-Up displej (HUD)*, který dokáže zobrazit dodatečné informace např. o poloze nebo rychlosti vozidla, ale zároveň nemá žádné informace o objektech reálného světa, které může uživatel skrz něj vidět a zároveň k těmto objektům nemají zobrazované informace polohovou vazbu.

Příkladem z druhé strany spektra budiž jakákoliv VR počítačová hra hraná v HMD, kde naopak o každém objektu víme, o jaký objekt se jedná, jaká je jeho pozice vůči modelovanému světu a jaká je pozice uživatele vůči modelovanému světu, tedy i v jaké pozici se nacházejí jednotlivé objekty vůči uživateli.



Extent of World Knowledge (EWK)

Obr. 2: Spektrum EWK

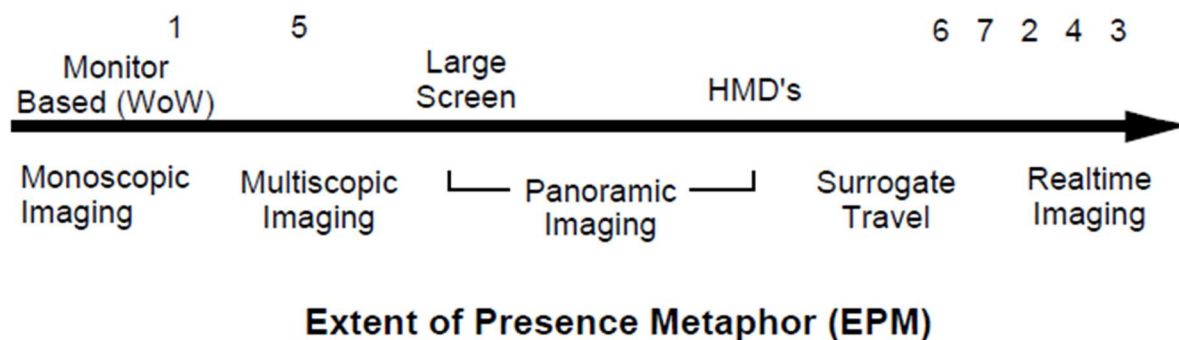
Další osou je osa *Reproduction Fidelity* (*Věrohodnost obrazové reprodukce; RF*), která popisuje, do jaké míry jsou CGI objekty zaměnitelné s reálnými objekty. Parametrizuje ji především užitá technologie zobrazování. Takovou technologií může být např. prosté monoskopické zobrazení s využitím statických textur nebo naopak stereoskopické zobrazení s využitím fotorealistických textur, které jsou proměnné např. vlivem osvětlení v reálném čase. Osa je zobrazena na Obr. 3 [1].



Reproduction Fidelity (RF)

Obr. 3: Osa RF

Poslední osou je osa *Extent of Presence Metaphor (Rozsah přítomnosti; EPM)*, která definuje míru obklopení uživatele modelovaným světem. A to od prostého nahlížení do modelovaného světa skrz WoW, přes velkoplošné panoramatické obrazovky až po HMD, které uživatele zcela vtahují po vizuální stránce do modelovaného světa. Osa je zobrazena na Obr. 4 [1].



Obr. 4: Osa EPM

2.4 Definice pojmů v kontextu této práce

Tato práce se z velké části dále zabývá především využitím technologie XR běžnými spotřebiteli, a to v místech kde se nedá očekávat, alespoň v blízké budoucnosti, hromadné použití specializovaných zařízení pro XR jako například HMD, což samo o sobě výrazně omezuje využitelnost XR. Na druhou stranu toto omezení přináší jisté zjednodušení a pro další kontext a srozumitelnost textu proto stačí definovat pouze tři pojmy. Při jejich definici vyjdeme z trojrozměrného taxonomického rámce.

Prvním pojmem je *Augmented reality*. V tomto konkrétním případě zařadíme tuto technologii na ose EWK (na Obr. 2 odpovídá bodu „1“) spíše do její levé poloviny, blíže k nemodelovanému světu. O objektech jak virtuálních, tak reálných máme jen omezené informace, známe především jejich polohu, jež u objektů reálného světa může být definována např. *mračnem bodů (Point Cloud Map; PCM)* a polohu uživatele vzhledem k objektům reálného světa. Poloha virtuálních objektů je podobně jako poloha uživatele dopočítávána v závislosti na jejich ukotvení vzhledem k reálným objektům. Na ose RF (na Obr. 3 odpovídá bodu „1“) se AR nachází také spíše v levé polovině. Předpokládáme využití především WoW zobrazení, které ze své podstaty může generovat pouze monoskopický pohled. Byť může být užito velmi realistických textur modelovaných objektů, uživatel bude vždy vnímat, alespoň periferně, své okolí, což věrohodnost CGI reprodukce bude snižovat. Na ose EPM (na Obr. 4 odpovídá

bodů „1“) se při předpokládaném využití WoW zobrazení nacházíme v blízkosti levého extrému, kdy máme jako uživatel jasné povědomí a reálném světě.

Druhým pojmem je *Augmented Virtuality*, kterou na ose EWK (na Obr. 2: Spektrum EWK 2 odpovídá přibližně bodu „7“) zařadíme do pravé poloviny, blíže k simulovanému světu. Známe poměrně přesné informace o předdefinovaných objektech reálného světa a o všech objektech virtuálního světa, především jejich polohu, a to jak z bezpečnostních důvodů (při využití neprůhledných HMD), tak z důvodů umožnění interakce virtuální projekce s reálnými objekty. Příkladem takto definovaných objektů mohou být například překážky v pohybu při *room-scale* (*velkoprostorové*) simulaci jako například dveře, nábytek apod. nebo např. uživatelské ruky, které mohou uchopit reálné pero a psát s ním na simulovanou tabuli. Na zbývajících dvou osách (na Obr. 3 Obr. 3: Osa RF, resp. Obr. 4 přibližně odpovídají body „3“, resp. „4“) se pohybujeme směrem k pravému extrému, tedy k plně modelovanému světu, a to v závislosti na využití průhledových, resp. neprůhledových HMD.

Posledním termínem důležitým pro tuto práci je *Virtual Reality*. Předpokládáme využití především neprůhledných HMD, což výrazně zjednodušuje zařazení podle definovaného trojrozměrného taxonomického rámce. Lze konstatovat, že na všech třech osách se blížíme k jejich pravým extrémům. Na ose EWK (na Obr. 2 přibližně odpovídá bod „6“) známe především přesné polohy simulovaných objektů, včetně uživatele samotného. Míru s jakou se přibližujeme na ose RF k extrému v současné době omezuje grafický výpočetní výkon, který ale ve specializovaných aplikacích dokáže nabídnout zmíněné fotorealistické textury (např. vozidlové simulátory). Na poslední ose EPM (na Obr. 4 přibližně bod „7“) usadíme VR do blízkosti jejího pravého extrému, neboť uživatel bývá z pravidla zcela obklopen simulovaným světem.

3 Historie vývoje a první příklady užití XR

Přestože technologii rozšířené reality vnímáme spíše jako vymoženost 21. století, je pro lidstvo typické, že nové technologie se často urodí ze snů a tužeb, které jsou prezentovány v literatuře. Však na základě potřeby tyto sny prezentovat vznikl celý literární žánr vědeckofantastické literatury. Pozitivním příkladem budiž například knihy Julesa Verna o cestách na Měsíc a jejich srovnání s programem Apollo. Negativním příkladem může být například Velký Bratr z románu George Orwella *1984* a jeho srovnání s dnešním využitím internetu.

U smíšené reality je to povídka amerického spisovatele Stanley G. Weinbauma *Pygmalion's Spectacles* vydaná v roce 1935 v magazínu *Wonder stories* [2]. V této povídce představuje autor zařízení, které po nasazení na hlavu vtáhne diváka do děje filmu. Divák tak dokáže nejen vidět, ale i cítit, dotýkat se a ochutnávat cokoli co je mu ve filmu prezentováno.

3.1 Sensorama a telesférická maska

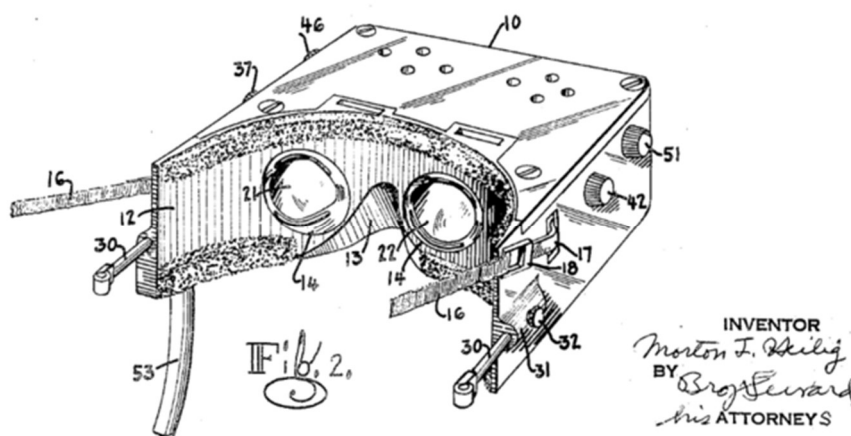
V 50. letech 20. století začal pracovat americký filmový producent a vynálezce Morton Heilig na kinematografickém zařízení, které by dokázalo stimulovat více smyslů než jen zrak a nabídnout tak divákovi do té doby zcela nevídaný zážitek. Společně s jeho týmem se mu podařilo vyvinout zařízení, s komerčním označením *Sensorama* [2], které si nechal v roce 1962 patentovat pod patentním číslem US 3,050,870.

Jednalo se o elektromechanické zařízení velikosti arkádové hry (Obr. 5) s integrovanou pohyblivou sedačkou, na kterou si divák sedl, ruce položil na vibrující područky před ním a hlavu mu obklopovaly desky, které sloužili především k odstínění okolního světa. Před ním byly umístěny dva okuláry, které soustavou čoček převáděly speciálně natočený film z obrazovky a nabízeli stereoskopický pohled. Součástí byly též stereoskopické reproduktory, ventilátory a dávkovače pachů [3]. Pro Sensoramu Morton Heilig též natočil několik filmů, které dávali divákovi možnost virtuálně navštívit New York City. Bohužel vzhledem k nedostatku financí se i přes ohlas veřejnosti nepodařilo Sensoramu rozšířit [4].



Obr. 5: Podoba jednoho z prvních XR zařízení – Sensorama

V průběhu prací na Sensoramě si též Morton Heilig nechal v roce 1960 pod patentním číslem US 2,955,156 patentovat pravděpodobně vůbec první HMD [2] (Obr. 6), který využíval dvou samostatných obrazovek a soustavy čoček k zobrazení trojrozměrného filmu [5]. Toto zařízení nazval *Telesphere Mask* [2] a jeho vzhled se příliš nelišil od dnešních HMD. Zařízení samozřejmě postrádalo jakoukoliv možnost zobrazení komplexního virtuálního světa, který by uživatele obklopoval a ve kterém by se mohl pohybovat. Sloužilo čistě k trojrozměrnému zobrazení speciálně natočeného filmu, který byl ale ve své podstatě pouze dvojrozměrný.



Obr. 6: Výkres Heiligova HMD jak je uveden v patentové žádosti

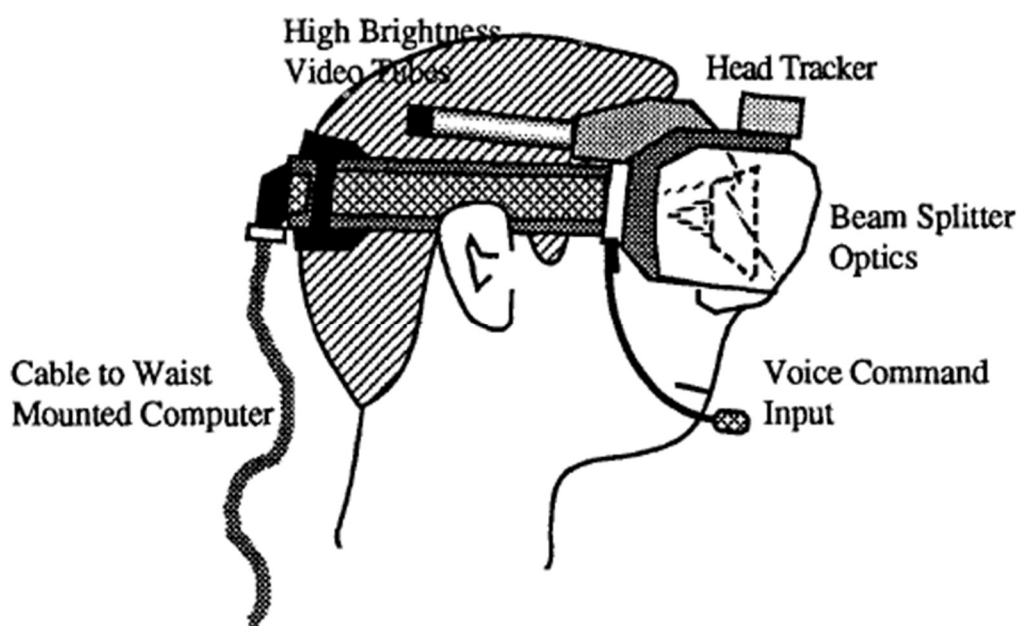
3.2 Boeing a prvotní užití XR v průmyslu

Komplexnost proudových letadel klade mimořádné nároky na jejich výrobu, která musí být přesná, ale dostatečně rychlá, přičemž složitost jednotlivých kroků je taková, že nelze užít ve velkém měřítku robotizovanou výrobu, což platí i do dnešních dnů.

Složité kroky jako například elektroinstalace je výhradně v gesci lidských pracovníků, kteří svou činnost musí neustále porovnávat s výkresy a diagramy. Tyto diagramy byly rozkládány na velké dřevotřískové desky ve tvaru blízkých skutečnému letadlu, což je velmi neefektivní, neboť je tím výrazně limitována možnost variabilní produkce jednotlivých modelů letadel.

Problém se snažili pro Boeing vyřešit v roce 1992 Thomas P. Caudell a David Mitzell. V jejich společné práci uvádějí jako jedni z prvních termín *Augmented reality* a definují základní požadavky na tuto technologii a celkem čtyři možná využití v leteckém průmyslu, včetně omezení, která tato technologie přináší [6].

V této práci prezentují návrh HMD (Obr. 7), který má vlastní výpočetní výkon umístěný na odepínacím pásu, jež uživatel nosí kolem pasu, a to hlavně z důvodu eliminace nutnosti být fyzicky propojen s počítačem pomocí datové kabeláže. Zároveň definují způsoby sledování polohy HMD v prostoru montážní haly a před konstruktérským stolem. Ovládání je řešeno pomocí hlasových instrukcí a tlačítek na výpočetní jednotce [6].



Obr. 7: Návrh HMD pro aplikaci v leteckém průmyslu

Jako vhodnou aplikaci AR v leteckém průmyslu uvádějí právě instalaci kabeláže, montáž kabelových spojek, orientace jednotlivých vrstev při kompletaci kompozitních materiálů a promítání drátového modelu letadla [6]. Dalším současným možností využití rozšířené reality nejen v leteckém průmyslu se věnují následující části této práce.

3.3 Prvotní užití XR v herním průmyslu

Dnes velmi rozšířené užití virtuální reality v herním průmyslu má své počátky v 90. letech minulého století, kdy přišla Japonská technologická firma *Sega* společně s jejich partnerskou společností *Virtuality* s doplňující periferií ke konzoli *Sega Genesis* nazývanou *Sega VR* (Obr. 8).

Jednalo se o HMD s dvěma LCD displeji a senzory schopnými sledovat pohyb hráčovi hlavy a adekvátně tomu zobrazovat herní scénu. Představena byla uzavřenému publiku na Consumer Electronic Show v roce 1993. HMD periferie měla stát tehdy 200\$ (přibližně dnešních 426\$) a Sega vyvíjela pro počáteční uvedení na trh celkem čtyři hry. Značná část zkušebních uživatelů pociťovala však při užívání nevolnost, kvůli nízké frekvenci aktualizace obrazů a zároveň HMD nešlo používat po delší dobu, především kvůli jeho vysoké hmotnosti. Sega nakonec vývoj zastavila a nikdy nedošlo ke komerčnímu využití [7].



Obr. 8: Propagační fotografie HMD Sega VR

Sega ovšem nebyla jedinou herní společností zabývající se technologií virtuální reality. Skoro každý z velkých hráčů průmyslu s herními konzolami se pokoušel vyvinout svůj vlastní HMD. Japonská společnost *Nintendo* v roce 1995 představilo HMD pod názvem *Virtual Boy*, ale ani ten nebyl příliš úspěšný a jeho produkce skončila přibližně po roce od představení [8]. V tomto ohledu nejdále došla společnost *Sony* se svým HMD s názvem *PUD-J5A* vydaným v roce 2002. Tento HMD se ovšem prodával pouze v Japonsku a byla na něj vyvinuto jen velmi omezené množství her [9] [10].

3.4 Průhledové displeje

Průhledové displeje (HUD) je možné považovat za velmi primitivní zařízení AR. Jedná se o evoluci reflektorových zaměřovačů, které využívali za druhé světové války bombardéry při nočních misích. První prototyp byl nasazen do služby v roce 1961 [11]. Typický HUD se skládá ze tří základních částí, a to zdroje světla, resp. obrazu; optiky

vedoucí obraz a slučovače, jež je vlastně průhlednou promítací plochou. Tato stavba se v průběhu let příliš nezměnila, jediná komponenta, která doznala jistých změn je zdroj obrazu, kdy na začátku to byla vysoko svítivá CRT obrazovka, kterou postupně nahradila LCD obrazovka. Dnes se pro zobrazení nejčastěji využívá laseru [12].

Dnes původně převážně vojenská technologie nabývá významu i v civilní sféře, a to jak v leteckém, tak automobilovém průmyslu.

3.5 Průlom technologie XR a její větší komerční využití

Od 90. let 20. století až do první dekády 21. století bylo využití technologie XR, především AR, jen velmi omezené. Zobrazovací zařízení byla stavěna pro konkrétní specifické účely a jejich využití na jiné, než předem určené úkoly bylo značně problematické. Tento stupeň vývoje lze srovnat se začátky využívání výpočetní techniky, kdy byly sálové počítače stavěny pro konkrétní, většinou výpočetní, úkoly.

Průlom nastal až ve druhé dekádě 21. století, a to jak na poli AR, tak VR, kdy se začínají objevovat první zařízení určená pro obecné využití běžnými uživateli. V technologii VR to je především uvedení HMD *Oculus Rift* (Obr. 9) v roce 2012. Na poli AR to je uvedení základních vývojářských nástrojů *ARKit* společností *Apple* a *ARCore* společností *Google* a přizpůsobení mobilních zařízení technologii XR [2].



Obr. 9: První verze HMD Oculus Rift DK1 z roku 2012

4 Základní principy fungování technologií XR

Cílem této kapitoly je dát obecný technický popis technologií XR, na základě kterého bude možné technologie analyzovat pro použití v navigační aplikaci, která využívá prvky XR. Zaměřuje se především na základní představení dvou komponent potřebných pro vytvoření XR aplikace a zjednodušenému popisu jejich fungování. Jedná se o zobrazovací komponentu, tedy jakými způsoby může být uživateli prezentováno prostředí XR a o komponentu orientace virtuálního obsahu ve vztahu k reálnému světu. Využití těchto komponent v daných zařízeních a výslednou aplikací v praxi se zabývají následující kapitoly.

4.1 Zobrazovací komponenta

Při deklarovaném zjednodušení v úvodu této kapitoly lze zobrazovací komponenty rozdělit do dvou základních skupin, a to do neprůhledových displejů a průhledových displejů.

4.1.1 Neprůhledové displeje

Neprůhledové displeje jsou konstrukčně jednodušší a v současnosti jsou využívány dvěma způsoby zobrazování XR.

Prvním takovým způsobem je již zmiňované WoW, což je zároveň pravděpodobně nejdostupnější zobrazení pro širokou veřejnost, neboť nevyžaduje zvláštní hardware a běžný uživatel si vystačí s chytrým telefonem nebo tabletem. Aby bylo zařízení schopno nabídnout XR je nezbytné, aby bylo vybaveno kamerou s dostatečným rozlišením (obecně alespoň 720p) a inerciální měřicí jednotkou (*inertial measurement unit; IMU*), která se sestává ze soustavy tří akcelerometrů pro měření translačního pohybu a tří gyroskopů pro měření rotačního pohybu. Doplnující senzorkou mohou být senzory měřící hloubku obrazu (*time-of-flight sensor; ToF*), které nabízejí modely vyšších cenových kategorií jako součást kamerového modulu, které obvykle vypočítávají vzdálenost měřeného objektu z časového rozdílu mezi vysláním a přijetím měřicího signálu, kterým je v tomto případě světlo z infračervené LED diody. V neposlední řadě je nezbytnou součástí WoW zobrazovacího zařízení displej, na který je promítán současně obraz reálného světa zachycený kamerou a virtuální obsah generovaný příslušným softwarem [13] [14].

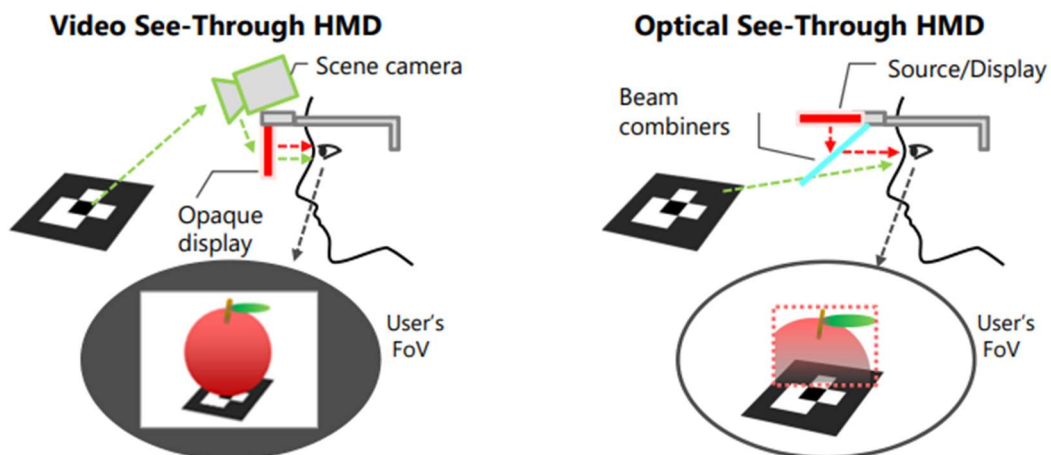
Druhu neprůhledovou technologií jsou neprůhledová binokulární HMD. V základu většinou obsahují tytéž komponenty jako mobilní zařízení vhodná pro zobrazení WoW [13]. Tato vzájemná podoba dovoluje při použití specializovaného hardware využití chytrého telefonu jako základu pro neprůhledový HMD, přičemž lze využít nejen displeje, ale též integrované IMU [15]. K vytvoření iluze trojrozměrného prostředí využívá binokulární HMD stereoskopického zobrazování, kdy na jednom nebo dvou displejích s vysokým rozlišením je cílový trojrozměrný objekt prezentován ve stejný okamžik ve dvou, typicky vzájemně mírně potočených dvourozměrných obrazech. Každé oko snímá pouze jeden z těchto obrazů, které jsou optickou soustavou čoček přeneseny do bodu, ve kterém jednotlivé obrazy splývají v jeden. Díky mírně odlišné perspektivě náhledu pro každé oko na oba dvojrozměrné obrazy dokáže lidský mozek vyhodnotit hloubku obrazu a tím vytvořit iluzi trojrozměrného obrazu [16].

4.1.2 Průhledové displeje

Nejjednodušším příkladem průhledového displeje je HUD displej, jehož základní konstrukce a princip zobrazování byl nastíněn v kapitole 3.4. V současné době, kdy si pod XR aplikacemi představujeme většinou aplikace využívající volně přenosné zobrazovací zařízení, není technologie HUD displeje již vyhovující.

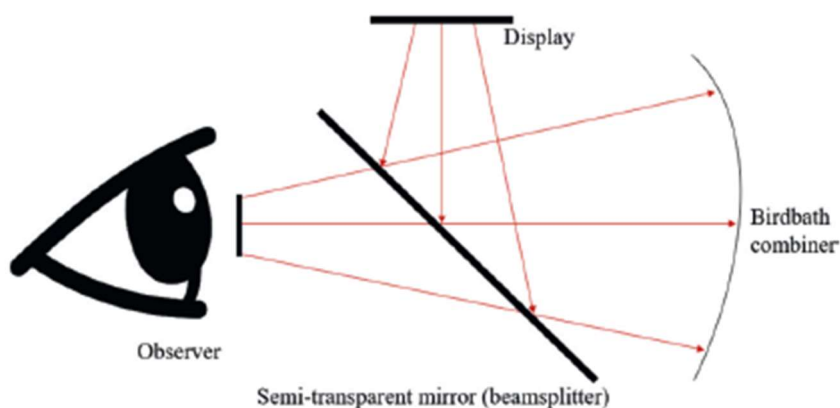
Průhledové displeje lze rozdělit v základu do dvou skupin (Obr. 10), a to *video-see-through (VST)* displej a *optical-see-through (OST)* displej. Displeje s technologií VST snímají reálné okolí kamerami vestavěnými v HMD a následný obraz reálného světa, doplněný o CGI obraz simulovaného světa, promítají jako standardní neprůhledový displej. Výhodou této konfigurace je, že HMD má úplnou kontrolu nad obrazem prezentovaným uživateli a může tak provádět korekce přijímaného signálu z kamer,

tak aby obrazy reálného a CGI světa vzájemně lépe korespondovali. Nevýhodou může být například latence v přenosu obrazu reálného světa [17].



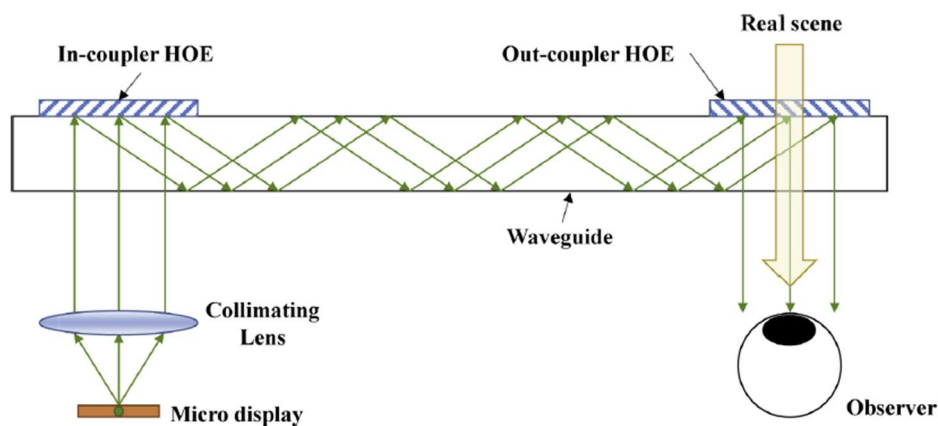
Obr. 10: Srovnání dvou základních přístupů k průhledovým displejům

Displeje s OST technologií jsou konstrukčně náročnější, ale mohou přinášet uspokojivější míru holografické prezentace, neboť pohled na reálný svět je přímější a je pouze doplněn o CGI projekci. Metod, jakým je CGI obraz doplňován do zorného pole uživatele je několik. Pro jednoduchost budou uvedeny pouze dva základní přístupy. Jedním z přístupů je částečně průhledné klopené zrcadlo umístěné v zorném poli uživatele, přes které lze vidět reálný svět. Na toto zrcadlo je poté přes optickou soustavu promítán obraz z projektoru, resp. z vysoko svítivého displeje. Schéma takového HMD je na Obr. 11 [18].



Obr. 11: Schéma OST HMD s technologií klopeného zrcadla

Druhým přístupem je *waveguide display*, který se skládá ze zdroje obrazu (opět většinou vysoko svítivého displeje), optického kabelu a extrakční průhledové plochy umístěné před okem uživatele. Tato extrakční plocha je z materiálu jiných optických vlastností než samotný optický kabel, proto zde dochází k částečnému odrazu do zornice uživatele, ne které je poté sestaven požadovaný CGI obraz. Schématické znázornění je poté na Obr. 12 [19].



Obr. 12: Schéma OST HMD s technologií waveguide

Zásadním rozdílem mezi těmito dvěma přístupy je, v jakém místě dochází ke složení výsledného obrazu, neboť u metody s klopeným zrcadlem dochází ke kompletaci obrazu ještě před okem na klopeném zrcadle, a tedy velikost zrcadla je přímo úměrná velikosti zorného pole zobrazení. U druhé metody dochází k odrazu na ploše rovnoběžné s plochou horizontu a ke kompletaci obrazu až na zornici. Díky tomu tato metoda dokáže poskytnout mnohem větší zorné pole zobrazení, neboť zvětšování extrakční plochy tolik neovlivňuje celkovou velikost HMD [18] [19].

4.2 Prostorově-orientační komponenta

Každá XR aplikace, ať už je to AR, AV nebo VR potřebuje během svého běhu znát polohu, především uživatele, resp. zobrazovacího zařízení ve vztahu k reálnému světu a adekvátně této poloze umisťovat CGI obsah. V zásadě lze prostorovou orientaci XR aplikací rozdělit do tří, resp. čtyř kategorií. První kategorií je metoda využívající předem instalovaných orientačních bodů (*marker-based XR*). Druhou metodou je metoda bez orientačních bodů (*marker-less XR*). Třetí metodou je metoda lokalizace pomocí globálních družicových polohových systémů (GNSS) [20]. Poslední metodou je metoda *room-scale point cloud map*, která se nachází na pomezí marker-based a marker-less.

Zásadním pravidlem jakékoliv orientační metody je její rychlost rozpoznání a určení polohy zobrazovacího zařízení. Jakékoliv latence v rozpoznávání prostoru, a tedy i určování pozice uživatele je nežádoucí a výrazně zhoršuje vnímání rozšířené reality.

4.2.1 Marker-based XR

Tato prostorově orientační metoda je vývojově nejstarší a ve své podstatě též nejjednodušší. Založena je na definování specifických obrazců, resp. výrazných bodech na těchto obrazcích, jako jsou například hrany (rozhraní dvou barev, typicky černé a bílé), které mohou být jednoduše rozeznány a na základě měření hloubky obrazu z několika úhlů lze určit jejich polohu, a tedy i polohu zobrazovacího zařízení ve vztahu k reálnému prostředí [20] [21].

Historicky byly využívány převážně černobílé markery ať už čtvercové a velmi podobné standardním QR kódům, tak například kruhové, případně mnohoúhelníkové. Vzhledem k jejich poměrně velké přesnosti, která pramení z jasně definovaných kontur jsou podobné markery využívány například i ve fotogrammetrii, i když v mnohem větším počtu [21].

V současnosti není nutné se omezovat pouze na černobílé markery, ale jako marker lze definovat v podstatě jakýkoliv obraz (příklad na Obr. 13), který obsahuje dostatečné množství výrazných kontur, z důvodu spolehlivějšího a rychlejšího rozpoznání pozice. Příkladem mohou být například interaktivní vizitky, věrnostní karty, reklamní poutače, obrazy a podobné [20].



Obr. 13: V pozadí rozpoznáný marker – logo a promítaný CGI objekt

Specifikem marker-based XR může být využití reálného trojrozměrného objektu, na kterém bylo definováno mračno bodů, a to buď oskenováním jakoukoliv trojrozměrnou skenovací technologií (3D skener, fotogrammetrie aj.), nebo bylo využito původního digitálního modelu, pokud cílový objekt byl například vytištěn na 3D tiskárně [22]. Schopnost model rozeznat a určit tak polohu zobrazovacího zařízení v prostoru se poté odvíjí od kvality zpracovaného mračna bodů, kdy platí přímá úměra mezi počtem definovaných specifických bodů a spolehlivostí a rychlostí rozeznání. Tento postup je typicky aplikován při rekonstrukci např. historických nekompletních nebo jinak poškozených objektů.

Značnou nevýhodou marker-based XR přístupu je nutnost dopředu označit prostor, ve kterém je zamýšlen provoz XR aplikace nebo rekonstruovaný objekt těmito markery, a to i přes to, že pro běžného uživatele mohou být markery skryté např. ve vhodně zpracované grafice. Další nevýhodou je nutnost udržovat vhodnou pozici vzhledem k markeru, protože při ztrátě viditelnosti markeru dochází též ke ztrátě orientace a promítaný CGI obsah již nelze umístit na správnou pozici. Poslední výraznou nevýhodou, a to především při užití trojrozměrného objektu jako markeru, je náchylnost na změny. Pokud je objekt nebo obecně dvojrozměrný marker nějak pozměň a tato změna není zanesena do definovaných rozpoznatelných bodů dochází velmi rychle ke snížení spolehlivosti rozpoznání a ke špatnému umístění CGI obsahu [20].

Důležitým aspektem marker-based XR je též zvolení vhodného místa ukládání digitální informace o markerech. Na výběr jsou dvě možné metody, a to rozpoznávání na zařízení (*on-device recognition*), kdy jsou informace uloženy přímo v datech dané aplikace nebo na síťovém disku (*on-cloud recognition*). Je poté na úvaze vývojáře aplikace, jakou z metod využije. Rozhodnutí je ovlivněno především základním pravidlem rozpoznávání a tj. rozpoznávání, pokud možno v reálném čase, kdy *on-cloud recognition* může být značně závislé na rychlosti datového přenosu a dostupnosti datové sítě. Dalším významným faktorem při rozhodování je poté množství a typ markerů, kdy potřebné digitální informace o dvojrozměrných obrazových markerech nejsou tolik objemově náročné, na rozdíl od trojrozměrných modelových markerech, kdy objem potřebných dat velmi rychle narůstá se vzrůstající přesností mračna bodů definujících daný marker.

4.2.2 Marker-less XR

Z nevýhod popsaných v předešlé podkapitole jasně vyplývá omezení pro využití marker-based rozpoznávání, neboť ještě před startem aplikace je nutné znát přesně jaké objekty, resp. markery a jaké výrazné kontury mají být rozeznávány. Tyto aplikace je tedy nutné provozovat i kvůli své náchylnosti na změny na markerech v kontrolovaných podmínkách a například do městského prostředí je tato metoda nevyhovující.

Základní odlišností marker-less XR rozpoznávání od marker-based XR rozpoznávání je, že skenování a modelování prostoru se odehrává až při běhu aplikace, ovšem způsob, jakým zobrazovací zařízení skenuje prostor není příliš odlišný. Na základě algoritmu definuje v jednotlivých snímcích výrazné body zájmu a jejich polohu, resp. jejich posun, následně zjišťuje na každém z dalších snímků. Tím dokáže zrekonstruovat pohyb uživatelského zobrazovacího zařízení. Je ovšem nezbytné, aby skenovaný prostor měl dostatečně specifickou texturu (např. bílé holé stěny jsou na rozpoznání velmi náročné) a zároveň, aby uživatel provedl alespoň mírný pohyb společně se zobrazovacím zařízením, tak aby bylo možné vyhodnotit prostor z více úhlů a pozic, čímž určit i pohyb definovaných zájmových bodů, a tedy polohu uživatele [14].

Na základě měření hloubky obrazu jednotlivých specifikovaných bodů lze poté rekonstruovat reálné plochy a objekty jako trojrozměrné digitální modely, kterým může být následně přiřazen určitý fyzikální model, např. model tuhého tělesa a CGI obsah prezentovaný uživateli se může od takovýchto objektů odrážet nebo na nich stát. Další typicky využívanou funkcionalitou, jež vychází z využití marker-less metody je umístování CGI objektů do scény přímo uživatelem, přičemž tyto vložené objekty si poté zachovávají svoji pozici i když uživatel zamíří zobrazovacím zařízením do jiného bodu. Této funkcionality se velmi hojně využívá např. v plánovacích a designerských studiích při rozmisťování nábytku po místnosti [14].

Metoda marker-less má ovšem své nevýhody. Tou pravděpodobně největší je, že není možné dopředu definovat polohy zobrazení CGI obsahu vůči objektům reálného světa [20].

4.2.3 Lokalizace pomocí GNSS

Všechny ostatní zmiňované metody jsou založeny na optickém rozpoznávání výrazných prvků na objektech. Metoda lokalizace pomocí GNSS naopak zcela spoléhá na vyhodnocení pozice uživatele, a tedy i pozice zobrazovacího zařízení na měření rádiových signálů přijatých z družic jednotlivých světových GNSS systémů. Nezbytnou součástí je též IMU jednotka, která dodává informace o natočení zobrazovacího zařízení a dále senzor magnetického pole, jež udává natočení zobrazovacího zařízení vůči magnetickému severu, resp. po přepočtu geografického severu. Poloha každého CGI objektu je poté definována geografickými souřadnicemi [23].

Jasnou nevýhodou této metody je omezení použití pouze v místech, kde je možný dostatečně kvalitní příjem navigačních zpráv z družic GNSS systému. Naopak nespornou výhodou je poměrně značná datová úspornost a téměř neomezená škálovatelnost dané aplikace co do počtu zobrazovaných CGI objektů. Toto platí zvláště při užití síťového uložení trojrozměrných CGI modelů, které mohou být do zobrazovacího zařízení stahovány podle potřeby [20] [23].

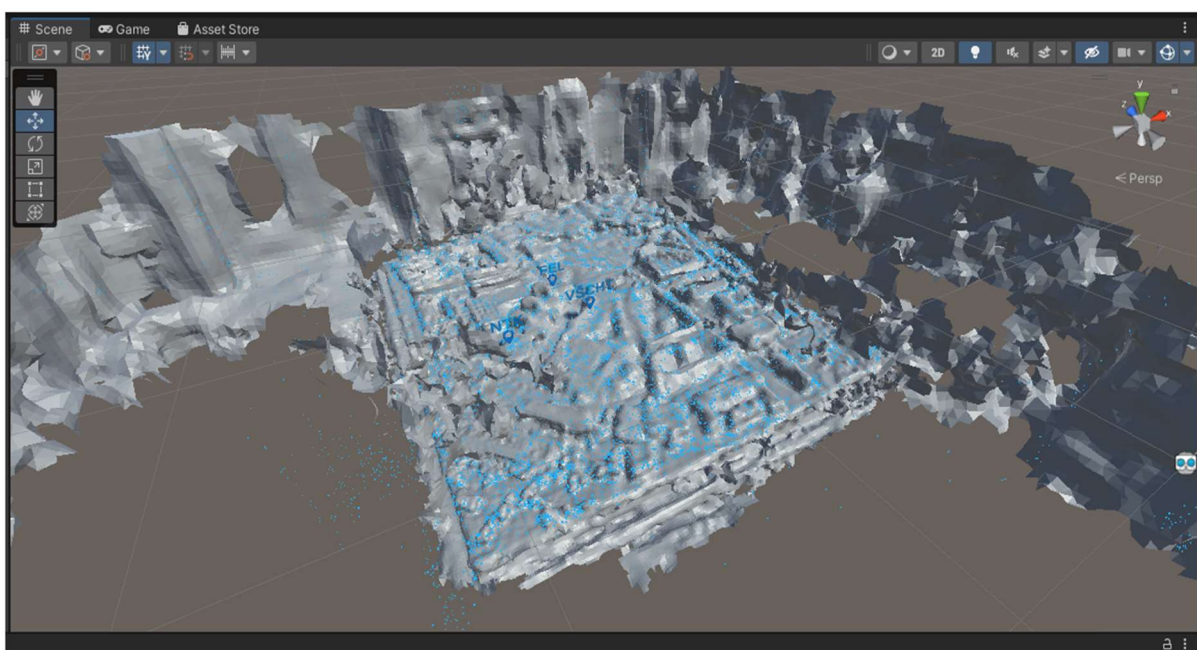
4.2.4 Room-scale point cloud map

Jak již bylo řečeno jedná se o způsob orientace na rozhraní marker-based a marker-lessa metod, protože pro její užití je nezbytné předem zmapovat prostor a vytvořit mračno bodů (PCM), což je jedno ze základních kritérií marker-based metody. Tvrzení, že room-scale PCM orientování, je možné zařadit také do kategorie marker-less metod lze podložit tím, že definujícím aspektem marker-less metod je jejich značná variabilita a možnost použití na velké ploše. Ačkoliv je tato metoda uváděna v této práci pod názvem *room-scale*, tedy v měřítku jedné místnosti, lze ji poměrně jednoduše aplikovat na rozměr celých budov, a i celých městských čtvrtí, či dokonce celých měst [24].

Při využívání XR aplikací v měřítku místností, či budov nejsou již fyzické rozměry jednotlivých objektů v těchto místnostech natolik zásadní, aby bylo nutné mít přesné PCM každého z objektů, neboť lokalizace zobrazovacího zařízení v takto velkých prostorech není závislá pouze na jednom objektu, ale je určena s pomocí výrazných prvků na více objektech zároveň. Počet bodů PCM, jež by byl nutný na přesné vymodelování jednoho objektu tak v tuto chvíli postačuje pro vymodelování základních rysů celé místnosti a všech objektů v ní (příklad na Obr. 14). Analogicky lze postupovat se zvětšujícím měřítkem, např. v měřítku ulic, kde pro určení polohy nejsou již

podstatné přesné tvary např. městského mobiliáře nebo dopravního značení, ale postačují pouze základní obrysy definované pouze několika málo body PCM.

Při vhodném rozdělení prostoru do jednotlivých samostatných PCM uložených v síťovém uložišti a detekci přechodu z jedné PCM do druhé lze výrazně snížit objem dat uložených na zobrazovacím zařízení v průběhu simulace a docílit tak pokrytí velmi velkých oblastí. Zároveň pro mapování oblastí při tvorbě PCM není třeba takové přesnosti jako při mapování jednoho objektu a lze ji poměrně jednoduše provést fotogrammetrickou metodou za použití běžného fotoaparátu a to i např. fotoaparátu v chytrých telefonech.



Obr. 14: Reprezentace PCM mapy místnosti v prostředí Unity

4.2.5 Srovnání prostorově-orientačních metod

Vzhledem k poměrně velkému spektru prostorově-orientačních metod je klíčové vybrat pro danou aplikaci správnou metodu orientace zobrazovacího zařízení v prostoru, a to především ve vztahu k zamýšlenému využití aplikace a prostoru ve kterém bude aplikace provozována. Bohužel dostupnost zdrojů k přímému porovnání jednotlivých metod je omezená, nicméně z pohledu autora této práce je důležité dát alespoň přibližné srovnání. Údaje vycházejí buď z dosavadních zkušeností autora nebo z principů na kterých daná metoda pracuje. Do budoucna je na místě provést experimentální ověření a parametry přesněji, numericky kvantifikovat. Základní

srovnání nabízí Tab. 1, přičemž definice jednotlivých stupňů u porovnávaných parametrů jsou uvedeny dále.

1. Rychlost určení pozice:

- a. Nízká = doba od otevření aplikace po zobrazení prvního CGI objektu může být i více jak 2s
- b. Střední = doba od otevření aplikace po zobrazení prvního CGI objektu je většinou mezi 1 a 2s
- c. Vysoká = doba od otevření aplikace po zobrazení prvního CGI objektu není vyšší jak 1s

2. Přesnost určení pozice:

- a. Nízká = CGI objekt se může zobrazit ve vzdálenosti i několika desítek centimetrů od své skutečné pozice
- b. Střední = CGI objekt se nezobrazí ve vzdálenosti větší než 10 centimetrů od své skutečné polohy
- c. Vysoká = CGI objekt se zobrazuje na své pozici v přesnosti jednotek centimetrů

3. Trvalost zobrazení CGI obsahu (schopnost CGI objektu setrvávat na své definované pozici v prostoru – „ukotvení CGI“):

- a. Nízká = jen při malém pohybu se CGI objekt začne samovolně vychylovat ze své pozice a k návratu do správné pozice je třeba opakovaného skenování prostoru
- b. Vysoká = CGI obsah si zachovává svou polohu i při pohybu uživatele nebo se do této pozice dokáže vrátit během několika málo sekund po zastavení pohybu uživatele

4. Datová náročnost:

- a. Nízká = datové podklady pro orientaci zabírají v uložišti místo v řádu kB až nízkých jednotek MB.
- b. Vysoká = datové podklady pro orientaci zabírají v uložišti místo v řádu desítek MB až stovek MB

Tab. 1: Srovnání prostorově-orientačních metod

	Marker-based	Marker-less	GNSS lokalizace	Room-scale PCM
Předchozí zmapování prostoru	ANO	NE	NE	ANO
Předem definované pozice CGI obsahu	ANO	NE	ANO	ANO
Rychlost určení pozice	Vysoká; při dobré viditelnosti markeru	Střední; nutnost pohybu uživatele, světelné podmínky, textura skenovaného objektu	Střední až vysoká; v závislosti na dostupnosti signálu GNSS systému	Nízká při prvotním určení; střední při následném pohybu uživatele
Přesnost určení pozice	Vysoká; při dobré viditelnosti markeru	Střední; v závislosti na rychlosti pohybu uživatele	Střední; v závislosti na dostupnosti signálu GNSS systému	Nízká při pohybu uživatele; vysoká při stání uživatele na místě
Trvalost zobrazení CGI obsahu	Nízká; při ztrátě viditelnosti markeru současně ztráta pozice CGI obsahu	Vysoká; při dostatečném naskenování prostoru během běhu aplikace	Vysoká	Vysoká
Datová náročnost	Nízká pro 2D markery; Vysoká pro 3D markery	Nízká	Nízká	Vysoká; v závislosti na využití průběžně stahovaných PCM z cloudu
Typická plocha využitelnosti aplikace	Jeden předmět	Jedna místnost	Ulice, město; nemožnost využití aplikace v interiéru	Rozsáhlé interiéry, ulice, město

4.3 Typické použití jednotlivých komponent

Jednotlivé komponenty a metody představené v předcházejících podkapitolách mají své typické využití v jednotlivých typech XR, přičemž bereme v úvahu definici těchto typů XR, jak je uvedena v kapitole 2.4.

4.3.1 Augmented reality (AR) – rozšířená realita

Rozšířená realita má pravděpodobně z trojice AR, AV, VR největší možnosti, co se variability využití týče. Využívá se jak na malém měřítku např. interaktivních exponátů v muzeu, ale tak i na celoměstském měřítku v případě služby jako je *Google Maps Live View*.

Základem kvalitní AR aplikace je vhodně zvolená metoda orientace v prostoru, přičemž je možno využít všech metod prezentovaných v kapitole 4.2, v závislosti na uvažovaném měřítku prostoru, ve kterém bude aplikace fungovat. Nejběžnějším způsobem zobrazování AR aplikace pro běžnou veřejnost je poté WoW v podobě standardních chytrých telefonů z alespoň střední cenové kategorie, kde většina modelů AR podporuje skrze developerské nástroje poskytované přímo společnostmi vytvářejícími operační systém pro chytré telefony (např. Google a OS Android s prostředím ARCore nebo Apple a iOS s prostředím ARKit).

Zobrazování pomocí průhledových HMD je většinou doménou specializovaných aplikací pro průmyslové využití, a to především kvůli obvykle vyšší pořizovací ceně průhledového HMD, zároveň je v těchto aplikacích většinou upřednostněna orientace podle markerů, která dává obvykle vyšší míru přesnosti určení pozice. Využití HMD pro AR běžným uživatelem v domácím prostředí je tak limitováno na využití neprůhledového HMD s technologií VST.

4.3.2 Rozšířená virtualita (AV) a virtuální realita (VR)

U těchto typů XR je využíváno nejčastěji neprůhledových HMD, které v současné době většinou obsahují i určitou výpočetní kapacitu zvládající většinu běžných aplikací. Pro složitější modelované prostory je ovšem stále nutné být propojen s externím počítačem a tu buď pomocí kabelu nebo lépe bezdrátově.

V obou případech uživatel nemá zpravidla možnost sledovat reálné prostředí, je tedy nezbytné, aby HMD měl okolí uživatele zmapované a mohl tak upozornit na případné překážky v trajektorii pohybu uživatele. Komerční zařízení tuto problematiku adresují

vyzváním uživatele na definování bezpečného prostoru, který je bez překážek a je vhodný pro užití neprůhledového HMD. Během běhu aplikace poté co se uživatel přiblíží k této definované hranici bezpečného prostoru, uživatele upozorní zobrazením virtuální bariéry a v případě, že hrozí bezprostřední nebezpečí střetu s pevnou překážkou ukončuje typicky HMD právě běžící aplikaci a začíná promítat obrázek z vnějších kamer, čímž se z neprůhledového HMD stane průhledový HMD.

Pro určení polohy HMD v prostoru se využívá dvou metod. První ze způsobů vyžaduje instalaci externích zařízení (většinou infračervené majáky), které sledují specifické body na HMD. Tento způsob je nazýván *outside-in* a je založen na marker-based metodě. Druhý způsob pracuje na principu marker-less metody, tedy samotný HMD je vybaven vnějšími kamerami, které vyhodnocují plochy v okolí uživatele a tím určují pozici HMD v prostoru. Tento způsob je nazýván *inside-out*.

Z těchto dvou způsobů lokalizace též vyplývá omezení pro AV a VR, kdy pro VR je možno využít obou způsobů, ale pro AV je typicky nezbytné využít metody *inside-out*, neboť se předpokládá využití reálných objektů v simulovaném prostředí, které zároveň nejsou předem označeny. Jedná se například o promítnutí uživatelových rukou do modelovaného světa a jejich využití k ovládní virtuálních předmětů.

5 Analýza aktuálně dostupného vybavení

Vytvořit přesný seznam všech aktuálně dostupných zařízení pro XR je v takto rychle se rozvíjejícím prostředí v podstatě nemožné. Pro zjednodušení je tedy nutné zavést pravidla podle kterých budou jednotlivá zařízení vybrána. Analýza aktuálně dostupného vybavení je provedena k datu 30.6.2023 a tedy jakékoliv zařízení, které bude komerčně dostupné po tomto datu není zahrnuto a současně jsou zahrnuty pouze taková zařízení, které je možné k danému datu stále zakoupit. Dalším pravidlem je uvádění společností, jež mají aktuálně významný podíl na trhu s XR vybavením a současně se jedná o již etablované technologické společnosti, které se zaměřují na dodávky pro celosvětový trh. Specializované HMD využívané ve specializovaných aplikacích (např. medicína a robotické operační nástroje) rovněž nejsou uváděny, neboť přesnější informace k těmto produktům jsou jen velmi těžko dostupné pro širokou veřejnost.

5.1 Komerčně dostupné HMD pro XR

Dle pravidel popsaných výše byly do této části vybrány následující technologické společnosti: Apple, HP, HTC, Microsoft, Oculus (Meta), Sony, Valve [25]. Historicky byly jednotlivé HMD vyvíjeny pro konkrétní technologii XR, a to buď HMD pro AR nebo HMD pro VR. V současné době, lze najít na trhu HMD pro obě použití, nicméně na základě své konstrukce a využitých komponent popsaných v kapitole 4 budou dále HMD rozděleny do dvou kategorií, a to dle jejich převažujícího prezentovaného využití výrobcem. U těch HMD, které podporují oba způsoby XR je tato informace uvedena.

Hodnoty všech parametrů byly převzaty přímo ze stránek výrobce. U některých, především hmotnost, pokud nebyla uváděna výrobcem, jako zdroj byly použity články z magazínů specializujících se na výpočetní techniku.

5.1.1 HMD primárně určené pro AR

Prvním HMD z této kategorie je HMD představený na Worldwide Developers Conference (WWDC) v červnu roku 2023 společností Apple. Produkt nese komerční označení Apple Vision Pro (Obr. 15) a uveden na trh by měl být v první polovině roku 2024. Tento produkt zavádí nový přístup ke konstrukci HMD, kdy nabízí dva oddělené výpočetní čipy, přičemž jeden zpracovává výstupy ze senzorů a specializuje se tak na určení polohy HMD v prostoru a druhý slouží k běhu programů a zpracovává obraz. Je

vybaven dvěma OLED displeji (technologie VST s vnější mimikou uživatelových očí), prostorovým zvukem, inside-out orientací a ovládání je realizováno hlasovými povely a pomocí gest, jak rukou, tak očí. Z této konstrukce vyplývá teoretické možné využití jak v AR, tak VR oblasti. Podrobnější výčet parametrů je v Tab. 2 [26].



Obr. 15: Apple Vision Pro s externí baterií, snižující celkovou hmotnost

Druhým zástupcem je druhá vývojová generace HMD společnosti Microsoft s komerčním názvem *HoloLens 2*. Tento HMD je vybaven waveguide OST zobrazovací jednotkou, prostorovým zvukem z vestavěných reproduktorů, inside-out orientací a je ovládán hlasovými povely a gesty rukou a očí. Součástí je i samostatná výpočetní jednotka. Tento HMD je zároveň certifikován pro použití v čistých místnostech a nabízí také variantu umožňující současné nošení HMD a bezpečnosti přilby. Detaily k jednotlivým parametrům se nacházejí v Tab. 2 [27].

Posledním zástupcem této kategorie je produkt společnosti Oculus (Meta) *Meta Quest Pro*. Nabízí VST zobrazení pomocí dvou LCD displejů, vestavěné reproduktory s prostorovým zvukem, inside-out orientací a ovládání pomocí dvou hardwarových ovladačů. Z uvedených parametrů lze opět vyvodit možnost použití tohoto HMD jako HMD pro VR, přičemž je tento HMD dodáván s externími clonami, které po nasazení odstiňují periferní vidění reálného světa a tím umožňují větší pohlcení uživatele virtuálním prostředím. Podrobnější výčet parametrů následuje opět v Tab. 2 [28].

5.1.2 HMD primárně určené pro VR

Prvním zástupcem je druhá generace HMD od společnosti HP *HP Reverb G2*. Vybaven je dvěma LCD displeji, integrovanými reproduktory, inside-out orientací a pro ovládání slouží dva hardwarové ovladače. Tento HMD není vybaven vlastním výpočetním výkonem a je tedy nutné fyzické propojení kabelem s externím PC. Podrobnosti v Tab.2 [29].

Druhým zástupcem této kategorie HMD pro VR je druhá generace HMD společnosti HTC s komerčním označením *HTC VIVE Pro 2* (Obr. 16). Tento HMD nabízí zobrazení dvěma LCD displeji, prostorový zvuk z vestavěných reproduktorů, outside-in orientaci pomocí IR majáků a ovládání pomocí dvou hardwarových ovladačů [30]. Tento HMD není vybaven vlastním výpočetním výkonem a je tedy nutné připojení k externímu PC, které bývá v základu kabelové, ale lze dokoupit dodatečné periferie umožňující bezdrátové propojení. Mezi další dodatečné periferie patří externí IR majáky, které lze upevnit k reálným objektům a nabídnout tak AV nebo sledovací zařízení mimiky v obličeji uživatele, opět umožňující rozšíření VR do podoby AV [31]. Podrobnosti opět v Tab. 2.



Obr. 16: Kompletní sada HTC VIVE Pro 2 včetně ovladačů a dvou IR majáků

Třetí zástupce, je již zmiňovaná společnost Oculus (nyní Meta), která má s vývojem komerčních VR HMD ze společností uvedených v úvodu této podkapitoly pravděpodobně největší zkušenosti, neboť nabízí již čtvrtou komerčně dostupnou generaci HMD, s očekávaným uvedením páté generace na podzim 2023 [32] (oficiální specifikace k datu provedení této analýzy nebyl dosud zveřejněny). Aktuálně dostupná generace HMD pro VR se nazývá *Meta Quest 2* a nabízí dělený LCD displej, prostorový zvuk, inside-out orientaci a ovládání pomocí externích hardwarových ovladačů, zároveň je vybaven vlastní výpočetní kapacitou a není tak nutné propojení s externím PC. Detaily k specifikaci se nacházejí v Tab. 2 [33].

Dalším HMD je HMD od společnosti Sony uváděné pod názvem *PlayStation VR*, který je primárně určený pro hraní videoher na konzoli PlayStation. Nabízí dělený OLED displej, integrovaný prostorový zvuk, outside-in orientaci a ovládání pomocí externích hardwarových ovladačů, které mohou být využity i bez HMD k ovládání videohry přímo na obrazovce televize. Podrobnější specifikace opět v Tab. 2 [34].

Posledním zástupcem je HMD společnosti Valve *Valve Index*. Na vývoji tohoto HMD spolupracovali společnosti HTC a Valve, což se projevilo na výrazných podobnostech v parametrech těchto produktů. Tento HMD nabízí zobrazení dvěma LCD displeji, prostorový zvuk, outside-in orientaci a k ovládání slouží externí hardware ovladače [35]. Podobně jako HMD od HTC nedisponuje vlastním výpočetním výkonem a je tedy nezbytné fyzické propojení kabelem s externím PC. Na rozdíl od HTC VIVE Pro 2 je tento HMD primárně určen pro hraní videoher a jako takový nabízí dodatečně nakoupitelné periferie jako například haptickou vestu, která dokáže rozšířit paletu stimulovaných smyslů o dotyk. Díky podobnostem je též možné využít sledovací IR majáky pro oba uváděné HMD. Podrobněji jsou parametry uvedeny v Tab. 2.

5.2 Porovnání parametrů

Na základě zjištěných parametrů, které pro podrobnější porovnání obsahuje Tab. 2, je možné provést následující shrnutí:

1. Většina HMD nabízí zobrazení v rozlišení přibližně odpovídající Full HD, pouze některé modely, především HMD pro AR podporují rozlišení Ultra HD.
2. Všechny modely nabízejí prostorový zvuk z integrovaných reproduktorů.
3. Pro orientaci v prostoru převládá způsob orientace inside-out, který je z podstaty svého fungování mnohem lépe adaptovatelný na širší pole využití.
4. Většina zařízení nabízí vlastní výpočetní výkon a není tedy třeba propojení kabelem s externím PC,.
5. Pro zařízení určená primárně pro AR je nejčastějším způsobem ovládání HMD pomocí hlasových příkazů, případně gest rukou a očí, HMD pro VR jsou ovládány nejčastěji pomocí externích hardwarových ovladačů.
6. Výdrž baterie u těch zařízení, která nevyžadují připojení k externímu PC je v závislosti na způsobu využití 2-3 hodiny, zařízení bez vlastního výpočetního výkonu propojená s PC kabelem jsou napájena přes toto spojení.
7. Hmotnost všech HMD se pohybuje v rozmezí přibližně od 400 do 800 gramů, přičemž se nezdá, že by na hmotnost měla výrazný vliv velikost baterie nebo například přítomnost vlastní výpočetní jednotky.
8. V cenách lze nalézt 3 výrazná pásma, a to pásmo od 300 do 600 dolarů (HMD pro VR), pásmo od 600 do 1000 dolarů a poté pásmo 3500 a více dolarů za HMD pro AR.

Tab. 2: Seznam vybraných parametrů HMD

	Apple Vision Pro	Hololens 2	Meta Quest Pro	HP Reverb G2	HTC VIVE Pro 2	Meta Quest 2	PlayStation VR	Valve Index
Primární určení	AR (VR, AV)	AR	AR (VR, AV)	VR	VR (AV)	VR	VR	VR
Obraz (rozlíšení na jedno oko)	2x micro-OLED (3800x3000 px)	OST-waveguide (2048x1080 px)	2x LCD (1800x1920 px)	2x LCD (2160x2160 px)	2x LCD (2448x2448 px)	1x LCD (1832x1920)	1x OLED (1920x1080)	2x LCD (1440x1600 px)
Zvuk	integrované reproduktory, prostorový zvuk; 6x mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; 5x mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; 3x mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; 2x mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; mikrofon	integrované reproduktory, prostorový zvuk; 2x mikrofon
Orientace	inside-out (2x kamera, LiDAR, TrueDepth)	inside-out (4x kamera, 2x IR senzor)	inside-out (3x kamera)	inside-out (4x kamera)	outside-in (IR majáky)	inside-out (4x kamera)	outside-in (kamera)	outside-in (IR majáky kompatibilní s HTC VIVE Pro 2)
Vlastní výpočetní síla	ANO	ANO	ANO	NE, propojení kabelem	NE, propojení kabelem nebo bezdrátové	ANO	NE	NE, propojení kabelem
Primární ovládání	hlas, gesta (oči, ruce)	hlas, gesta (oči, ruce)	ovladač	ovladač	ovladač	ovladač	ovladač	ovladač
Výdrž baterie [hod]	2	2-3	2-3	nerelevantní, napájení kabelem	nerelevantní, napájení kabelem	2-3	3-4	nerelevantní, napájení kabelem
Hmotnost [g]	450-680 (výrobce nspecifikováno, odhad)	566	722	453 (bez kabelu)	498	503	600	807
Cena [\$]	3500	3500-5199	999	599	799 (sada včetně ovladačů a IR majáků)	299	599	1079 (sada včetně ovladačů a IR majáků)

5.3 Mobilní zařízení podporující rozšířenou realitu

Se vzrůstajícím zájmem veřejnosti dochází k výraznému rozšiřování trhu s HMD, což má pozitivní vliv především na jejich cenu, která se u některých zařízení vhodných pro běžné komerční využití dostává do cenové kategorie odpovídající již nižší střední cenové třídě chytrých telefonů. Přesto může být cena pro mnoho potenciálních uživatelů, považujících XR za stále ne zcela ověřenou technologii, stále vysoká. Řešením v oblasti VR je využití standardních chytrých telefonů jako zařízení zobrazujících ve formě WoW, tak jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.

Jednou z prvních výrazněji rozšířenou možností využití chytrých telefonů jako základu HMD pro VR byl projekt *Google Cardboard* (Obr. 17) představený v roce 2014 [36]. Jednalo se o kartonovou krabici s čočkami, do které se vložil chytrý telefon vybavený IMU, obrazovkou o velikosti 4 až 6 palců [37] a specializovanou aplikací. Hlavní možnost ovládání byla pomocí definovaných pohybů hlavy nebo pomocí jednoho tlačítka, což využití limitovalo. Kromě nejnovějších vývojových generací Google Cardboard se na trhu nachází mnoho dalších podobných zařízení.



Obr. 17: Google Cardboard

6 Analýza vybraných aplikací

Technologie XR není využívána pouze v zábavním, specificky ve videoherním, průmyslu, tak jak by mohl často běžný člověk předpokládat. Koneckonců jak bylo naznačeno již v kapitole 3, prvního většího využití XR technologií bylo v leteckém průmyslu a prvotní pokusy o přenesení XR do videoherního průmyslu skončili na přelomu tisíciletí neúspěchem.

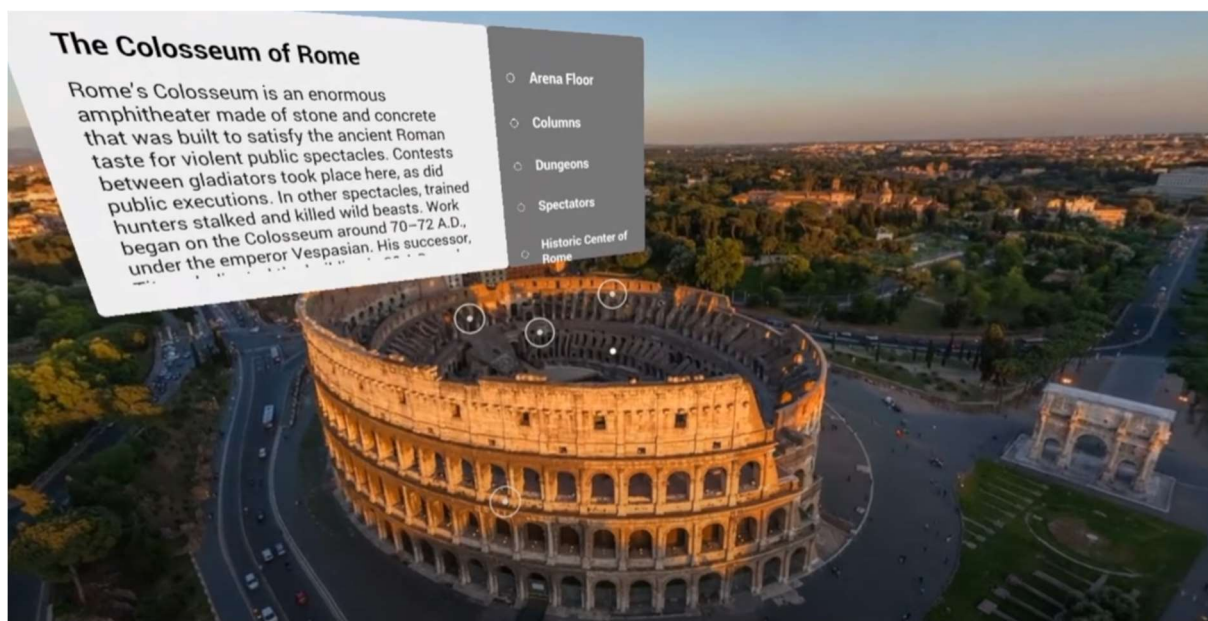
V současnosti můžeme identifikovat využití XR především v těchto oblastech lidské činnosti: umění a kultura, cestovní ruch, vzdělávání, medicína, průmysl (především strojírenský a stavebnictví), obchod a marketing, zábava a další. Pro tuto práci je důležitá analýza především využití XR v městském prostředí, a proto tomuto tématu je věnována zvláštní podkapitola 6.2.

6.1 Příklady aplikací z vybraných oblastí lidské činnosti

Vzhledem k tématu této práce v této části bude uvedeno pouze několik málo konkrétních aplikací pro ilustraci širokého spektra možností využití XR technologie. Dále vzhledem k omezené dostupnosti podrobnější technických detailů jsou popisy fungování aplikace odhadovány na základě funkcí daných aplikací a typickému využití komponent popsanych v kapitole 4.

V povědomí široké veřejnosti je pravděpodobně nejsilnější oblastí oblast zábavy, a to především ve formě videoher. V oblasti AR výraznou stopu zanechává hra pro chytré telefony *Pokemon GO* od americké společnosti Niantic, ve které uživatel loví fiktivní postavičky Pokemon na různých místech v reálném světě, přičemž k tomu využívá zobrazení WoW a pravděpodobně lokalizaci pomocí GNSS [38]. V oblasti VR je videoherních zástupců několik, za zmínku stojí například hra české vývojářské společnosti Beat Games *Beat Saber*, která se jako první čistě VR hra dostala v roce 2019 do stovky nejprodávanějších her na platformě Steam [39].

Oblast vzdělávání, umění, kultury a cestovního ruchu komplexně pokrývá aplikace *Google Expeditions VR* (Obr. 18). Ta umožňuje uživateli navštívit pomocí 360° videa, fotografie nebo CGI obsahu významná světová muzea, galerie, přírodní a kulturní památky nebo místa historických událostí, a to za použití HMD pro VR v domácím prostředí nebo ve školní třídě, kdy studenti mají nasazeny HMD pro VR (např. Google Cardboard pro své nízké náklady na pořízení) a lektor ovládá obsah k zobrazení z tabletu, na kterém zároveň má připravené podklady pro podání bližších informací, čímž funguje jako průvodce virtuální scénou [2].



Obr. 18: Virtuální prohlídka Colossea v Římě v HMD Google Cardboard

V oblasti marketingu a obchodu stojí za zmínku aplikace švédské nábytkářské společnosti IKEA *IKEA Place*. Ta nabízí uživatelům možnost zaměření místnosti a následné umístění virtuálních modelů nábytku z katalogu, čímž může dopomoci v rozhodování jaký kus koupit. Další funkcí je například rozpoznání originálních kusů nábytku IKEA a jejich vyhledání v katalogu [40]. Vzhledem k uvedeným funkcím lze soudit, že se jedná o aplikaci využívající marker-less metodu rozpoznávající povrchy, především podlahu místnosti, ke které je poté možné ukotvit a zobrazit virtuální model. Výrazným limitujícím faktorem je dostupnost této aplikace pouze pro uživatele zařízení od společnosti Apple (odkaz z oficiálních stránek IKEA na aplikaci v Google Play Store je nefunkční, stejně tak v samotném obchodě aplikaci nelze vyhledat).

Z možností užití XR aplikace ve strojírenském průmyslu lze uvést např. aplikaci *WorkLink* (Obr. 19) [2]. Tato aplikace společně s nástroji, které poskytuje, dovoluje z trojrozměrného modelu sestavy strojírenských součástí vytvořené v CAD (Computer Aided Design) programu sestavit podrobné instrukce k montáži nebo naopak demontáži jednotlivých součástí v podobě AR animace orientované podle marker-based trojrozměrné modelové metody, kterou lze následně přehrát jak na mobilních zařízeních v podobě WoW zobrazení, tak na HMD pro AR [41]. Ve stavebnictví to jsou poté aplikace pro přehledné zobrazování BIM (Building Information Modeling) dat.



Obr. 19: Ukázka fungování aplikace Worklink

6.2 Příklady aplikací z městského prostředí

Vzhledem k zaměření této práce je důležité zmínit využití XR v městském prostředí, a to v podobě analýzy dvou navigačních AR doplňků standardních mobilních mapových aplikací a poté jedné aplikace přinášející využití AR pro prezentaci dat při městském plánování v duchu Smart City.

6.2.1 Navigační aplikace

V případě navigačních AR doplňků se jedná o doplněk *Google Live View* ke standardní mapové aplikaci *Google Maps* a AR doplněk k mapové aplikaci *Apple Maps*, který nenese specifický název. Tyto mapové aplikace nejsou jediné podporující AR zobrazování navigačních instrukcí, ale pro jednoduchost jsou uváděny pouze tyto dvě, a to kvůli svému globálnímu dosahu. Aplikací, která do budoucna může mít svůj

význam je například aplikace *Petal Maps* od společnosti Huawei, která taktéž od roku 2022 nabízí AR navigační instrukce [42]. Všechny aplikace podporují AR instrukce pouze pro pěší navigaci a výslovně zakazují její použití ve vozidle nebo na kole. Bohužel v obou případech je obtížné nalézt bližší technické specifikace a princip fungování je tedy opět odhadován na základě funkcí a chování aplikací.

Doplňek Google Live View je dostupný všem uživatelům Google Map, a to za podmínky, že se nacházejí v exteriéru a zároveň v oblasti pokryté službou *Google Street View*. K promítání AR instrukcí lze přistoupit po zvolení startu a cíle cesty a po vypočtení trasy standardními algoritmy Google Maps. Po startu je uživatel vyzván, aby mobilní telefon namířil na výlohy nebo firemní štíty v okolí. V uživatelské nápovědě specificky upozorňují, že namíření na lidi nebo stromy je nedostatečné [43]. Z těchto informací lze soudit, že využívá marker-based metody, kdy fotografie z Google Street View slouží jako zdroj referenčních bodů, nicméně AR navigaci lze inicializovat i uvnitř budovy nebo např. namířením na prázdnou zeď, které postrádají výrazné referenční body. Je tedy patrné, že současně pro svou orientaci využívá i služby zjišťování polohy poskytované mobilním telefonem, nicméně takový způsob orientaci poskytuje horší výsledky. Po zorientování uživatele v prostoru se začnou promítat CGI šipky (Obr. 20) ukazující směr chůze. Bezpečnost při pohybu je řešena výzvou (Obr. 21) k odložení mobilního telefonu po nalezení směru trasy a pokud se uživatel blíží k navigačně zajímavému bodu, jako je například odbočka, mobilní telefon zavibruje a po jeho zvednutí do vertikální polohy se AR zobrazení obnoví [43].



Obr. 20: CGI navigační šipka v Google Live View



Obr. 21: Bezpečnostní upozornění při pohybu

Apple Maps nabízejí AR navigační instrukce od uvedení operačního systému iOS 15. Podobně jako Live View používají ke své orientaci kombinaci lokalizace pomocí služeb zjišťování polohy poskytované mobilním telefonem a jistou formou marker-based metody, neboť opět podobně jako Live View vyzývají uživatele k namíření fotoaparátu na okolní budovy. Zdrojem těchto dat může být, podobně jako v případě Live View, služba na prohlížení panoramatických fotografií daných lokací nebo trojrozměrné modely budov, neboť využitelnost AR navigace koresponduje s dostupností těchto trojrozměrných modelů budov ve standardním zobrazení map. Po zorientování nabízí CGI šipky a tabule s názvy ulic a míst k navedení uživatele na správnou trasu. Bezpečnost pohybu je řešena výzvou, aby uživatel jednotlivé instrukce četl při stání, a nikoliv v pohybu [44]. Navigace pomocí AR instrukcí je jednou z modulů Apple Maps, podobně jako například zmíněné podrobné trojrozměrné modely památek a jiné. Dostupnost těchto modulů se pro jednotlivé státy výrazně liší, přičemž AR navigace je možná především ve světových metropolích, případně ve větších městech USA. Dle neoficiálního seznamu je k červenci 2023 [45] v Evropě tato služba dostupná v 11 městech, především se jedná o hlavní města států na západ od České republiky a druhá největší, případně jinak významná města v těchto státech. Nám nejbližší města podporující AR navigaci mohou být například Berlín nebo Mnichov.

Vzhledem k velké podobnosti obou služeb je lze poměrně jednoduše porovnat. Ukazuje se, že obě služby stojí na podobném principu orientace, a tedy konkrétně na kombinaci orientace pomocí služeb zjišťování polohy a marker-based metod čerpající data z ostatních služeb daných společnostmi. K navigaci využívají podobné CGI objekty, tedy šipky a tabule s názvy ulic a míst. Obě služby jsou dostupné pouze pro pěší navigaci a zdá se, že obě jsou použitelné pouze pro navigaci v exteriéru (omezení použití na exteriér uvádí specificky pouze Google Live View). Výrazným rozdílem je tedy geografická dostupnost těchto služeb, která je nesrovnatelně vyšší v případě Google Live View.

6.2.2 Městské plánování

V městském plánování se jedná o pilotní projekt prezentace dat AR formou s názvem *Virtualizace Prahy*, který probíhal v období od ledna 2018 do července 2019. Byl zpracován trojrozměrný reálný model části Dejvic, na který bylo možno pomocí HMD Hololens promítat data ať už historická, real-time nebo simulovaná. Jednalo se především o environmentální data o teplotě, proudění vzduchu, znečištění a dopravní data, především data o intenzitách provozu, sledování polohy vozidel dopravního podniku. Ze simulovaných dat se jednalo poté o ovlivnění těchto veličin novou výstavbou. Data byla převzata z datové platformy města. Závěrečná zpráva zmiňuje technickou limitaci promítání pomocí HMD pro AR, limitující její širší využití např. veřejností, nicméně z podstaty výstavby aplikace v prostředí Unity zmiňuje možnost adaptace aplikace pro využití na PC, mobilním zařízení nebo na webovém rozhraní [46].

7 Vlastní návrh navigační aplikace

Tato kapitola se zabývá vlastním návrhem navigační aplikace pro pohyb po terminálech veřejné dopravy, přičemž vychází jak z poznatků získaných řešerské práce v předchozích kapitolách, a to především v oblasti dostupnosti a možnostech současných technologií, tak z osobních zkušeností autora této práce, a to především v oblasti využitelnosti takové aplikace pro jednodušší navádění. Výraznou inspirací jsou již představené AR navigační funkce implementované jak v Google Maps, tak v Apple Maps, které výrazně pomáhají v orientaci, především pokud se uživatel dostane do jiného města, než které obývá, či dokonce do jiné země, kde svůj vliv může sehrát jazyková bariéra či jiné písmo, kvůli kterému je využitelnost standardních navigačních tabulí výrazně omezena.

Bylo již uvedeno, že navigační aplikace podporující zobrazování navigačních zpráv v AR pomocí WoW zobrazení jsou již nějakou dobu na trhu dostupné, jsou zaměřeny na standardní pěší navigaci po městě a nabízejí tak rozlišovací úroveň ulic. Tato rozlišovací úroveň nebere ovšem v úvahu specifika navigace cestujících po dopravních terminálech jako například přesná pozice odjezdového stání spoje v požadovaném směru jízdy, bezbariérovost trasy, bezpečnost pohybu a další.

Cílem této kapitoly je představit návrh navigační aplikace poskytující primárně AR instrukce pro uvažované hlavní využití v terminálech hromadné dopravy, a to především běžnými uživateli s využitím WoW zobrazení pomocí chytrého telefonu. V první části definuje obecné funkce, které jsou v různé míře aplikovatelné v jakémkoliv městě na jakýkoliv druh dopravy a v druhé části se zaměřuje na implementaci takovéto aplikace v Praze.

Pro zjednodušení se tato práce nezabývá konkrétní přesnou technickou implementací daných funkcí, pouze nastiňuje možnosti technologií vhodných pro danou funkci.

7.1 Definice základních funkcí

Mezi základní funkce je možné zařadit takové funkce aplikace, které jsou nutné pro nabídnutí AR navigačních instrukcí a zároveň nevyžadují externí live-data, neboť veškerá data, především ta prostorová, nutná pro správné fungování aplikace jsou do aplikace vložena při jejím vytváření. Pro přehlednost je lze rozdělit do dvou skupin, a to na funkce nutné pro správnou navigaci – navigační funkce a funkce pro bezpečný pohyb během navigace uživatele – bezpečnostní funkce.

7.1.1 Navigační funkce

Pro další přehlednost ujasněme pojmy lokalizace a orientace. Lokalizací je dále myšleno určení geografické polohy uživatele a orientací je dále myšlena orientace zobrazovacího zařízení ve vztahu k okolním objektům. Pro úspěšnou navigaci uživatele je nezbytná jak dostatečně přesná lokalizace, tak orientace.

Lokalizace: úkolem lokalizace je, jak už bylo zmíněno, určení geografické polohy uživatele. Vzhledem k předpokládanému užití aplikace jak v exteriéru, tak interiéru, lze užít dvou technologií, a to lokalizace pomocí GNSS (především v exteriéru) a lokalizaci pomocí rádiových vln, ať už pomocí služeb GSM nebo pomocí jiných bezdrátových služeb jako např. Wi-Fi (především v interiéru). Všechny způsoby dnešní chytré telefony podporují a ze strany hardwaru tedy nic nebrání jejich využití. Lokalizace je pro navrhovanou aplikaci nutná pro dva případy. Prvním případem je počáteční lokalizace pro stažení, resp. načtení správné PCM pro následnou orientaci a druhým případem je sledování pohybu po zvolené navigační trase.

Orientace: úkolem orientace je především určování polohy zobrazovacího zařízení vzhledem k okolním objektům a tím poskytovat informace pro správné umístění a zobrazení AR navigačních zpráv. Správným zobrazením je myšleno především zmenšení CGI objektů nacházejících se ve větší vzdálenosti od uživatele, tak aby podpořili vnímání hloubky obrazu zobrazovaného na displeji nebo zajištění „neprůhlednosti“ reálných objektů, tak aby nebylo možné vidět navigační zprávu nacházející se za pevnou překážkou jako je například roh chodby. Jako vhodné se zdá využití room-scale PCM metody pro orientaci v interiéru a GNSS metody pro orientaci v exteriéru, zvláště pokud se v exteriéru nenachází dostatečné množství výrazných prvků, které by bylo možno využít jako orientační body PCM. Orientace také může zpřesňovat lokalizaci, především v interiéru, kde se nachází dostatečné množství

potenciálních orientačních bodů PCM, ovšem toto může být výrazně negativně ovlivněno velkým počtem lidí, které mohou výrazně ovlivnit rychlost a přesnost rozpoznávání.

Pro samotnou navigaci jsou navrhovány dva přístupy v závislosti na tom, jaký je cíl trasy, přičemž uvažujeme, že výchozím bodem je vždy aktuální poloha uživatele. Toto zjednodušení je zavedeno na základě deklarace účelu této aplikace, tedy navigování pomocí AR navigačních zpráv, které ze své podstaty nejsou vhodné pro dopředné plánování trasy.

Point to Point (PtP): neboli navigace bod-bod je zamýšlená pro využití při navigaci k významnému bodu zájmu jako mohou být například pokladny, toalety, informační kiosky a další, či specifický vchod nebo východ, případně specifický vstup nebo výstup z podchodu.

Point to Area (PtA): neboli navigace bod-oblast je určena pro nevedení uživatele do specifické oblasti jako je například nástupiště nebo vyčkávací místo zastávky.

Vzhledem ke specifické oblasti užití této aplikace pro navigaci pěších lze trasování značně zjednodušit. Typické dělení trasování pro motorovou dopravu na nejrychlejší, nejkratší, případně nejekologičtější trasu nedává v tomto případě příliš smysl, neboť platí, že v pěší dopravě je nejkratší trasa většinou zároveň i tou nejrychlejší. Nicméně přesný algoritmus vyhledávání tras není předmětem této práce, a proto bude nastíněn pouze zjednodušený princip trasování.

Trasování: data každé zmapované oblasti obsahují navigační body, kdy následně nalezená trasa je poté posloupností těchto předdefinovaných bodů. Takto definované body můžeme rozdělit do dvou skupin a sice body koncové a body průchozí. Koncové body jsou v místech, kde se nachází vstup, resp. výstup z mapované oblasti, bod zájmu, nebo cílová oblast. Průchozí body označují místo potencionálního větvení tras, případně definují počátek schodiště, eskalátoru, vstupu do výtahu a podobně.

Bezbariérové trasování: v případě požadavku na bezbariérové trasování aplikace vyhledá trasu standardním způsobem s tím rozdílem, že trasu nevede přes body v jejichž vlastnostech je uvedena některá z položek vylučujících bezbariérovost trasy jako je například schodiště.

7.1.2 Bezpečnostní funkce

Při používání AR navigace hrozí nebezpečí v podobě fixace pohledu uživatele na displej, který sice nabízí jistý průhled, ale i tak omezuje celkový přehled o okolí uživatele, což může vést k nehodám a zranění. Pro zvýšení bezpečnosti při používání aplikace je navržen podobný přístup jako např. u Google Live View, tedy výzva uživateli k odložení mobilního telefonu po zorientování s funkcí vibrace při přiblížení k navigačně významnému bodu na trase.

Pro zvýšení bezpečnosti je navržena funkce pro aktivní upozornění uživatele při přiblížení se k překážce, případně nebezpečnému prostoru. Nebezpečným prostorem je myšlena hrana nástupiště, počátek schodiště nebo eskalátorů a vstup na přechod. Přesná podoba takového upozornění je přílišným detailem v kontextu této práce, nicméně by měla mít obecně podobu minimálně vizuální, případně haptickou či zvukovou.

Přesnost, a tedy i spolehlivost takto podávaných upozornění je značně ovlivněna jak lokalizací, tak potenciálně i orientací, a proto by měl být uživatel jasně seznámen s faktem, že za svou konečnou bezpečnost zodpovídá pouze on sám a vina za případné zranění nelze přenášet na nepřesný systém upozorňování.

7.2 Definice doplňkových funkcí

Mezi doplňkové funkce lze zařadit takové funkce, které jsou buď zbytné pro základní orientaci a navádění cestujících po ploše dopravního terminálu nebo jsou závislé na externích live-datech. Jedná se tedy spíše o návrh možných rozšiřujících funkcí, které by prezentovali dodatečná data v AR zobrazení a na které by navigační aplikace byla připravena v případě, že by objednavatel takovéto navigační aplikace o tyto služby stál. Mezi doplňkové funkce jsou zařazeny: nalezení trasy do místa zájmu (pokladny, informační kiosky, toalety, parkoviště apod.); zobrazování časů odjezdů spojů; zobrazení přibližné pozice dveří vozidla, především pro osoby, které využívají snížené plošiny vozidla; automatická validace jízdních dokladů při vstupu do dopravního terminálu. Podrobnější popis těchto funkcí následuje dále.

Místa zájmu: funkce umožňující nalezení nejbližšího místa zájmu a dovedení uživatele k tomuto místu z aktuální pozice. Místa zájmu se rozumí pokladny, informační kiosky nebo přepážky, toalety, čekárny, parkoviště P+R a K+R, stanoviště s uložením kol,

pracoviště dozorčího nebo jiné pracoviště určené pro komunikaci cestujících se zaměstnanci dopravního podniku v případě nutnosti oznámení nehody nebo zažádání o jinou specifickou asistenci. Tato doplňková funkce nepotřebuje ke svému fungování žádná externí live-data a všechna potřebná data by byla do aplikace vložena při jejím vytváření. Její implementace je tedy ze všech navrhovaných doplňkových funkcí nejjednodušší.

Časy odjezdů: tuto funkci lze nabídnout ve dvou případech. V prvním případě upozorňuje uživatele na nejbližší odjezdy spojů v požadovaném směru při navigaci na odjezdové stání těchto spojů, přičemž zobrazuje pouze ty spoje, které lze z místa kde se uživatel nachází stihnout. Druhým případem je použití mimo navigaci, kdy tato funkce slouží jako virtuální odjezdová tabule v těch místech, kde taková tabule není fyzicky nainstalována. V tomto případě by aplikace zobrazovala všechny spoje z této zastávky s možností filtrace dle linek nebo směru jízdy. Aby tato funkce dostala dnešním moderním standardům, tedy zobrazování aktuálního odjezdu, a nikoliv plánovaného odjezdu dle jízdního řádu, je nezbytný přístup k externím live-datům, a proto implementace této funkce značně závisí na dostupnosti těchto dat.

Virtuální vozidlo: díky této funkci bude mít uživatel dopředu informace o přibližném místě dveří vozidla po jeho zastavení, což může mít přínos především v místech, kde je provoz zajištěn jen částečně nízkopodlažními vozidly. Tato funkce by po lokalizaci a orientaci automaticky zobrazovala zjednodušený virtuální model očekávaného vozidla se zvýrazněním umístění dveří vedoucích k plošině, dále by upozorňovala na přítomnost schodů za dveřmi a zobrazovala ty dveře vhodné k nástupu s jízdním kolem. Zjednodušený CGI model vozidla by mohl být dále doplněn o číslo linky a destinaci, podobně jako instalované panely přímo ve vozidle pro zjednodušení orientace. Jistý potenciál této funkce lze spatřit i na zastávkách umožňující odbavování dvou nebo více vozidel současně za sebou, kdy dle očekávaného času příjezdu by mohla zobrazovat pořadí vozidel, čímž by se mohli cestující přesunout do místa zastavení jejich spoje ještě před samotným příjezdem vozidla na zastávku. Pro správnou funkci je i zde nutné získávat externí, pokud možno, live-data, která by reflektovala skutečně nasazené vozidlo na konkrétním spoji.

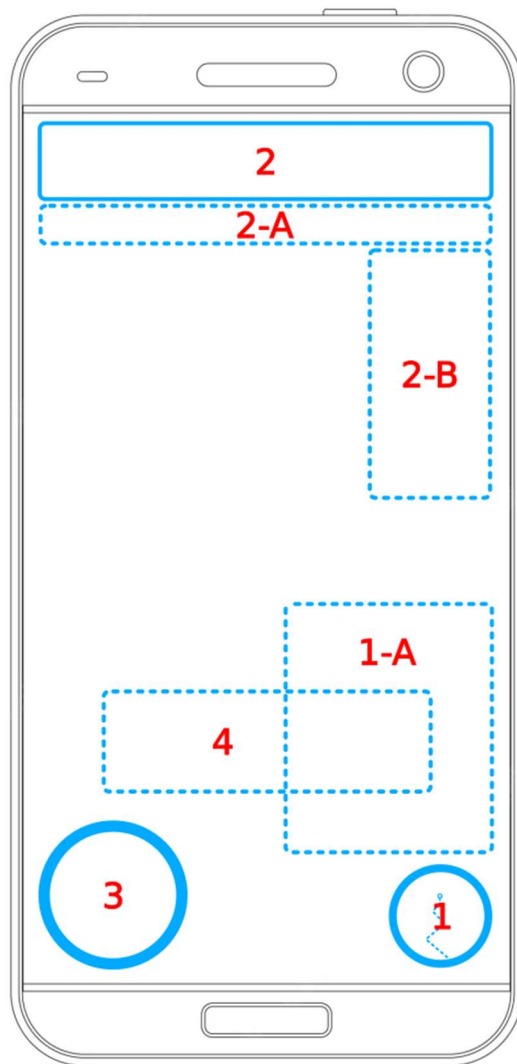
Automatická validace jízdních dokladů: funkce umožňující v místech, kde je možné nakoupit jízdenku předem pomocí mobilní aplikace, tuto jízdenku automaticky validovat, resp. aktivovat po překročení definovaných hranic. Tato funkce vyžaduje ze všech zde prezentovaných funkcí největší součinnost s vnější stranou, v tomto případě například s provozovatelem aplikace na nákup jízdenek, což může být značně problematické. Zároveň tato funkce výrazně závisí na zvoleném tarifním systému, od kterého se odvíjí i různé typy jízdenek a se vzrůstající komplexností tarifního systému vzrůstá potřeba výběru správného typu jízdenky, kde bude pravděpodobně třeba součinnost uživatele, aby správnou jízdenku předem označil jako tu, která se má automaticky validovat/aktivovat, což nabízí otázku, zda tato funkce má skutečné využití.

7.3 Zjednodušený návrh grafického zpracování aplikace

V této kapitole je představena zjednodušená grafická podoba aplikace. Jedná se především o návrh uživatelského rozhraní v první části této kapitoly a ve druhé části této kapitoly grafické znázornění navigačních zpráv uživateli.

7.3.1 Uživatelské rozhraní

Návrh vychází ze zásad pro návrh uživatelského rozhraní [47], z toho plyne umístění ovládacích prvků v blízkosti palce v dolní části displeje, a naopak umístění čistě informačních prvků do horní části obrazovky, kde nemohou být překryty. Samozřejmostí je přizpůsobení ovládacích prvků pro pravoruké, resp. levoruké uživatele. Rozmístění jednotlivých objektů pro pravoruké uživatele se nachází na Obr. 22, přičemž objekty, které jsou trvale viditelné jsou vykresleny plnou čarou a objekty jejichž viditelnost závisí na některé akci jsou vykresleny čárkovanou čarou. Podrobný popis jednotlivých prvků následuje níže.



Obr. 22: Schéma rozmístění jednotlivých prvků uživatelského rozhraní

Objekt 1: základní ovládací tlačítko, které spouští vyhledávání trasy

Objekt 1-A: rozbalovací okno, ve kterém je uvedeno několik možností nejčastějších cílů, případně možnost navigace na nejbližší místa zájmu, v dolní části je doplněno o vyhledávací pole, které aktivuje klávesnici, pomocí které může uživatel zadat cíl, který není v seznamu

Objekt 2: toto informační pole plní dvě funkce, v případě, kdy není aplikace v navigačním módu, zobrazuje název aktuální stanice, resp. terminálu, kde se uživatel nachází a v případě, že je rozeznána špatná oblast, může být poklepáním na toto pole provedena nová lokalizace a orientace. Pokud aplikace funguje v aktivním navigačním módu, pak zobrazuje ve své levé části textové instrukce (např. „Jděte ke schodům a

poté sestupte o 1 patro“ nebo „Na další křižovatce se dejte vlevo“) a v pravé části zobrazuje odhadovanou vzdálenost k avizovanému bodu.

Objekt 2-A: navazuje na objekt 2 a je viditelný pouze je-li aplikace v navigačním módu. Zobrazuje odhadovanou vzdálenost do cíle, odpočet času potřebného k dosažení cíle (minuty a vteřiny) a přibližný čas dosažení cíle (hodiny a minuty).

Objekt 2-B: společně s objektem 2 a 2-A je aktivní při navigaci a zobrazuje odjezdy nejbližších spojů ze zastávky v případě, že byla zvolena navigace na konkrétní stanoviště linky, pak zobrazuje odjezdy této linky. V případě, že byl zadán směr další cesty zobrazuje spoje všech linek jedoucí daným směrem.

Objekt 3: je zobrazen vždy, pokud se uživatel nachází ve zmapované oblasti a zobrazuje dvojrozměrné schéma dané oblasti. Po rozkliknutí umožňuje zvětšení schématu na celou plochu displeje.

Objekt 4: je zobrazen kdykoliv je třeba od uživatele zpětná vazba nebo je třeba uživatele na něco upozornit. Typickým využitím takového objektu je například při funkci automatické validace jízdenky potvrzení validace, pokud je nastavena validace s kontrolou uživatelem nebo pokud se uživatel přibližuje k nebezpečnému místu, zobrazí varování.

Pro přehlednost schématu na Obr. 22 bylo vypuštěno několik málo grafických prvků. Prvním je přístup do nastavení aplikace, které je přístupné po přetažení rolovacího okna z hrany mobilního telefonu. Druhý prvek je rámeček displeje, který v případě přiblížení se k nebezpečnému místu začne červeně pulzovat za současného zobrazení upozornění v objektu 4.

Jak již bylo uvedeno celé rozhraní je navrženo, aby bylo možno všechny hlavní funkce obsluhovat pouze pohybem palce, ať už na pravé nebo levé ruce. V případě ovládání levou rukou jsou objekty 1, 1-A, 2-B a 3 zrcadlově převrácené podél vertikální osy displeje.

7.3.2 Navigační objekty

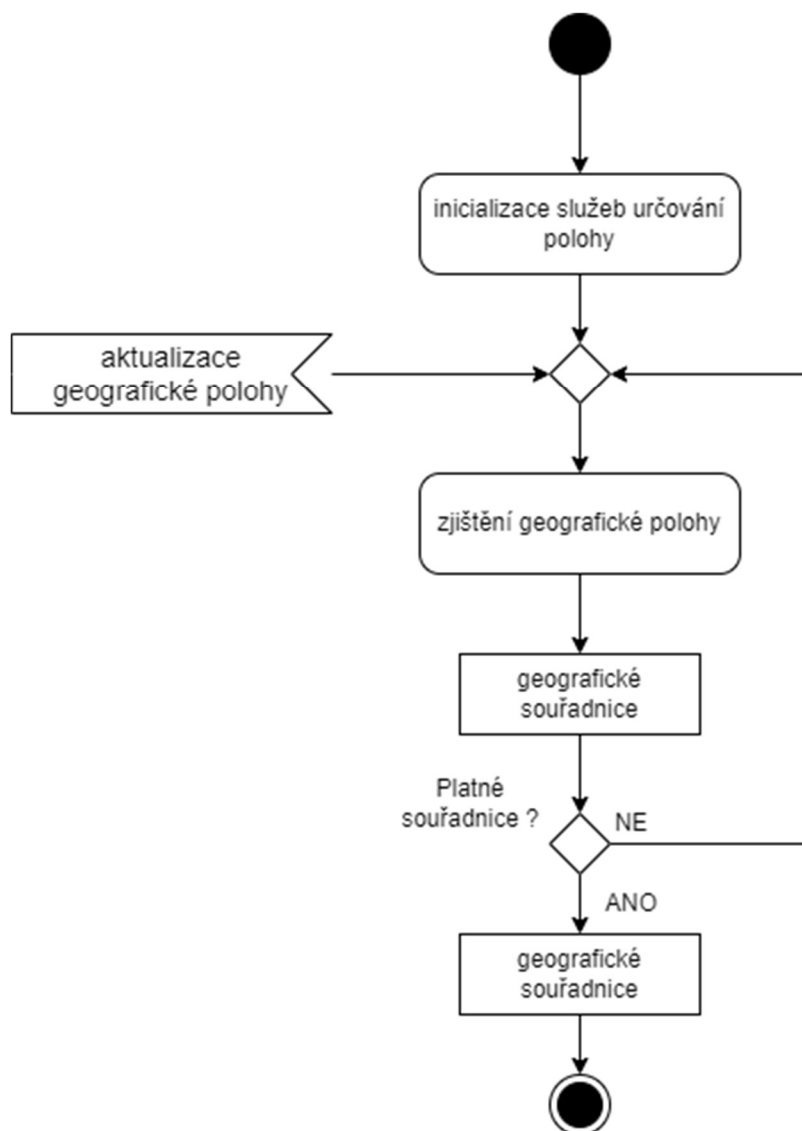
Pro zobrazování AR navigačních instrukcí je využito celkem dvou objektů. Prvním objektem je samotná cesta promítaná v podobě série šipek na zemi, dalším objektem jsou navigační tabule ukazující směr v místě křížení více cest, čímž dávají dopředu vědět, že se uživatel takovému místu blíží. Dále tyto tabule označují začátek schodiště, eskalátorů, vstup nebo výstup z výtahu nebo z budovy a vchod nebo východ z podchodu.

7.4 Diagramy chování aplikace

V této části je naznačena implementace dříve definovaných funkcí a způsob vykonávání jejich účelu. K tomuto je využito zjednodušené podoby grafického programovacího jazyka UML (Unified Modeling Language), konkrétně diagramů aktivit jednotlivých funkcí definovaných v podkapitolách 7.1 a 7.2.

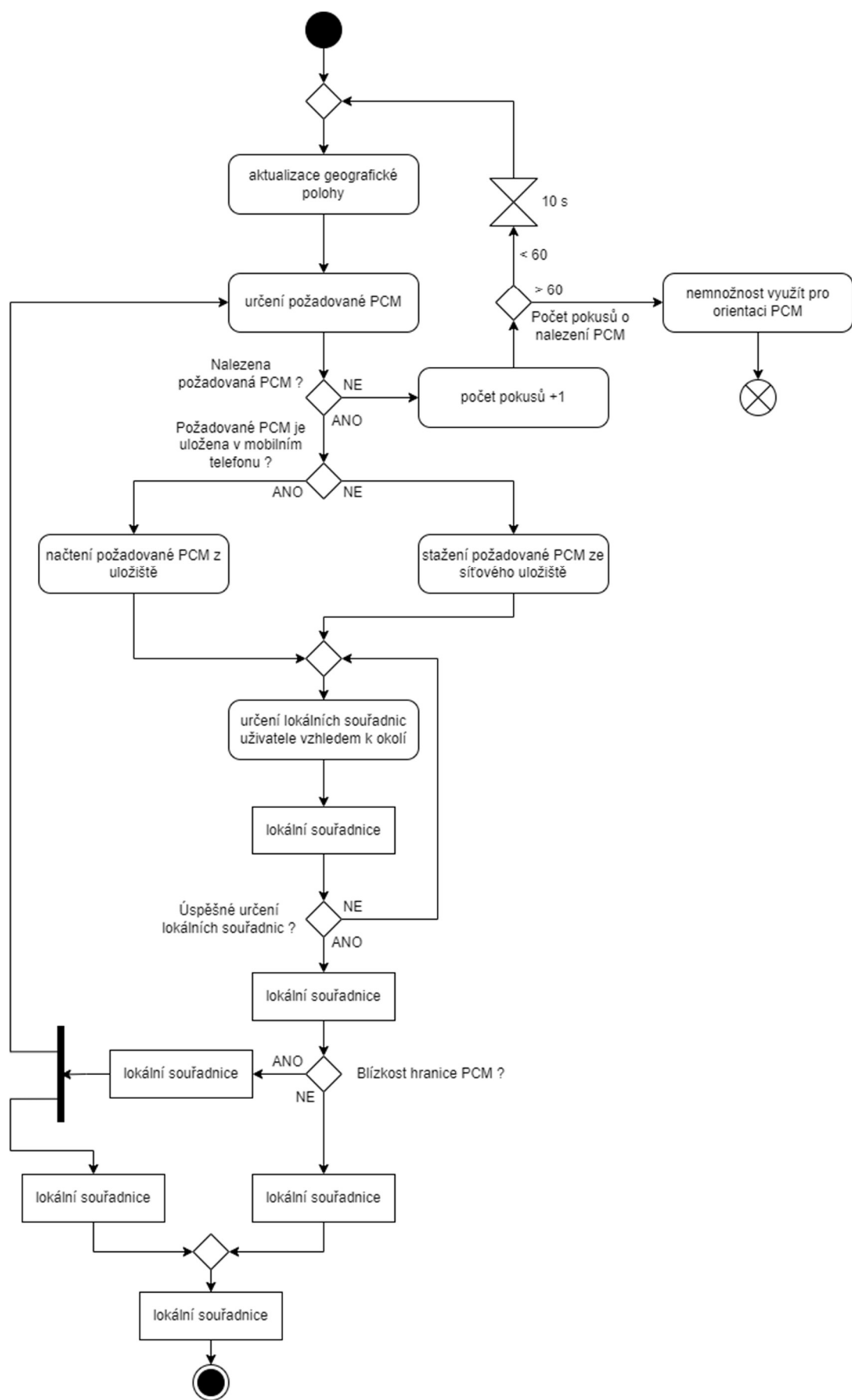
7.4.1 Diagram aktivit základních funkcí

První modelovanou funkcí je funkce lokalizace, tedy určení geografických souřadnic, které jsou dále vstupními parametry dalších funkcí. Funkce je zavolána vždy při otevření aplikace a poté kdykoliv je třeba aktualizovat geografickou polohu. Sama o sobě je velmi jednoduchá, nevětvená a nepotřebuje žádné vstupní parametry. Obsahuje pouze jednu smyčku, která opakuje pokus o lokalizaci v případě určení neplatných souřadnic nebo pokud je třeba při nedostatečné síle signálu lokalizaci opakovat. Diagram na Obr. 23 neobsahuje pro jednoduchost kontrolu počtu pokusů o opakovanou lokalizaci, což může potenciálně vést k zacyklení funkce a chybnému chování aplikace. Při skutečné implementaci se dá předpokládat kontrola, která musí být adekvátně nastavena, neboť geografické souřadnice jsou skutečně základním parametrem mnohých dalších funkcí, a tedy pro správný chod aplikace jsou zcela nepostradatelné. Lze předpokládat, že v případě opakované neúspěšné lokalizace aplikace nabídne uživateli výběr k zobrazení dvojrozměrné mapy daného prostoru, bez kontroly polohy a bez možnosti využití navigačních funkcí.



Obr. 23: Diagram funkce lokalizace

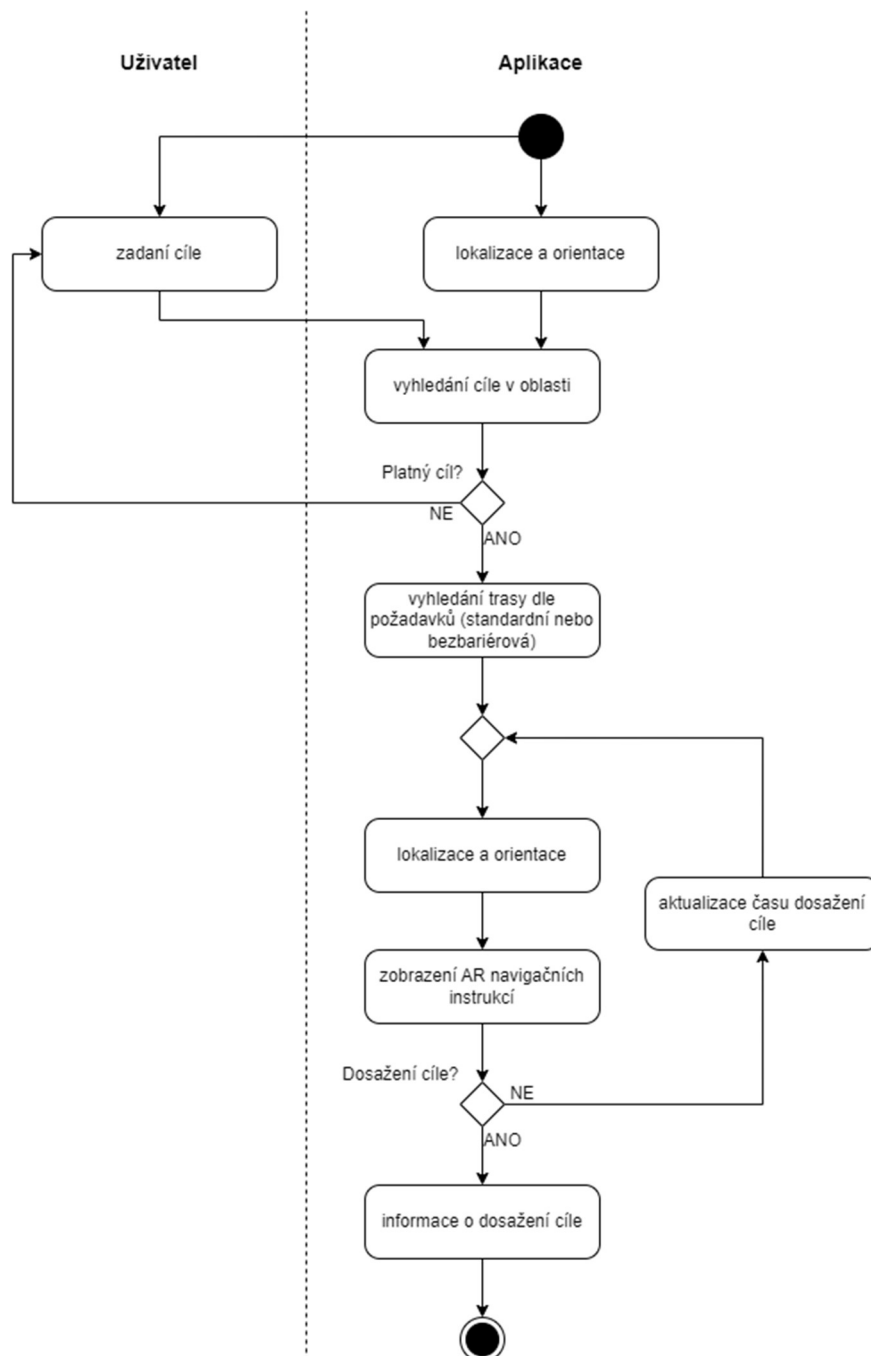
Další navigační funkcí je funkce orientace, která je taktéž volána vždy při startu aplikace po určení geografické polohy a při požadavku na aktualizaci orientace, v případě že k orientaci je využívána PCM. Důležitým vstupním parametrem jsou geografické souřadnice, které určují výběr dané PCM. Pokud není na základě geografických souřadnic nalezena PCM, funkce orientace je ukončena a pro další orientaci je třeba využít pouze geografických souřadnic. Na závěr mimo kontroly platnosti lokálních souřadnic uživatele vzhledem k okolí kontroluje též přítomnost hranice PCM pro případné stažení navazující PCM, tak aby nedošlo ke ztrátě orientace. Diagram se nachází na Obr. 24.



Obr. 24: Diagram funkce orientace

Funkce, které definují typ cíle nemá smysl UML diagramy specificky modelovat, jedná se pouze o rozdělení cílů, kdy u bodových cílů (PtP navigace) se koncový navigační uzel nachází přímo před daným cílem a v případě, že cílem je oblast (PtA navigace) se koncový navigační uzel nachází buď v jejím středu (například nástupiště metra nebo vlaku) nebo v jiném, v daném kontextu vhodném smyslu (například v blízkosti označnicku zastávky).

Funkci trasování a bezbariérového trasování lze také sloučit do jednoho zjednodušeného diagramu, který se nachází na Obr. 25. Obr. 25: Diagram funkce trasování. Funkce je zavolána kdykoliv je vyžádáno navigování do určitého cíle. Po zadání cíle uživatelem, aplikace nalezne na základě nastaveného typu cesty (standardní nebo bezbariérová) nejkratší cestu (posloupnost navigačních uzlů) do cíle a začne zobrazovat navigační instrukce, dokud uživatel nedosáhne koncového navigačního uzle.



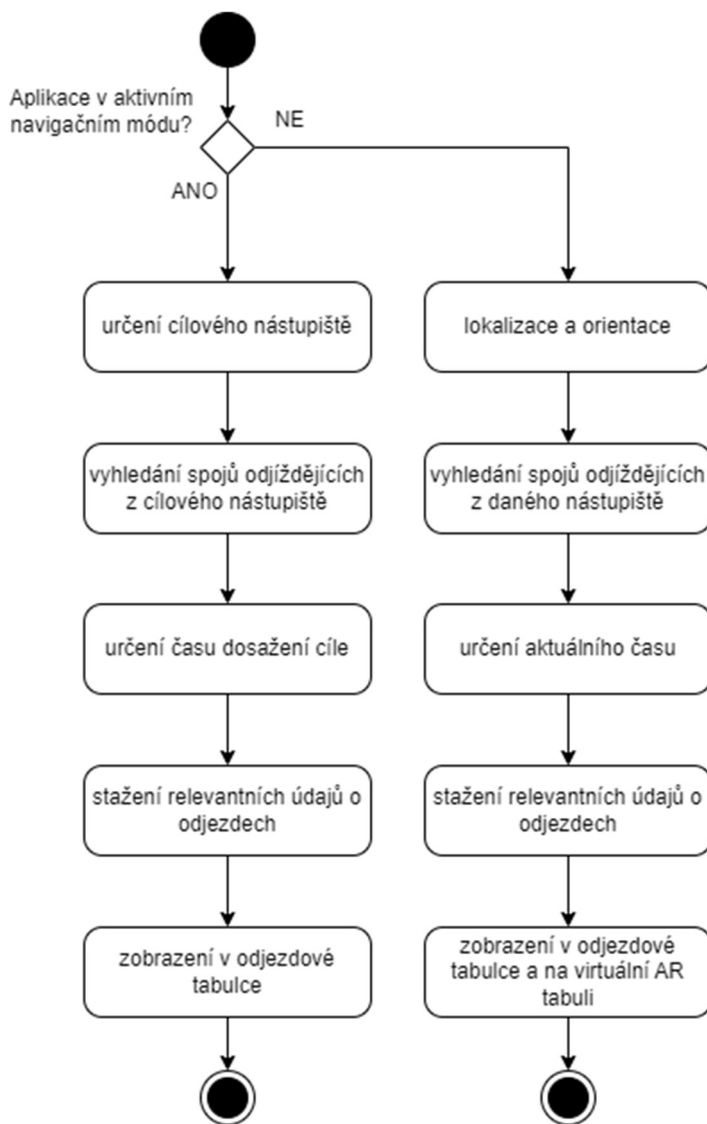
Obr. 25: Diagram funkce trasování

7.4.2 Diagram aktivit doplňkových funkcí

Diagram funkce nalezení místa zájmu má stejnou podobu jako diagram funkce trasování na Obr. 25, neboť se ve své podstatě jedná pouze o nalezení nejkratší cesty ke specifickému cíli – bodu zájmu.

Funkce zobrazení časů odjezdů spojů a virtuálního vozu jsou ve své podstatě identické, rozdílem je pouze předávaná informace. Obě funkce jsou tedy modelovány pouze jedním diagramem, který se nachází na Obr. 26. Obě funkce jsou volány buď

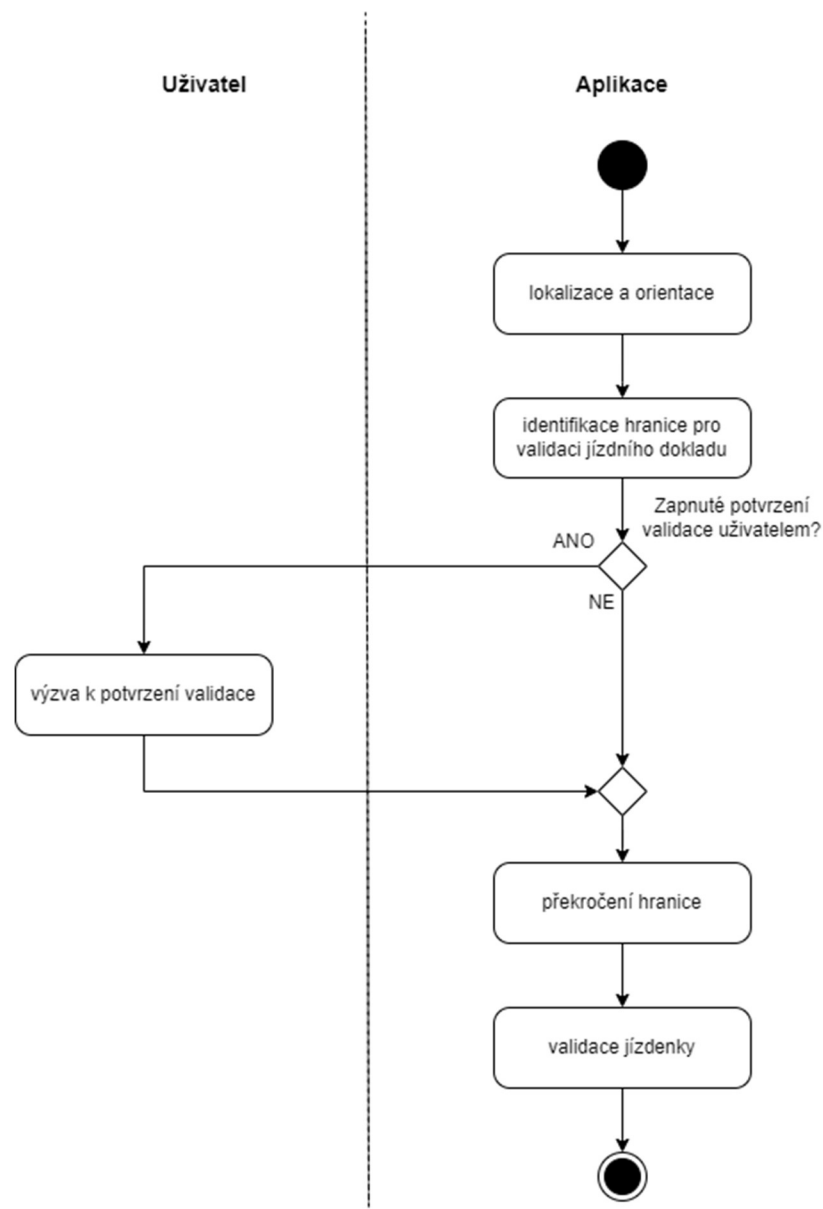
po startu aplikace a po rozpoznání lokality nebo při přechodu aplikace do aktivního navigačního módu. Funkce nejprve zjistí, v jakém místě je požadavek na doplňkové informace, následně dle časového údaje buď očekávaného příchodu na nástupiště nebo aktuálního času zjistí relevantní spoje a informace o jejich aktuálních příjezdech stáhne z příslušné datové platformy, poté informaci zobrazí buď pouze do tabulky odjezdů (v návrh designu rozhraní objekt 2-B), případně tabulku doplní o virtuální AR odjezdovou tabuli.



Obr. 26: Diagram funkce zobrazování odjezdů spojů

Funkce virtuálního vozu a zobrazování pozice dveří se liší pouze v bodě stahování relevantních údajů, kdy místo očekávaného času příjezdu stahuje z datové platformy informaci o typu vozidla nasazeného na nejbližším spoji, aby následně mohl promítnout AR model daného vozidla s vyznačením všech informací popsanych u definice této funkce v kapitole 7.2.

Funkce validace jízdních dokladů je zavolána v případě, že se uživatel přiblížil do oblasti, do které lze vstoupit pouze s platným jízdním dokladem. Po zavolání nejprve určí lokalizaci a orientaci pro přesnou identifikaci hranice při jejímž překročení dochází k validaci jízdního dokladu, v případě že je třeba vybrat typ dokladu k validaci nebo je zapnuta kontrola validace uživatelem, aplikace uživatele vyzve, aby takovou volbu, resp. kontrolu učinil a teprve následně po překročení hranice dojde k samotné validaci jízdního dokladu. Diagram se nachází na Obr.27.



Obr. 27: Diagram funkce validace jízdních dokladů

7.5 Návrh implementace AR navigační aplikace v Praze

Již při samotném návrhu bylo bráno v potaz nasazení aplikace pro navigaci po pražských dopravních terminálech, proto všechny funkce představené v kapitolách 7.1 a 7.2 lze využít v pražských podmínkách, byť implementace jednotlivých funkcí vyžaduje různou míru součinnosti s dalšími subjekty.

Účel aplikace byl obecně popsán již v úvodu této kapitoly, nicméně zde jsou myšlenky na potenciální využití rozvedeny a konkretizovány pro použití v Praze. Přestože Praha aktuálně pracuje na novém celoměstském unifikovaném informačním systému, jehož přínos je zatím vyhodnocován na pilotních projektech, autor této práce vidí výrazný potenciál v rozšíření takového systému o prvky AR, především v navigaci po dopravních terminálech, u kterých se složitost a rozlehlost stále zvyšuje. To může působit problémy nejen pro návštěvníky města, ale také pro samotné obyvatele.

Příkladem takových problematických míst mohou být například přestupní stanice metra a obecně stanice metra, které mají více vestibulů a do kterých vede z povrchu mnoho vstupů. Koncové terminály regionálních autobusových linek, stejnojmenné přestupní zastávky povrchové dopravy a metra, které jsou od sebe ve větší vzdálenosti, případně centrální přestupní body nočních linek. Některým vybraným místům se věnují následující odstavce.

Přestupní stanice Můstek: typický příklad rozlehlé stanice metra jejíž vstupy se nacházejí v několika ulicích v dolní části Václavského náměstí. Zároveň samotná stanice je se vstupy propojena mnoha členitými chodbami, které v případě chybně zvoleného výstupu značně prodlužují cestu z nástupiště na povrch, čímž výrazně snižují komfort. V případě implementace navigační aplikace se předpokládá využití navigace k významným cílům v okolí, resp. k východům vedoucím k těmto významným cílům (např. výstup k Stavovskému divadlu, do ulice Na Příkopě směrem k náměstí Republiky, na Jungmannovo náměstí a dále směrem k Národnímu divadlu, do ulice Na Můstku a dále k Staroměstskému náměstí, případně do ulice Jindřišská a směrem k tramvajovým zastávkám).

Terminál Letňany: rozlehlý terminál, který je taktéž velmi zatížen například v době konání veletrhů v areálu PVA Expo Praha nebo při hromadných koncertech pořádaných na přilehlém Letňanském letišti. Podobně jako stanice Můstek jsou Letňany vybaveny mnoha východy, mezi kterými navíc existuje jen velmi omezené

pěší spojení po povrchu. Významný autobusový terminál s mnoha odjezdovými stánkami též klade vysoké nároky na orientační systém, podobně jako velkokapacitní parkoviště P+R. Po implementaci AR navigační aplikace se opět předpokládá zvýšení komfortu cestujících při snížení počtu zbytečných peších přesunů.

Odbavení cestujících na letišti Václava Havla Praha: jednosměrná organizace jízdnic pruhů před terminály letiště vyžaduje zastavování autobusových linek různých směrů v řadě za sebou, což výrazně snižuje přehlednost a komfort cestujících. Zároveň u, především zahraničních, turistů dochází nezdědka ke koupi jízdnicího dokladu až u řidiče, což snižuje rychlost odbavení cestujících. Po zavedení navigační aplikace lze předpokládat zvýšení přehlednosti v uspořádání odjezdových stání a potenciálně snížení časové náročnosti odbavení cestujících při upozornění uživatele ke koupi jízdnicího dokladu ještě před nástupem v automatech nacházejících se přímo na nástupišti, případně v informačním kiosku, kde jim mohou zaměstnanci podat dodatečné informace.

Uvedená potenciálně problematická místa jsou řešitelná především implementací navigačních funkcí jako takových. Výrazný potenciál doplňkové funkce virtuálních AR modelů vozidel lze identifikovat především v pražském tramvajovém provozu, který zajišťuje velké množství vozidel různých konstrukcí, a kde panuje značná variabilita umístění nízkopodlažních plošin vhodných pro přepravu OOSPO nebo rodičů s dětským kočárkem. Po implementaci této funkce v aplikaci lze očekávat především zvýšení komfortu cestování tím, že se uživatel může postavit do prostoru nástupu ještě před příjezdem vozidla.

Poslední doplňkovou funkcí je automatická validace jízdnicího dokladů, která je ovšem navázána na implementaci v aplikaci PID Lítačka, ve které lze jízdnicí doklady zakoupit. Po zavedení takového způsobu validace lze odstranit v současné době zavedená dvouminutový ochranný limit proti zneužití, což může vést ke snížení konfliktních situací při jednání se zaměstnanci přepravní kontroly a ke zvýšení komfortu cestujících, kteří tak nebudou muset odhadovat načasování aktivace jízdnicí na základě aktuálního zpoždění spoje pro dojetí do místa určení.

Navigační aplikaci lze v Praze implementovat v několika variantách. Buď jako samostatnou aplikaci; jako součást aplikace PID Lítačka; nebo jako součást standardních, zavedených mapových aplikací (např. Mapy.cz). Podrobnějšímu zhodnocení jednotlivých přístupů se věnuje kapitola 8.

Pro všechny přístupy je ale nezbytné vytvořit oblasti, ve kterých se uvažuje využití aplikace, a to v následujících krocích:

1. Vytvoření PCM dané oblasti rozdělené do adekvátního množství menších PCM pro minimalizaci datové náročnosti
2. Vytvoření dvojrozměrné mapy oblasti
3. Definování navigačních uzlů na všech křižovatkách, před nebezpečnými místy a u všech potenciálních destinací
4. Definování navigačních uzlů, kterými může procházet bezbariérové trasování
5. Implementace dat o všech linkách pohybujících se danou oblastí
6. Napojení na externí datové platformy pro poskytování dat funkcím, jež taková data vyžadují

8 Zhodnocení návrhu

Cílem této kapitoly je celkově zhodnotit návrh, přičemž se hodnocení zaměřuje především na zhodnocení navrhovaných způsobů implementace a četnosti využití aplikace jedním uživatelem. V závěru je na návrh aplikována SWOT analýza pro celkové zhodnocení.

Návrh aplikace má obecně za cíl zvýšení komfortu cestování veřejnou dopravou tím, že sníží časovou náročnost pěších transferů nalezením optimální trasy, poskytne pomoc s nalezením správného odjezdového stání, zjednoduší pohyb OOSPO po dopravní infrastruktuře nalezením vhodných tras a zjednoduší odbavování cestujících.

8.1 Zhodnocení možností implementace

Výrazným potenciálním problémem je způsob implementace, neboť ten přímo ovlivňuje množství potenciálních uživatelů i samotnou dostupnost některých funkcí. A tedy i výsledný dopad na cestování veřejnou dopravou v daném městě a specificky hodnotí možnost implementace v Praze v aplikaci PID Lítačka.

V případě implementace v podobě samostatné aplikace je potenciál uživatelů jen velmi omezený a vyžadoval by nákladnou propagační kampaň, lze totiž konstatovat, že skutečný přínos aplikace bude mít pouze za předpokladu velmi vysokého využití. Nepravidelné využití nižšími tisíci uživatelů sice může lokálně některým jedincům pomoci, nicméně přínos například v podobě rychlejšího odbavení cestujících bude zcela zanedbatelný. Výhodou takového přístupu je ovšem plná kontrola nad vývojem celé aplikace. V případě implementace v Praze ovšem tento přístup zcela znemožňuje využití funkce automatické validace jízdních dokladů, neboť zavedení nákupu v navigační aplikaci, případně prosté přenesení z elektronického obchodu v jiné aplikaci je nerealizovatelné.

Pokud by byla AR navigace s navrhovanými funkcemi implementována do aplikace PID Lítačka, existovala by zde již od počátku velká základna potenciálních uživatelů, což lze vnímat jako výrazné pozitivum především v potenciálně pozitivních dopadech využívání aplikace v měřítku celého dopravního systému. Zároveň by PID Lítačka nabídla stabilní a provozem ověřenou základní platformu, především v oblasti vyhledávání spojení a dat o aktuální provozní situaci v síti. Bohužel tato cesta se jeví jako nejsložitější, neboť vyžaduje značnou kooperaci s vývojářem aplikace PID Lítačka

a zároveň značně limituje možnosti volby nástrojů k vývoji, neboť by se musela přizpůsobit prostředí, ve kterém je aktuálně PID Lítačka vyvíjena.

Zajímavou implementací by byla implementace do aplikace Mapy.cz, která aktuálně postrádá AR navigační instrukce a lze tedy předpokládat, že pokud by taková funkce byla pro tuto aplikaci vyvíjena, bylo by vhodné ji implementovat současně s navrženými funkcemi uvedenými v kapitolách 7.1 a 7.2. Výrazným benefitem by byla opět ověřená platforma a mezi uživateli velmi oblíbená platforma, což dokazuje široká uživatelská základna. Zároveň by tím aplikace Mapy.cz mohla získat, alespoň v českých poměrech, mírnou konkurenční výhodu, neboť ostatní mapové aplikace nabízející AR navigační instrukce nejsou uzpůsobeny pro takovou specializovanou službu.

8.2 Zhodnocení četnosti využití jedním uživatelem

Při hodnocení využitelnosti aplikace je dále vhodné brát v potaz četnost potenciálního využití jedním uživatelem. Pro tyto potřeby definujme následující typické uživatele – pravidelný cestující, nepravidelný cestující a návštěvník města.

Pravidelný cestující: takový cestující využívá síť veřejné dopravy pravidelně, například při dojížděce do zaměstnání, zná svou trasu a nepotřebuje navádět po terminálech, kterými tato trasa prochází. Takový cestující tedy využije navigační funkce převážně v případech, kdy se jeho destinace nachází mimo jeho standardní trasu nebo v případě výlukového provozu. Potenciál využití je taktéž po provedení síťových změn ovlivňující jeho standardní, již naučenou trasu do doby, než si tyto změny zapamatuje. V případě ostatních funkcí si lze dostatečně dobře představit občasné využití například virtuálních odjezdových tabulí, případně virtuálního modelu vozidla, a to především v zastávkách umožňujících odbavení více vozidel za sebou.

Nepravidelný cestující: takový cestující využívá síť veřejné dopravy k dopravě za kulturou, případně jinou nepravidelnou destinací. Může mít základní znalosti o struktuře sítě v daném městě, nicméně nemusí disponovat znalostmi o umístění odjezdových stání, parkovištích, pokladnách a podobně. Takový cestující může využít navigační funkce jak při navigaci na odjezdová stání, tak typicky navigaci k východům, které jsou blízké jeho destinaci. Ostatní funkce jsou svou potenciální četností využití srovnatelné s četností využití pravidelným cestujícím.

Návštěvník města: cestující, zahraniční nebo domácí, město navštěvuje poprvé nebo od poslední návštěvy uběhla dlouhá doba. Zde lze očekávat četnost využití výrazně vyšší než u předchozích dvou skupin, neboť takový cestující má zpravidla informace o systému veřejné dopravy jen velmi omezené nebo dokonce žádné. Pro každou svou cestu je nucen využít navigace téměř vždy, zvláště pokud se jedná o zahraničního návštěvníka, pro kterého může být využití standardního informačního systému kvůli jazykové bariéře problematické. Problém nesrozumitelnosti standardního informačního systému může být zvláště patrný v případě dočasných změn organizace provozu například při rekonstrukci.

8.3 SWOT analýza

Celkově má aplikace výrazný potenciál pozitivně přispět k lepšímu přístupu cestujících k veřejné dopravě, a to v současné době skrz velmi žádanou a moderní formu implementace AR.

Mezi silné stránky se řadí především již uvedené intuitivní předávání navigačních instrukcí jak pomocí CGI objektů v AR, tak textových pokynů. Jednoduché a samo vysvětlující uživatelské rozhraní optimalizované na nutnost využít při základním ovládní minimálních pohybů rukou. Návrh aplikace je sám o sobě modulární ve smyslu variability míst užití, přičemž přidání nových oblastí by mělo být pouze otázkou dodání nových navigačních dat.

Výrazným nedostatkem aplikace se jeví vysoká datová náročnost, především co se týče dat sloužících k orientaci (při předpokládaném využití orientace pomocí PCM) a je zcela na místě provést optimalizační opatření například v podobě postupně stahovaných dat ze síťového uložení. Souvisejícím nedostatkem je potenciální snížení přesnosti orientace v případě, že jednotlivé referenční body PCM nebudou dostatečně dobře viditelné nebo se budou výrazně lišit od skutečnosti (například během rekonstrukcí, kdy některé detekovatelné prvky mohou být například zakryty).

Aplikace má potenciál zefektivnění komunikace s cestujícími v oblasti dočasných nebo trvalých změn v systému, ovšem za předpokladu, že ji používá dostatečné množství uživatelů. Tento potenciál taktéž výrazně závisí na aktuálnosti všech dat, jejichž správa bude se vzrůstajícím počtem pokrytých oblastí výrazně narůstat.

Obecně výrazným rizikem pro spolehlivost aplikace je přesnost a rychlost orientace, protože při špatné orientaci může docházet k chybnému umístování navigačních informací a ve výsledku tak velmi ovlivňují použitelnost takových navigačních instrukcí. Hodnocení aplikace je přehledně shrnuto v Tab. 3.

Tab. 3: Tabulka SWOT analýzy

Silné stránky	Slabé stránky
srozumitelné předávání navigačních informací; přehledné uživatelské rozhraní; možnost bezbariérového vedení trasy; jednoduchá škálovatelnost míst využití	náročnost na přenos dat při běhu aplikace; vysoká náročnost na přesnost lokalizace a orientace; náročnost údržby datové základny aplikace
Příležitosti	Hrozby
zjednodušení přístupu k veřejné dopravě; zatraktivnění veřejné dopravy; zefektivnění komunikace během dočasných opatření v dopravě; zefektivnění odbavení cestujících na zastávkách	omezené množství potenciálních uživatelů v závislosti na zvoleném způsobu implementace; při nedostatečném využití snížení pozitivních vlivů aplikace na systém veřejné dopravy; nespolehlivá lokalizace a orientace znemožňující běh aplikace

9 Závěr

Cílem práce byla analýza možností využití XR v městském prostředí a následně návrh AR aplikace v podobě navigační aplikace, který by pomáhala při navigování po dopravních terminálech veřejné dopravy.

Vzhledem k prudkému vývoji technologií XR, se kterým souvisí nejednoznačnost pojmů pojící se s XR bylo nejprve třeba upřesnit využití těchto pojmů v této práci. K tomuto účelu bylo využito práce týmu profesora Milgrama z Univeristy of Toronto, která bývá k těmto účelům pravidelně využívána i v jiných pracích.

Dále byla provedena analýza aktuálně dostupných technologií XR, především způsobu jejich technického fungování, za účelem jejich porovnání a následného zhodnocení jejich využitelnosti v AR navigační aplikaci. Z analyzovaných technologií se jako vhodné pro AR navigační aplikaci jeví užití orientace pomocí GNSS případně velkoplošných PCM a ze zobrazovacích metod poté metoda zobrazení WoW s využitím mobilních telefonů uživatelů, především z cenových důvodů, neboť analýzou aktuálního hardwarového vybavení bylo zjištěno, že trh se specializovanými HMD pro AR je v současné době stále ještě poměrně malý, což může mít právě vliv na vyšší ceny takových HMD.

Samotný návrh AR navigační aplikace je poté inspirován současným, podobným využitím AR v mapových aplikacích společností Google a Apple. Definuje a pomocí zjednodušených UML diagramů modeluje všechny potřebné funkce ke spolehlivé a bezpečné navigaci uživatele po plochách dopravních terminálů. Základní navigační funkce dále doplňuje o možné další funkce zjednodušující využití veřejné dopravy, čímž mohou přispívat ke zvýšení komfortu veřejné dopravy, zvýšení přístupnosti veřejné dopravy pro OOSPO nebo například zjednodušení odbavení. Při implementaci všech navrhovaných funkcí lze identifikovat potenciál ke zvýšení atraktivity veřejné dopravy, což v současné době klimatické krize je jistě velmi žádoucí.

V rámci návrhu byly také představeny způsoby implementace takové navigační aplikace v Praze, a ačkoliv se tato práce věnovala pouze několika málo možným problémovým místům, tak celkový potenciál využití v Praze je značný.

Zhodnocení návrhu se věnovalo především zhodnocení míry využití, přičemž jako nejvhodnější co do počtu potenciálních uživatelů a zároveň potenciálu využití všech navrhovaných funkcí jeví implementace aplikace do současné pražské aplikace PID Lítačka, a to i přesto, že tento způsob je pravděpodobně co do samotné technické implementace nejnáročnější, především z důvodů nutné koordinace se současným vývojářským týmem této aplikace a přizpůsobení se současnému technickému řešení. Co se týče četnosti, resp. pravidelnosti využívání navigační aplikace, tak bylo konstatováno, že pravděpodobně nejčastějšímu využití dojde ze strany návštěvníků města, což v případě Prahy jakožto celosvětově známé a oblíbené turistické destinaci skrývá výrazný potenciál využitelnosti.

Ke zpracování této práce bylo využito nástrojů MS Office, především *MS Word* a *MS Excel*. UML diagramy byly zpracovávány v aplikaci *draw.io*.

Autor věří, že tato práce má výrazný přínos především v oblasti možností aplikace XR v městském prostředí a že bude dále využita i v dalších pracích autora.

10 Citovaná literatura

[1] *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum.*

Milgram, Paul, a další. 1994, SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies, stránky 282-292.

[2] **Mealy, Paul.** *Virtual & Augmented Reality For Dummies.* For Dummies, 2018. ISBN 978-1-119-48152-2.

[3] **Heilig, Morton L.** *Sensorama Simulator.* 3050870 USA, 28. Srpen 1962.

[4] **Turi, Jon.** The sights and scents of the Sensorama Simulator. *engadget.com.*

[Online] 16. Únor 2014. [Citace: 2. července 2023.] https://www.engadget.com/2014-02-16-morton-heiligs-sensorama-simulator.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAALzA3FeJZjY_QJO1_ahitWnCiDI_l-rmMB1cosZoPUE0J81OENsTEnBcliq4T5207sVqIKC16I3ExGWwiJj2Yr2CwluwzSfn1
1.

[5] **Heilig, Morton L.** *Stereoscopic-television apparatus for individual use.* 2955156 USA, 4. Říjen 1960.

[6] *Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes.* **Caudell, Thomas P. a Mizell, David.** místo neznámé : IEEE, 1992. ISBN 0-8186-2420-5.

[7] **Sega Retro.** Sega VR. *SEGA RETRO.* [Online] [Citace: 2. července 2023.] https://segaretro.org/Sega_VR.

[8] **Edwards, Benj.** Unraveling The Enigma Of Nintendo's Virtual Boy, 20 Years Later. *Fast Company.* [Online] 21. Srpen 2015. [Citace: 2. července 2023.] <https://www.fastcompany.com/3050016/unraveling-the-enigma-of-nintendos-virtual-boy-20-years-later>.

[9] **Hughes, Season.** Sony PUD-J5A Virtual Reality Headset. *Digital Game Museum.* [Online] 29. Prosinec 2015. [Citace: 2. července 2023.] <https://www.digitalgamemuseum.org/sony-pud-j5a-virtual-reality-headset/>.

[10] **Horowitz, Ken.** Sega VR: Great Idea or Wishful Thinking? *sega-16.com* [Online] web.archive.org, 28. Prosinec 2004. [Citace: 2. červenec 2023.]

https://web.archive.org/web/20100114191355/http://sega-16.com/feature_page.php?id=5&title=Sega%20VR%3A%20Great%20Idea%20or%20Wishful%20Thinking%3F.

[11] **BAE Systems**. The evolution of the Head-Up Display. *beasystems.com* [Online] [Citace: 2. července 2023.] <https://www.baesystems.com/en/feature/our-innovations-hud>.

[12] **Previc, Fred H. a Ercoline, William R.** *Spatial Disorientation in Aviation*. místo neznámé : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. ISBN 1563476541.

[13] **Jasenovcova, Lucia**. What is augmented reality and how does AR work? *resco.net*. [Online] 10. Srpen 2022. [Citace: 15. července 2023.] <https://www.resco.net/blog/what-is-augmented-reality-and-how-does-ar-work/>.

[14] **Google ARCore Development**. ARCore Fundamental Concepts. *ARCore Documentation*. [Online] [Citace: 15. července 2023.] <https://developers.google.com/ar/develop/fundamentals>.

[15] **Noble, Steve**. The 8 best smartphone virtual reality headsets of 2021. *Aniwaa.com*. [Online] 6. Srpen 2021. [Citace: 15. července 2023.] <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/vr-ar/best-smartphone-vr-headset/>.

[16] *Consumer-oriented Head Mounted Displays: Analysis and Evaluation of Stereoscopic Characteristics and User Preferences*. **Gadia, Davide, a další**. místo neznámé : Springer Nature, 2018. ISSN 15728153.

[17] *Applications of Video See-Through HMD only with General Smartphone and Cardboard to Game*. **Kim, Seong K. a Lee, Jong B.** místo neznámé : Korean Society for Computer Game, 2021. ISSN 1976-6513.

[18] *Towards Indistinguishable Augmented Reality: A Survey on Optical See-Through Head-mounted Display*. **Itoh, Yuta, Langlotz, Tobias a Plopski, Alexander**. 6, New York : Association for Computing Machinery, 2021, Sv. 54. ISSN 1557-7341.

[19] *Waveguide-type see-through dual focus near-eye display with a polarization grating*. **Shin, Kwang-Soo, a další**. 22, místo neznámé : Optical Society of America, 2021, Sv. 29. ISSN 1094-4087.

- [20] **Zvejnieks, Gatis**. Marker-based vs markerless augmented reality: pros, cons & examples. *Overly*. [Online] 13. července 2022. [Citace: 15. července 2023.] <https://overlyapp.com/blog/marker-based-vs-markerless-augmented-reality-pros-cons-examples/>.
- [21] *Strategy for Creating AR Applications in Static and Dynamic Environments Using SLAM- and Marker Detector-Based Tracking*. **Park, Chanho, a další**. místo neznámé : Tech Science Press, 2022. ISSN 1546-2226.
- [22] **Vuforia SDK**. Model Targets. *Vuforia Developer Library*. [Online] [Citace: 15. července 2023.] <https://library.vuforia.com/objects/model-targets>.
- [23] **Fedko, Daria**. All You Need to Know About Location-Based Augmented Reality. *Wear-studio.com*. [Online] 20. června 2022. [Citace: 15. července 2023.] <https://wear-studio.com/location-based-ar/>.
- [24] **Immersal SDK**. Immersal SDK. *Immersal Developer Portal*. [Online] [Citace: 15. července 2023.] <https://immersal.gitbook.io/sdk/#what-can-it-do>.
- [25] **Greenwald, Will a Minor, Jordan**. The Best VR Headsets for 2023. *pcmag.com*. [Online] 11. července 2023. [Citace: 20. července 2023.] <https://www.pcmag.com/picks/the-best-vr-headsets>.
- [26] **Apple**. Apple Vision Pro. *apple.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.]
- [27] **Microsoft**. HoloLens 2. *microsoft.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware#document-experiences>.
- [28] **Meta**. Meta Quest Pro. *meta.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.meta.com/quest/quest-pro/>.
- [29] **HP**. HP Reverb G2. *hp.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.hp.com/us-en/vr/reverb-g2-vr-headset.html>.
- [30] **HTC**. HTC VIVE Pro 2. *htc.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.vive.com/us/product/vive-pro2/overview/>.
- [31] —. Accessories. *htc.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.vive.com/us/accessory/>.

- [32] **Meta**. The powerful Meta Quest 3. *meta.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.meta.com/quest/quest-3/>.
- [33] —. Meta Quest 2 for less. *meta.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.meta.com/quest/products/quest-2/tech-specs/#tech-specs>.
- [34] **Sony**. PlayStation VR. *playstation.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.playstation.com/cs-cz/ps-vr/>.
- [35] **Valve**. Valve Index - Nová úroveň virtuální reality. *valvesoftware.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.valvesoftware.com/cs/index>.
- [36] **MaxBoxVR**. History of Google Cardboard. *maxboxvr.com*. [Online] 13. srpna 2021. [Citace: 20. července 2023.] <https://www.maxboxvr.com/wiki/history-of-google-cardboard/>.
- [37] **Amazon**. Official Google Cardboard. *amazon.com*. [Online] [Citace: 20. července 2023.] <https://www.amazon.com/Google-87002822-01-Official-Cardboard/dp/B01L92Z8D6?th=1>.
- [38] **Niantic**. Pokemon GO. *pokemgolive.com*. [Online] [Citace: 21. července 2023.] <https://pokemongolive.com/>.
- [39] **Steam**. Best of 2019 Top Sellers. *store.steampowered.com*. [Online] [Citace: 21. července 2023.] https://store.steampowered.com/sale/2019_top_sellers/.
- [40] **IKEA**. Apps. *ikea.com*. [Online] [Citace: 21. července 2023.] <https://www.ikea.com/ch/en/customer-service/mobile-apps/#6f254e20-867a-11eb-99f0-93776650d90f>.
- [41] *WorkLink Easy Authoring AR Smart Instructions System*. **Scope AR**, 2016. [online] [Citace: 21. července 2023] <https://www.youtube.com/watch?v=895OZPSSNkl>
- [42] **Petal Maps**. Petal Maps Unveils AR Walking Navigation Feature for Today's Explorers. *prnewswire.com*. [Online] 5. května 2022. [Citace: 2021. července 2023.] <https://www.prnewswire.com/ae/news-releases/petal-maps-unveils-ar-walking-navigation-feature-for-today-s-explorers-884815680.html>.

- [43] **Google**. Use Live View on Google Maps. *support.google.com*. [Online] [Citace: 21. července 2023.]
<https://support.google.com/maps/answer/9332056?hl=en&co=GENIE.Platform%3DAndroid>.
- [44] **Apple**. Apple Maps introduces new ways to explore major cities in 3D. *apple.com*. [Online] [Citace: 21. července 2023.]
<https://www.apple.com/newsroom/2021/09/apple-maps-introduces-new-ways-to-explore-major-cities-in-3d/>.
- [45] **O'Beirne, Justin**. APPLE MAPS FEATURE AVAILABILITY COMPARED ACROSS MAJOR CITIES. *justinobeirne.com*. [Online] červenec 2023. [Citace: 21. července 2023.] <https://www.justinobeirne.com/apple-maps-feature-availability-metros>.
- [46] *Virtualizace Prahy Zpráva o ukončení projektu a získaných poznatcích*. Praha : **Operátor ICT a.s.**, 2019.
- [47] *Design Quality Criteria for Smartphone Applications Interface and its Impact on User Experience and Usability*. **Ayada, Wesam a Hammad, Maram**. 4, místo neznámé : International Design Journal, 2023, Sv. 13. ISSN 2090-9640.
- [48] **Aimojo - Ali**. Top 15 Virtual Reality and AR Companies [2023 Selective]. *Aimojo.pro*. [Online] červenec 2023. [Citace: 20. července 2023.]
<https://aimojo.pro/top-virtual-reality-ar-companies/>.
- [49] *Advancements in Optical See-through Near-Eye Display*. **Zhang, Zhou, a další**. místo neznámé : IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772.

11 Seznam obrázků

Obr. 1 Reality-Virtuality continuum; zdroj: [1]

Obr. 2: Spektrum EWK; zdroj: [1]

Obr. 3: Osa RF; zdroj: [1]

Obr. 4: Osa EPM; zdroj [1]

Obr. 5: Podoba jednoho z prvních XR zařízení – Sensorama; zdroj: [2]

Obr. 6: Výkres Heiligova HMD jak je uveden v patentové žádosti; zdroj: [5]

Obr. 7: Návrh HMD pro aplikaci v leteckém průmyslu; zdroj: [6]

Obr. 8: Propagační fotografie HMD Sega VR; zdroj: [7]

Obr. 9: První verze HMD Oculus Rift DK1 z roku 2012; zdroj: Sebastian Stabinger 2013. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oculus_Rift_-_Developer_Version_-_Front.jpg

Obr. 10: Srovnání dvou základních přístupů k průhledovým displejům; zdroj: [18]

Obr. 11: Schéma OST HMD s technologií klopeného zrcadla; zdroj: [49]

Obr. 12: Schéma OST HMD s technologií waveguide; zdroj: [19]

Obr. 13: V pozadí rozpoznáný marker – logo a promítaný CGI objekt; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 14: Reprezentace PCM mapy místnosti v prostředí Unity; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 15: Apple Vision Pro s externí baterií, snižující celkovou hmotnost; zdroj: Alza.cz 2023. <https://www.alza.cz/apple-vision-pro-recenze>

Obr. 16: Kompletní sada HTC VIVE Pro 2 včetně ovladačů a dvou IR majáků; zdroj: Alza.cz. https://www.alza.cz/gaming/htc-vive-pro-2-full-kit-d6678124.htm?kampan=adw4_prislusenstvi-pro-it-tv_dsa_all_obecna_ostatn%C3%AD_c_9062891___529610160912_~99657998070~&gclid=CjwKCAjww7KmBhAyEiwA5-PUSvjpaTxbxiozc7Jk-TmXPDRY0e5pHpq4qnXNoPc-eeq-LRfuayShjRoCQ80QAvD_BwE

Obr. 17: Google Cardboard; zdroj: Evan Amos 2015.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Google-Cardboard.jpg>

Obr. 18: Virtuální prohlídka Colossea v Římě v HMD Google Cardboard; zdroj: Google AR & VR 2017. <https://www.youtube.com/watch?v=iZJPO7FVM3U>

Obr. 19: Ukázka fungování aplikace Worklink; zdroj: [41]

Obr. 20: CGI navigační šipka v Google Live View; zdroj: záznam obrazovky aplikace Google Maps s aktivním Live View

Obr. 21: Bezpečnostní upozornění při pohybu; zdroj: záznam obrazovky aplikace Google Maps s aktivním Live View

Obr. 22: Schéma rozmístění jednotlivých prvků uživatelského rozhraní; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 23: Diagram funkce lokalizace; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 24: Diagram funkce orientace; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 25: Diagram funkce trasování; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 26: Diagram funkce zobrazování odjezdů spojů; zdroj: vlastní práce autora

Obr. 27: Diagram funkce validace jízdních dokladů; zdroj: vlastní práce autora

12 Seznam tabulek

Tab. 1: Srovnání prostorově-orientačních metod

Tab. 2: Seznam vybraných parametrů HMD

Tab. 3: Tabulka SWOT analýzy