

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačové grafiky a interakce



Diplomová práce
Využití AR v muzejnictví pro správu expozice

Bc. Dominik Truong

Vedoucí práce: Ing. David Sedláček, Ph.D.

Studijní program: Otevřená informatika

Obor: Interakce člověka s počítačem

Leden 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Truong** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **465987**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra počítačové grafiky a interakce**
Studijní program: **Otevřená informatika**
Specializace: **Interakce člověka s počítačem**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití AR v muzejnictví pro správu expozice

Název diplomové práce anglicky:

Use of AR in museums for exhibition management

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši rozšířeně realitních (AR) knihoven vhodných pro sdílení SLAM (Simultaneous Localization and Mapping [4]) modelů prostředí a vytvořte demonstrační prototypy.
- 2) Prototypy porovnejte dle následujících kritérií: způsob načtení odpovídajícího SLAM modelu, přechod mezi SLAM modely, možnost použití v offline módu nebo s lokální sítí bez internetu, náročnost správy obsahu a přesné umístění virtuálních objektů. Použití na rozdílném HW vybavení (brýle, tablet, telefon,...). Vyberte knihovnu vhodnou pro implementaci systému pro správu expozice pomocí AR přičemž přepokládejte využití jak AR brýlí, tak mobilního telefonu nebo tabletu (platforma Android).
- 3) Navrhněte a implementujte systém pro správu expozice, použitelný pro prototypování budoucích výstav a/nebo pro přípravu a správu virtuálních výstav v AR. Vyřešte: tvorbu a sdílení SLAM modelů, umístění virt. objektů v rámci SLAM modelu, persistenci a úpravy scény. Zvažte možnost napojení na zdroj dat použitý pro multimediální exponáty v muzejních sbírkách [6] nebo navrhněte vlastní řešení.
- 4) Výsledný systém otestujte alespoň s pěti uživateli (výběr uživatelů konzultujte s vedoucím práce).

Seznam doporučené literatury:

- 1] Joseph J. LaViola, Jr. et al. 3D User Interfaces: Theory and Practice, second edition. 2017. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.
- 2] Steve Aukstakalnis. Practical Augmented Reality: A Guide to the Technologies, Applications, and Human Factors for AR and VR (Usability). Addison Wesley 2017.
- 3] Dieter Schmalstieg, and Tobias Hollerer. Augmented Reality: Principles and Practice (Usability), Addison Wesley 2016.
- 4] Servières M. et al., Visual and Visual-Inertial SLAM: State of the Art, Classification, and Experimental Benchmarking. Journal of Sensors, vol. 2021, Article ID 2054828, 26 pages, 2021.
- 5] online documentation for: ARcore and Cloud Anchors, ARfoundation, Unity as a Library, Immersal (<https://immersal.com/>).
- 6] <https://github.com/iimcz/ipw-firmware>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. David Sedláček, Ph.D. katedra počítačové grafiky a interakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. David Sedláček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Sedláčkovi, Ph.D. za vedení mé práce a za cenné informace a rady poskytnuté během práce na tomto projektu. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přátelům a své přítelkyni Natálii za mimořádnou podporu jak během mého studia, tak i při práci na tomto projektu.

Prohlášení

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

V Praze 9. ledna 2023

.....

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a implementací aplikace pro správu muzejních expozic. S využitím technologií rozšířené reality umožňuje aplikace vytvářet SLAM modely, do nichž je možné vkládat interaktivní obsah a sdílet ho s dalšími uživateli. Cílem aplikace je poskytnout správcům expozic možnost prototypovat a spravovat virtuální výstavy. Pro vývoj aplikace byl zvolen herní engine Unity a knihovna Immersal. Cílovými platformami jsou mobilní zařízení s operačním systémem Android a brýle pro rozšířenou realitu Nreal Light.

Klíčová slova: rozšířená realita, AR, SLAM, muzeum, expozice, správa expozice, Unity, Nreal, Immersal

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of a museum exhibition management application. Using augmented reality technologies, the application allows the creation of SLAM models into which interactive content can be added and shared with other users. The aim of this application is to provide exhibition managers with the ability to prototype and manage virtual exhibitions. The Unity game engine and the Immersal library were chosen for the development of this application. The target platforms are Android mobile devices and Nreal Light augmented reality glasses.

Key words: augmented reality, AR, SLAM, museum, exhibition, exhibition management, Unity, Nreal, Immersal

Title translation: Use of AR in museums for exhibition management

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Cíle projektu a cílová skupina	1
1.3	Struktura práce	1
2	Rešerše	3
2.1	SLAM, vSLAM a viSLAM	3
2.2	Související práce	4
2.3	Dostupné knihovny	6
2.3.1	Porovnávání kritéria	6
2.3.2	Immersal	7
2.3.3	ARCore Cloud Anchors	9
2.3.4	Azure Spatial Anchors	11
2.3.5	Stardust	13
2.3.6	ARwayKit	16
2.3.7	Shrnutí	18
3	Návrh	19
3.1	Základní charakteristika	19
3.2	Funkce aplikace	20
3.3	Scénáře	21
3.4	Hierarchická analýza úkolů	22
3.5	Lo-Fi prototyp	24
3.5.1	Stavové kartičky	25
3.5.2	Dialogové kartičky	25
3.5.3	Kartičky názvů a QR kódy	26
4	Implementace	27
4.1	Použité nástroje a technologie	27
4.1.1	Nreal Light	27
4.1.2	Unity	27
4.1.3	Firebase	28
4.2	Režimy aplikace	29

4.3	Manažeři	30
4.4	Tvorba SLAM modelu	31
4.4.1	Immersal Mapper	31
4.4.2	Pravidla pro vytváření SLAM modelů	33
4.4.3	Portál vývojáře	35
4.5	Tvorba nového obsahu	36
4.5.1	Tvorba obsahu v aplikaci	36
4.5.2	Tvorba obsahu v databázi	38
4.6	Úprava existujícího obsahu	39
4.6.1	Načtení obsahu	39
4.6.2	Lokalizace zařízení	39
4.6.3	Přidávání objektů	40
4.6.4	Interakce s objekty	41
4.6.5	Portály	43
4.7	Prohlížení obsahu	44
4.8	Kopírování obsahu	45
4.9	Uživatelské rozhraní	46
4.10	Vykreslování na různých platformách	47
5	Testování	49
5.1	Cíle testování	49
5.2	Podmínky testování	49
5.3	Struktura testování	50
5.4	Testování Lo-Fi prototypu - první iterace	50
5.4.1	Popis participantů	50
5.4.2	Testovací scénáře	51
5.4.3	Průběh testování	52
5.4.4	Nálezy a řešení	53
5.5	Testování Lo-Fi prototypu - druhá iterace	54
5.5.1	Popis participantů	54
5.5.2	Průběh testování	55
5.5.3	Nálezy a řešení	56
5.6	Testování výsledné aplikace - první iterace	57
5.6.1	Popis participantů	57
5.6.2	Testovací scénáře	58
5.6.3	Průběh testování	59
5.6.4	Nálezy a řešení	64
5.7	Testování výsledné aplikace - druhá iterace	67
6	Závěr	69
7	Literatura	71

A Seznam použitých zkratek	75
B Obsah přiloženého CD	77
C Screener	79

Seznam obrázků

2.1	Porovnání SLAM metod dle způsobu řešení problému	4
2.2	Ukázka hry Expedition Schatzsuche vytvořené ve frameworku Studierstube ES	5
2.3	Terč s referenčním objektem	7
2.4	Immersal - spojení a zarovnání pěti map v Unity	8
2.5	Immersal - ukázka demonstračního prototypu (mobilní telefon) . . .	10
2.6	ARCore - ukázka demonstračního prototypu	11
2.7	Azure Spatial Anchors - ukázka uživatelského účtu	12
2.8	Azure Spatial Anchors - ukázka demonstračního prototypu	13
2.9	Stardust - webová aplikace	14
2.10	Stardust - editor	15
2.11	Stardust - přidávání virtuálních objektů v Unity	15
2.12	Stardust - ukázka demonstračního prototypu	16
2.13	ARwayKit - portál vývojáře	17
2.14	ARwayKit - editor Web Studio	17
3.1	Hierarchický diagram pro vytvoření nového virtuálního obsahu . . .	23
3.2	Hierarchický diagram pro úpravu virtuálního obsahu	23
3.3	Lo-Fi prototyp - druhá iterace	24
3.4	Stavové kartičky - první iterace	25
3.5	Stavové kartičky - druhá iterace	25
3.6	Dialogové kartičky - první iterace	26
3.7	Dialogové kartičky - druhá iterace	26
3.8	Kartičky názvů a QR kódy	26
4.1	Brýle Nreal Light	28
4.2	Vývojové prostředí Unity	29
4.3	Tok dat mezi zařízeními a databázemi	30
4.4	Immersal Mapper - pracovní režim (workspace mode)	32
4.5	Immersal Mapper - vizualizační režim (visualize mode)	33
4.6	Doporučený způsob mapování jednoho bodu zájmu	34
4.7	Doporučený způsob mapování vnitřních prostor	34
4.8	Immersal - portál vývojáře	35

4.9	Zadaný název obsahu a k němu vygenerovaný QR kód	37
4.10	Workflow diagram pro tvorbu nového obsahu	37
4.11	Hierarchie dat v databázi	38
4.12	Režim pro úpravu obsahu - přidávání objektu	41
4.13	Virtuální objekt se šipkami znázorňujícími směr posunu	42
4.14	Model šipky reprezentující neviditelnou zeď	44
4.15	Rozdíly v umístění elementů (vlevo mobilní verze, vpravo verze pro brýle nReal)	47
5.1	Snímek z testování druhé iterace Lo-Fi prototypu	55
5.2	Snímek z testování první iterace výsledné aplikace	63
5.3	Snímek z testování druhé iterace výsledné aplikace	67

1 Úvod

1.1 Motivace

Využití rozšířené reality v oblasti muzejnictví již dnes není žádnou novinkou. Aplikace, které umožňují návštěvníkům expozice prohlížet si vystavované exponáty interaktivní formou jsou v dnešní době chloubou mnoha muzeí. Cílovou skupinou jsou však především návštěvníci, kterým chtějí muzea co nejvíce zpříjemnit návštěvu expozice. Tato práce se proto zaměřuje na využití rozšířené reality v muzejnictví z pohledu správců expozic. Současná řešení využívající rozšířené reality v muzeích jsou často jednorázová, kdy se změnou expozice je často nutné vytvořit nové řešení přizpůsobené dané expozici. Tento systém je časově a finančně náročný, navíc typicky vyžaduje součinnost muzea s externími vývojáři. Výhodnějším přístupem je umožnit muzeím vytvářet si vlastní interaktivní expozice. Tvorba interaktivního obsahu by poté připadla na správce expozic, které by si muzea samy zaškolily. Řešení, které by toto umožňovalo, by muselo být dostatečně robustní, aby bylo možné interaktivní obsah měnit a upravovat v závislosti na konkrétních požadavcích dané expozice. Navíc by muselo být dostatečně jednoduché a uživatelsky přívětivé, aby ho dokázala používat i laická obsluha. Tato práce se bude zabývat návrhem a implementací prvotního prototypu takového řešení.

1.2 Cíle projektu a cílová skupina

Cílem této práce je navrhnout a implementovat prototyp aplikace umožňující tvorbu SLAM modelů, do nichž bude možné přidávat interaktivní obsah a sdílet ho s dalšími uživateli. Cílovou skupinou jsou správci expozic, u kterých se nepředpokládá znalost technologií rozšířené reality. Z tohoto důvodu je nutné, aby výsledná aplikace byla uživatelsky přívětivá, jednoduchá a srozumitelná. Na druhou stranu musí umožňovat tvorbu interaktivního obsahu pro různé expozice s odlišnými požadavky. Cílovou věkovou kategorií jsou osoby v produktivním věku od 18 do 65 let.

1.3 Struktura práce

Práce je členěna do kapitol, sekcí a podsekcí. Každá kapitola popisuje určitou fázi projektu. V první části jsou vysvětleny základní termíny a je zde popsána provedená rešerše souvisejících prací a dostupných knihoven. Další kapitola se věnuje návrhu implementace, v níž jsou charakterizovány základní vlastnosti a funkce aplikace společně s prvotním Lo-Fi prototypem. V navazující kapitole o implementaci jsou následně popsány metody realizace projektu v závislosti na vytvořeném návrhu.

V další kapitole je poté popsáno uživatelské testování jak Lo-Fi prototypu, tak i výsledné aplikace. Na závěr je poskytnuto shrnutí celé práce včetně jejích výsledků a budoucího vývoje.

2 Rešerše

Následující kapitola se bude nejprve zabývat terminologií, konkrétně vysvětlením pojmů SLAM, vSLAM a viSLAM. Dále bude následovat sekce popisující práce a projekty, které tématicky souvisí s touto prací. Poslední část se bude věnovat rešerši dostupných knihoven pro sdílení SLAM modelů. Tyto knihovny budou porovnány dle předem daných kritérií a nakonec bude poskytnuto shrnutí, v němž bude zdůvodněn výběr jedné z popsanych knihoven pro implementaci výsledné aplikace.

2.1 SLAM, vSLAM a viSLAM

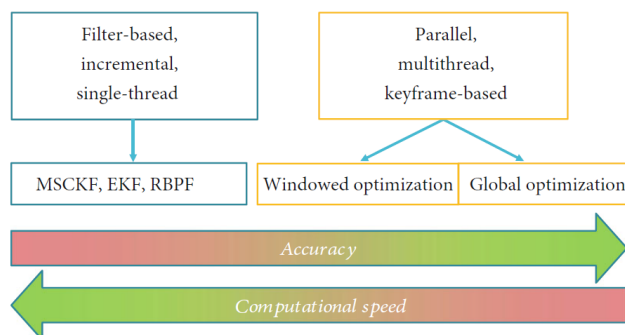
Simultánní lokalizace a mapování (anglicky simultaneous localization and mapping) neboli SLAM je technologie pocházející z oboru robotiky. Jejím základním cílem je získávat globální a konzistentní odhad dráhy zařízení (například robota) a současně rekonstruovat mapu okolního prostředí [23]. V dnešní době již existuje velké množství různých SLAM metod lišících se především svým přístupem k řešení problému, důrazem na mapování a lokalizaci nebo využitím v různých podmínkách a s odlišnými požadavky.

Z historického hlediska byl problém SLAMu formulován již v 80. letech 20. století [23]. Od této doby vzniklo mnoho matematických formulací, například [24] formuluje problém s využitím pravděpodobnostní terminologie. Termíny vSLAM (visual SLAM) a viSLAM (visual-inertial SLAM) se začaly objevovat až na počátku 21. století, kdy se pro snímání okolního prostředí začaly používat kamery (monokulární, stereo či RGB-D) a také inerciální měřicí jednotka (anglicky inertial measurement unit, IMU) skládající se například z gyroskopu, akcelerometru nebo magnetometru. Obě tato zařízení se navzájem doplňují. Kamery poskytují detailnější informace, jsou však náchylnější na změny prostředí. Oproti tomu jsou data z inerciální jednotky proti změnám prostředí odolnější a také je jejich vzorkovací frekvence vyšší, údaje z jednotlivých senzorů však mohou být zkreslené [23]. Využití přesnějších a komplexnějších hardwarových komponent, které se dnes již běžně nacházejí v mnoha chytrých zařízeních, mělo pozitivní dopad na přesnost a rychlost řešení tohoto problému a v důsledku i na jeho aplikovatelnost v dalších odvětvích mimo robotiku, například v rozšířené realitě.

Jedním z mnoha možných způsobů kategorizací SLAM metod je dle způsobu řešení problému. První skupinu tvoří metody založené na takzvaných filtrech. Jako filtry jsou typicky označovány metody řešící online SLAM problém, jehož cílem není získat odhad celé dráhy zařízení, ale pouze určit polohu zařízení v konkrétním čase [24]. Metody založené na filtrech jsou historicky nejstarší, mezi typické zástupce patří EKF (extended Kalman filter) SLAM nebo metody využívající částicových filtrů

(anglicky particle-based). EKF SLAM ukládá informace o poloze zařízení a významných bodech v prostředí ve stavovém vektoru. Při pohybu zařízení se do stavového vektoru přidávají nové stavy, čímž se zvětšuje i jeho velikost. Paměťová náročnost tohoto přístupu je proto jeho největší nevýhodou, existují ale upravené metody, které si uchovávají informace pouze o omezeném počtu detekovaných významných bodů [23].

Do druhé skupiny se řadí metody založené na PTAM (parallel tracking and mapping). Charakteristickými rysy PTAM je především oddělená lokalizace a mapování prostoru, které běží ve dvou paralelních vláknech. Při mapování také nedochází k využití všech snímků z kamery, jelikož může docházet ke zpracování velkého množství opakujících se dat. Místo toho se PTAM zaměřuje na menší množství takzvaných klíčových snímků, což má pozitivní dopad na výkonnost, robustnost a přesnost celého procesu [18]. Jak je možné vidět na obrázku 2.1, metody z výše popsanych kategorií se liší primárně v rychlosti a přesnosti výpočtu, kdy metody z první skupiny jsou obecně rychlejší, ale méně přesné, kdežto v druhé skupině je situace typicky opačná.



Obrázek 2.1: Porovnání SLAM metod dle způsobu řešení problému¹

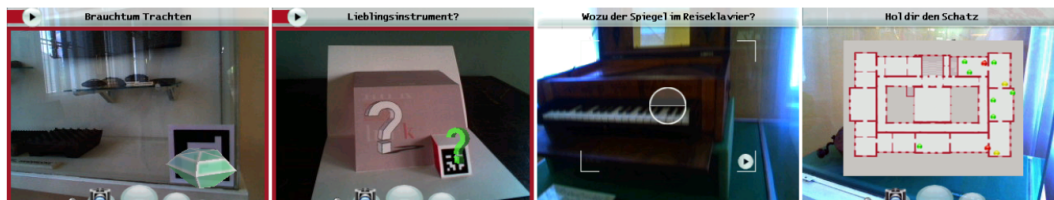
2.2 Související práce

Využití rozšířené reality v muzeích bylo popsáno již v mnoha odborných publikacích. V [22] popsali Schmalstieg a Wagner svůj framework pro tvorbu AR aplikací Studierstube ES. Vývoj tohoto frameworku byl cílen primárně na chytrá zařízení své doby, tedy chytré telefony, PDA a tabletové počítače. Aplikace využívaly výpočetní výkon pouze zařízení, na kterém byly nainstalovány, čímž byla odstraněna potřeba využívat přídatných, mnohdy těžkých a nepraktických, zařízení, které se využívaly v jiných řešeních tehdejší doby². Studierstube ES kromě rozšířené realitních funkcí obsahoval i komponenty pro přehrávání multimédií, síťovou komunikaci nebo skriptování. Jedním z hlavních principů fungování tohoto frameworku byla detekce referenčních značek. Oproti SLAMu, který vytváří mapu prostoru, v němž se záro-

¹Převzato z [23].

²Článek byl publikován v roce 2007.

veň snaží zařízení lokalizovat, detekce referenčních značek umožňuje vypočítat pózu kamery na základě detekce (typicky) obdélníkových značek s unikátními vzory nacházejících se ve fyzickém prostoru. S využitím Studierstube ES byly následně vytvořeny dvě hry pro středoškolské studenty (viz obrázek 2.2). Tyto hry byly poté otestovány v prostorách Technického muzea ve Vídni a korutanského muzea [22].



Obrázek 2.2: Ukázka hry Expedition Schatzsuche vytvořené ve frameworku Studierstube ES³

Kombinace technologií SLAM a BLE (Bluetooth Low Energy) byla využita v projektu MuseumEye [15]. Tento projekt se zabýval využitím rozšířené reality v souvislosti s User Experience (UX)⁴. Dle Normana a Nielsena je User Experience souhrnem všech aspektů interakce uživatele se společností, jejími službami a produkty [20]. V této souvislosti se projekt zaměřil na uživatelský zážitek návštěvníků muzeí z AR aplikace vytvořené v rámci projektu. Aplikace byla vytvořena v enginu Unity s využitím knihoven ARCore a open cvs. Aplikace sloužila jako interaktivní průvodce expozicemi v muzeích. Návštěvníkům umožňovala prohlédnout si exponáty mimo jejich skleněné vitríny. Technologie BLE zde byla využita v podobě čipů iBeacon, které sloužily jako servery schopné určit polohu zařízení a v závislosti na ní návštěvníkovi zobrazit relevantní obsah. Z uživatelských testování provedených v Městském muzeu v Leeds a Egyptském muzeu v Káhiře, jichž se dohromady zúčastnilo 46 participantů, bylo zjištěno, že většina participantů považuje aplikaci za užitečnou, intuitivní a imerzivní. Z poznatků získaných v rámci studie byl následně vytvořen UX design model, který by měl vývojářům pomoci s vývojem uživatelsky přívětivých a zajímavých AR aplikací [15].

Další využití rozšířené reality v muzeích bylo popsáno v [17]. Zde byla popsána aplikace CHES (Cultural Heritage Experiences through Socio-personal interactions and Storytelling) umožňující zobrazování dynamického obsahu závislého na návštěvníkově profilu, chování nebo poloze. Tím byl obsah personalizován a zážitek jednotlivých návštěvníků se mohl lišit. Dynamičnosti bylo dosaženo implementací AR aktivit, tedy příběhů, během nichž mohl návštěvník interagovat s objekty v prostředí a vybírat si, které informace mu budou zobrazeny a také jakou formou mu budou podány. Obsah se dále lišil podle profilu návštěvníka, jiný zážitek z návštěvy si tak odnesly děti a jiný dospělí lidé. Aplikace byla otestována v prostorách muzea Akropole v Aténách [17].

³Převzato z [22].

⁴Česky uživatelská zkušenost.

Zatímco výše zmíněné projekty se zabývají využitím rozšířené reality z pohledu návštěvníků, v [27] byl popsán projekt ARCO (Augmented Representation of Cultural Objects), který umožňoval tvorbu, správu a vizualizaci virtuálních a rozšířeně realitních expozic. Zaměřil se tak na využití virtuální a rozšířené reality z pohledu správců muzeí. Systém ARCO se skládal ze tří komponent - tvorby, správy a vizualizace obsahu. V rámci systému bylo možné vytvářet jednoduché 3D modely, ty vložit do virtuálních expozic prezentovatelných skrze web. Expozice byly ukládány v databázi ve formátu X-VRML⁵, který umožňoval tvorbu expozic dynamickým způsobem. AR expozice bylo možné prohlížet skrze AR prohlížeč, který fungoval na principu detekce referenčních značek (podobně jako například výše zmíněný framework Studierstube ES) [27].

Dalším, z časového hlediska aktuálnějším, projektem zabývajícím se tvorbou rozšířeně realitních expozic je Holomuseum [19]. Tento nástroj byl vyvinut pro AR brýle Microsoft Hololens. Holomuseum byl vytvořen jak pro správce expozic, kteří si pomocí něj mohli do reálných expozic přidávat virtuální objekty, tak i pro návštěvníky muzeí, kteří si mohli vytvořené expozice prohlížet. Systém umožňoval navigaci jak gesty, tak i pomocí hlasových příkazů. V rámci tohoto projektu bylo vytvořeno několik testovacích scén, na nichž bylo provedeno uživatelské testování v prostorách Polytechnické univerzity ve Valencii [19].

2.3 Dostupné knihovny

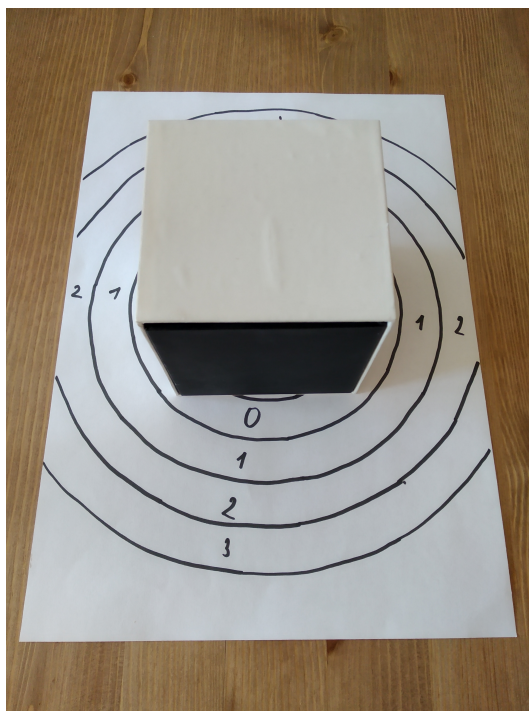
Následující sekce se bude zabývat rešerší rozšířeně realitních (AR) knihoven pro sdílení SLAM modelů. Nejprve zde budou uvedena kritéria, podle kterých budou jednotlivé knihovny porovnány. Dále bude ke každé knihovně uveden její popis a následně budou uvedeny informace k jednotlivým kritériím pro danou knihovnu. Pro každou knihovnu byl vytvořen demonstrační prototyp umožňující tvorbu a načítání SLAM modelů a přidávání virtuálních objektů. Pro upozornění - v textu budou často zaměňovány termíny SLAM model a mapa, které mají v rámci této práce identický význam.

2.3.1 Porovnávání kritéria

Knihovny byly porovnány podle následujících kritérií: způsobu načtení odpovídajícího SLAM modelu, přechodu mezi prostředím, možnosti použití v offline módu nebo s lokální sítí bez internetu, náročnosti správy obsahu, přesného umístění virtuálních objektů a použití na rozdílném hardwarovém vybavení (brýle, tablet, telefon...). Pro měření přesnosti umístění virtuálních objektů byl vytvořen terč. Tento terč byl rozdělen do čtyř kruhových zón (0 až 3), které byly od sebe vzdálené dva centimetry. Doprostřed terče byl umístěn fyzický referenční objekt - krychle (viz obrázek

⁵Angl. eXtensible Virtual Reality Modeling Language.

2.3). Následně byl do prostoru umístěn virtuální objekt tak, aby co nejlépe překrýval referenční objekt. Nakonec byl zaznamenán posun virtuálního objektu vůči referenčnímu objektu při snímání scény z různých pohledů. Jelikož takové měření není nutně geometricky přesné, budeme posunem chápat pouze nejvzdálenější oblast na terči, ve které se virtuální objekt nacházel. Pro měření byl použit mobilní telefon Nokia 6.1 s operačním systémem Android 10, popřípadě brýle Nreal s operačním systémem Android 8.1.



Obrázek 2.3: Terč s referenčním objektem

2.3.2 Immersal

Immersal je knihovna (popř. SDK⁶) určená pro tvorbu AR aplikací využívajících technologií mapování prostoru a vizuálního polohování či lokalizace⁷. Umožňuje vytvářet SLAM modely prostředí a následně do nich vkládat virtuální objekty. Díky lokalizaci následně umožňuje určit polohu a orientaci uživatelského zařízení (telefonu, tabletu, brýlí atd.) ve virtuálním světě na základě dat získaných ze snímačů a senzorů na zařízení (např. kamery, gyroskopu či akcelerometru). Umožňuje tak propojení fyzického prostoru s jeho SLAM modelem. Virtuální objekty jsou tedy zobrazovány perzistentně, tzn. že jejich umístění ve fyzickém světě se nezmění, i když se změní uživatelská poloha [9]. Immersal je nabízen ve dvou verzích licencí - Commercial a Enterprise. Commercial licence omezuje počet map, které si uživatel může měsíčně

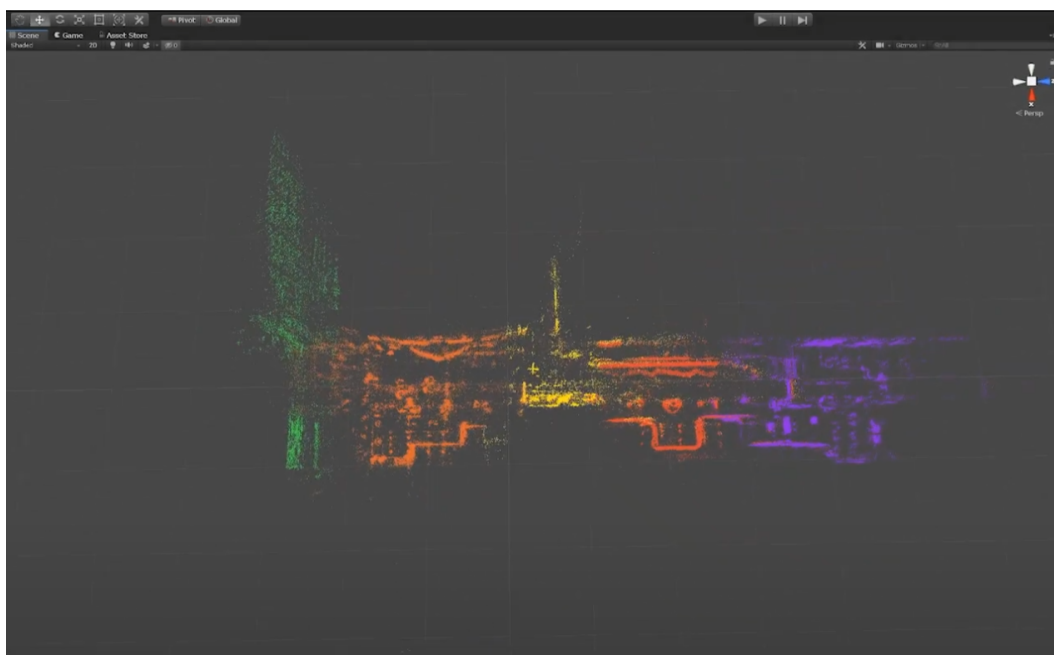
⁶Soubor nástrojů pro vývoj softwaru, angl. software development kit.

⁷Angl. spatial mapping and visual positioning (localization).

vytvořit, dále počet snímků na jednu mapu a také počet lokalizací a stažení map ze serveru v jednom měsíci. Enterprise licence umožňuje uživateli si nastavit parametry dle svých potřeb. Commerical licence je nabízena zdarma, cena licence Enterprise je závislá na nastavených parametrech [9]. Immersal je dostupný jako plugin pro herní engine Unity.

Vytváření map probíhá výhradně prostřednictvím cloudové služby. Immersal poskytuje API⁸ pro komunikaci s touto službou. Cloudová služba vytváří mapy ze série fotek, uživatel tedy musí nafotit scénu z různých úhlů. Je nutné, aby fotek bylo dostatečné množství, dobře na sebe navazovaly a byly pořizovány z velkého množství různých úhlů. Výsledné mapy je možné si prohlédnout v portálu vývojáře⁹. Každé mapě je přiřazen její celočíselný identifikátor, podle kterého ji lze stahovat do zařízení. Mapy se dají stahovat jako binární soubory, mračna bodů (point clouds), vrcholově obarvené sítě (vertex-colored mesh) nebo texturované sítě (textured mesh) [9].

Immersal také umožňuje lokalizaci ve více mapách najednou. Pro vnitřní prostory s více místnostmi, resp. ve velkých prostorách, je tedy lepší vytvořit více map dle jednotlivých místností, resp. rozdělit velký prostor do více menších. Mapy je případně možné spojit a zarovnat ručně v Unity, nebo využít automatického sešívání map (map stitching) prostřednictvím portálu vývojáře [9]. Příklad spojení pěti map v Unity lze vidět na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Immersal - spojení a zarovnání pěti map v Unity¹⁰

⁸Rozhraní pro programování aplikací, angl. application programming interface.

⁹Pro detailnější informace o portálu vývojáře viz sekce 4.4.3.

¹⁰Převzato z <https://immersal.gitbook.io/sdk/tutorials/multiple-maps>.

V Unity je také možné přidávat virtuální objekty do vytvořených map. Jedná se o alternativu k přidávání objektů skrze zařízení např. poklepáním na displej (tapping). Přidávání objektů skrze zařízení může mít své nedostatky především v nepřesnosti umístění virtuálního objektu, kdy nemusí být zcela zřetelné, kam přesně do prostoru bude objekt umístěn. Umístění objektů přímo do mapy může být pro uživatele jednodušší a přesnější, jelikož jasně uvidí tvar a hranice dané mapy (typicky například zdi, podlahu či zem) a předměty v ní, podle kterých se může lépe orientovat.

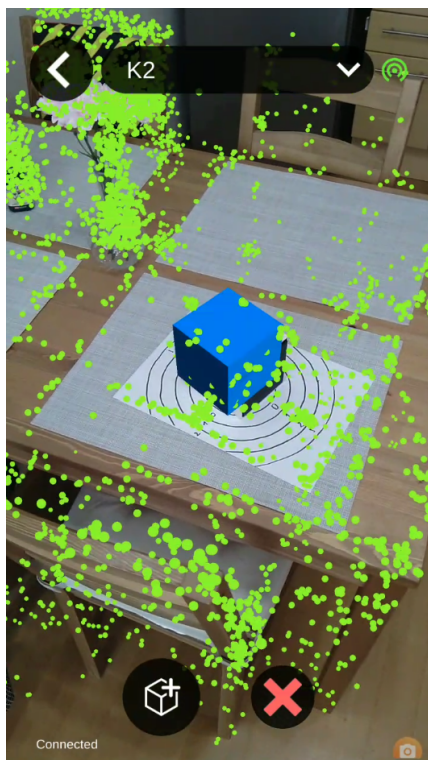
Jelikož je tvorba map možná pouze přes cloudovou službu, není možné tuto knihovnu využívat v čistě offline režimu či pouze na lokální síti. Po vytvoření mapy je ale možné si ji stáhnout přímo do editoru v Unity a uložit si ji přímo do scény. Samotnou lokalizaci je poté možné provést lokálně bez připojení k internetu. Immersal nenabízí správu virtuálních objektů, které si uživatel přidá do scény. Poloha a orientace (popř. i hierarchie) jednotlivých objektů se na cloud neukládají, je tedy nutné si vytvořit vlastní systém. V demonstračním prototypu jsou například informace o objektech k daným mapám ukládány do souboru ve formátu JSON (JavaScript Object Notation).

Měření přesnosti umístění virtuálních objektů proběhlo na dvou zařízeních - mobilním telefonu a brýlích Nreal. Na mobilním telefonu se virtuální objekt pohyboval mezi zónami 1 a 2 (vysvětlení zón viz sekce 2.3.1), tato přesnost byla zachována i při rychlejšímu pohybu. Při načítání mapy někdy docházelo k nesprávné lokalizaci, kdy se mapa špatně zarovnávala vůči fyzickému prostoru. Tento problém bylo možné vyřešit opětovným načtením stejné mapy. Na brýlích Nreal byla měřená přesnost horší, virtuální objekt se pohyboval mezi zónami 2 a 3. Posun se obvykle zhoršoval se zvyšující se vzdáleností od referenčního objektu. Ukázkou demonstračního prototypu je možné vidět na obrázku 2.5.

Immersal je podporován na zařízeních s operačním systémem Android nebo iOS, které mají podporu pro knihovny ARCore (Android) nebo ARKit (iOS). Dále je podporován brýlemi Nreal, zařízeními Magic Leap či zařízeními podporujícími knihovnu Huawei AR. V budoucnu by měla být přidána podpora i pro brýle Microsoft HoloLens [9]. V případě brýlí Nreal je nutné podotknout, že je podporována pouze lokalizace, není skrze ně možné vytvářet SLAM modely.

2.3.3 ARCore Cloud Anchors

ARCore je SDK pro tvorbu AR aplikací vyvíjené společností Google. Pro tvorbu těchto aplikací využívá ARCore dvou základních funkcionalit. První je tzv. sledování pohybu (motion tracking) využívající technologie SLAM. Pomocí kombinace kamerových snímků a údajů z inerciální měřicí jednotky dokáže ARCore vypočítat uživatelskou pozici, orientaci a jejich změnu v čase. Dále je ARCore vybaven funkcí porozumění prostředí (environmental understanding), pomocí které dokáže detekovat horizontální a vertikální plochy a jejich velikosti. Díky těmto funkcionalitám si uživatel může do fyzického světa umisťovat virtuální objekty, které si zachovávají svou



Obrázek 2.5: Immersal - ukázka demonstračního prototypu (mobilní telefon)

pozici a orientaci nezávisle na uživatelské poloze [2]. ARCore je nabízen zdarma, je možné s ním pracovat např. ve vývojovém prostředí Android Studio nebo herních enginech Unity a Unreal. ARCore je podporován na vybraných zařízeních s operačním systémem Android a iOS¹¹.

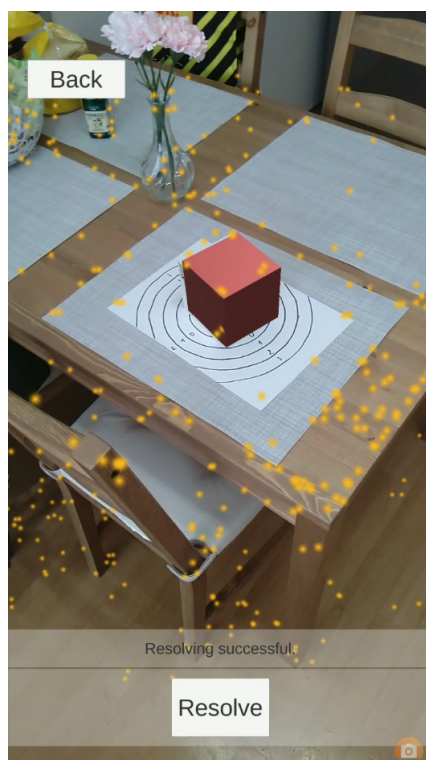
ARCore může měnit pozice a orientace detekovaných ploch za běhu aplikace. Aby se virtuální objekty zobrazovaly v prostoru perzistentně, je nutné nejprve vytvořit tzv. kotvy (anchors) a jim přiřadit virtuální objekty. ARCore umožňuje tyto kotvy sdílet mezi více uživateli a dává jim tak možnost prohlížet si scény s totožným obsahem na více zařízeních. Tato funkce je pojmenována jako Cloud Anchors [2]. Tímto způsobem tedy ARCore umožňuje vytvářet SLAM modely prostředí. Sdílené kotvy jsou ukládány po dobu maximálně jednoho roku.

Pro sdílení map je nejprve nutné naskenovat fyzický prostor pomocí zařízení (např. telefonu nebo brýlí). ARCore následně vytvoří tzv. mapu významných bodů (feature map), do níž je poté potřeba umístit kotvu. Během procesu zvaného hostování (hosting) se posléze ARCore připojí na cloudovou službu (ARCore Cloud Anchor Service) a nahraje mapu společně s kotvou. Uživateli je poté odeslán unikátní identifikátor nahrané cloudové kotvy. Tento identifikátor mohou použít jiní uživatelé pro načtení dané kotvy a s ní spojené mapy. Celý proces vyžaduje stabilní internetové připojení, není proto možné využívat tuto funkci v offline režimu či na lokální

¹¹Kompletní seznam podporovaných zařízení viz [3].

síti. Počet hostování a načítání kotev je omezen na 30 za minutu pro jednu IP adresu a 300 za minutu pro jeden projekt. ARCore si ukládá pouze informace o kotvě a příslušné mapě, žádnou další správu obsahu neprovádí. Tuto funkcionalitu je tedy nutné implementovat zvlášť, konkrétně si tedy ukládat například informace o poloze a orientaci virtuálních objektů vzhledem ke kotvě.

Přesnost umístění virtuálních objektů byla testována pouze na mobilním telefonu, brýle Nreal nebyly v době testování podporovány. Virtuální objekt se pohyboval mezi zónami 0 a 2, často však docházelo ke skokovému posunu objektu při změně úhlu pohledu. To vytvářelo nepříjemný efekt cukajícího se objektu. Na obrázku 2.6 je možné vidět ukázkou demonstračního prototypu.



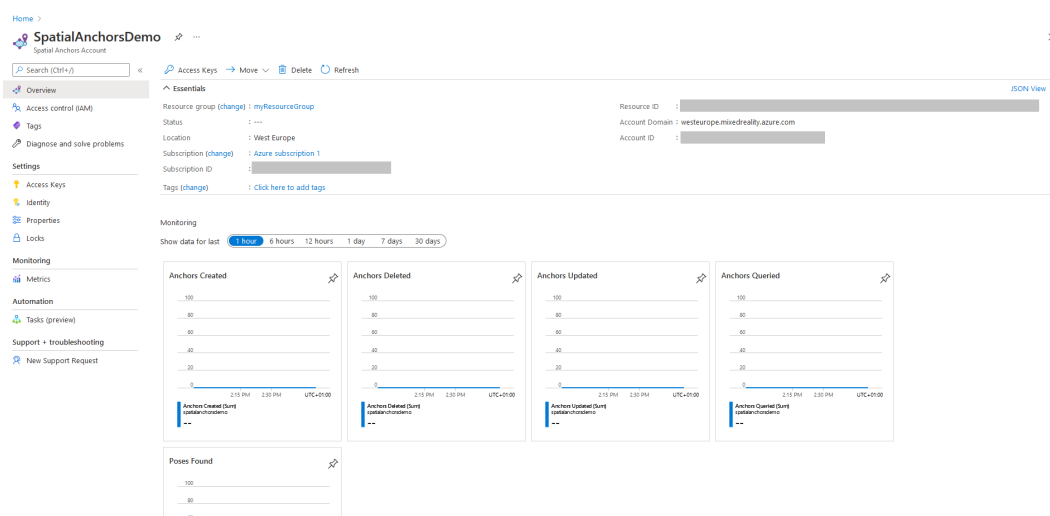
Obrázek 2.6: ARCore - ukázkou demonstračního prototypu

2.3.4 Azure Spatial Anchors

Azure Spatial Anchors (dále už jen Spatial Anchors) je SDK vyvíjené společností Microsoft umožňující tvorbu a sdílení SLAM modelů. Spatial Anchors jsou rozšířením knihoven ARCore a ARKit, jejichž funkcionality využívají například pro sledování pohybu zařízení, detekci významných bodů nebo tvorbu map. Konceptně jsou Spatial Anchors velmi podobné Cloud Anchors (viz předchozí sekce 2.3.3). Pro zajištění perzistentního vykreslování virtuálních objektů ve fyzickém prostoru také využívají kotev. Tyto kotvy je možné sdílet a zobrazovat na různých zařízeních současně. Rozdílem oproti Cloud Anchors je služba, která je využívána pro správu těchto kotev.

Místo ARCore Cloud Anchor Service se využívá Azure Spatial Anchors Service [6].

Pro práci se Spatial Anchors je nejprve nutné si založit účet, jehož identifikátor se využívá pro získání přístupového tokenu. Pomocí něho je poté možné komunikovat s cloudovou službou. V přehledu účtu je možné sledovat celkový provoz, tedy například počet vytvořených, smazaných nebo načtených kotev (viz obrázek 2.7). Pro vytvoření mapy je nejprve nutné naskenovat fyzický prostor pomocí zařízení. Výsledkem skenování je mračno bodů, které je společně s kotvou nahráno na cloud. Po úspěšném nahrání je jako zpětná vazba odeslán identifikátor kotvy, který lze využít pro jeho načtení na jiném zařízení [6]. Na rozdíl od Cloud Anchors, které se uchovávají maximálně po dobu jednoho roku, jsou Spatial Anchors dostupné na neomezenou dobu až do jejich explicitního smazání uživatelem.

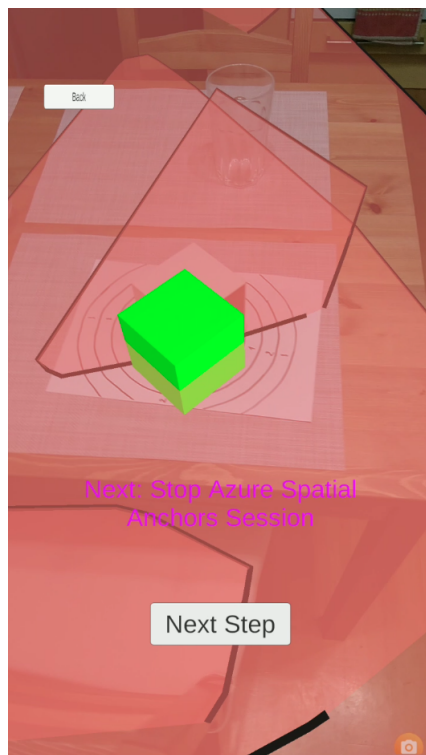


Obrázek 2.7: Azure Spatial Anchors - ukázka uživatelského účtu

Přestože není omezen počet virtuálních objektů, které lze přiřadit jedné kotvě, je dobré pro větší prostory vytvořit více kotev a rozdělit tak daný prostor do menších částí. Při malém posunu jedné z kotev tak nedojde k posunu všech objektů najednou. Při přechodu mezi scénami je tedy nutné načíst všechny kotvy k ní přiřazené.

Spatial Anchors vyžadují stálé internetové připojení. Jelikož se informace o kotvách nahrávají na cloud a posléze se odtud tyto informace při načítání stahují, není možné tuto knihovnu využívat v offline režimu ani na lokální síti. Podobně jako u Cloud Anchors si Spatial Anchors neuchovávají žádná data o virtuálních objektech, které jsou přiřazené ke kotvám. Tato data je nutné ukládat separátně a vytvořit si vlastní systém pro správu obsahu.

Přesnost umístění virtuálních objektů byla měřena pouze na mobilním zařízení. Při měření přesnosti byl zaznamenán značný posun virtuálního objektu oproti fyzickému, kdy se virtuální objekt často nacházel až ve třetí zóně na testovacím terči. Přesnost se nezlepšila ani po opětovném načtení kotvy a mapy. Ukázku demonstračního prototypu je možné vidět na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Azure Spatial Anchors - ukázka demonstračního prototypu¹²

Spatial Anchors jsou podporované na brýlích Microsoft Hololens a na zařízeních s operačním systémem Android a iOS, které podporují knihovny ARCore nebo ARKit. Cena se odvíjí podle regionu, ve kterém se uživatel nachází a podle počtu načtených kotev. Například pro region West Europe (západní Evropa) je cena nulová pro prvních deset tisíc načtení, poté je měsíčně účtováno 0.018 Euro.

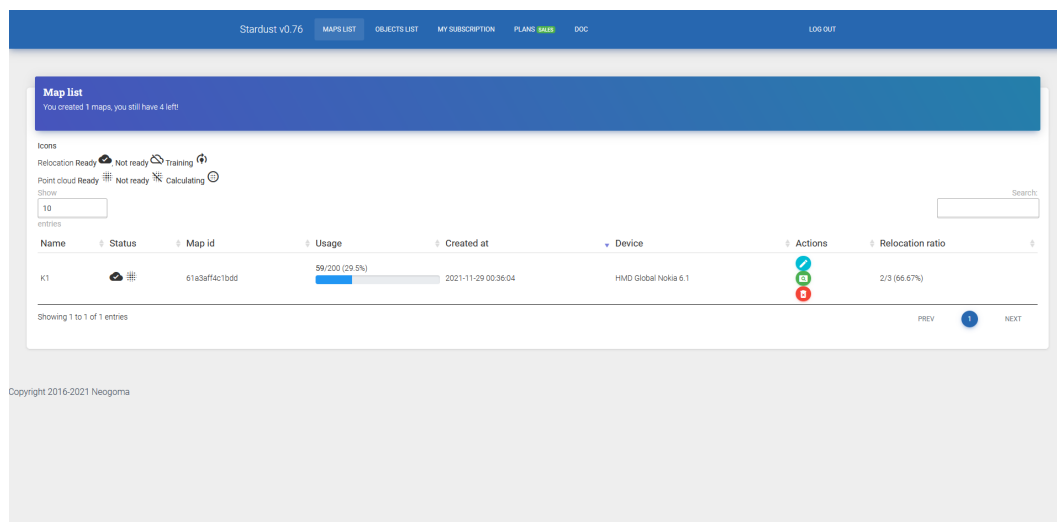
2.3.5 Stardust

Stardust je SDK vyvíjené společností Neogoma poskytující řešení pro vizuální polohování ve vnitřních i vnějších prostorech. Podobně jako některé z dříve popisovaných knihoven i Stardust využívá knihoven ARCore a ARKit například pro detekci významných bodů nebo sledování pohybu a polohy zařízení. Stardust navíc poskytuje API pro nahrávání dat ze zařízení i pro případ, že nemají podporu pro tyto knihovny. V tomto případě je nutné nahrávat snímky z kamery, vlastnosti kamery (camera intrinsics) a polohu zařízení [11].

Tvorba map probíhá skrze cloudovou službu. Obdobně jako u knihovny Immersal jsou mapy vytvářeny ze série fotek. Je nutné, aby fotky na sebe navzájem navazovaly a aby pokrývaly co největší část snímaného prostoru. Prostory by měly být dobře osvětlené. Velikost map není omezena, maximální počet fotek na jednu mapu se však odvíjí od zakoupené licence. Základní licence umožňuje nahrát až 200 fotek na

¹²Červené plochy reprezentují detekované horizontální plochy.

jednu mapu [11]. Větší prostory je obvykle vhodné rozdělit do více menších map. Vytvořené mapy je možné spravovat ve webové aplikaci (viz obrázek 2.9). Uživatel zde může vidět název a identifikátor map, jejich stav, datum vytvoření nebo zařízení, ze kterého byly odeslány snímky z kamery.



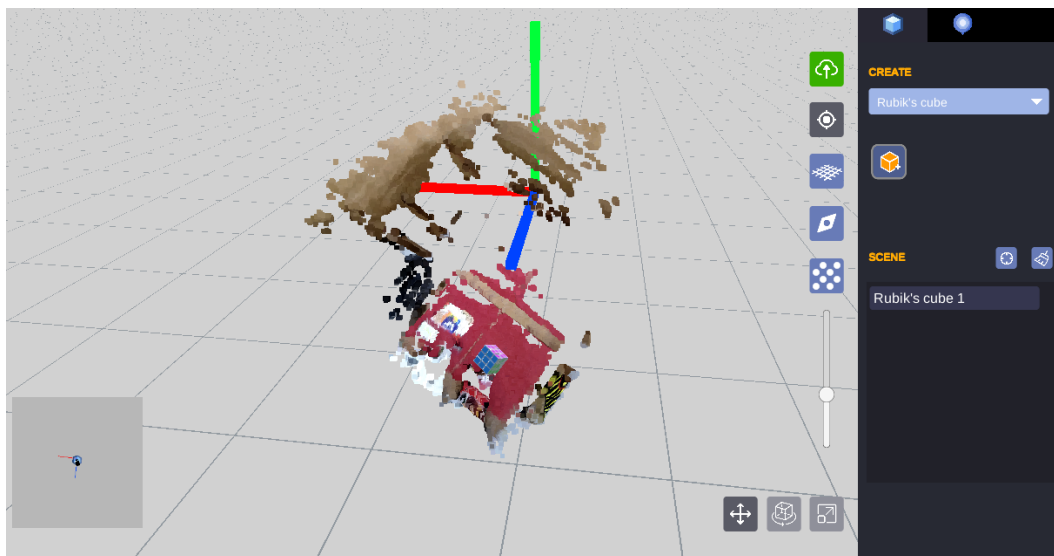
Obrázek 2.9: Stardust - webová aplikace

Mapy je možné upravovat prostřednictvím editoru map (viz obrázek 2.10). V něm je možné si zobrazit mapu v podobě mračna bodů a přidávat do ní virtuální objekty. Objektům je možné nastavit jejich pozici, rotaci a velikost. Stardust nabízí možnost nahrávat vlastní virtuální objekty skrze webovou aplikaci a přidávat tyto objekty přímo do editoru. Nahrávat lze objekty ve formátu .obj a také jako Unity AssetBundle [11]. Podobně jako u knihovny Immersal je také možné přidávat virtuální objekty přímo v Unity. Stardust umožňuje nahrávání map v podobě mračen bodů, do nichž může uživatel přidávat virtuální objekty (viz obrázek 2.11).

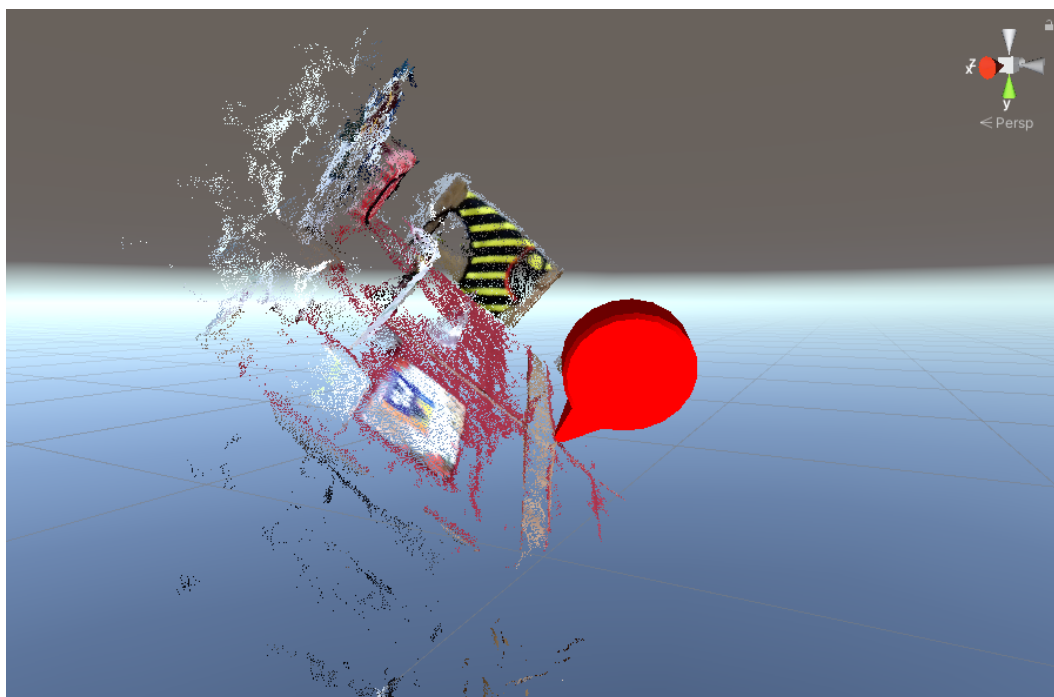
Stardust není možné využívat bez stálého internetového připojení. Vytváření map probíhá pouze prostřednictvím cloudové služby a přestože je možné si vytvořenou mapu stáhnout do zařízení, samotná lokalizace není proveditelná v offline režimu. Správu obsahu je možné provádět skrze editor, ve kterém je možné si prohlédnout veškeré vytvořené mapy a nahrané virtuální objekty, jejichž vlastnosti lze upravovat¹³.

Měření přesnosti umístění virtuálních objektů bylo provedeno na mobilním telefonu. Již při načítání mapy a virtuálních objektů byla zaznamenána poměrně dlouhá doba stahování veškerých dat. I s jedním virtuálním objektem dosahovala doba stahování řádu několika minut. Dle údajů uvedených v dokumentaci se v době měření nacházely servery pouze v Singapuru, což pravděpodobně ovlivnilo vysokou latenci a

¹³Je nutné podotknout, že v době provádění rešerše bylo poměrně obtížné s editorem pracovat, především kvůli neintuitivnímu ovládání, například při rotaci kamery. Jedná se však pouze o subjektivní názor autora.



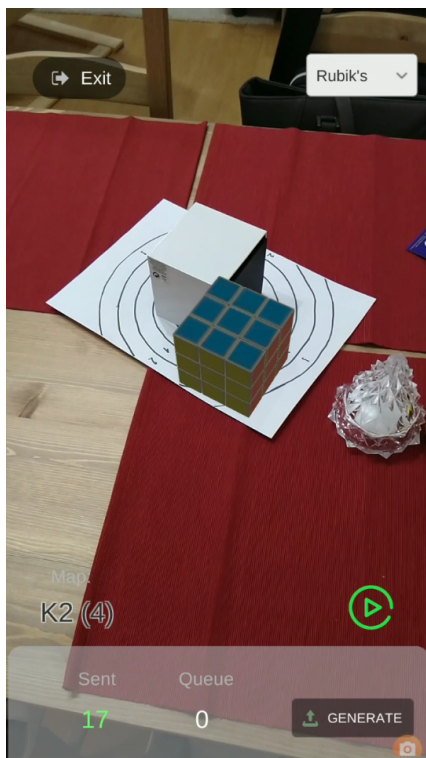
Obrázek 2.10: Stardust - editor



Obrázek 2.11: Stardust - přidávání virtuálních objektů v Unity

nízkou rychlost stahování. Posun virtuálního objektu vůči referenčnímu objektu byl značný, často se na terči pohyboval až za hranici třetí zóny, což je větší nepřesnost v umístění než u ostatních knihoven. Ukázku demonstračního prototypu lze vidět na obrázku 2.12.

Stardust je podporován na zařízeních Android a iOS, které jsou podporovány knihovnami ARCore nebo ARKit. Stardust nabízí pět různých licencí, které se od



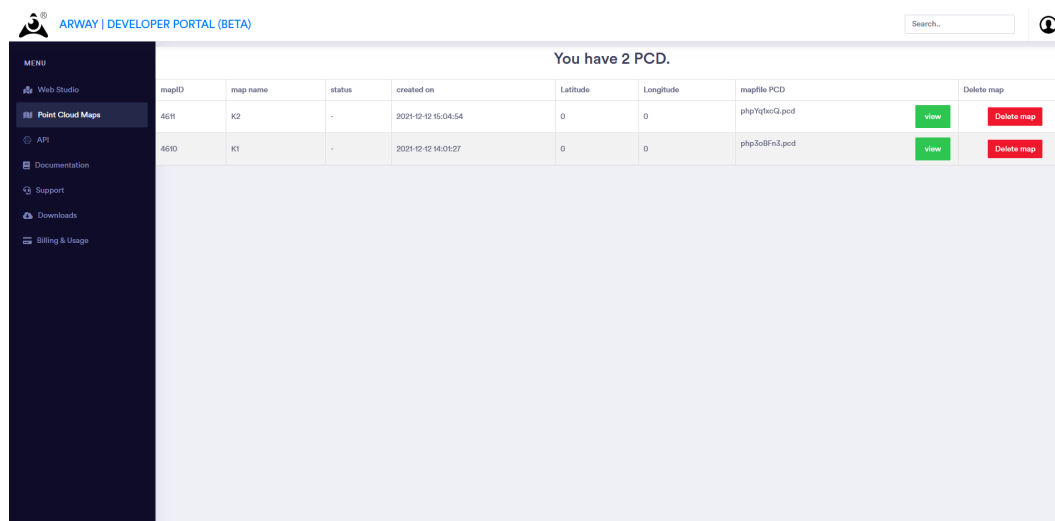
Obrázek 2.12: Stardust - ukázka demonstračního prototypu

sebe liší především cenou, maximálním počtem map a fotek na jednu mapu a počtem požadavků, které může uživatel na cloudu provést. Základní licence poskytovaná zdarma umožňuje vytvořit až 5 map, každou z map ze série až 200 fotografií. Počet požadavků na cloudu je omezen na 100 za měsíc. Oproti tomu nejdražší nabízená licence stojí 300 dolarů měsíčně a umožňuje vytvořit až 500 map, každou ze série 2000 fotografií. Počet požadavků na cloudu je u této licence omezen na jeden milion měsíčně [11].

2.3.6 ARwayKit

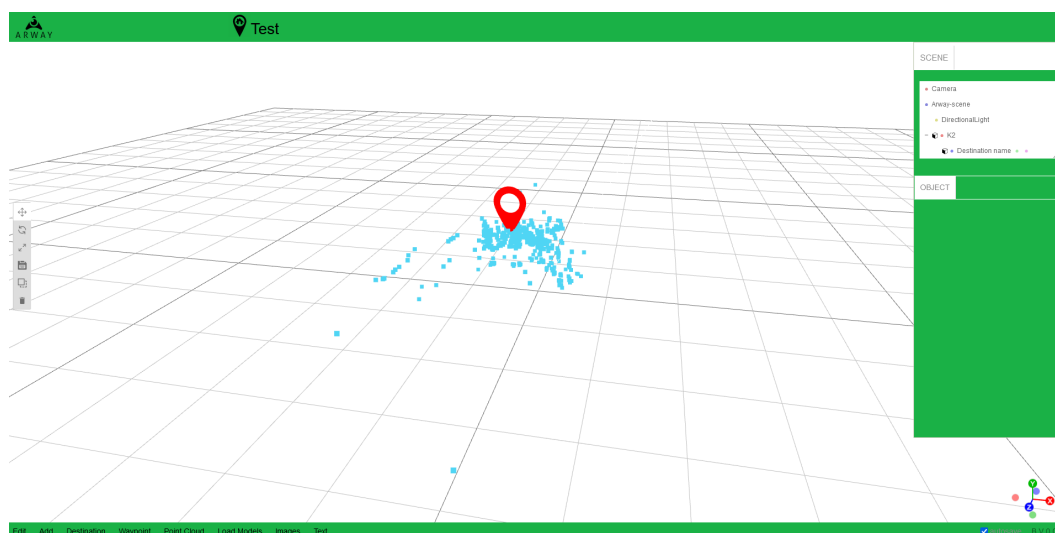
ARwayKit je knihovnou umožňující mapování prostředí a vizuální polohování ve vnitřních a vnějších prostorech. Jedná se o nadstavbu knihoven ARCore, ARKit a Azure Spatial Anchors (viz sekce 2.3.3 a 2.3.4), které využívá především například pro detekci významných bodů nebo tvorbu kotev. Mapy jsou vytvářeny ze série fotek posílaných na cloud [4]. Správu map je možné provádět prostřednictvím portálu vývojáře (viz obrázek 2.13). Ke každé mapě je uveden její celočíselný identifikátor, název, datum vytvoření či GPS souřadnice. Jelikož je tvorba map a lokalizace prováděna na cloudu, není možné ARwayKit využívat bez stálého internetového připojení, tedy ani na lokální síti.

ARwayKit umožňuje spravovat obsah pomocí editoru Web Studio. Do editoru je možné nahrávat mapy v podobě mračna bodů a přidávat do nich virtuální objekty ve



Obrázek 2.13: ARwayKit - portál vývojáře

formátu .glb a .gltf. Objektům je možné nastavit jejich název, pozici, rotaci, velikost a viditelnost. ARwayKit také umožňuje navigaci v prostoru. Do map je možné přidávat speciální virtuální objekty reprezentující startovní a konečnou pozici. V editoru je dále možné spojit více vytvořených map do jedné [4]. Využití této funkcionality je vhodné například při vytváření map velkých prostor, kdy se prostor rozdělí do menších částí, vytvoří se mapy jednotlivých částí a následně se spojí do jedné mapy. Ukázku editoru je možné vidět na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14: ARwayKit - editor Web Studio

Měření přesnosti umístění virtuálních objektů neproběhlo vlivem problémů, které se vyskytly při lokalizaci zařízení. Zatímco vytvoření mapy proběhlo úspěšně, v portálu vývojáře bylo možné si mapu prohlédnout a přidat do ní virtuální objekty, při

lokalizaci nedocházelo k odesílání snímků z kamery. Při hlubším zkoumání bylo zjištěno, že služba odpovědná za příjem těchto snímků nebyla dostupná¹⁴. Tuto chybu se nepodařilo odstranit, a proto pro tuto knihovnu nebylo měření provedeno.

ARwayKit je podporován na vybraných zařízeních Android a iOS. Jelikož se jedná o nadstavbu knihoven ARCore a ARKit, je nutné, aby zařízení byla těmito knihovnami podporována. Dostupné jsou 4 licence lišící se především počtem požadavků, které může uživatel odeslat na server, dále počtem vytvořených map nebo velikostí obsahu v editoru Web Studio. Základní licence je poskytována zdarma, umožňuje odesílat až 500 požadavků měsíčně, vytvářet až 50 map a spravovat obsah ve velikosti až 1 GB. Nejdražší nabízená licence stojí 149 dolarů měsíčně a umožňuje odesílat až 100 000 požadavků měsíčně, vytvářet až 20 000 map a spravovat obsah až do velikosti 1 000 GB [5].

2.3.7 Shrnutí

Vzhledem k provedené rešerši rozšířeně realitních knihoven se jako nejvhodnější kandidát jeví Immersal. Hlavním důvodem je již existující podpora pro brýle Nreal, se kterými musí být řešení správy expozice kompatibilní. V případě výběru jiné knihovny by musela být nejprve implementována podpora pro tyto brýle, což by zvýšilo časovou náročnost celého projektu. Vzhledem k faktu, že u brýlí Nreal umožňuje Immersal pouze lokalizaci, bude nutné vytváření map (resp. snímání prostoru) provádět na jiném, například mobilním, zařízení. Další výhodou Immersalu je možnost offline lokalizace, tedy bez připojení k internetu. I když vytváření map probíhá na cloudu, je možné si vytvořené mapy stáhnout do Unity a uchovávat si je tak lokálně v zařízení. V základní verzi je Immersal nabízen zdarma, je však omezen počtem map, které si uživatel může vytvořit a také maximálním počtem snímků, z nichž se mapa vytvoří. Nicméně s různými omezeními se uživatel setká i u ostatních knihoven, především pak pokud bude využívat základní licence. Nevýhodou Immersalu je nutnost implementace vlastního systému správy obsahu. Zde mají výhodu knihovny Stardust a ARwayKit, které prostřednictvím svých webových aplikací umožňují využívat editor map, v němž je možné správu obsahu provádět. Z hlediska přesnosti umístění virtuálních objektů se Immersal umístil na vyšších příčkách, především při použití mobilního zařízení pro lokalizaci. Virtuální objekt se na referenčním terči pohyboval mezi zónami 1 a 2 u mobilního zařízení, u brýlí Nreal pak mezi zónami 2 a 3.

¹⁴API endpoint vracel chybu 503 - Service Unavailable, tedy že služba není dostupná.

3 Návrh

Tato kapitola se bude zabývat návrhem implementace aplikace. V první sekci bude nejprve popsána základní charakteristika aplikace. Následně bude popsána funkce aplikace. Poté budou následovat sekce zabývající se modelovými scénáři použití, hierarchickou analýzou úkolů a nakonec Lo-Fi prototypem.

3.1 Základní charakteristika

Základní vlastnosti aplikace a funkční požadavky pro splnění zadání práce jsou uvedeny v následujících bodech.

- **P1** - Aplikace bude umožňovat vytváření SLAM modelů (map) místností.
- **P2** - Bude možné vytvářet více map pro jednu místnost, například v závislosti na uspořádání interiéru. Dále je požadavkem, aby vlastnosti virtuálních objektů (poloha, orientace, velikost) zůstala ve všech těchto mapách stejná.
- **P3** - Pro jednu mapu bude možné vytvořit více různých virtuálních obsahů.
- **P4** - Vytvořené mapy si bude možné stáhnout do zařízení a vkládat do nich virtuální objekty, které se budou zobrazovat perzistentně.
- **P5** - Vytvořené mapy si bude možné stáhnout a načítat pomocí QR kódu.
- **P6** - Bude implementována správa virtuálního obsahu. Ke každé vytvořené mapě se budou ukládat informace o umístěných virtuálních objektech (tzv. metadata), tedy typicky jejich typ, poloha, orientace či velikost. Vlastnosti virtuálních objektů bude možné upravovat, popřípadě bude možné objekty smazat.
- **P7** - Virtuální objekty a informace o nich budou uloženy na serveru, aby bylo možné je sdílet mezi více uživateli. Tato data se budou stahovat před načtením mapy.
- **P8** - Pokud si uživatel načte více map najednou, bude se mu zobrazovat pouze virtuální obsah mapy, v níž se právě nachází. Konkrétním příkladem použití je přechod mezi místnostmi, kdy je žádoucí, aby se uživateli zobrazil virtuální obsah místnosti, do které vchází a naopak skryl obsah místnosti, z níž vychází.
- **P9** - Mapy a jejich virtuální obsahy bude možné sdílet mezi různými zařízeními. Více uživatelů si tak bude moci prohlížet stejnou mapu se všemi virtuálními objekty na různých zařízeních. Pokud jeden z uživatelů upraví virtuální obsah, pak se tyto změny provedou i na zařízeních ostatních uživatelů.

- **P10** - Virtuální objekty v dané mapě bude moct upravovat vždy jen jeden uživatel.
- **P11** - Bude dostupná česká a anglická jazyková lokalizace aplikace.
- **P12** - Aplikace bude kompatibilní s brýlemi Nreal a vybranými mobilními zařízeními či tablety s operačním systémem Android.
- **P13** - Aplikaci bude moct používat laická obsluha, typicky správci expozic, u kterých se nepředpokládá znalost technologií rozšířené reality.

3.2 Funkce aplikace

Funkci aplikace je možné rozdělit do pěti částí: tvorby SLAM modelů, načtení vytvořených modelů a lokalizaci, úpravu virtuálního obsahu, sdílení vytvořených modelů a kopírování virtuálního obsahu.

Tvorba SLAM modelů

Z provedené rešerše popsané v kapitole 2 vychází knihovna Immersal jako nejlepší kandidát, především díky alespoň částečné kompatibilitě s brýlemi Nreal. Jak již bylo popsáno v sekci 2.3.2, Immersal vytváří mapy ze série fotek. V této části aplikace tedy bude muset uživatel vytvořit dostatečné množství snímků dané místnosti tak, aby snímky pokrývaly místnost ze všech úhlů. Následně budou snímky zpracovány cloudovou službou, která vytvoří mapu. Celý proces bude vyžadovat stálé internetové připojení. Při úspěšném vytvoření mapy bude možné si ji prohlédnout v portálu vývojáře po přihlášení do stejného účtu, pod kterým se uživatel přihlásil do aplikace v zařízení. Jelikož vytváření map nebude možné provádět pomocí brýlí Nreal (viz opět sekce 2.3.2), bude tato část implementována pouze pro mobilní zařízení či tablety.

Načtení vytvořených modelů a lokalizace

V této části bude možné si stáhnout všechny mapy, které byly vytvořeny pod daným uživatelským účtem. Uživatel si bude moct v daném okamžiku zobrazit pouze jednu mapu, aby bylo jednoznačné, do které mapy se budou vkládat virtuální objekty v následující části. Pokud se v mapě již budou nacházet virtuální objekty, pak budou tyto objekty společně se svými metadaty staženy do zařízení. Po načtení mapy dojde k lokalizaci zařízení a zobrazení mapy a všech jejích virtuálních objektů na správném místě ve fyzickém prostředí. Pro stažení mapy bude nutné stálé internetové připojení.

Úprava virtuálního obsahu

Po načtení mapy a lokalizaci bude možné do mapy přidávat virtuální objekty. Uživatel si bude moct vybrat ze seznamu objektů dostupných na serveru. Dále bude moct objektům měnit jejich polohu, orientaci a velikost. Informace o objektech budou uloženy na serveru tak, aby bylo možné si je stáhnout do libovolného zařízení,

například pro sdílení map s více uživateli. Aby se předešlo potenciálním kolizím při úpravě mapy více uživateli najednou, bude mapu v jednu chvíli moci upravovat pouze jeden uživatel. Prvnímu uživateli, který začne v dané mapě provádět úpravy, se mapa uzamkne a ostatní uživatelé nebudou moci obsah této mapy měnit.

Sdílení SLAM modelů

Vytvořené mapy s virtuálními objekty si budou uživatelé moci sdílet mezi sebou. Uživatelé si budou moci načítat i více map zároveň, a pokud budou v těchto mapách definovány přechody mezi mapami v podobě tzv. portálů, bude se uživateli načítat pouze virtuální obsah mapy, ve které se právě nachází a přepínat se při průchodu těmito portály. Informace o virtuálním obsahu se bude pravidelně aktualizovat, bude tedy například možné vidět změny, které právě provádí jiný uživatel.

Kopírování virtuálního obsahu

V případě, že dojde ke změnám fyzických prostor a nebude již možné provést přesnou lokalizaci, bude možné překopírovat virtuální obsah ze staré mapy do nové. Uživatel si vytvoří novou mapu místnosti a do ní přeneseme virtuální obsah z mapy staré. Tím se vytvoří nový obsah, který se bude správně načítat a zobrazovat v rámci nově vytvořené mapy.

3.3 Scénáře

V následující sekci budou uvedeny zjednodušené modelové scénáře, které ilustrují použití výsledné aplikace.

Scénář 1 - Vytvoření nového virtuálního obsahu

Karel dostal za úkol připravit novou expozici týkající se dinosaurů. Jelikož je Karel pečlivý, začal s přípravami s velkým předstihem. Některé exponáty se však po cestě zdržely a nebylo jasné, za jak dlouho dorazí. Karel se proto rozhodl si chybějící exponáty zobrazit alespoň virtuálně, aby měl představu, jak výsledná expozice bude vypadat. Pomocí aplikace v mobilu si nejprve celou místnost nafotil. Tím si vytvořil mapu, do níž následně vložil virtuální modely chybějících exponátů.

Scénář 2 - Úprava virtuálního obsahu

Před zahájením expozice o dinosaurech bylo při kontrole zjištěno, že jeden z exponátů byl při přepravě poškozen a musí se ihned poslat zpět původnímu majiteli. Nyní se místo něj musí najít jiný exponát, který by ho nahradil. Karel využil faktu, že si pro tuto expozici již vytvořil mapu místnosti a začal si do ní zkoušet přidávat nové virtuální exponáty, které by mohly nahradit ten původní.

Scénář 3 - Sdílení virtuálního obsahu

V rámci nové expozice týkající se vesmíru dostal Karel za úkol rozmístit po místnosti planety Sluneční soustavy. Aby si práci usnadnil, rozhodl se si planety umístit nejprve virtuálně. Po dlouhém prototypování expozice se však nemohl rozhodnout na konečném rozmístění planet. Požádal proto svého kolegu Michala o jeho názor. Michal se proto připojil ke Karlovi do jeho virtuální expozice, prošel si všechny varianty rozmístění ze všech úhlů a tu nejlepší Karlovi doporučil.

Scénář 4 - Kopírování virtuálního obsahu

Po třech letech se do muzea opět vrátila expozice o vesmíru. I když se některé části expozice změnily k nepoznání, část týkající se Sluneční soustavy měla zůstat stejná. Protože však došlo k rekonstrukci místnosti, kde se tato část původně nacházela, chtěl si Karel být jistý, že původní umístění planet bude vhodné i pro zrekonstruovanou místnost. Kvůli rekonstrukci však nemohl využít starou mapu s virtuálními planetami. Aby ale nemusel planety umisťovat znovu v nové mapě, rozhodl se je jen překopírovat z té staré, čímž si ušetřil spoustu času.

3.4 Hierarchická analýza úkolů

Hierarchická analýza úkolů (angl. hierarchical task analysis, HTA) je jednou z technik analýzy úkolů. Její metodologie je založená na teorii lidského výkonu a principiálně je možné ji shrnout do tří základních bodů:

1. Na nejvyšší úrovni uvažujeme úkol jako operaci, která je definována svým cílem.
2. Každou operaci je možné rozdělit do podoperací definovaných vlastními podcíly.
3. Tím mezi operacemi a podoperacemi vzniká hierarchický vztah - pro splnění operací je nutné nejprve splnit jejich podoperace [25].

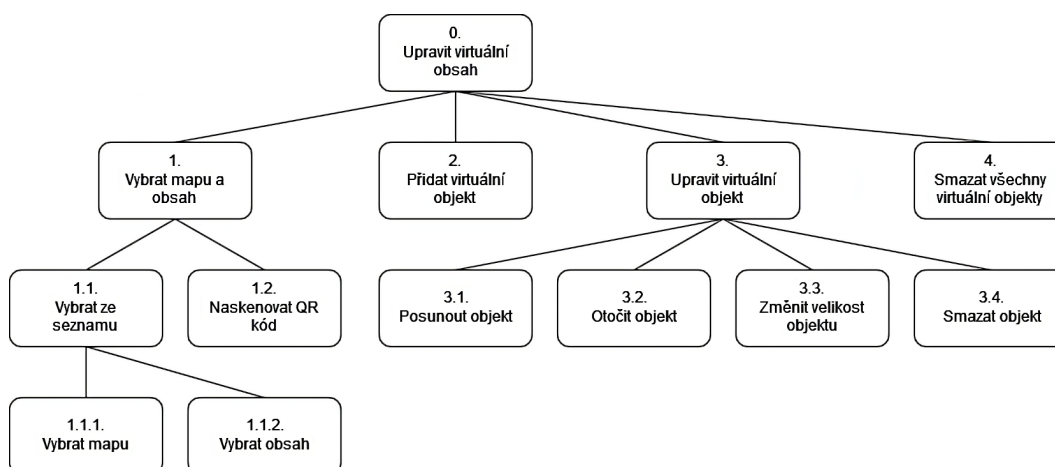
Výhodou HTA je především flexibilita, jelikož je možné pomocí této analýzy popsat prakticky jakýkoliv systém. Laicky řečeno, je cílem definovat systém jako soubor úkolů a každý úkol následně rozdělit do podúkolů. Podúkoly, které se již nedají dále dělit prohlásíme za kroky. Sekvenci kroků vedoucích ke splnění jednotlivých podúkolů (a následně úkolů) prohlásíme za plány. Pro demonstraci byly v rámci této práce vytvořeny hierarchické diagramy dvou úkolů: vytvoření nového virtuálního obsahu (obrázek 3.1) a úpravy virtuálního obsahu (obrázek 3.2).

Diagram 1 - Vytvoření nového virtuálního obsahu

Obrázek 3.1: Hierarchický diagram pro vytvoření nového virtuálního obsahu

Plán 0.: Proved' 1., poté 2., poté volitelně 3., poté 4., poté skonči

Plán 2.: Proved' buď 2.1., anebo 2.2., poté skonči

Diagram 2 - Úprava virtuálního obsahu

Obrázek 3.2: Hierarchický diagram pro úpravu virtuálního obsahu

Plán 0.: Proved' 1., poté volitelně 2., poté volitelně 3. (pokud existují virtuální objekty), poté volitelně 4., poté libovolně opakuj 2., 3., 4., poté skonči

Plán 1.: Proved' buď 1.1., anebo 1.2., poté skonči

Plán 1.1.: Proved' 1.1.1., poté 1.1.2., poté skonči

Plán 3.: Proved' volitelně 3.1. nebo volitelně 3.2. nebo volitelně 3.3. nebo volitelně 3.4., poté libovolně opakuj 3.1., 3.2., 3.3., 3.4., poté skonči

3.5 Lo-Fi prototyp

Lo-Fi prototyp je vizuální reprezentací designového konceptu, která umožňuje v krátkém časovém horizontu získat zpětnou vazbu od uživatelů a udat tak správný směr vývoje produktu. Jedná se často o náčrtky či papírové modely, které umožňují rychlé a jednoduché změny za běhu. Výhodou tohoto přístupu je možnost dělat mnoho iterací v krátkém čase a otestovat tak velké množství designových návrhů, konceptů a myšlenek. Cílem Lo-Fi prototypování je především otestovat funkcionality, nikoliv vizuální stránku prototypu [10]. Při testování Lo-Fi prototypu je často využívána metoda Wizard of Oz, kdy reakce a výstupy na uživatelskou interakci s prototypem negeneruje počítač, ale člověk, který například tahá za páčky nebo přepíná obrazovky [16].

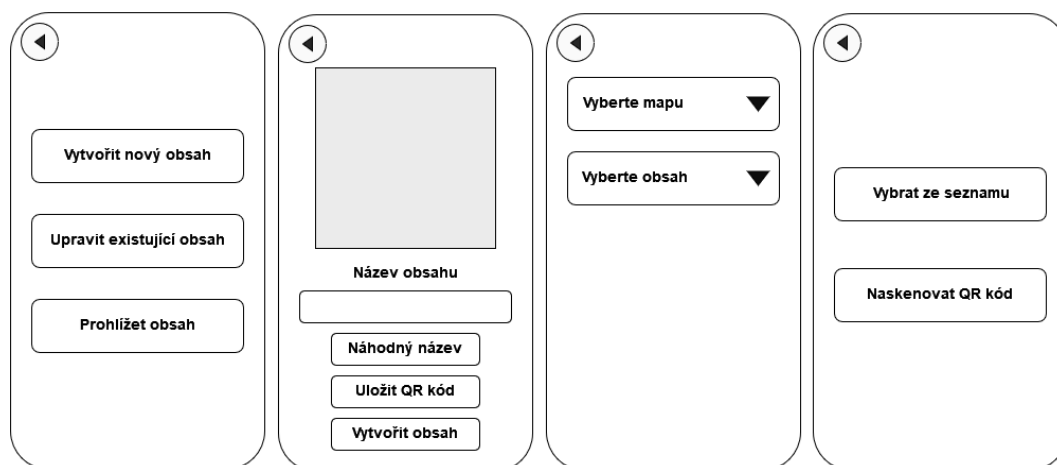
V rámci tohoto projektu byly vytvořeny dvě iterace Lo-Fi prototypu, každá z nich byla otestována s uživateli (viz sekce 5.4 a 5.5). Lo-Fi prototyp se skládá ze sady papírových kartiček a figurek. V sadě se nachází čtyři typy kartiček: stavové kartičky, dialogové kartičky, kartičky názvů a QR kódy. V rámci prototypu je možné interagovat s figurkami dvěma způsoby - posunem dopředu, dozadu, vpravo a vlevo a otáčením doprava a doleva. Celý prototyp lze vidět na obrázku 3.3.



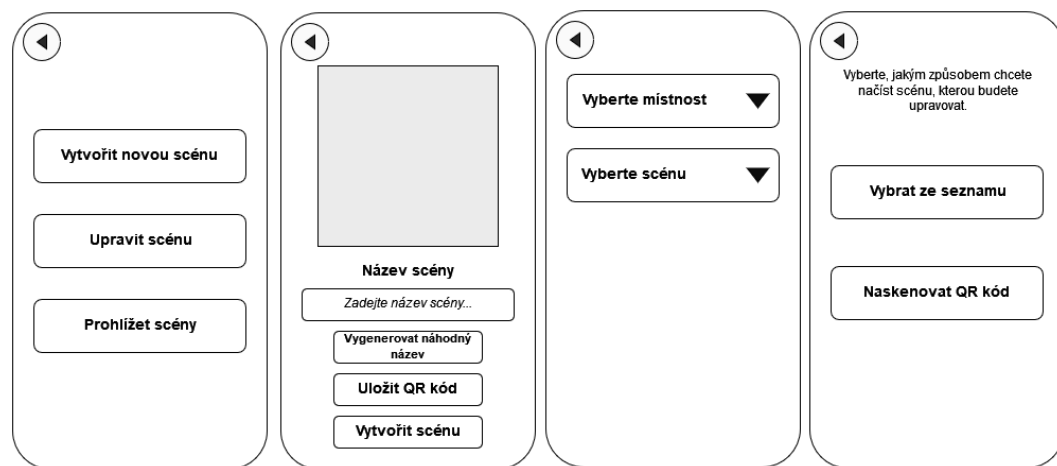
Obrázek 3.3: Lo-Fi prototyp - druhá iterace

3.5.1 Stavové kartičky

Tyto kartičky představují stavy, do kterých se může uživatel při průchodu prototypem dostat. Na každé kartičce se nachází tlačítka umožňující přechod mezi jednotlivými stavy. V kontextu hierarchické analýzy úkolů popsané v sekci 3.4 lze každý stav přirovnat k podúkolů a funkce jednotlivých tlačítek, vstupních polí či seznamů ke krokům, které může uživatel provádět. Na obrázcích 3.4 a 3.5 je možné vidět příklady stavových kartiček obou iterací prototypu.



Obrázek 3.4: Stavové kartičky - první iterace

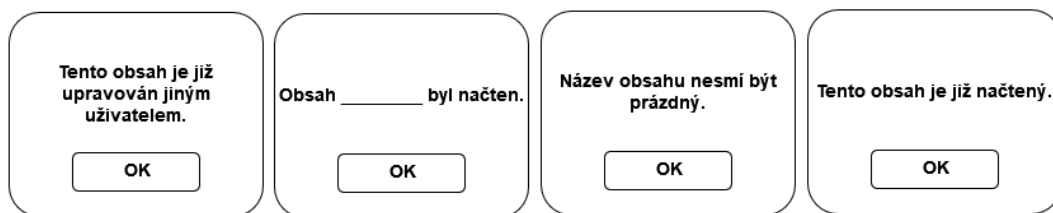


Obrázek 3.5: Stavové kartičky - druhá iterace

3.5.2 Dialogové kartičky

Účelem dialogových kartiček je uživatele informovat o konkrétním stavu, ve kterém se prototyp nachází, případně upozornit na chybu, která právě nastala. Po uživatelském testování první iterace prototypu bylo odebráno tlačítko *OK*, kterým se

dialog zavřel. Místo něho byly kartičky předělány do podoby oznámení, která automaticky zmizí po uplynutí určité doby. Obě iterace lze vidět na obrázcích 3.6 a 3.7.



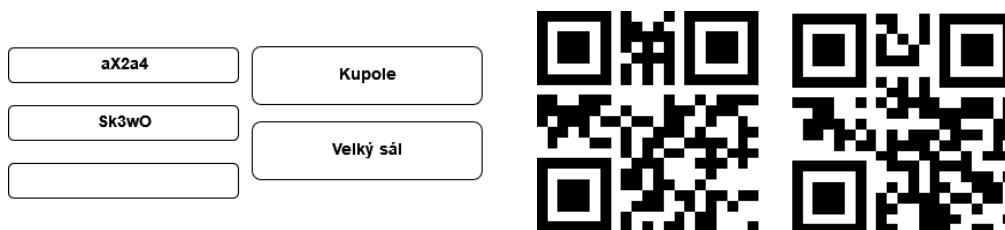
Obrázek 3.6: Dialogové kartičky - první iterace



Obrázek 3.7: Dialogové kartičky - druhá iterace

3.5.3 Kartičky názvů a QR kódy

Tyto kartičky obsahují názvy map a virtuálních obsahů, které může uživatel použít. Některé kartičky jsou záměrně prázdné pro případ, kdy by uživatel chtěl použít vlastní názvy. Poté, co si uživatel vybere mapu a zadá název virtuálního obsahu, se mu vygeneruje QR kód, který si může uložit a posléze ho použít pro načtení virtuálního obsahu. Tyto kartičky zůstaly v obou iteracích stejné, zobrazeny jsou na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Kartičky názvů a QR kódy

4 Implementace

V této kapitole bude popsána implementace aplikace. Nejprve bude uveden seznam klíčových nástrojů a technologií využitých při jejím vývoji. Dále budou následovat sekce zabývající se implementačními řešeními jednotlivých částí aplikace, od tvorby nového obsahu až po uživatelské rozhraní.

4.1 Použité nástroje a technologie

4.1.1 Nreal Light

Nreal Light jsou brýle pro rozšířenou realitu. Svou podobou a lehčím zpracováním než konkurenční zařízení, jako jsou například Microsoft HoloLens 2 nebo Magic Leap One, připomínají spíše těžší sluneční brýle (viz obrázek 4.1). Váží totiž 106 gramů, zatímco HoloLens 2 váží 566 gramů a Magic Leap One 316 gramů [1]. Oproti svým konkurentům jsou s cenovkou 599 dolarů také několikanásobně levnější. Nižší cena je záměrná, výrobci se s její pomocí snaží dostat technologie rozšířené reality do povědomí širší veřejnosti. Nreal Light disponují dvěma displeji o rozlišení 1920x1080 se zorným polem 52 úhlů a obnovovací frekvencí 60 Hz [1]. Napájeny a ovládány jsou pomocí mobilního zařízení¹, ke kterému se připojují pomocí USB-C kabelu. Mobilní zařízení posléze funguje jako laserové ukazovátko, kterým lze interagovat s virtuálními prvky na displeji. Pro správné sledování pohybu slouží 2 zabudované kamery umožňující až 6 stupňů volnosti. Nreal Light tedy využívají sledování pohybu metodou inside-out (zevnitř ven), kdy se snímače, jako například kamery, nachází přímo na zařízení a ke sledování pohybu a lokalizaci dochází snímáním okolního prostředí a detekcí referenčních bodů v něm. Opačným přístupem je metoda outside-in (z venku dovnitř), kdy jsou snímače oddělené od zařízení. Tyto snímače detekují zařízení například skrze infračervené záření vysílané zařízením. Tento přístup využívá například VR headset Oculus Rift [14].

4.1.2 Unity

Unity je multiplatformní herní engine vyvíjený společností Unity Technologies od roku 2005. Jeho součástí je velké množství zabudovaných nástrojů, jejichž cílem je usnadnit vývoj 2D a 3D aplikací. Uživatelé tak dávají svobodu při návrhu a tvorbě vlastního projektu. V Unity je možné vytvořit jak malé 2D aplikace s jednoduchou grafikou, tak i velké 3D aplikace s velkým množstvím realistických grafických prvků od modifikovatelných materiálů a shaderů přes dynamické osvětlení a stíny až po

¹Mobilní zařízení musí být s brýlemi kompatibilní, pro seznam kompatibilních zařízení viz [7].

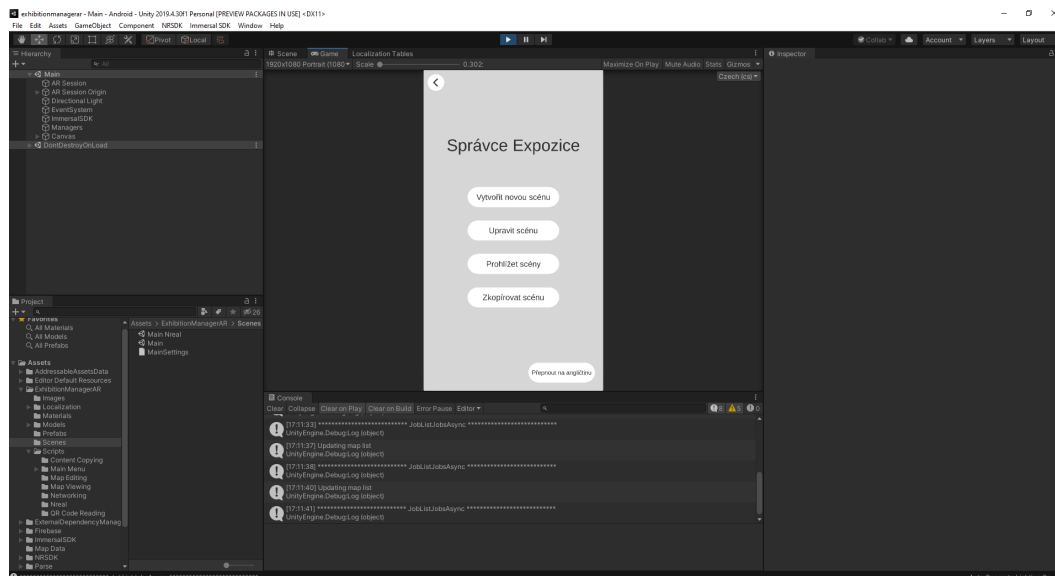
Obrázek 4.1: Brýle Nreal Light²

množství post-processových efektů, jako je zastínění okolím či hloubka ostrosti. Součástí Unity je také fyzikální engine umožňující simulaci kolizí, gravitace či působení sil mezi objekty. V rámci Unity je dále možné přidávat a upravovat animace postav, spravovat hudbu nebo vytvářet vlastní uživatelské rozhraní. Součástí je také tzv. Asset Store, tedy obchod obsahující velké množství 3D modelů, zvukových souborů, materiálů a shaderů, částicových efektů nebo pluginů vytvořených jinými uživateli [21]. V kontextu tohoto projektu je též důležitá aktivní podpora vývoje virtuálně realitních (VR) a rozšířeně realitních (AR) aplikací. Do Unity je totiž možné přidat balíčky umožňující vývoj těchto aplikací kompatibilních s většinou současných zařízení, včetně například brýlí Nreal Light. Pro vývoj tohoto projektu bylo využita verze Unity 2019.4.30f1. Vývojové prostředí nebo také editor Unity je možné vidět na obrázku 4.2.

4.1.3 Firebase

Firebase je platforma vyvíjená společností Google obsahující velkou škálu nástrojů a služeb usnadňující vývoj aplikací. Mezi tyto nástroje a služby patří například autentifikace, databáze, analytika nebo měření výkonu. Jedná se tedy především o backendové cloudové služby. Z tohoto důvodu je Firebase také někdy označován jako Backend-as-a-Service (backend jako služba) [12]. Umožňuje tedy vývojářům zaměřit se na frontendovou stránku svých aplikací, tedy typicky logiku na straně klienta a uživatelské rozhraní. Komunikace mezi klientskou aplikací a Firebase probíhá prostřednictvím aplikačního rozhraní, které Firebase poskytuje. Firebase je zaměřen především na mobilní platformy a webové aplikace, v kontextu tohoto projektu je důležitá především podpora pro engine Unity [26].

²Převzato z <https://vr-expert.com/nreal-light-now-available-in-spain/>.



Obrázek 4.2: Vývojové prostředí Unity

4.2 Režimy aplikace

Aplikace je rozdělená do čtyř režimů - tvorby nového obsahu, úpravy existujícího obsahu, prohlížení obsahu a kopírování obsahu. Tvorba SLAM modelů není součástí výsledné aplikace. SLAM modely se vytváří pomocí aplikace Immersal Mapper (viz sekce 4.4.1). V následujících bodech budou jednotlivé režimy stručně popsány, detailnější popis bude obsažen v následujících sekcích. Na obrázku 4.3 je dále možné vidět datový tok mezi aplikací, serverem Immersal a databází Cloud Firestore v různých režimech aplikace.

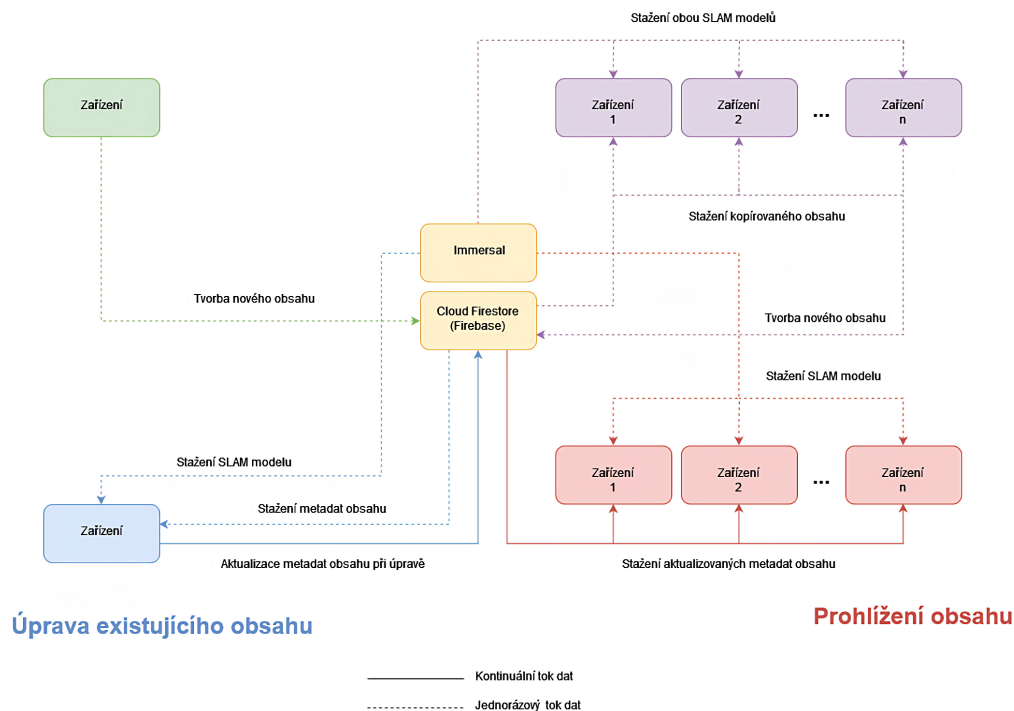
- **Tvorba nového obsahu** - Tento režim umožňuje tvorbu nového virtuálního obsahu. Aby uživatel mohl vytvořit nový obsah, musí nejprve vytvořit SLAM model místnosti, do níž chce obsah umístit. Virtuální obsah je možné pojmenovat, případně i vygenerovat QR kód, kterým ho lze posléze jednoduše načíst pro případné úpravy či prohlížení.
- **Úprava existujícího obsahu** - V tomto režimu může uživatel provádět úpravy vytvořeného obsahu. V rámci úprav může uživatel přidávat a odebírat virtuální objekty, případně měnit jejich vlastnosti (polohu, orientaci a velikost). Veškerá metadata týkající se virtuálního obsahu jsou ukládána na server. S každou úpravou obsahu se nová metadata odešlou na server, aby byla aktuální i pro další uživatele, kteří si daný obsah právě prohlíží. V jednu chvíli může daný virtuální obsah upravovat pouze jeden uživatel.
- **Prohlížení obsahu** - V tomto režimu si může uživatel prohlížet veškeré vytvořené virtuální obsahy. Může si načíst i více obsahů z různých map. Pokud je některý z obsahů zrovna upravován, tyto změny se projeví i ostatním uživate-

lům, kteří si ho prohlíží. Tento režim neumožňuje žádné úpravy ani zásahy do načtených obsahů, slouží pouze jako prostředek pro sdílení virtuálních obsahů mezi uživateli.

- **Kopírování obsahu** - Pomocí tohoto režimu může uživatel překopírovat virtuální obsah z jedné mapy do druhé. Cílem je zarovnat obě mapy tak, aby se virtuální obsah zobrazil správně i v nové mapě.

Tvorba nového obsahu

Kopírování obsahu



Úprava existujícího obsahu

Prohlížení obsahu

Obrázek 4.3: Tok dat mezi zařízeními a databázemi

4.3 Manažeři

Správu aplikace provádí takzvaní manažeři. Každý manažer je třídou starající se o určitou část aplikace. Manažeři jsou, až na výjimky, koncipováni jako singletony. V celé aplikaci tedy existuje pouze jedna instance každého manažera. Manažeři spolu komunikují skrze svá rozhraní, tedy metody a události, pomocí nichž si předávají důležitá data a informace. Základní přehled klíčových manažerů včetně jejich stručného popisu je uveden níže, podrobnější informace o jednotlivých manažerech budou uvedeny v následujících sekcích.

- **StateManager** - Řídí přechody mezi jednotlivými stavy aplikace. V aplikaci je definováno pět stavů - **MainMenu** (hlavní menu), **MapEditing** (úprava obsahu),

MapViewing (prohlížení obsahu), ContentCopying (kopírování obsahu) a QRCodeReading (skenování QR kódu).

- **DataManager** - Uchovává data důležitá pro ostatní manažery, jako například nastavený jazyk aplikace, seznam všech virtuálních objektů, které lze přidat do obsahu, nebo aktuálně načítanou mapu a obsah.
- **NetworkManager** - Stará se o síťovou komunikaci se službou Cloud Firestore (databáze virtuálních obsahů a objektů) a serverem Immersal (databáze vytvořených map). **NetworkManager** se tedy například stará o přihlášení uživatele, stahování map nebo tvorbu a aktualizaci obsahů v databázi.
- **UIManager** - Spravuje uživatelské rozhraní aplikace. Deleguje práci pro další správce, jelikož v každém stavu aplikace se o uživatelské rozhraní stará jiný správce. V aplikaci tedy existují další správci jako **MainMenuUIManager**, **MapEditingUIManager** nebo **MapViewingUIManager**.
- **MapEditingManager** - Spravuje aplikaci v režimu pro úpravu obsahu. Stará se například o načítání obsahů nebo přidávání nových objektů a jejich úpravu či mazání.
- **MapViewingManager** - Spravuje aplikaci v režimu pro prohlížení obsahu. Dohlíží především na načítání obsahů a jejich správnou aktualizaci při úpravách jiným uživatelem.
- **ContentCopying** - Stará se o kopírování obsahu mezi dvěma mapami.
- **QRCodeReadingManager** - Skenuje QR kódy zachycené kamerou zařízení.

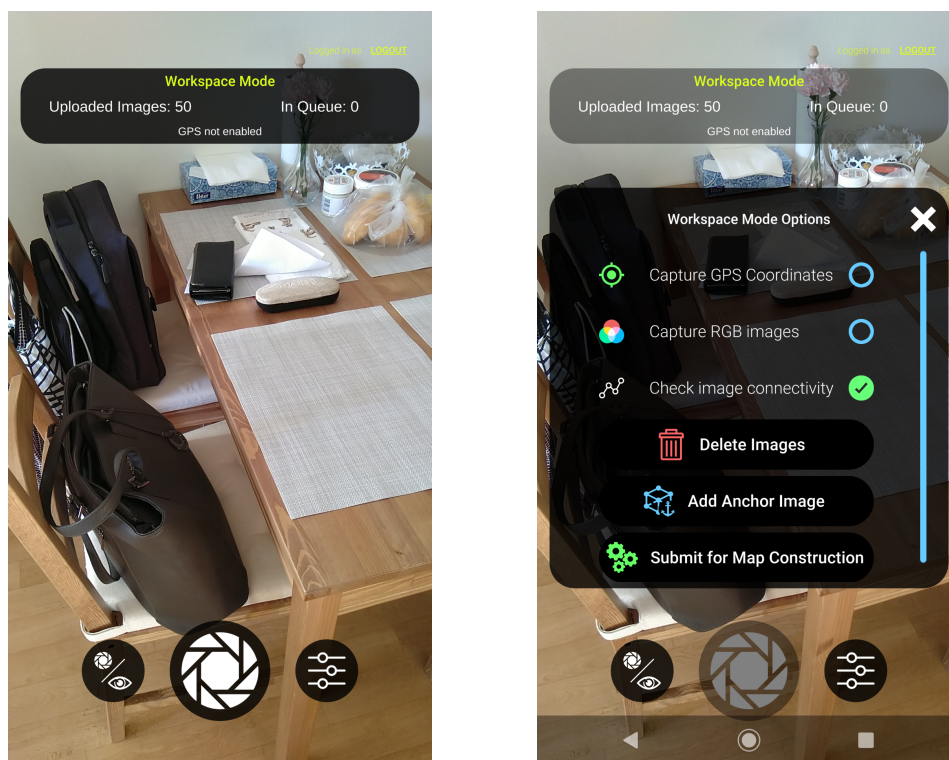
4.4 Tvorba SLAM modelu

4.4.1 Immersal Mapper

Přestože v rámci návrhu aplikace (viz sekce 3.2) bylo uvedeno, že tvorba map bude součástí výsledné aplikace, po zjištění, že pro knihovnu Immersal již existuje aplikace, která tuto úlohu řeší, tato část nebyla implementována. V této sekci tedy bude pouze popsána převzatá aplikace Immersal Mapper umožňující tvorbu map. Immersal Mapper je možné stáhnout prostřednictvím služeb Google Play či App Store nebo jako součást demonstračního projektu v Unity. Aplikace je kompatibilní se zařízeními s operačním systémem Android a iOS, které jsou podporovány knihovnami ARCore nebo ARKit.

Immersal Mapper nabízí dva režimy - pracovní (workspace) a vizualizační (visualize). Pracovní režim slouží k tvorbě map. Uživatelské rozhraní aplikace je přímočaré a poměrně jednoduché. V horním panelu se vypisují dvě hodnoty - in queue a uploaded images. In queue (ve frontě) je hodnota udávající počet snímků, které se nachází na zařízení a čekají na odeslání cloudové službě. Uploaded images (nahrané snímky) udává počet snímků, které již byly odeslány. Pokud je v zařízení dostupný signál

GPS, zobrazí se v panelu také poloha zařízení. V dolním panelu se nachází tři tlačítka - vlevo je umístěné tlačítko pro přepínání mezi režimy, prostřední tlačítko slouží pro pořizování snímků a vpravo se nachází tlačítko pro nastavení pracovního režimu. V nastavení se nachází přepínače pro zaznamenání GPS souřadnic, zachycování barevných obrázků v režimu RGB a kontrolu návaznosti snímků mezi sebou. V dolní části se nachází tři tlačítka pro smazání snímků, přidání kotevního snímku³ (anchor image) a zahájení tvorby mapy. Pracovní režim je možné vidět na obrázku 4.4.

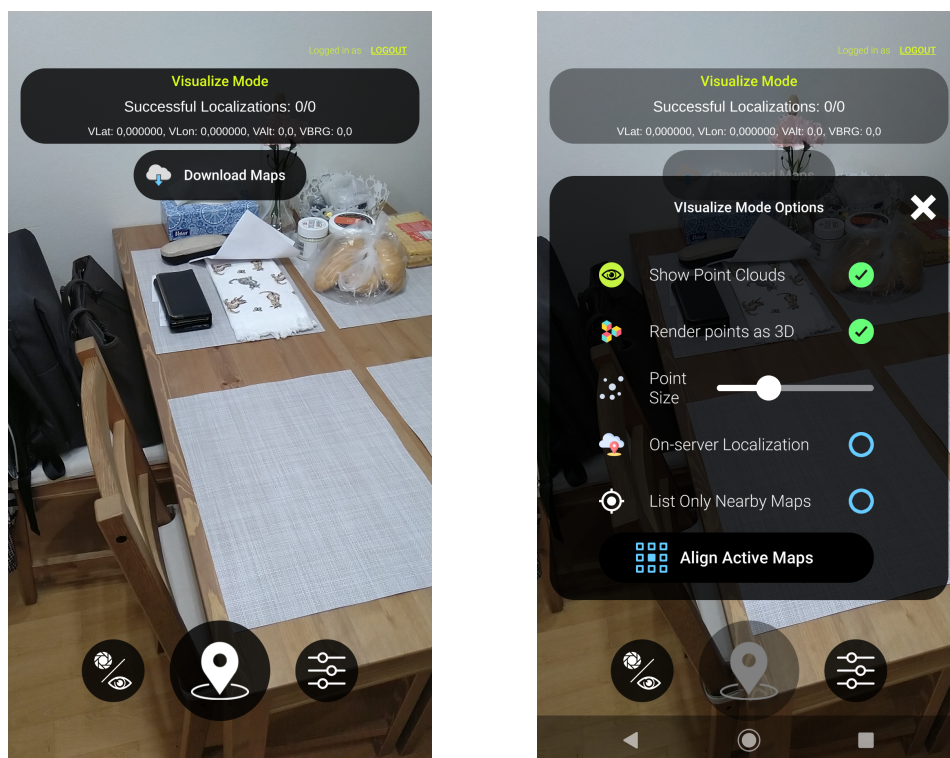


Obrázek 4.4: Immersal Mapper - pracovní režim (workspace mode)

Vizualizační režim umožňuje načíst a lokalizovat vytvořené mapy, čímž si uživatel může ověřit kvalitu mapy a přesnost lokalizace zařízení vůči mapě. V horním panelu se zobrazuje počet úspěšných lokalizací a počet pokusů o lokalizaci. Pokud byly pro danou mapu zaznamenány i GPS souřadnice, zobrazí se zde i vizuální GPS souřadnice mapy. Pod horním panelem se nachází tlačítko, kterým je možné si stáhnout a načíst mapy, popřípadě je smazat. V dolním panelu se nachází tlačítka pro přepínání mezi režimy, lokalizování map a nastavení vizualizačního režimu. V nastavení se nacházejí přepínače pro přepínání viditelnosti mapy (respektive mračna bodů, kterým je mapa reprezentována), zobrazování bodů jako 3D objekty nebo zapínání a vypínání serverové lokalizace. Dále je zde možné nastavit velikost bodů. V neposlední řadě se v nastavení nachází možnost zarovnání aktivních map. Tato funkce je vhodná, pokud si uživatel načte více map v rámci jedné místnosti. Poté, co se mapy

³Slouží pro správné nastavení orientace mapy, viz [9].

lokalizují, si může jejich vzájemnou polohu uložit a nemusí si tak mapy zarovnávat manuálně, například v Unity. Vizualizační režim je možné vidět na obrázku 4.5.

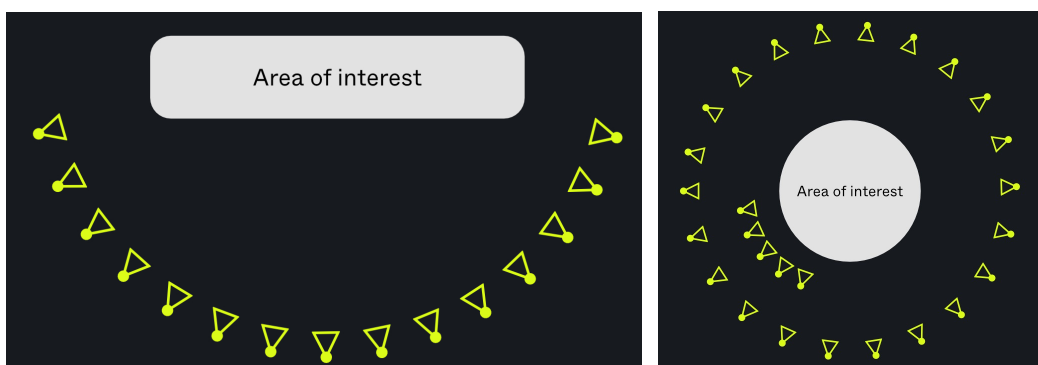


Obrázek 4.5: Immersal Mapper - vizualizační režim (visualize mode)

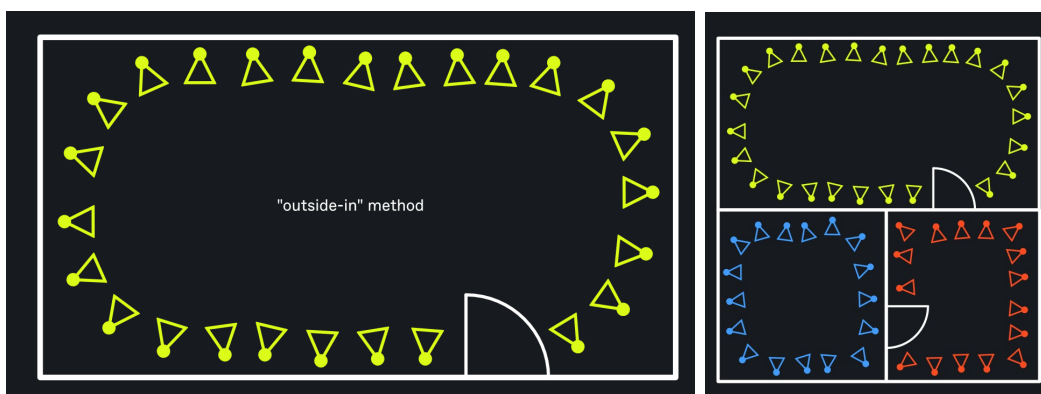
4.4.2 Pravidla pro vytváření SLAM modelů

Pro vytvoření kvalitních map, vůči kterým se budou různá zařízení schopna spolehlivě lokalizovat, je nutné splnit požadavky na vlastnosti mapovaných prostor a dodržovat základní pravidla při procesu mapování. Cílem mapování je detekovat co největší počet významných bodů. Za významný bod se považuje jakýkoliv bod v prostoru, který je možné spolehlivě odlišit a detekovat z různých úhlů pohledu. Tato odlišnost může spočívat v barvě, kontrastu, přechodu mezi různými předměty apod. Z těchto důvodů musí být mapovaný prostor v první řadě dobře osvětlený. Obdobně jako lidské oko ani kamera nedokáže správně odlišit jednotlivé předměty v prostoru za špatné viditelnosti [11]. V prostorách by se neměly nacházet lesklé předměty odrážející světlo, jako například zrcadla nebo skleněný nábytek a nádoby. Kamera totiž může detekovat významné body i v odrazech, které nejsou konzistentní vůči pohybu kamery. Důraz by měl být také kladen na rozmanitost prostoru, typicky například v barevnosti nebo kontrastu mezi jednotlivými předměty. Nevhodnými prostorami jsou například místnosti s bílými zdmi a nábytkem. Prostor by se neměl při mapování měnit, nemělo by například docházet ke stěhování nábytku při probíhajícím mapování [9].

Při procesu mapování je primární snahou zachytit mapovaný prostor z co největšího počtu různých úhlů pohledu a vzdáleností. Jednotlivé snímky na sebe musí dobře navazovat, pravidlem je v každém snímku zachytit alespoň třetinu ze snímku předchozího. Překryvy mezi snímky umožňují lepší detekci stejných významných bodů mezi jednotlivými snímky, což přispívá k vytvoření kvalitnější mapy. V ideálním případě je dobré zachytit každý významný bod z alespoň tří různých úhlů. Mapování by dále mělo být přizpůsobeno prostorům, které je potřeba mapovat. V případě mapování jednoho konkrétního bodu zájmu, například stěny či rohu dvou budov, je vhodné provádět mapování v oblouku okolo mapovaného bodu, popřípadě v kruhu, pokud je možné bod zájmu vyfotit ze všech úhlů, jako je to například u soch (viz obrázek 4.6). V případě vnitřních prostor je doporučeno snímky pořizovat po obvodu místnosti. Pokud je místností více, pak je dobré mapovat každou místnost zvlášť (viz obrázek 4.7) [9].



Obrázek 4.6: Doporučený způsob mapování jednoho bodu zájmu⁴



Obrázek 4.7: Doporučený způsob mapování vnitřních prostor⁵

⁴Převzato z [9].

⁵Převzato z [9].

4.4.3 Portál vývojáře

Jak již bylo zmíněno v sekci 2.3.2, vytvořené mapy je možné spravovat v portálu vývojáře (viz obrázek 4.8). Jedná se o webovou aplikaci, do které je možné se přihlásit s účtem Immersal. V horní části stránky se nachází odkazy ke stažení knihovny, na demonstrační příklady pro podporované platformy nebo na dokumentaci. Pod odkazy se nachází seznam všech vytvořených map. Ke každé mapě se zobrazují následující informace:

- **ID mapy (map id)** - jedná se o unikátní identifikátor mapy sloužící k jejímu referencování.
- **Název mapy (name)** - textový řetězec, který se zadává při vytváření mapy.
- **Stav (status)** - udává fázi tvorby mapy, tedy například jestli se mapa vytváří nebo již byla vytvořena.
- **Snímky (images)** - udává počet snímků, z nichž byla mapa vytvořena.
- **Sdílení (sharing)** - zdali je mapa dostupná kterémukoliv uživateli, nebo pouze uživatelům, kteří mají token od tvůrce mapy.
- **Zeměpisná šířka a délka (latitude, longitude)** - tato hodnota se zobrazuje pouze pokud bylo na zařízení zapnuto GPS při tvorbě mapy.
- **SDK** - verze SDK použitá pro tvorbu mapy.
- **Tvůrce (creator)** - jméno uživatele, který mapu vytvořil.
- **Vytvořeno (created)** - datum a čas, kdy byla mapa vytvořena.
- **Stažitelné soubory (downloadable files)** - vytvořená mapa v různých formátech.

The screenshot shows the Immersal Developer Portal interface. At the top, there's a navigation bar with links for 'Download & Documentation', 'Private developer token', and a 'Logout' button. The main content area is divided into two columns. The left column contains links to 'Download Immersal SDK v1.14.1', 'Samples on GitHub', 'Demo App', and 'SDK Documentation'. The right column shows a 'Private developer token' with a 'Copy token' button. Below this, there's a 'Jobs' section with a 'View my maps' button. A table of maps is displayed, with columns for Map ID, Name, Status, Images, Sharing, Latitude, Longitude, SDK, Creator ID, Created, and Downloadable files. The table shows one map with ID 34970, named 'K1', in 'done' status, with 40 images, private sharing, and a download link for 'K1.zip'.

Map ID	Name	Status	Images	Sharing	Latitude	Longitude	SDK	Creator ID	Created	Downloadable files
34970	K1	done	40	private			1.14.0		2021-10-24 15:45:55	K1.zip

Obrázek 4.8: Immersal - portál vývojáře

Mapy je možné si stáhnout jako binární soubory, mračna bodů a vrcholově obarvené či texturované sítě, popřípadě je také možné si je v těchto podobách zobrazit přímo v portálu. V portálu je dále možné mapy mazat, poslat je jiným uživatelům, nebo je sešívat. Funkce sešívání map umožňuje vytvořit novou mapu automatickým spojením více map dohromady. Pro správný výsledek je nutné, aby existoval překryv mezi jednotlivými mapami [9].

4.5 Tvorba nového obsahu

4.5.1 Tvorba obsahu v aplikaci

Po úspěšném vytvoření mapy je do ní možné přidat virtuální obsah skládající se z virtuálních objektů⁶. Každá mapa může mít více obsahů, musí se však lišit svým názvem. Je ale možné mít stejnojmenné obsahy v různých mapách. V aplikaci je tedy nejprve nutné si vybrat mapu, do které bude obsah přidán. Posléze může uživatel zadat název obsahu nebo si nechat vygenerovat náhodný. Název nesmí být prázdný a nesmí se shodovat s názvem jiné scény, která již v mapě existuje. Při zadávání názvu se uživateli automaticky vygeneruje QR kód sloužící k jednoduchému načtení scény v režimech pro úpravu nebo prohlížení (viz obrázek 4.9). Tento QR kód je možné si uložit do zařízení a poté si ho například vytisknout. Data zakódovaná v QR kódu obsahují celočíselný identifikátor mapy⁷ a název obsahu ve tvaru *idmapy.nazevobsahu*, tedy například *12345.MujObsah*. Ze znalosti těchto informací je také možné si pomocí služeb třetích stran vygenerovat vlastní QR kód, který bude též použitelný. Název obsahu může obsahovat mezery i diakritiku. Po úspěšném vytvoření obsahu se uživateli zobrazí finální obrazovka obsahující potvrzení o vytvoření obsahu a stručné informace o dalších režimech, které by uživatel mohl chtít dále využít. Pro lepší znázornění je na obrázku 4.10 uveden workflow diagram pro tvorbu nového obsahu.

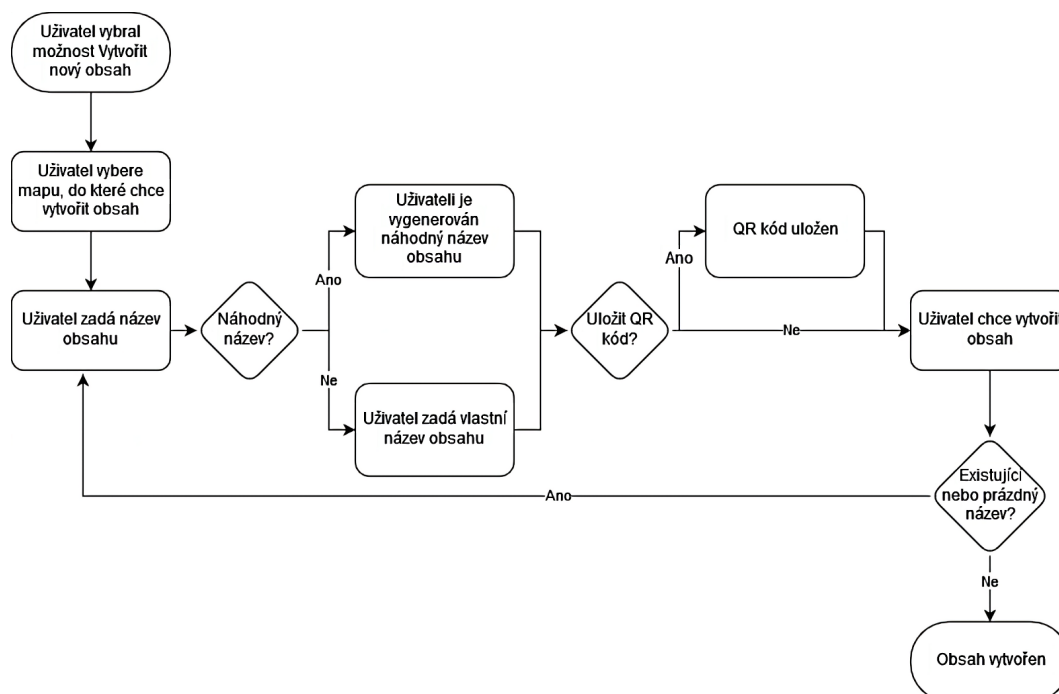
Z implementačního hlediska se o tvorbu nového obsahu stará **NetworkManager**, konkrétně metoda **CreateContent()**. Ta nejprve odešle do databáze dotaz, zdali v uživatelem vybrané mapě již existuje obsah se stejným názvem. Pokud ano, zobrazí se skrze **UIManager** upozornění o stejnojmenném obsahu. V opačném případě se zobrazí finální obrazovka s potvrzením o vytvoření obsahu.

⁶Ve finální aplikaci byla terminologie upravena po uživatelském testování (viz sekce 5.5). Termíny mapa, obsah a objekt byly změněny na místnost, scéna a exponát. V tomto textu však budou i nadále použity původní termíny s výjimkou některých sekcí v kapitole 5 zabývajících se uživatelským testováním.

⁷Identifikátor mapy je uveden v portálu vývojáře, viz sekce 4.4.3.



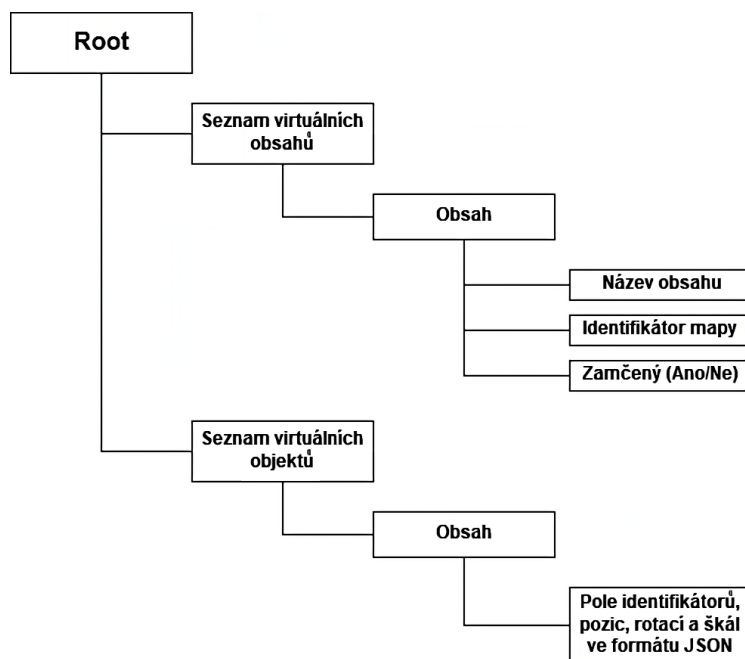
Obrázek 4.9: Zadaný název obsahu a k němu vygenerovaný QR kód



Obrázek 4.10: Workflow diagram pro tvorbu nového obsahu

4.5.2 Tvorba obsahu v databázi

Pro ukládání metadat map a jejích obsahů byla využita služba Cloud Firestore. Jedná se o NoSQL⁸ cloudovou databázi, jejíž hlavními přednostmi jsou především škálovatelnost a schopnost aktualizace dat v reálném čase. Díky tomu je možné do databáze ukládat velké množství dat a současně je v reálném čase upravovat. Rychlá synchronizace dat mezi klienty je klíčová pro sdílení obsahů mezi více uživateli. Data jsou hierarchicky uspořádána do kolekcí, které se skládají z dokumentů, každý dokument dále obsahuje jednotlivá pole. Pro účely této aplikace jsou v databázi uloženy dva typy kolekcí - seznam všech virtuálních obsahů a seznam objektů pro každý obsah. V seznamu obsahů se v jednotlivých dokumentech ukládají název obsahu, identifikátor mapy, v níž se obsah nachází, a proměnná typu boolean reprezentující zámek obsahu, tedy zdali je obsah již někým upravován. V seznamu objektů se ukládají metadata k jednotlivým objektům v daném obsahu. V každém dokumentu je uložený řetězec ve formátu JSON obsahující pole identifikátorů, pozic, rotací a škál (velikostí) objektů. Při tvorbě nového obsahu tedy dojde k vytvoření nového dokumentu v každé z kolekcí. Pro snazší pochopení je na obrázku 4.11 znázorněna hierarchie dat v databázi.



Obrázek 4.11: Hierarchie dat v databázi

⁸Angl. Not only Structured Query Language. Oproti klasickým SQL databázím ukládají NoSQL databáze data v jiném formátu než v relačních tabulkách (viz [13]).

4.6 Úprava existujícího obsahu

4.6.1 Načtení obsahu

Načítání obsahu má z velké části pod správou **NetworkManager**. Obsah může být načten dvěma způsoby - ze seznamu, nebo pomocí QR kódu, který lze vytvořit při tvorbě nového obsahu. Poté, co uživatel vybere obsah, odešle **NetworkManager** prostřednictvím metody **IsContentLocked()** do databáze dotaz, zdali je požadovaný obsah zamčený, tedy zdali je již upravován jiným uživatelem. Pokud ano, zobrazí se uživateli upozornění o zamčeném obsahu. Pokud ne, odešle metoda **SetContentLocked()** požadavek pro uzamčení obsahu. Jelikož je zámek obsahu reprezentován proměnnou typu boolean, uzamčení představuje pouze nastavení této hodnoty na true (pravda).

Následně **StateManager** přepne aplikaci do režimu pro úpravu obsahu a odešle požadavek na stažení dat. Jako první stáhne **NetworkManager** pomocí metody **LoadMap()** mapu ze serveru Immersal v podobě mračna bodů. Jedná se o bodovou reprezentaci mapovaného fyzického prostoru. Mapa je objekt, který se při správné lokalizaci zarovná s fyzickým prostorem, který reprezentuje. Také slouží jako rodičovský objekt, jehož dítětem je vybraný obsah. Pokud si uživatel pro úpravu vybere obsah, který už obsahuje objekty, načtou se tyto objekty jako jeho děti. Vzniká tedy hierarchie mapa \rightarrow obsah \rightarrow objekty, podobně jako je tomu u dat v databázi. Vytváření instancí jednotlivých objektů provádí **MapEditingManager**.

4.6.2 Lokalizace zařízení

Po úspěšném načtení mapy a obsahu dochází k automatické lokalizaci zařízení vůči načtené mapě. Immersal v pravidelných intervalech vyhodnocuje snímky pořizované kamerou zařízení. Z kombinace snímků a vlastností kamery (camera intrinsics) Immersal vypočítává tzv. pózu kamery, tedy její polohu a orientaci vůči mapě. Pokud je výpočet pózy úspěšný, Immersal zarovná mapu vůči fyzickému prostředí jejím posunem a rotací. S každým novým snímkem dochází k novému vyhodnocování a případné korekci v umístění a orientaci mapy. Tento mechanismus zajišťuje správnou lokalizaci i při pohybu se zařízením.

Úspěšnost lokalizace je ovlivněna třemi faktory - kvalitou vytvořené mapy, kamerou zařízení a prostory, ve kterých je lokalizace prováděna. Kvalitu mapy je možné definovat pomocí počtu nalezených významných bodů. Pokud bylo mapování prováděno za špatných světelných podmínek, nebo se v mapovaném prostoru nenacházelo dostatečné množství odlišitelných a rozpoznatelných bodů, může být výsledná kvalita mapy nízká, což negativně ovlivní i schopnost lokalizace zařízení v takové mapě. Pravidly, kterými se řídit při tvorbě map se zabývá sekce 4.4.2.

Druhým faktorem je kamera zařízení. Zde jsou důležité dva parametry - kvalita kamery a rozdíl mezi kamerou použitou při mapování a při lokalizaci. Kvalitní kamera je nezbytná jak pro mapování, tak i lokalizaci. Kamery s většími snímači

schopné produkovat ostřejší a větší snímky za různých světelných podmínek dokáží lépe detekovat významné body v prostředí. V problému s detekcí významných bodů spočívá i rozdíl mezi použitými kamerami při mapování a lokalizaci. Rozdílné kamery produkují rozdílné snímky, ve kterých nemusí být detekovány stejné významné body. V ideálním případě je tedy vhodné použít stejné zařízení v obou situacích.

Posledním faktorem jsou prostory, ve kterých lokalizace probíhá. Zde je především nutné, aby rozmístění předmětů a objektů bylo při lokalizaci stejné, jako při mapování. Pokud mezi mapováním a lokalizací dojde k posunu či odstranění některých předmětů, může být posléze obtížné lokalizaci provést. Důležité je také zachovat intenzitu osvětlení a rozmístění světelných zdrojů v prostoru. Z tohoto důvodu není vhodné mapovat prostory, kde se často mění světelné podmínky.

4.6.3 Přidávání objektů

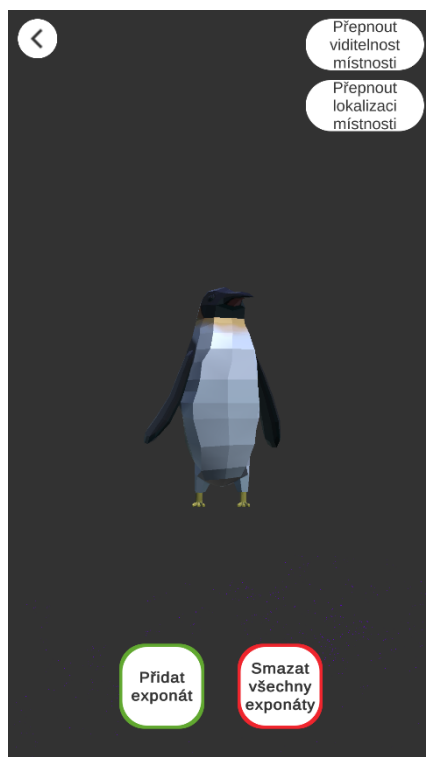
Po výběru a načtení obsahu se v režimu pro úpravu obsahu zobrazí následující čtyři tlačítka (viz obrázek 4.12):

- **Přidat exponát** - Umožňuje přidat objekt do obsahu. Uživatel má na výběr mezi šesti různými animovanými objekty.
- **Smazat všechny exponáty** - Smaže všechny přidané objekty.
- **Přepnout viditelnost místnosti** - Přepíná viditelnost mračna bodů, kterým je mapa reprezentována. Mračno bodů může být pro některé uživatele rušivým elementem při vytváření obsahu.
- **Přepnout lokalizaci místnosti** - Přepíná lokalizaci zařízení vůči mapě. Vypnout lokalizaci může být vhodné, pokud lokalizace není stabilní, což může mít za následek cukání či přeskakování objektů.

Ve funkčních požadavcích v sekci 3.1 bylo uvedeno, že virtuální objekty a informace o nich budou uloženy na serveru. Pro metadata tato informace platí, avšak samotné objekty, respektive jejich modely, jsou součástí aplikace a nejsou stahovány ze serveru. Tato funkcionality nakonec nebyla implementována a byla ponechána jako jedno z možných budoucích vylepšení aplikace.

Při přidání, smazání či jakékoli interakci s objektem je také aktualizován příslušný dokument daného virtuálního obsahu v databázi. To umožňuje dalším uživatelům, kteří si daný obsah prohlížejí, vidět změny v reálném čase.

Seznam všech objektů, které lze přidat do obsahu, si uchovává `DataManager`. Tato data jsou uložena v poli, do něhož je možné přidávat pouze objekty typu `MovableObject`. `MovableObject` obsahuje informaci o číselném identifikátoru daného objektu, jehož hodnota se ukládá v databázi. Dále si uchovává název objektu, který se zobrazí v aplikaci, a reference na další objekty, jako například pomocné šipky zobrazující se při pohybu s objektem. Při přidávání nového virtuálního objektu je proto nutné přidat i tyto pomocné objekty jako jeho děti. Pro případné stahování objektů



Obrázek 4.12: Režim pro úpravu obsahu - přidávání objektu

ze serveru by kromě samotného stahování bylo nutné přidat či implementovat i parsování objektů ve vybraných formátech a následně tyto objekty přidat do pole, které si uchovává `DataManager`.

Jak již bylo zmíněno v sekci 4.6.1, přidané objekty se stanou dětmi obsahu, do něhož patří. Obsah je dítětem mapy, ve které se nachází. Mapa se zarovnává s fyzickým prostorem v rámci lokalizace zařízení. Tato hierarchie umožňuje vytvořeným objektům se zobrazit na správných místech za předpokladu, že je lokalizace zařízení úspěšná.

4.6.4 Interakce s objekty

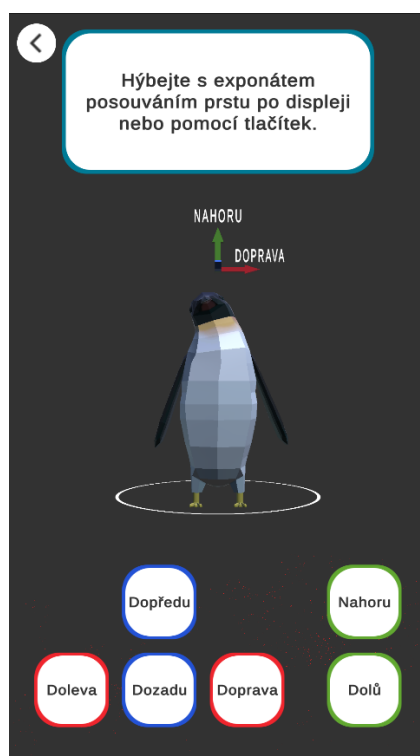
V rámci aplikace jsou k dispozici následující čtyři způsoby interakce s objekty - posun, otáčení, změna velikosti a smazání. Smazání objektu je přímočará operace při níž je vybraný objekt odstraněn z obsahu jak v rámci aplikace, tak i v databázi.

Interakci s objekty řídí `MapEditingManager`. Při interakci si tento manažer uchovává informace o typu interakce, směru pohybu nebo otáčení, které posléze předává vybranému virtuálnímu objektu. Ten tyto informace zpracuje a provede požadované úpravy. K těmto úpravám dochází v metodě `Update()` ve třídě `MovableObject`. Data o všech instancovaných objektech si taktéž uchovává `MapEditingManager`. Po dokon-

čení interakce se tato data použijí k aktualizaci obsahu v databázi.

Posun

Posun objektů je v obou verzích aplikace možný dvěma způsoby - pomocí tlačítek zobrazujících se v uživatelském rozhraní nebo posunem pomocí prstu (v případě verze pro mobilní zařízení) či táhnutím laserového ukazovátka (v případě verze pro brýle nReal). Při posunu se nad vybraným objektem zobrazí šipky znázorňující směr posunu (viz obrázek 4.13). Pomocí těchto šipek je možné se zorientovat v případě, že uživatel použije posun pomocí tlačítek. V tomto případě totiž dochází k posunu v rámci lokální souřadné soustavy daného objektu. Pokud tedy chce uživatel například posunout objekt směrem doprava, dojde k posunu doprava z pohledu vybraného objektu. V případě posunu prstem nebo laserovým ukazovátkem stačí objekt vybrat a umístit ho do prostoru pohybem prstu po displeji telefonu nebo táhnutím laserového ukazovátka. Při posunu dochází k ukládání relativní pozice daného objektu vůči jeho rodiči, kterým je virtuální obsah. Při opětovném načtení obsahu jsou poté objekty umístěny do prostoru pomocí této uložené hodnoty.



Obrázek 4.13: Virtuální objekt se šipkami znázorňujícími směr posunu

Otáčení

Otáčení objektu je možné provádět posunem prstu po displeji (u verze pro mobilní zařízení) nebo táhnutím laserového ukazovátka (u verze pro brýle nReal). Uživatel může otáčet objektem vždy pouze v jedné ose. Může si tak vybrat mezi rotací vpravo

či vlevo, náklonem dopředu či dozadu a náklonem do stran. Při rotaci se do databáze ukládá rotace v jednotlivých osách. Tyto hodnoty se poté aplikují při opětovném načtení obsahu. Otáčení objektu nemá vliv na směr šipek udávající směr posunu objektu.

Změna velikosti

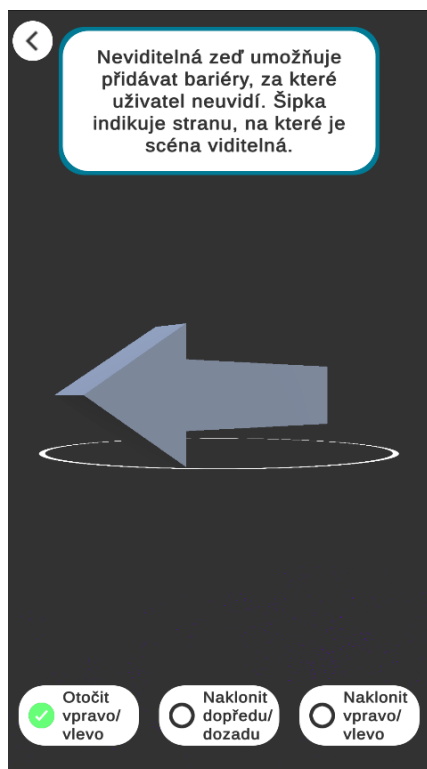
Změnu velikosti může uživatel provést pomocí tlačítek v uživatelském rozhraní. Tato operace je přímočará, tlačítka buďto vybraný objekt zmenší nebo zvětší. Změna velikosti je prováděna vzhledem ke středu objektu nikoliv například k jeho podstavě. Do databáze je ukládána velikost objektu v jednotlivých osách.

4.6.5 Portály

Portály jsou řešením situace, kdy by do jedné mapy bylo vytvořeno více virtuálních obsahů, které by bylo potřeba zobrazit separátně v závislosti na pozici uživatele. Konkrétním případem použití je například mapa skládající se z více místností. Pokud by uživatel pro každou místnost vytvořil vlastní virtuální obsah, logickým požadavkem by mohlo být, aby se obsah zobrazoval pouze v případě, že se uživatel nachází v dané místnosti. Pokud by poté přešel do jiné místnosti, měl by se zobrazit obsah pouze této místnosti.

Implementačním řešením portálů jsou v aplikaci takzvané neviditelné zdi. Jedná se o speciální typ objektů, které může uživatel přidat do obsahu. Neviditelné zdi jsou viditelné pouze v režimu pro úpravu obsahu a jejich účinek je možné pozorovat pouze v režimu pro prohlížení obsahu. Po přidání do scény jsou reprezentovány modelem šipky (viz obrázek 4.14). Tato šipka reprezentuje směr, ve kterém je obsah viditelný. Pokud se uživatel nachází kdekoli za touto šipkou, bude mu obsah skryt. Tento objekt tedy funguje jako pomyslná zeď, za kterou není možné obsah vidět. Pokud je v obsahu umístěno více neviditelných zdí, pak se uživatel musí nacházet před všemi zdmi. Virtuální zdi je tedy vhodné umístit na místa, ve kterých se ve fyzickém prostoru nachází skutečné zdi nebo překážky oddělující jednotlivé obsahy.

Neviditelné zdi jsou instancemi třídy `InvisibleWall`. Ta v sobě obsahuje implementaci metody `IsUserInFront()`, která kontroluje, zdali uživatel stojí před nebo za danou zdí. Tato kontrola je provedena výpočtem skalárního součinu vektoru vedoucího od zdi ke kameře a vektoru udávajícího směr, ve kterém je obsah viditelný. Pokud jsou tyto vektory normalizované, pak je jejich skalární součin roven kosinu úhlu mezi nimi. Pokud je kosinus úhlu větší než nula, pak se uživatel nachází před zdí. Jelikož se v obsahu může nacházet více neviditelných zdí najednou, byl pro jejich správu implementován `InvisibleWallManager`, který provádí kontrolu uživatelské polohy vzhledem ke všem neviditelným zdem.



Obrázek 4.14: Model šipky reprezentující neviditelnou zeď

4.7 Prohlížení obsahu

Režim pro prohlížení obsahu umožňuje uživateli si prohlédnout vytvořené virtuální obsahy. V tomto režimu není možné provádět žádné úpravy. Uživatel si může načíst libovolný počet obsahů⁹. Obdobně jako u režimu pro úpravu obsahů je možné obsahy načítat jak ze seznamu, tak i pomocí QR kódu. Při načtení obsahu ale nedochází k jeho uzamčení. Stejný obsah si tak může ve jednu chvíli zobrazit více uživatelů. Po načtení dochází k lokalizaci zařízení v mapě (viz sekce 4.6.2). Pokud je načteno více obsahů v různých mapách, bude se aplikace snažit lokalizovat zařízení vůči všem načteným mapám.

Pokud dojde k úpravě obsahu jiným uživatelem, je tato změna v reálném čase propagována všem ostatním uživatelům, kteří si daný obsah prohlíží. Z implementačního hlediska je této funkcionality docíleno pomocí takzvaných posluchačů (listeners)¹⁰. Na každý dokument, který reprezentuje obsah v databázi, je při načtení obsahu přidán posluchač, který reaguje na změny provedené v daném dokumentu. Pokud dojde k úpravě obsahu, dojde i k úpravě dokumentu, kterou posluchač zachytí a uvědomí o tom aplikaci. Ta si posléze stáhne aktualizovaný dokument a načte upravený obsah

⁹Pro reálné použití by tento počet měl být rozumný, s každým načteným obsahem se zvyšují nároky na výpočetní výkon potřebný pro vykreslení všech objektů. Také je nutné provádět lokalizaci zařízení v načtených mapách a aktualizaci obsahů v případě, že jsou upravovány.

¹⁰Pro více informací o posluchačích viz [8].

znovu. Níže uvedený pseudokód znázorňuje přidávání posluchače na dokument.

```
function AddRealtimeListenerToContent()
{
    // Get the database and document reference
    documentName = GetDocumentName()
    database = NetworkManager.GetDatabase()
    document = database.GetDocument(documentName)

    // Add a listener to the document
    listener = document.Listen(snapshot => {
        // If the content has been edited, reload it
        if (snapshot)
        {
            json = snapshot.GetJSON()
            ReloadContent(json)
        }
    })

    // Add the new listener to the map
    DataManager.GetListenersMap()[documentName] = listener
}
```

Prohlížení obsahu spravuje `MapViewingManager`. Ten obsahuje metody `LoadContent()` a `ReloadContent()`, kterými načítá a aktualizuje obsah zobrazený uživateli na základě metadat z databáze. Také obsahuje výše zmíněnou metodu `AddRealtimeListenerToContent()` pomocí níž přidává posluchače na dokumenty v databázi.

V režimu pro prohlížení obsahu je dále možné otestovat funkčnost neviditelných zdí. Ty se v tomto režimu nezobrazují, nicméně obsah se zobrazuje podle toho, jestli se uživatel nachází před zdí, nebo za ní. Pokud si uživatel načte více obsahů zároveň, může si vyzkoušet přechody mezi jednotlivými obsahy a otestovat jejich správné zobrazování v závislosti na uživatelské pozici (viz sekce 4.6.5).

4.8 Kopírování obsahu

Režim pro kopírování obsahu umožňuje přenášet již vytvořené obsahy mezi různými mapami. Jedním z případů použití tohoto režimu je situace, kdy si uživatel vytvoří mapu místnosti, do které následně přidá obsah. Pokud se následně změní rozmístění předmětů v místnosti, je možné, že se zařízení nebude schopné lokalizovat vůči dříve vytvořené mapě. Uživatel si tak bude muset vytvořit novou mapu upravené místnosti. Aby však nebylo nutné vytvářet každý obsah znovu, je možné je zkopírovat ze staré mapy do nové. Uživatel si nejprve zvolí mezi kterými mapami chce vybraný obsah překopírovat. Následně je nutné obě mapy mezi sebou zarovnat tak, aby poloha a orientace jednotlivých virtuálních objektů byla správná ve fyzickém prostoru.

Toho lze docílit dvěma způsoby zarovnání: automatickým nebo manuálním.

Pokud v místnosti nedošlo k velkým změnám a obě mapy jsou si tak dostatečně podobné, je možné, že se zařízení bude schopné lokalizovat i vůči staré mapě. Cílem automatického zarovnání je tedy lokalizovat zařízení vůči oběma vytvořeným mapám. Pokud je zarovnání úspěšné, pak je pro každý objekt v obsahu přepočítána jeho relativní pozice a orientace vůči nové mapě tak, aby se zobrazoval na stejném místě ve fyzickém prostoru. Pokud je automatické zarovnání neúspěšné, může uživatel mapy zarovnat manuálně. V tom případě může interagovat se starou mapou obdobně jako s kterýmkoliv jiným virtuálním objektem. Mapu tedy může posouvat a otáčet pomocí tlačítek na uživatelském rozhraní.

Ve chvíli, kdy je uživatel spokojený se zarovnáním obou map, je v následujícím kroce vyzván k vytvoření nového obsahu. K němu dochází podobným způsobem popsaným v sekci 4.5.1. Uživatel tedy musí zadat unikátní název obsahu a může si uložit vygenerovaný QR kód pro jednodušší načtení v ostatních režimech. V databázi je vytvořen nový dokument a do něj jsou zapsány údaje o jednotlivých objektech nacházejících se v obsahu. Při kopírování obsahu nedochází ke smazání původního obsahu. Uživateli tedy zůstane přístup do obsahů v obou mapách.

Výše zmíněnou funkcionalitu implementuje `ContentCopyingManager`. Ten v sobě obsahuje i jednotlivé metody pro načítání obou map a kopírovaného obsahu nebo pro manuální zarovnání obsahů posunem a otáčením.

4.9 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní aplikace spravuje `UIManager`. Jeho úlohou je primárně delegovat práci ostatním manažerům v závislosti na tom, v jakém stavu se aplikace právě nachází. Jak již bylo zmíněno v sekci 4.3, `StateManager` definuje pět stavů, ve kterých se aplikace může nacházet. Pro každý z těchto stavů byl vytvořen vlastní manažer uživatelského rozhraní. Jmenovitě se tedy jedná o následující manažery:

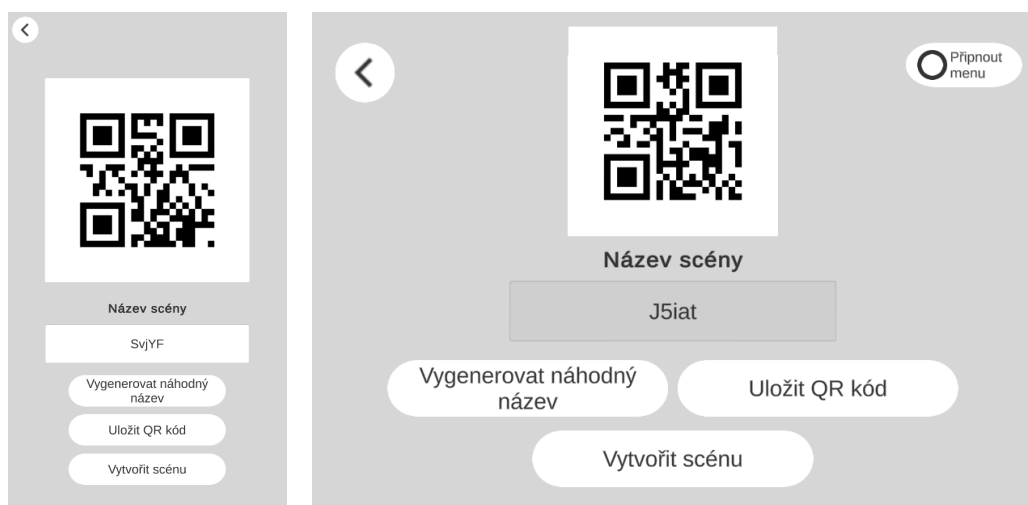
- `MainMenuUIManager` (spravuje hlavní menu)
- `MapEditingUIManager` (spravuje režim pro úpravu obsahu)
- `MapViewingUIManager` (spravuje režim pro prohlížení obsahu)
- `ContentCopyingUIManager` (spravuje režim pro kopírování obsahu)
- `QRCodeReadingUIManager` (spravuje skenování QR kódu)

Dále se tato sekce bude zabývat rozdíly v implementaci uživatelského rozhraní pro mobilní verzi aplikace a verzi pro brýle nReal. Z funkčního hlediska jsou až na výjimky obě verze identické, je v nich tedy možné provádět stejné operace.

Prvním rozdílem je umístění jednotlivých elementů. U mobilní verze aplikace se elementy uživatelského rozhraní (tlačítka, textová pole, obrázky apod.) vykreslují jako dvourozměrné objekty přímo na displej zařízení. Uživatel tedy na displeji vidí

jak fyzický prostor s virtuálními objekty, tak i samotné uživatelské prostředí, s kterým může interagovat. V případě verze pro brýle nReal se stále jedná o dvourozměrné objekty, ty jsou však vykreslovány do trojrozměrného prostoru. Z tohoto důvodu má uživatel možnost si uživatelské rozhraní připnout nebo odepnout. Pokud je rozhraní připnuté, chová se podobně jako u mobilního zařízení - rozhraní je vykreslováno jako obrazovka mezi uživatelem a fyzickým prostorem s virtuálními objekty. V případě, že je rozhraní odepnuté, chová se jako ostatní virtuální objekty v prostoru. Jednoduše řečeno, lze ho vnímat jako ovládací panel, ke kterému může uživatel přijít a interagovat s ním. Ve verzi pro brýle nReal je také možné si uživatelské rozhraní zcela vypnout pro případ, že by si uživatel chtěl lépe prohlédnout vykreslený obsah.

Druhým rozdílem jsou rozměry uživatelského rozhraní. U mobilní verze je rozhraní implementováno pro orientaci na výšku, v případě verze pro brýle nReal je rozhraní orientováno na šířku. Z tohoto důvodu je především umístění některých elementů odlišné tak, aby se vykreslovaly správně v rámci vyhrazeného prostoru. Ve verzi pro brýle jsou jednotlivé elementy zpravidla větší, jelikož interakce pomocí laserového ukazovátka je náročnější a citlivější, než interakce dotykem prstu. Větší elementy také usnadňují jejich viditelnost a čitelnost. Rozdíly v umístění elementů je možné vidět na obrázku 4.15.



Obrázek 4.15: Rozdíly v umístění elementů (vlevo mobilní verze, vpravo verze pro brýle nReal)

4.10 Vykreslování na různých platformách

Vykreslování na mobilních zařízeních a brýlích Nreal Light vyžaduje použití odlišných knihoven. Hlavním rozdílem jsou knihovny, které spravují kameru zařízení. Zatímco u mobilní verze je za správu odpovědná knihovna ARFoundation, u brýlí kameru spravuje plugin přímo od společnosti Nreal. Další odlišnosti spočívají v uži-

vatelském rozhraní mezi oběma platformami (viz předchozí sekce 4.9). Z těchto důvodů jsou obě verze implementovány odděleně ve svých vlastních scénách¹¹, ačkoliv je funkcionality v obou verzích až na výjimky totožná. Tato implementace zabraňuje potenciálním kolizím mezi knihovnami. Informaci o aktuálně používané platformě si v sobě uchovává `DataManager` v proměnné typu `boolean` `usingNreal`.

¹¹Zde je myšlena scéna v enginu Unity, nikoliv virtuální obsah (v aplikaci též nazývaný jako scéna).

5 Testování

Následující kapitola se bude zabývat uživatelským testováním Lo-Fi prototypu popsaném v sekci 3.5 a výsledné aplikace pro správu expozice, jejíž implementace byla popsána v předchozí kapitole. Jak již bylo uvedeno v sekci 1.2, cílovou skupinou jsou osoby v produktivním věku od 18 do 65 let, u kterých se nepředpokládá znalost technologií rozšířené reality.

5.1 Cíle testování

V následujících bodech budou uvedeny cíle testování. Jedná se o soubor informací, které by měly být pomocí uživatelského testování zjištěny.

1. Prvním cílem testování je zjistit, jestli je uživatel schopen pro vytvořené SLAM modely vytvářet nový virtuální obsah a přidávat do něj virtuální objekty.
2. Virtuální objekty je možné libovolně přidávat, mazat a upravovat. Je nutné zjistit, jestli uživatel pochopí, jak tyto akce provádět. Jelikož se způsob interakce na různých zařízeních liší, je nutné, aby byl uživatel schopen provádět stejné akce nezávisle na zvoleném zařízení.
3. Aplikace umožňuje sdílení obsahu s více uživateli. Zatímco jeden uživatel upravuje mapu, ostatní mohou sledovat jeho úpravy v reálném čase. Je tedy důležité zjistit, jestli uživatel tento mechanismus pochopí a bude jej umět používat.
4. Posledním cílem je zjistit, jestli uživatel dokáže zkopírovat obsah mezi dvěma mapami.

5.2 Podmínky testování

Testování Lo-Fi prototypu probíhalo především v domácím prostředí. Jelikož byl prototyp papírový (viz sekce 3.5), nebylo třeba provádět testování v prostředí muzea. Výhodou této volby byla lepší časová dostupnost participantů a také větší klid na samotné testování. Pro simulaci odezvy prototypu na vstup od participanta byly využity techniky Wizard of Oz, kdy například přechody mezi jednotlivými obrazovkami (kartičkami) prováděl člověk. Každému participantovi byl prototyp připraven na stůl a participant byl požádán, aby postupně prošel jednotlivé scénáře popsané v sekci 5.4.2.

Výsledná aplikace byla testována v prostorách Národního muzea v Praze. Pro testovací účely byl vybrán tzv. ptačí ostrov, který byl součástí expozice o dobytí vzduchu. Tato expozice byla vybrána především kvůli své barevné a kontrastní roz-

manitosti a také konstantní a zdánlivě dostačující intenzitě osvětlení¹. Před testováním byly vytvořeny dvě mapy ostrova, jedna pro testování mobilní verze aplikace, druhá pro testování verze pro brýle Nreal. Veškeré scénáře, jako například tvorba obsahu nebo umisťování objektů, byly prováděny v rámci těchto vytvořených map. Participant byl požádán, aby scénáře popsané v sekci 5.6.2 procházel ve stanoveném pořadí a postupně tak otestoval aplikaci na obou zařízeních. Všechna testování proběhla po domluvě s participanty během jednoho dne.

5.3 Struktura testování

Každé testování bylo rozděleno do čtyř částí. První částí byl tzv. ice breaking, ve kterém byl participant uvítán. V následující části pre-testu byly participantovi uvedeny základní informace o testování, také se v této části seznámil s jednotlivými scénáři. Participant byl požádán, aby přemýšlel nahlas a také nahlas říkal, co se v dané chvíli snaží dělat. V části testování prototypu participant procházel jednotlivé testovací scénáře krok po kroku. Průběh testování byl zaznamenán písemně, především pak jednotlivé problémy, které při testování nastaly. Po testování následovala část post-testu, v níž byl participant dotázán na své dojmy z testování a zdali má případné otázky ohledně testování, prototypu či aplikace. Celková délka testování se pohybovala mezi 30 a 60 minutami.

5.4 Testování Lo-Fi prototypu - první iterace

5.4.1 Popis participantů

Participant 1

Participantem je muž ve věku mezi 31 a 45 lety. Participant pracuje jako vývojář počítačových her, aktivně využívá moderní technologie a také se o ně zajímá. S rozšířenou realitou se již setkal, jako příklad uvedl mobilní hru Pokémon GO. V posledním roce navštívil muzeum jednou až třikrát.

Participant 2

Participantem je muž ve věku 46 let a více. Participant pracuje v automobilovém průmyslu, aktivně využívá moderní technologie, ale nezajímá se o ně. Participant se s rozšířenou realitou ještě nesetkal, a proto neuvedl ani žádný příklad. V posledním roce muzeum nenavštívil.

Participant 3

Participantkou je žena ve věku mezi 18 a 30 lety. Participantka je studentkou

¹Intenzita osvětlení se během testování nakonec ukázala jako nedostačující, viz sekce 5.6.4.

vysoké školy, na částečný úvazek pracuje v oblasti personalistiky a lidských zdrojů. Participantka aktivně využívá moderní technologie a také se o ně aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se setkala například ve hře Pokémon GO nebo v adventním kalendáři IKEA. V posledním roce muzeum nenavštívila.

5.4.2 Testovací scénáře

Scénář 1 - Vytvoření nového virtuálního obsahu

Participant si vytvoří dva nové virtuální obsahy, každý do jiné mapy. Název prvního obsahu si participant určí podle sebe, druhý název si vygeneruje náhodně. K obsahu, jehož název byl vygenerován náhodně, si participant uloží i vygenerovaný QR kód. Do každého virtuálního obsahu poté participant přidá jeden virtuální objekt.

Kroky:

1. Vytvořte si nový virtuální obsah. Zadejte libovolný název obsahu.
2. Po vytvoření obsahu přidejte libovolný virtuální objekt.
3. Vytvořte další virtuální obsah, tentokrát do jiné mapy. Název obsahu vygenerujte náhodně. Uložte si vygenerovaný QR kód.
4. Po vytvoření obsahu přidejte libovolný virtuální objekt, ne však ten stejný jako v kroce 2.

Scénář 2 - Úprava virtuálního obsahu

Po vytvoření virtuálních obsahů si participant jeden z obsahů zvolí a provede v něm úpravy. Pokud bude mít k dispozici QR kód, bude vyzván, aby obsah s jeho pomocí načtl. Poté posune a otočí virtuální objekt vytvořený ve scénáři 1 dle stanovených instrukcí².

Kroky:

1. Načtete si libovolný virtuální obsah vytvořený ve scénáři 1. Pokud máte k dispozici QR kód, načtete obsah pomocí něj.
2. Posuňte a otočte virtuální objekt, který se v obsahu nachází dle stanovených instrukcí.

Scénář 3 - Sdílení virtuálního obsahu

V tomto scénáři bude participant pomáhat jinému uživateli s úpravou virtuálního obsahu. Načte si stejný obsah jako druhý uživatel a pomůže mu s umístěním

²Umístění a orientace objektů se bude lišit v závislosti na prostředí, ve kterém bude testování probíhat.

virtuálního objektu na stanovené místo.

Kroky:

1. Jiný uživatel právě upravuje jeden z virtuálních obsahů, který jste vytvořil(a) ve scénáři 1. Načtěte si tento obsah a pomozte mu s umístěním virtuálního objektu na stanovené místo.

Scénář 4 - Prohlížení vytvořených virtuálních obsahů

V posledním scénáři si participant načte oba vytvořené virtuální obsahy zároveň a ověří si, že jsou virtuální objekty správně umístěné. Každý obsah načte jiným způsobem - jeden ze seznamu a druhý pomocí QR kódu.

Kroky:

1. Načtěte si oba vytvořené virtuální obsahy zároveň a ověřte, že jsou virtuální objekty správně umístěné. Každý obsah načtete jiným způsobem, jeden ze seznamu a druhý pomocí QR kódu.

5.4.3 Průběh testování**Participant 1**

Na začátku prvního scénáře byl participant zmaten, když po kliknutí na tlačítko *Vytvořit nový obsah* nemohl najít místo, kam zadat název nového obsahu. Místo toho byl vyzván, aby si vybral mapu, do níž bude obsah přidán. Až poté mohl zadat jeho název. Participant očekával, že pořadí bude opačné. Po vytvoření virtuálního obsahu se participant pozastavil nad seznamem objektů, které mohl přidat. Nevěděl, jestli jsou virtuální objekty tématicky laděné (například podle expozice), nebo jestli se jedná o výčet všech možných objektů, které je možné přidat. Také mu chybělo oznámení o přidání virtuálního objektu. Ve druhém scénáři klikl participant na tlačítko *Prohlížet obsah* místo *Upravit existující obsah*. Dostal se tak do režimu pro prohlížení obsahu, ve kterém není možné obsah upravovat. Také byl zmaten pojmenováním některých tlačítek, zcela nerozuměl termínům obsah nebo objekt. Očekával by jiné termíny, například scéna či model. Ze zmíněných důvodů participant tento scénář nedokončil. Ve třetím scénáři participant nevěděl, jak pomoci jinému uživateli s úpravou jeho obsahu. Zkusil si načíst obsah v režimu úpravy existujícího obsahu. Poté však zjistil, že je obsah upravován jiným uživatelem. Z tohoto důvodu tento scénář nedokončil. Poslední scénář prošel participant bez problémů.

Participant 2

Obdobně jako participant 1 ani druhý participant nemohl zprvu najít místo, kam zadat název obsahu. Po vytvoření obsahu participant úspěšně přidal virtuální

objekty, očekával však oznámení o jejich přidání. Ve druhém scénáři participant nejprve přešel do režimu prohlížení obsahu. Jelikož však nenašel způsob, jak obsah upravit, vrátil se zpět do hlavního menu a klikl na tlačítko *Upravit existující obsah*. Obsah poté úspěšně načetl pomocí QR kódu. Při úpravě virtuálního objektu participant očekával, že se směr posunu bude řídit participantovou orientací, ne orientací samotného objektu. Proto se například stalo, že participant chtěl posunout objekt dopředu, ale ten se posunul dozadu. Pomocné šipky, které indikovaly orientaci objektu participantovi zprvu nepomohly. Nakonec se však participant zorientoval a objekt správně umístil. Třetí a čtvrtý scénář prošel participant bez problémů.

Participant 3

První scénář prošla participantka bez problémů. Ve druhém scénáři měla participantka problém s posouváním virtuálního objektu, podobně jako v případě participanta 2 čekala, že posun bude závislý na její orientaci. Poté si však všimla pomocných šipek na objektu a pomocí nich ho správně umístila. Ve třetím scénáři participantka nevěděla, jak druhému uživateli pomoci s umístěním objektu. Zkusila si nejprve obsah načíst v režimu pro prohlížení, zde však hledala nějakou možnost, jak s objektem hýbat nebo otáčet. Poté zkusila načíst obsah v režimu pro úpravu, což se jí nepodařilo, protože byl obsah upravován druhým uživatelem. Z těchto důvodů scénář 3 nedokončila. Poslední scénář prošla participantka bez problémů.

5.4.4 Nálezy a řešení

Nález 1 - Nejasná terminologie

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participant 1 a 2 (všechny scénáře)

Popis problému: Participant 1 byli zmateni nejasnou terminologií, například termíny obsah či objekt. V režimu pro prohlížení obsahu byli zmateni tlačítkem *Přidat obsah*.

Řešení: Nahradiť termíny mapa, obsah a objekt za místnost, scéna a exponát. Tlačítko *Přidat obsah* přejmenovat na *Načíst scénu*.

Nález 2 - Nejasný účel jednotlivých režimů

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participant 1, 2 a 3 (scénáře 2 - 4)

Popis problému: Participant 1 si pletli režimy pro úpravu obsahu a prohlížení obsahu.

Řešení: Před přechodem do jednotlivých režimů zobrazovat stručné informace o daném režimu, jeho funkcích a účelu.

Nález 3 - Směr posunu se neřídí orientací uživatele

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 2 a 3 (scénář 2, krok 2)

Popis problému: Participanti měli potíže s posouváním objektu, protože směr posunu byl závislý na orientaci virtuálního objektu a nikoliv na participantově orientaci.

Řešení: Při přidávání objektu natočit objekt tak, aby jeho orientace byla identická s orientací uživatele.

Nález 4 - Po kliknutí na tlačítko *Vytvořit nový obsah* není možné zadat název obsahu

Priorita: Nízká

Výskyt: Participanti 1 a 2 (scénář 1, kroky 1 a 3)

Popis problému: Participanti byli zmatení opačným pořadím zadávání nejprve mapy a až poté názvu obsahu. Očekávali, že název obsahu se bude zadávat první.

Řešení: Z funkčního hlediska je nutné, aby uživatel nejprve vybral mapu a poté zadal název obsahu. Důvodem je nutnost kontroly duplicitních názvů obsahů v rámci vybrané mapy. Řešením může být informování uživatele o nutnosti nejprve zadat mapu a poté teprve názvu obsahu.

Nález 5 - Chybějící oznámení o přidání objektu

Priorita: Nízká

Výskyt: Participanti 1 a 2 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Participanti očekávali, že se objeví oznámení o přidání virtuálního objektu.

Řešení: Přidat oznámení o přidání objektu.

5.5 Testování Lo-Fi prototypu - druhá iterace

5.5.1 Popis participantů

Participant 1

Participantkou je žena ve věku mezi 18 a 30 lety. Participantka je studentkou vysoké školy, v nynější době není zaměstnaná. Participantka uvedla, že aktivně využívá moderní technologie, ale nezajímá se o ně. S rozšířenou realitou se nesešla, a proto neuvedla ani konkrétní případ. V posledním roce muzeum nenavštívila.

Participant 2

Participantem je muž ve věku mezi 18 a 30 lety. Participant je studentem vysoké

školy, na částečný úvazek pracuje jako programátor. Participant aktivně využívá moderní technologie a také se o ně aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se již setkal, jako příklad uvedl hru Pokémon GO, uvedl také aplikace v muzeích či výstavištích, jejichž název však neznal. V posledním roce navštívil muzeum jednou až třikrát.

5.5.2 Průběh testování

Pro testování druhé iterace Lo-Fi prototypu byly použity stejné scénáře jako při prvním testování (viz sekce 5.4.2). Vzhledem k nálezům z prvního testování (viz sekce 5.4.4) však byly nahrazeny termíny mapa, obsah a objekt za místnost, scéna a exponát. Tyto termíny budou pro konzistenci použity i v následujících sekcích. Snímek z testování je možné vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Snímek z testování druhé iterace Lo-Fi prototypu

Participant 1

V prvním scénáři participantka úspěšně vytvořila nové scény a uložila si QR kód. Nepřišla ale na to, jak do scény přidat exponáty. Po dokončení testování participantka uvedla, že si špatně přečetla jednu ze stavových kartiček, na které bylo uvedeno, jak postupovat dále pro přidání exponátu do scény. Kvůli zmíněnému problému scénář nedokončila. V druhém scénáři participantka zvolila možnost *Prohlížet scény* v hlavním menu. Byla zmatena tím, že v tomto režimu není možné přidávat exponáty a

ani je nijak upravovat. Po návratu do hlavního menu zkusila zvolit možnost *Upravit scénu* a nakonec se jí úspěšně povedlo exponáty přidat. Třetí a čtvrtý scénář prošla participantka bez problémů.

Participant 2

V prvním scénáři se participant pozastavil nad tím, proč je při výběru místnosti upozorňován na nutnost nejprve zadat místnost a až poté název scény. Pokračoval však dále a scénu úspěšně vytvořil. Pro přidání exponátu participant správně zvolil možnost *Upravit scénu* v hlavním menu. Při načítání scény pomocí QR kódu byl však zmaten textem *Skenuji QR kód...*. Myslel si, že se jeho QR kód již skenuje. Po chvíli čekání se rozhodl svůj QR kód přiložit, čímž se mu scéna načetla. Exponáty poté úspěšně přidal do scény. V druhém scénáři participanta překvapilo, že se při otáčení exponátu nemění i směr posunu. Neměl však problém s jeho správným umístěním. Třetí scénář participant nedokončil. Správně zvolil možnost *Prohlížet scény* v hlavním menu a načel si správnou scénu, nevěděl ale, jak pomoci jinému uživateli s umístěním exponátu na správné místo. Poslední scénář prošel participant bez problémů.

5.5.3 Nálezy a řešení

Nález 1 - Nejasný účel jednotlivých režimů

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participant 1 (scénáře 2 - 4)

Popis problému: Participantka si pletla režimy pro úpravu scény a prohlížení scén.

Řešení: Jedná se o nález, který se objevil již při testování prvního prototypu. Při rozhovoru s participantkou po dokončení testování bylo zjištěno, že by problémem mohla být zavádějící formulace scénáře 2, která nabádala k tomu, aby participantka zvolila možnost *Prohlížet scény* v hlavním menu. Z tohoto důvodu by bylo vhodné scénář přepsat.

Nález 2 - Přehlednutelné instrukce o úpravě scény po jejím vytvoření

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participant 1 (scénář 1, kroky 1 a 3)

Popis problému: Participantka přehlédla instrukce obsahující informace o tom, jak do scény přidat exponáty.

Řešení: Zvýraznit text tučně.

Nález 3 - Nejasný způsob, jakým má uživatel pomoci jinému uživateli s umístěním exponátu

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participant 2 (scénář 3, krok 1)

Popis problému: Participant nevěděl, jak pomoci jinému uživateli s umístěním exponátu.

Řešení: Cílem scénáře 3, kterého se náleží týkat, bylo otestovat, zdali bude participantům jasný způsob, jakým je možné si prohlédnout scény, které upravuje jiný uživatel. V rámci testování však pravděpodobně nebyl zvolen vhodný způsob, jakým tuto funkcionality otestovat. Papírový prototyp totiž nemusí být dostačující k tomu, aby si participant představili situaci, v níž se nachází. Z tohoto důvodu by bylo pravděpodobně vhodné scénář přepsat.

Nález 4 - Nejasný stav při načítání QR kódu

Priorita: Nízká

Výskyt: Participant 2 (scénář 2, krok 1)

Popis problému: Participant si nebyl jistý, jestli je QR kód již načítán, protože se při načítání okamžitě zobrazil text *Skenuji QR kód...*

Řešení: Změnit text, například na *Naskenujte QR kód...*

5.6 Testování výsledné aplikace - první iterace

5.6.1 Popis participantů

Participant 1

Participantem je muž ve věku 18 až 30 let. Participant je studentem vysoké školy v oboru počítačová grafika a hry. Participant uvedl, že využívá moderní technologie, o které se také aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se však ještě nesetkal. Muzeum navštívil v posledním roce jednou až třikrát.

Participant 2

Participantem je muž ve věku mezi 31 a 45 lety. Participantova práce spadá do oboru virtuální a rozšířené reality a počítačových her. Moderní technologie tedy využívá a také se o ně aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se setkává pravidelně v rámci své práce. V posledním roce navštívil muzeum jednou až třikrát.

Participant 3

Participantkou je žena ve věku 18 až 30 let. Participantka je studentkou vysoké školy, současně pracuje v oboru virtuální reality³. Participantka uvedla, že využívá moderní technologie, o něž se aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se setkala především v rámci své práce a výzkumu. Setkala se tak už s rozšířenými realitními aplikacemi

³Participantka je postgraduální studentkou, v rámci svého studia se podílí na výzkumné činnosti.

jak na mobilních zařízeních, tak i na brýlích. V posledním roce navštívila muzeum jednou až třikrát.

Participant 4

Participantem je muž ve věku mezi 18 a 30 lety. Participant je studentem vysoké školy a zároveň také pracuje jako backend developer. Participant využívá moderní technologie, o které se i aktivně zajímá. S rozšířenou realitou se setkal především ve škole. Muzeum navštívil v posledním roce jednou až třikrát.

Participant 5

Participant spadá do věkové kategorie 18 až 30 let. Participant je studentem vysoké školy v oboru softwarového inženýrství. Participant využívá moderní technologie a aktivně se o ně zajímá. S rozšířenou realitou se setkal během brigády v podobě AR brýlí, které však nakonec nedostal možnost si vyzkoušet. V posledním roce participant muzeum nenavštívil.

5.6.2 Testovací scénáře

Scénáře použité pro testování výsledné aplikace vycházejí ze scénářů použitých pro testování Lo-Fi prototypu (viz sekce 5.4.2). Vzhledem k nálezům z testování Lo-Fi prototypu (sekce 5.4.4 a 5.5.3) byla upravena terminologie a také upraveny scénáře 2 a 3. Pro úplnost a lepší referenci v sekci o nálezech budou testovací scénáře s jednotlivými kroky popsány níže.

Scénář 1 - Tvorba nové scény

Participant si vytvoří novou scénu pomocí mobilního zařízení. Scénu přidá do místnosti s názvem *PtaciOstrovMobil* a pojmenuje ji *Tucnaci*. Do scény přidá dva tučňáky a umístí je dle stanovených instrukcí. Poté si vytvoří druhou scénu pomocí brýlí. Scénu přidá do místnosti s názvem *PtaciOstrovBryle* a vygeneruje jí náhodný název. Do scény poté přidá ledního medvěda a umístí ho dle stanovených instrukcí.

Kroky:

1. Vytvořte si novou scénu pomocí mobilního zařízení. Scénu přidejte do místnosti s názvem *PtaciOstrovMobil* a pojmenujte ji *Tucnaci*.
2. Do scény přidejte dva tučňáky a umístěte je dle stanovených instrukcí.
3. Vytvořte si druhou scénu, avšak pomocí brýlí. Scénu přidejte do místnosti s názvem *PtaciOstrovBryle* a vygeneruje jí náhodný název.
4. Do scény přidejte ledního medvěda a umístěte ho dle stanovených instrukcí.

Scénář 2 - Spolupráce dvou uživatelů

V rámci tohoto scénáře bude participant spolupracovat s druhým uživatelem.

Ten bude upravovat scénu *Tucnaci* vytvořenou v prvním scénáři. Přidá do ní dalšího tučňáka a bude se ho snažit umístit na jím vybrané místo. Participantovým úkolem bude si scénu načíst, navigovat druhého uživatele a pomoci mu tučňáka správně umístit.

Kroky:

1. Jiný uživatel právě upravuje Vámi vytvořenou scénu *Tucnaci*. Rozhodl se do ní přidat dalšího tučňáka. Prohlédněte si tuto scénu a sledujte jeho úpravy.
2. Pokuste se ho navigovat a pomoci mu umístit tučňáka na jím vybrané místo.

Scénář 3 - Prohlížení scén

V tomto scénáři bude participantovým úkolem prohlédnout si obě vytvořené scény zároveň a ověřit si, že se exponáty zobrazují na správném místě.

Kroky:

1. Prohlédněte si obě vytvořené scény zároveň.
2. Vizuálně ověřte, že se exponáty zobrazují tam, kam byly umístěny.

Scénář 4 - Kopírování scény

Cílem tohoto scénáře bude zkopírovat scénu *Tucnaci* z místnosti *PtaciOstrovMobil* do místnosti *PtaciOstrovBryle* tak, aby se překopírované exponáty zobrazily na stejném místě i v druhé místnosti.

Kroky:

1. Zkopírujte scénu *Tucnaci* z místnosti *PtaciOstrovMobil* do místnosti *PtaciOstrovBryle* tak, aby se překopírované exponáty zobrazily na stejném místě i v druhé místnosti.

5.6.3 Průběh testování**Participant 1**

V prvním scénáři si participant bez problémů vytvořil novou scénu pomocí mobilního zařízení. Poté, když si chtěl scénu upravit, zjistil, že se scéna v seznamu nenachází. Z toho byl participant zmaten. Nakonec však zjistil, že musí nejprve vybrat místnost. Po vybrání místnosti se scéna v seznamu objevila. Při přidávání tučňáka participant nevěděl, kam bude tučňák umístěn. Neměl však problém si ho posléze přesunout podle potřeby. Při posunu pomocí tlačítek měl participant dojem, že posun dopředu a dozadu je prohozený.

Vytvoření scény v brýlích participantovi taktéž nečinilo potíže. Problémy ale nastaly při úpravě scény. Participantovi se nedařilo zkalibrovat laserové ukazovátko. Z tohoto důvodu měl velký problém správně klikat na tlačítka, dokonce měl pocit, že při klikání na některá tlačítka se nic neděje. Při klikání na tlačítko zpět se také omylem vrátil až do hlavního menu, když tlačítko zmáčkl vícekrát za sebou.

Scénář 2 prošel participant bez problémů. Při průchodu třetím scénářem participant nejprve správně zvolil možnost *Prohlížet scény* v hlavním menu, nenašel ale způsob, jak si obě vytvořené scény prohlédnout. Zkusil se vrátit do hlavního menu a vybrat možnost *Upravit scénu*, tam ale také nenašel způsob, jak načíst obě scény zároveň. Po chvíli bádání se mu nakonec podařilo načíst obě scény v režimu prohlížení scén. Důvodem byl matoucí význam tlačítka *Přidat obsah*.

Při průchodu posledním scénářem zmátlo participanta pořadí místností, které si vybírá. Domníval se, že místnost se scénou, která se má zkopírovat, se vybírají první a až poté se má vybrat místnost, do které bude scéna zkopírována. Musel si znovu přečíst jednotlivé popisky, ale nakonec načetl místnosti ve správném pořadí. Participant uvedl, že by řešením mohl být výběr obou místností v jednom kroce. Automatické zarovnání místností participantovi nepomohlo, proto si místnost zarovnal manuálně a scénu úspěšně zkopíroval.

Participantův celkový dojem z testování byl dobrý, participant vyzdvihl především zážitek z brýlí, kde na rozdíl od mobilního zařízení mohl vidět celou scénu a nikoliv jen její část. Jako frustrující označil především selhávající kalibraci laserového ukazovátko, také poukázal na některé problémy v uživatelském rozhraní jako například prohozené směry dopředu a dozadu při posunu nebo možnost se jednoduše omylem vrátit do hlavního menu.

Participant 2

V prvním scénáři si participant nejprve bez problémů vytvořil scénu v mobilním zařízení. Když si ji posléze chtěl načíst v režimu pro úpravu, zjistil, že se mu v seznamu nezobrazuje. Aby se mu scéna zobrazila, musel si seznam rozkliknout podruhé. S přidáním exponátu a jeho úpravou v mobilním zařízení participant problémy neměl. Pro posun a otáčení používal drag and drop pomocí prstu, pro jemnější úpravy využil tlačítek. Při posunu pomocí tlačítek měl podobně jako participant 1 dojem, že je posun dopředu a dozadu obráceně. Také se při klikání na tlačítko zpět omylem vrátil až do hlavního menu a musel si načítat scénu znovu.

Tvorba scény v brýlích participantovi nedělala problém. Pro posun exponátu dopředu či dozadu se pokoušel použít touchpad na ovladači, nic se ale nestalo. Použil proto tlačítka. Při otáčení si participant nebyl jistý, jestli má ukazovátkem pouze zamířit vedle exponátu, nebo s ním táhnout. Podobně jako u mobilního zařízení se při klikání na tlačítko zpět omylem vrátil až do hlavního menu. Při opětovném načítání scény měl poté problém zavřít seznam scén, nakonec ale tento problém vyřešil. Při úpravě ledního medvěda se ho pokusil zmenšit pohybem laseru. Protože se ale nic

nestalo, zmenšil medvěda pomocí tlačítek.

Ve druhém scénáři měl participant potíže s prohlížením scény. Nemohl najít způsob, jak ji v režimu prohlížení scén načíst. Stejně jako u participanta 1 ho zmátlo tlačítko *Přidat obsah*. Nakonec se mu problém podařilo vyřešit a scénu načíst. Po načtení scény však přestala v aplikaci fungovat lokalizace zařízení. Z tohoto důvodu nemohl participant dokončit scénář 2 a ani celkově pokračovat v testování.

Participant měl z testování dobrý pocit, pouze ho mrzelo, že v brýlích přestala fungovat lokalizace zařízení a testování muselo být předčasně ukončeno. Kromě výše popsaných problémů participant zmínil ještě problém s umístěním některých prvků v uživatelském rozhraní. Některé elementy byly příliš vysoko a nebylo možné na ně očima pohodlně zaostřit. Dívání se nahoru bylo z dlouhodobého hlediska unavující pro jeho oči.

Participant 3

První scénář začala participantka úspěšným vytvořením scény na mobilním zařízení. Měla pocit, že na finální stránce s informacemi ohledně dalších režimů je příliš velká mezera mezi nadpisem a tělem textu. Vytvořenou scénu si načetla bez problémů. První problém nastal při otáčení exponátu. Participantka si zprvu nevšimla tlačítka *Otočit* v dolní části obrazovky. Po chvíli bádání toto tlačítko objevila a problém vyřešila. S následným posunem neměla problém. Pro jednodušší orientaci ve scéně si participantka přepínala viditelnost místnosti, nebyla si ale jistá funkcí tlačítka *Přepnout lokalizaci místnosti*. Po kliknutí na něj neviděla žádné změny.

Následně si participantka bez potíží vytvořila scénu v brýlích. Při přidávání exponátu měla potíže kliknout na tlačítko *Přidat exponát*, zkoušela to proto vícekrát. Pro posun používala především tlačítka, umístění exponátu jí ztěžovala nepřesná lokalizace zařízení. Podobně jako participant 2 si nebyla při rotaci jistá, zdali stačí ukázat ve směru rotace, nebo s ukazovátkem táhnout.

Scénář 2 prošla participantka bez problémů, scénu si načetla a pomohla druhému uživateli správně umístit exponát. Ve třetím scénáři si participantka načetla obě vytvořené scény, vzhledem ke zhoršující se lokalizaci ale nedokázala přesně ověřit, jestli se všechny exponáty načetly na správném místě. Přemýšlela také nad funkcí tlačítka *Smazat všechny scény*. Nevěděla, jestli budou scény smazány pouze v aplikaci, nebo i celkově v databázi.

V posledním scénáři zadala participantka místnosti v opačném pořadí. Z tohoto důvodu se jí nenačítaly žádné exponáty, které měla zkopírovat. Byla zmatena, že je nevidí a přemýšlela, jestli se nekopíruje pouze místnost (v podobě mračna bodů). Po chvíli se vrátila zpět a přečetla si popis zkopírování, čímž problém vyřešila a scénu úspěšně zkopírovala.

Celkový dojem participantky z testování byl pozitivní. Vzhledem k nedostatečnému osvětlení expozice a vlivem toho špatné lokalizaci zařízení ale dodala, že by uživatelé, kteří nemají zkušenosti s rozšířenou realitou, mohli být zmateni z toho,

že scéna přeskakuje při snaze zařízení se lokalizovat. Doporučila také barevně odlišit tlačítka *Posunout*, *Otočit* a *Změnit velikost* tak, aby si jich uživatel okamžitě všiml. V brýlích měla také problém zaostřit na některé prvky na okraji obrazovky. Uvítala by například jednodušší kruhové uživatelské rozhraní. Při interakci s exponáty také měla potíže s výběrem některých tlačítek, které se překrývaly s exponáty. Participantce se více líbila verze v brýlích především kvůli přehlednosti a lepší orientaci ve scéně.

Participant 4

První scénář začal participant tvorbou nového scénáře na mobilním zařízení, což provedl bez problémů. Poté si načetl scénu v režimu pro prohlížení, kde však nenašel žádný způsob, jak scénu upravit. Vrátil se proto do hlavního menu, kde vybral možnost *Upravit scénu*. Scéna se mu správně načetla v režimu pro úpravy. Pro interakci s jednotlivými exponáty používal nejprve tlačítka, poté i drag and drop a neměl s umístěním exponátů žádný problém.

Poté si vytvořil novou scénu v brýlích. Zde měl participant problém především s laserovým ukazovátkem, které se špatně kalibrovalo. Také se mu při rozkliknutí seznamu scén napoprvé nezobrazovala jím vytvořená scéna. Tento problém vyřešil rozkliknutím seznamu podruhé. Při přidávání tučňáka do scény měl participant problém s interakcí s posuvníkem, který mu přišel příliš malý. S umístěním ledního medvěda však kromě horší kalibrace ovladače neměl problém.

Při průchodu druhým scénářem narazil shodně jako participant 2 na nefunkční lokalizaci zařízení. Pokoušel se tento problém vyřešit opětovným načtením scény jak v režimu pro úpravu, tak i v režimu pro prohlížení scén. Při tom si všiml, že seznamy scén se někdy nedají zavřít. Kvůli nefunkční lokalizaci tento ani zbylé další scénáře nedokončil.

Participant měl z testování dobrý pocit. Uvedl, že se mu více líbila verze aplikace v brýlích, protože se lépe orientoval v prostoru. Poukázal na některé problémy v uživatelském rozhraní, například na tlačítka, která byla na okraji obrazovky. Tato tlačítka byla špatně viditelná a také se s nimi špatně interagovalo. Všiml si také zvláštního chování tlačítek v případě, že se před nimi nacházel některý z exponátů. Při interakci s exponátem se totiž zároveň stisklo i tlačítko. Také dodal, že mu brýle často padaly z nosu a preferoval by tak jiný design. Participant také souhlasil s pořízením fotky během testování (viz obrázek 5.2).

Participant 5

Participant neměl problém vytvořit si scénu v mobilním zařízení. Po vytvoření ale čekal, že bude automaticky přesunut do režimu pro úpravu scény. Při úpravě scény zprvu nemohl najít způsob, jak s tučňákem rotovat, nevšiml si tlačítka v dolní části displeje. Pro interakci s exponáty používal kombinaci drag and drop a tlačítek na displeji.



Obrázek 5.2: Snímek z testování první iterace výsledné aplikace

Následně si bez potíží vytvořil scénu v brýlích. Při výběru scény ze seznamu se participantovi nenačítala scéna, kterou vytvořil. Vytvořil si proto novou scénu. V režimu pro úpravu mu poté, podobně jako u některých předchozích participantů, přestala fungovat lokalizace zařízení. Participant se pokusil scénu načíst znovu, ale lokalizaci se mu už nepodařilo zprovoznit. Scénář 1 proto nedokončil a scénář 2 přeskočil.

Scénáře 3 a 4 se participant pokusil projít na mobilním zařízení (oproti ostatním participantům, kteří je procházeli na brýlích). S třetím scénářem participant neměl problém, scény si úspěšně načetl a prohlédl. Ve čtvrtém scénáři participant zadal místnosti ve špatném pořadí. Nejprve zadal místnost, jejíž scénář chtěl zkopírovat. Neviděl ale žádné exponáty, vrátil se proto zpět a přečetl si popisek znovu. Poté zadal místnosti ve správném pořadí. S kopírováním scény neměl potíže, některé exponáty mu pouze náhodně problikávaly. Tento problém přisuzoval změně v úhlu pohledu.

Participant měl z testování dobrý pocit, i když ho mrzelo, že nemohl otestovat verzi na brýlích kvůli nefunkční lokalizaci. Kromě již zmíněných problémů neuvedl participant žádné další problémy, na které při testování narazil.

5.6.4 Nálezy a řešení

Nález 1 - Nefunkční nebo nepřesná lokalizace

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 2, 3, 4 a 5 (všechny scénáře)

Popis problému: Především na brýlích Nreal se vyskytly problémy s lokalizací, která byla nepřesná, nebo úplně přestala fungovat.

Řešení: Nepřesná lokalizace může být způsobená více faktory, například nedostatečným osvětlením místnosti, nedostatečným množstvím významných bodů v mapě, nebo i odlišností mezi kamerou použitou pro vytvoření mapy a kamerou použitou při lokalizaci. V tomto případě je nutné vytvořit kvalitnější mapy (viz sekce 4.4.2) a dodržet pravidla pro správnou lokalizaci (viz sekce 4.6.2). Nefunkční lokalizace může být způsobená interní chybou v kódu, popřípadě se může jednat o horší projev nepřesné lokalizace. Také může být důsledkem přehřívání zařízení nebo nízkého stavu baterie. Bude nutné najít příčinu tohoto problému. Podle ní se bude odvíjet i zvolené řešení.

Nález 2 - Obtížná kalibrace laserového ukazovátka

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 1, 3 a 4 (všechny scénáře)

Popis problému: Participanti měli potíže s kalibrací laserového ukazovátka. Vlivem toho měli problém zamířit a klikat na některá tlačítka.

Řešení: Tento problém pravděpodobně nebude možné odstranit. Jedná se totiž o hardwarový problém na straně brýlí, nikoliv samotné aplikace.

Nález 3 - Možnost se omylem vrátit do hlavního menu z režimu pro úpravu nebo prohlížení scén

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 1 a 2 (scénáře 1 - 3)

Popis problému: Participanti se při klikání na tlačítko zpět omylem vraceli do hlavního menu z režimů pro úpravu scény nebo prohlížení scén.

Řešení: Před návratem do hlavního menu zobrazovat dialogové okno.

Nález 4 - Špatná čitelnost a obtížná interakce s elementy uživatelského rozhraní

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 2, 3 a 4 (všechny scénáře)

Popis problému: Některé elementy uživatelského rozhraní (typicky tlačítka), které

se nacházely na hranicích obrazovky, byly špatně čitelné a obtížně se s nimi interagovalo. Tento problém se týkal pouze verze pro brýle Nreal.

Řešení: Posunout tyto elementy blíže ke středu, popřípadě se zamyslet nad lepším návrhem uživatelského rozhraní ve verzi pro brýle Nreal.

Nález 5 - Nepostřehnutelná změna tlačítek v režimu pro úpravu scény

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 3 a 5 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Participanti si nevšimli změny tlačítek při výběru exponátu. Kvůli tomu měli například problém s posouváním nebo rotací s exponáty.

Řešení: Odlišit tlačítka, mezi kterými dochází ke změně (například barvou).

Nález 6 - Matoucí význam tlačítka *Přidat obsah*

Priorita: Vysoká

Výskyt: Participanti 1 a 2 (scénář 3, krok 1)

Popis problému: V režimu pro prohlížení scén si participanti nebyli jistí funkcí tlačítka *Přidat obsah*. Kvůli tomu měli problém si načítat scény.

Řešení: Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že pro testování prvních dvou participantů byla použita starší verze aplikace. Tento problém se vyskytoval pouze u brýlí a po instalaci nové verze byl tento problém vyřešen. Tlačítko *Přidat obsah* bylo přejmenováno na *Načíst scénu*. S významem tohoto tlačítka neměli následující participanti problém.

Nález 7 - Obrácené pořadí zadávaných místností v režimu kopírování scény

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 1, 3 a 5 (scénář 4, krok 1)

Popis problému: Při kopírování scény participanti zadávali místnosti ve špatném pořadí.

Řešení: Je nutné, aby byla nejprve zadána místnost, do které bude scéna zkopírována a až poté místnost a scéna, která bude zkopírována. Proto bude upraven popis tak, aby bylo zřejmé, jakou místnost vybrat v daném kroce.

Nález 8 - Pro zobrazení scény v seznamu se musí seznam rozkliknout dvakrát

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 2 a 4 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Seznam scén se participantům nenačetl na první pokus. Museli

ho nejprve zavřít a poté rozkliknout znovu. Tento problém se týkal pouze verze pro brýle Nreal.

Řešení: Opravit tuto chybu tak, aby se seznam načetl napoprvé.

Nález 9 - Seznam scén nelze zavřít

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 2 a 4 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Seznam scén nebylo možné zavřít. Tento problém se týkal pouze verze pro brýle Nreal.

Řešení: Opravit tuto chybu tak, aby seznam scén bylo možné zavřít.

Nález 10 - Nejasná rotace

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 2 a 3 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Participanti nevěděli, jestli mají pro rotaci s exponátem táhnout laserem, nebo ukázat ve směru rotace. Tento problém se týkal pouze verze pro brýle Nreal.

Řešení: V aplikaci se zobrazuje oznámení s instrukcemi, které je pravděpodobně snadno přehledné. Řešením je toto oznámení lépe zviditelnit.

Nález 11 - Překrývání exponátů s tlačítka

Priorita: Střední

Výskyt: Participanti 3 a 4 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Při překryvu exponátu s tlačítkem dochází při kliknutí na tlačítko k interakci s exponátem a naopak.

Řešení: Opravit tuto chybu tak, aby docházelo k interakci pouze s jedním z těchto objektů.

Nález 12 - Prohozený směr dopředu a dozadu při posunu

Priorita: Nízká

Výskyt: Participanti 1 a 2 (scénář 1, kroky 2 a 4)

Popis problému: Participantům přišel směr posunu dopředu a dozadu prohozený.

Řešení: Prohodit směr posunu.

5.7 Testování výsledné aplikace - druhá iterace

Po testování první iterace výsledné aplikace proběhlo i testování druhé iterace, které však už nemělo pevně danou strukturu a formu jako to první. Jeho účelem bylo otestovat aplikaci v expozici s lepšími světelnými podmínkami než jaké byly v ptačím ostrově. Proto byla zvolena expozice ZeMě, v níž bylo možné intenzitu osvětlení nastavit. Oproti první iteraci proběhlo testování mimo otevírací dobu muzea, tedy bez přítomnosti návštěvníků. Testování se zúčastnili dva pracovníci Národního muzea a také vedoucí této práce. Ze subjektivního hlediska je možné říci, že přestože kvalita vytvořeného SLAM modelu byla nižší než v případě SLAM modelu ptačího ostrova, lepší a stabilnější světelné podmínky v expozici ZeMě pozitivně přispěly k přesnější lokalizaci zařízení ve vytvořeném SLAM modelu. Testování proběhlo jak na mobilním zařízení, tak i na brýlích Nreal a v obou případech byla zaznamenána stabilnější lokalizace zařízení. Toto zjištění pouze potvrzuje závislost přesnosti a stability lokalizace na kvalitě osvětlení (viz sekce 4.6.2). Snímek z testování je možné vidět na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Snímek z testování druhé iterace výsledné aplikace

6 Závěr

Výsledkem této práce je funkční prvotní prototyp aplikace pro správu muzejních expozic. Aplikace je schopná vytvářet SLAM modely, do nichž může uživatel přidávat virtuální obsah. Tento obsah je možné sdílet s dalšími uživateli. Také je možné v něm provádět úpravy, které se ostatním uživatelům zobrazí v reálném čase. V neposlední řadě je také možné virtuální obsahy kopírovat a přenášet je tak mezi různými SLAM modely.

Z provedené rešerše v kapitole 2 vyplývá, že technologie pro vytváření SLAM modelů velkých prostor a místností již existují a v mnoha případech jsou, alespoň pro testovací účely, dostupné zdarma. Nicméně, jak již bylo popsáno v kapitole 4, použitelnost těchto technologií závisí na mnoha aspektech od rozmanitosti či pestrosti mapovaného prostředí a kvality osvětlení v něm až po kvalitu kamery zařízení, na kterém bylo mapování provedeno. Každý z těchto aspektů má velký vliv na následnou schopnost zařízení se ve vytvořené mapě lokalizovat a spolehlivě tak zobrazovat virtuální obsah na uživatelem stanoveném místě. Uživatelské testování, jímž se zabývá kapitola 5, toto tvrzení potvrzuje. Zatímco při první iteraci testování u ptačího ostrova, u něhož panovaly spíše horší světelné podmínky, měli téměř všichni účastníci potíže s lokalizací zařízení, v lépe nasvícené expozici ZeMě se tento problém prakticky nevyskytoval. Výsledná aplikace tedy poukazuje na některá z omezení současných technologií. Aplikaci proto v současné době není možné používat v jakékoliv muzejní expozici, ale pouze v těch, ve kterých jsou výše zmíněné podmínky¹ splněny.

Z implementačního hlediska je výsledná aplikace funkční, uživatelské testování však odhalilo poměrně značný prostor pro zlepšení. Ve velké míře by se tato zlepšení dala provést v uživatelském rozhraní, v němž byly některé elementy špatně čitelné či nesrozumitelné. Ve verzi pro brýle Nreal měla většina účastníků potíže s kalibrací laserového ukazovátka, které ztěžovaly či znemožňovaly interakci s uživatelským rozhraním. Veškeré nálezy a k nim navrhovaná řešení jsou popsány v kapitole 5.

Kromě opravy nalezených chyb je v aplikaci prostor i pro implementaci nových funkcionalit. Jak již bylo zmíněno v sekci 4.6.3, virtuální objekty nejsou stahovány ze serveru, i když to bylo původně plánováno. Tato funkcionalita je jedním z bodů, kterým může budoucí vývoj aplikace směřovat.

¹A nejen ony, viz sekce 4.4.2 a 4.6.2.

7 Literatura

- [1] An overview of all Augmented Reality (AR) headsets in 2021/22 [online]. [cit. 13.06.2022]. Dostupné z: <https://vr-expert.com/an-overview-of-all-augmented-reality-ar-headsets-in-2021-22/>.
- [2] ARCore Documentation [online]. [cit. 02.11.2021]. Dostupné z: <https://developers.google.com/ar/develop>.
- [3] ARCore supported devices [online]. [cit. 08.06.2022]. Dostupné z: <https://developers.google.com/ar/devices>.
- [4] ARwayKit Documentation [online]. [cit. 13.12.2021]. Dostupné z: <https://docs.arway.app/>.
- [5] ARwayKit Pricing [online]. [cit. 13.12.2021]. Dostupné z: <https://arway.app/pricing/>.
- [6] Azure Spatial Anchors Documentation [online]. [cit. 14.11.2021]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/spatial-anchors/>.
- [7] Compatibility - Nreal [online]. [cit. 13.06.2022]. Dostupné z: <https://www.nreal.ai/compatibility-list/>.
- [8] Get realtime updates with Cloud Firestore [online]. [cit. 28.09.2022]. Dostupné z: <https://firebase.google.com/docs/firestore/query-data/listen>.
- [9] Immersal Documentation [online]. [cit. 28.10.2021]. Dostupné z: <https://immersal.gitbook.io/>.
- [10] Low-fi prototyping: What, Why and How? [online]. [cit. 30.05.2022]. Dostupné z: <https://blog.prototypr.io/low-fi-prototyping-what-why-and-how-24f77d9f4995>.
- [11] Stardust Documentation [online]. [cit. 28.11.2021]. Dostupné z: <https://neogoma.github.io/stardust-SDK-doc/>.
- [12] What is Firebase? [online]. [cit. 19.06.2022]. Dostupné z: <https://www.educative.io/answers/what-is-firebase>.
- [13] What is NoSQL? [online]. [cit. 19.06.2022]. Dostupné z: <https://www.mongodb.com/nosql-explained>.
- [14] BUTLER, Sydney. What Is Inside-Out Tracking in VR? [online]. [cit. 13.06.2022]. Dostupné z: <https://www.howtogeek.com/756785/what-is-inside-out-tracking-in-vr/>.

- [15] HAMMADY, Ramy, MA, Minhua, POWELL, Anna. User Experience of Markerless Augmented Reality Applications in Cultural Heritage Museums: “MuseumEye” as a Case Study. *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, 2018. [online] [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326374358_User_Experience_of_Markerless_Augmented_Reality_Applications_in_Cultural_Heritage_Museums_'MuseumEye'_as_a_Case_Study_5th_International_Conference_AVR_2018_Otranto_Italy_June_24-27_2018_Proceedings_Pa.
- [16] HARWOOD, Fiona. Wizard of Oz testing – a method of testing a system that does not yet exist [online]. [cit. 30.05.2022]. Dostupné z: <https://www.simpleusability.com/inspiration/2018/08/wizard-of-oz-testing-a-method-of-testing-a-system-that-does-not-yet-exist/>.
- [17] KEIL, Jens, PUJOL, Laia, ROUSSOU, Maria, ENGELKE, Timo, SCHMITT, Michael, BOCKHOLT, Ulrich, ELEFTHERATOU, Stamatia. A digital look at physical museum exhibits: Designing personalized stories with handheld Augmented Reality in museums. *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013. [online] [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263342491_A_Digital_Look_at_Physical_Museum_Exhibits_Designing_Personalized_Stories_with_Handheld_Augmented_Reality_in_Museums.
- [18] KLEIN, Georg, MURRAY, David. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2007. [online] [cit. 02.11.2022]. Dostupné z: <https://www.robots.ox.ac.uk/~gk/publications/KleinMurray2007ISMAR.pdf>.
- [19] MUÑOZ, Adolfo, MARTÍ, Ana. Holomuseum: A hololens application for creating extensible and customizable holographic exhibitions. *10th International Conference on Education and New Learning Technologies*, 2018. [online] [cit. 20.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326713622_HOLOMUSEUM_A_HOLOLENS_APPLICATION_FOR_CREATING_EXTENSIBLE_AND_CUSTOMIZABLE_HOLOGRAPHIC_EXHIBITIONS.
- [20] NORMAN, Don, NIELSEN, Jakob. The Definition of User Experience (UX) [online]. [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: <https://www.nngroup.com/articles/definition-user-experience/>.
- [21] SCHARDON, Lindsay. What is Unity? – A Guide for One of the Top Game Engines [online]. [cit. 12.06.2022]. Dostupné z: <https://gamedevacademy.org/what-is-unity/>.
- [22] SCHMALSTIEG, Dieter, WAGNER, Daniel. Experiences with Handheld Augmented Reality. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on*

- Mixed and Augmented Reality*, 2007. [online] [cit. 18.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/4334394_Experiences_with_Handheld_Augmented_Reality.
- [23] SERVIÈRES, Myriam et al. Visual and Visual-Inertial SLAM: State of the Art, Classification, and Experimental Benchmarking. *Journal of Sensors*, 2021. [online] [cit. 01.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349618757_Visual_and_Visual-Inertial_SLAM_State_of_the_Art_Classification_and_Experimental_Benchmarking.
- [24] SICILIANO, Bruno, KHATIB, Oussama. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
- [25] STANTON, Neville. Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. *Applied ergonomics*, 2006. [online] [cit. 08.05.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/7622539_Hierarchical_task_analysis_Developments_applications_and_extensions.
- [26] STEVENSON, Doug. What is Firebase? The complete story, abridged [online]. [cit. 19.06.2022]. Dostupné z: <https://medium.com/firebase-developers/what-is-firebase-the-complete-story-abridged-bcc730c5f2c0>.
- [27] WOJCIECHOWSKI, Rafał, WALCZAK, Krzysztof, WHITE, Martin, CELLARY, Wojciech. Building Virtual and Augmented Reality Museum Exhibitions. *Proceedings of the Ninth International Conference on 3D Web Technology - Web3D '04*, 2004. [online] [cit. 19.11.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221010858_Building_Virtual_and_Augmented_Reality_museum_exhibitions.

Příloha A

Seznam použitých zkratek

2D - dvoudimenzionální

3D - trojdimenzionální

API - application programming interface

AR - augmented reality

ARCO - Augmented Representation of Cultural Objects

BLE - Bluetooth Low Energy

CHESS - Cultural Heritage Experiences through Socio-personal interactions and Storytelling

EKF - extended Kalman filter

GB - gigabyte

GPS - Global Positioning System

HTA - hierarchical task analysis

Hz - hertz

ID - identification

IMU - inertial measurement unit

IP - Internet Protocol

JSON - JavaScript Object Notation

Lo-Fi - low fidelity

No-SQL - Not only Structured Query Language

PDA - personal digital assistant

PTAM - parallel tracking and mapping

QR - quick response

SDK - software development kit

SLAM - simultaneous localization and mapping

SQL - Structured Query Language

USB-C - Universal Serial Bus Type-C

UX - User Experience

viSLAM - visual-inertial simultaneous localization and mapping

VR - virtual reality

vSLAM - visual simultaneous localization and mapping

X-VRML - eXtensible Virtual Reality Modeling Language

Příloha B

Obsah přiloženého CD

Složka	Obsah
src	Zdrojové kódy projektu
builds	Instalační soubory
imgs	Ukázky z aplikace
videos	Videoukázky z aplikace
thesis	Text práce
documentation	Dokumentace

Příloha C

Screenener

1. Do jaké věkové kategorie spadáte?
 - (a) 0 - 17 let
 - (b) 18 - 30 let
 - (c) 31 - 45 let
 - (d) 46 let a více
2. Jaké je Vaše pohlaví?
 - (a) Muž
 - (b) Žena
 - (c) Jiné
 - (d) Nechci uvádět
3. V jakém odvětví pracujete? Můžete zaškrtnout více odpovědí.
 - (a) Jsem zaměstnaný(á)/OSVČ (uved'te prosím i odvětví)
 - (b) Jsem student (uved'te prosím i obor)
 - (c) Jsem v důchodu (uved'te prosím i odvětví, ve kterém jste pracoval(a) před nástupem do důchodu)
 - (d) Jsem nezaměstnaný(á)
 - (e) Jiné
 - (f) Nechci uvádět
4. Zaškrtněte prosím tvrzení, které je Vám nejbližší.
 - (a) Využívám moderní technologie (např. počítač, chytrý telefon či hodinky apod.) a aktivně se o ně zajímám, například čtením článků/knih nebo sledováním filmů/pořadů/videí.
 - (b) Využívám moderní technologie, ale aktivně se o ně nezajímám.
 - (c) Nevyužívám moderní technologie, popřípadě je využívám pouze v omezeném měřítku (např. pouze počítač, nebo pouze chytrý telefon).

5. Setkal(a) jste se někdy s rozšířenou realitou?
- (a) Ano
 - (b) Ne
6. Pokud jste v předchozí otázce odpověděl(a) ano, uveďte prosím i případ, kdy jste se s rozšířenou realitou setkal(a).
7. Kolikrát jste v posledním roce navštívil(a) muzeum?
- (a) V posledním roce jsem muzeum nenavštívil(a).
 - (b) 1 - 3 krát
 - (c) 4 krát a více