



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

VIZUALIZAČNÍ NÁSTROJ PRO PILOTA DRONU

VISUALIZATION TOOL FOR A DRONE PILOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB VALEŠ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL BAMBUŠEK

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce



162849

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)
Student: **Valeš Jakub**
Program: Informační technologie
Název: **Vizualizační nástroj pro pilota dronu**
Kategorie: Uživatelská rozhraní
Akademický rok: 2024/25

Zadání:

1. Prostudujte koncept rozšířené virtuality a rozšířené reality a jejich využití v oblasti vizualizace letových dat dronů. Dále prostudujte moderní postupy tvorby uživatelských rozhraní a seznamte se s nástroji pro řízení a správu dronů a uživatelskou komunikaci mezi nimi.
2. Seznamte se s fakultním nástrojem DroCo pro více-dronové mise a promyslete možnosti jeho rozšíření o pomocné grafické prvky, které by usnadnily řízení dronu a pomohly orientaci pilota během plnění mise. Zaměřte se na situace vizuální komunikace mezi piloty a velitelem mise.
3. Vyberte vhodné metody a nástroje a navrhnete rozšíření uživatelského rozhraní, které bude vizualizovat letová data dronu, blízké překážky, prvky mise a pomůže pilotu efektivněji plnit misi dle pokynů velitele.
4. Navržené rozšíření implementujte a integrujte do aplikace DroCo.
5. Proveďte experimenty a vyhodnoťte vlastnosti výsledného řešení.
6. Vytvořte video prezentující klíčové vlastnosti výsledného řešení.

Literatura:

- SCHMALSTIEG Dieter, HÖLLERER Tobias. *Augmented Reality: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 2016. ISBN 978-0321883575.
- SEDLMAJER Kamil, BAMBUŠEK Daniel a BERAN Vítězslav. *Effective Remote Drone Control Using Augmented Virtuality*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications 2019. Vienna: SciTePress - Science and Technology Publications, 2019, s. 177-182. ISBN 978-989-758-376-6.
- HARTSON Rex. *The UX Book: Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience*. 2012. ISBN 9780123852427.
- Elisa Păduraru, *Fundamentals of Creating a Great UI/UX*, Creative Tim, 2022
- Tidwell et al.: *Designing Interfaces: Patterns for Effective Interaction Design*, O'Reilly, 2020
- Dále dle pokynů vedoucího.

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

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

Vedoucí práce: **Bambušek Daniel, Ing.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2024
Termín pro odevzdání: 14.5.2025
Datum schválení: 2.5.2025

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a implementací vizualizačního nástroje s využitím rozšířené reality pro piloty a velitele dronových misí. Nástroj rozšiřuje stávající systém DroCo, který slouží k plánování a řízení více-dronových misí. Cílem bylo vytvořit uživatelské rozhraní pro pilota, které umožní zobrazovat anotace a instrukce od velitele přímo v obrazu z kamery dronu, a tím podpořit prostorovou orientaci a snížit potřebu verbální komunikace. Řešení bylo realizováno v prostředí Unity s využitím technologií pro rozšířenou realitu. Součástí práce je i rozhraní pro velitele, které umožňuje zadávání vizuálních pokynů do mapy. Funkčnost systému byla ověřena experimentálními testováními s účastníky, při kterém byla srovnávána verbální a vizuální forma komunikace. Výsledky ukazují, že anotace v rozšířené realitě představují efektivní a intuitivní způsob koordinace v dronových misích.

Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a visualization tool using augmented reality for both drone pilots and mission commanders. The tool extends the existing DroCo system, which is used for planning and managing multi-drone missions. The aim was to create a pilot interface capable of displaying annotations and instructions from the commander directly over the drone's camera feed, thereby enhancing spatial awareness and reducing the need for verbal communication. The solution was implemented in the Unity environment using augmented reality technologies. The work also includes a commander interface for entering visual instructions into the map. The functionality of the system was validated through experimental testing involving participants, during which purely verbal communication was compared to the visual method. The results indicate that annotations in augmented reality represent an effective and intuitive means of coordination in drone missions.

Klíčová slova

více-dronové mise, uživatelské rozhraní, rozšířená realita, Unity, DroCo, vizuální anotace

Keywords

multi-drone missions, user interface, augmented reality, Unity, DroCo, visual annotations

Citace

VALEŠ, Jakub. *Vizualizační nástroj pro pilota dronu*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Daniel Bambušek

Vizualizační nástroj pro pilota dronu

Prohlášení

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

.....
Jakub Valeš
12. května 2025

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Danielu Bambuškoví za odborné vedení, cenné rady, ochotu při konzultacích v průběhu celé práce a za zapůjčení zařízení nezbytných pro realizaci a testování aplikace. Dále děkuji všem účastníkům uživatelského testování za jejich čas, trpělivost při provádění experimentů, vyplňování dotazníků a sdílení cenných postřehů k aplikaci.

Obsah

1 Úvod	4
2 Drony, využití rozšířené reality a nástroje pro řízení misí	5
2.1 Drony	5
2.2 Více-dronové mise	5
2.3 Rozšířená realita	11
2.4 Existující nástroje pro řízení dronů a misí	13
2.5 DroCo	14
3 Vlastní návrh řešení	17
3.1 Použité nástroje	17
3.2 Cíle výsledného řešení	18
3.3 Počáteční návrhy a varianty uživatelského rozhraní	18
3.4 Výsledné uživatelské rozhraní	20
3.5 Architektura řešení	24
4 Implementace	26
4.1 Komunikace mezi pilotem a velitelem	26
4.2 Vytváření anotací – ikony	28
4.3 Vytváření anotací – oblast k prohledání	32
4.4 Zvýraznění anotací	36
4.5 Instrukce pro pilota	36
4.6 Vizualizace blízkých překážek	37
4.7 Pozice ostatních dronů v misi	39
5 Testování a vyhodnocení nástroje	42
5.1 Praktické testování v terénu	42
5.2 Návrh experimentů	43
5.3 Výsledky experimentů	47
6 Závěr	55
Literatura	56
A Dotazník NASA-TLX	58
B Vlastní dotazník k experimentům	60

Seznam obrázků

2.1	Snímek z aplikace při záchranné misi v řece [2].	7
2.2	Snímek z kontroly mostu v rámci studie [13].	9
2.3	Dron společnosti Wing doručuje zásilku ¹	11
2.4	Označení budovy k inspekci s trajektorií průletu dronu [16].	12
2.5	Přehledová scéna DroCo: dva drony ve 3D modelu zástavby, jejich video-streamy jsou promítnuty na virtuálních „plátnech“ před drony ²	16
3.1	Návrh uživatelského rozhraní pro aplikaci velitele.	19
3.2	Návrh uživatelského rozhraní pro pilota.	20
3.3	Symboly využívané při plánování mise.	21
3.4	Snímek uživatelského rozhraní aplikace.	22
3.5	Vizuální znázornění směrových indikátorů překážek.	24
3.6	Schéma architektury řešení.	25
4.1	Komponentní schéma řešení vizualizačního nástroje, zachycující moduly a popisky hlavních datových toků mezi nimi.	26
4.2	Komunikační sekvence mezi pilotní a velitelskou aplikací: 4.2a původní implementace bez aplikačních příkazů; 4.2b rozšířená výměna zpráv včetně periodické výměny letových dat mezi instancemi aplikací, video-přenosu a řízení anotací.	28
4.3	Pohled z aplikace pilota na vložené ikony za využití rozšířené reality.	30
4.4	Stejná situace z aplikace velitele a pohledu na 3D mapu.	31
4.5	Ukázka FPV režimu v aplikaci velitele při vkládání ikony „Cílový bod“ pro dron Mavic Mini na konkrétní okno. Díky FPV pohledu lze ikonu umístit přesně na zamýšlené místo; nad ikonou se zobrazuje jméno vybraného dronu (na rozdíl od pilotovy aplikace, kde se u ikony zobrazuje vzdálenost). Pokud je ikona určena všem dronům, žádné označení nad ní není.	31
4.6	Vizualizace zorného pole dronu v prostředí Unity pomocí nástroje Gizmos.	34
4.7	Zobrazení oblasti k prohledání v rozhraní pilotní aplikace s podporou rozšířené reality.	35
4.8	Zobrazení v aplikaci velitele s počátečním návrhem, kdy se buňky aktivovaly po prohledání a zbarvily zeleně. Na obrázku je 3D model dronu skenující budovu a v popředí záběr z jeho FPV kamery.	35
4.9	Zobrazení směrového ukazatele v aplikaci pilota. Šipka ukazuje na zvýrazněnou ikonu, jejíž zvýraznění bylo vyvoláno přijatou instrukcí (viditelnou v horní části obrazovky).	37
4.10	Zobrazení směrových detekcí v režimu ladění pomocí Gizmos.	39
4.11	Zobrazení cizího dronu pomocí komponenty DroneMark v AR pohledu pilota.	40

4.12	Pohled velitele na 3D mapu s modely všech aktivních dronů a jejich pohledy z kamery.	41
5.1	Mapa s vyznačenými kontrolními body pro první experiment. Čísla na mapě znázorňují posloupnost kontrolních bodů, kterými musí pilot proletět. Červené křížky označují bezletové zóny a žlutý vykřičník představuje oblast s nebezpečím, kterému se pilot musí vyhnout.	44
5.2	Mapa s vyznačenými kontrolními body pro druhý experiment. Obdobně jako na obrázku i zde čísla u zakroužkovaných oken znázorňují jejich pořadí průletu pilotem.	45
5.3	Mapa s vyznačenou oblastí k průzkumu pro třetí experiment. Červeným obdélníkem je vyznačena oblast, kterou měl pilot prozkoumat, modrý kruh označuje místo určené k přistání při simulované výměně baterie.	46
5.4	Grafy výsledků dotazníku NASA-TLX. Ve většině případů znamená hodnota 0 „velmi nízké zatížení“ a 20 „velmi vysoké zatížení“. Výjimku tvoří otázka zaměřená na vnímaný výkon, kde 0 znamená „perfektní výkon“ a 20 „naprosté selhání“.	49
5.5	Odpovědi účastníků na otázky týkající se využití pohledu rozšířené reality při experimentu. Jednotlivé možnosti označeny čísly: od rozhodně souhlasím (2) přes neutrální (0) až po rozhodně nesouhlasím (-2).	50
5.6	Odpovědi účastníků na otázky zaměřené na přehlednost, intuitivnost a celkovou použitelnost aplikace. Jednotlivé možnosti jsou označeny čísly: od rozhodně souhlasím (2) přes neutrální (0) až po rozhodně nesouhlasím (-2).	51
5.7	Vygenerovaná trasa pilota, který využíval zobrazení v aplikaci.	53
5.8	Porovnání mapy pokrytí bez použití aplikace (vlevo) a s využitím AR zobrazení (vpravo).	53
A.1	Dotazník NASA-TLX.	59
B.1	Dotazník k využití rozšířené reality a přehlednosti aplikace.	60

Kapitola 1

Úvod

Bezpilotní prostředky, zejména drony, nacházejí v posledních letech stále širší uplatnění v civilní i profesionální sféře. Díky technickému pokroku a dostupnosti pokročilých senzorů jsou využívány nejen k leteckému snímkování či inspekcím infrastruktury, ale stále častěji také pro plnění komplexních úkolů vyžadujících koordinaci více operátorů. Se zvyšující se složitostí těchto misí roste i potřeba kvalitních nástrojů pro řízení a přehlednou vizualizaci jejich průběhu.

Tato práce si klade za cíl rozšířit stávající aplikaci DroCo o nástroj rozšířené reality, který by pilotovi umožnil sledovat instrukce a důležité prvky mise přímo v rozhraní propojeném s obrazem z kamery dronu. Součástí řešení je rovněž návrh uživatelského rozhraní pro velitele, které umožňuje zadávat vizuální anotace do mapy. Tyto anotace se následně promítají pilotovi a slouží jako alternativní komunikační prostředek k verbálním pokynům.

Při misích, které vyžadují spolupráci více účastníků, se jako klíčová ukazuje efektivní a spolehlivá komunikace mezi pilotem dronu a velitelem mise. Verbální předávání pokynů však může být v praxi problematické – například kvůli nejasné interpretaci instrukcí, zpoždění nebo ztrátě přehledu o prostoru. Využití vizuálních anotací a rozšířené reality představuje způsob, jak tyto nedostatky eliminovat a zlepšit orientaci i rozhodování přímo během letu.

Stávající verze aplikace DroCo byla zaměřena primárně na podporu plánování a sledování mise z pohledu velitele. Chyběla však možnost přímé vizualizace pokynů na straně pilota, který tak byl odkázán pouze na slovní komunikaci a standardní náhled z kamery dronu. Tato práce se proto zaměřuje na návrh systému, který tento nedostatek odstraní a umožní efektivní předávání informací prostřednictvím vizuálních prostředků s využitím technologií rozšířené reality.

Navržené řešení bylo implementováno a následně ověřeno formou experimentálního testování, jehož cílem bylo posoudit přínos rozšířené reality a anotací pro zlepšení komunikace a orientace v rámci dronové mise.

Kapitola 2

Drony, využití rozšířené reality a nástroje pro řízení misí

V této kapitole se čtenář stručně seznámí s pojmem dron, hlavními oblastmi jeho využití. Dále jsou přiblíženy principy misí s více drony a vybrané scénáře jsou podrobněji popsány. Následuje sekce s vybranými aplikacemi pro řízení dronů a správu misí spolu s popisem aplikace DroCo.

2.1 Drony

Drony, označované také jako bezpilotní letadla (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), jsou prostředky, které lze ovládat na dálku, případně mohou letět autonomně podle předem naplánované trajektorie.

V posledních letech byl zaznamenán zvýšený zájem o drony jak v akademické, tak v průmyslové sféře, a to zejména díky jejich vysoké flexibilitě a nízkým provozním nákladům. Jsou modulární, proto je lze vybavit širokou škálou senzorů, od kamer s vysokým rozlišením až po termovize, právě tento fakt dělá z dronů vhodné nástroje pro široké spektrum aplikací, například v oblasti fotogrammetrie, logistiky, inspekce infrastruktury či krizového řízení [10].

Samostatný dron zpravidla stačí jen pro menší či krátkodobé úlohy, protože je limituje omezený dosah a zorné pole senzorů (včetně kamery), nízká výpočetní kapacita, krátká výdrž baterie a skutečnost, že představuje jediný bod selhání pro celou misi. Kooperace více dronů proto zkracuje dobu nasazení, snižuje riziko selhání a umožňuje plnit úkoly paralelně. Současný technický pokrok, od vestavěné palubní inteligence po spolehlivější bezdrátovou komunikaci, tak posouvá technologii dronů od izolovaných jednotek k autonomním týmům, které dovedou provést celou misi s minimálními zásahy operátora [10].

2.2 Více-dronové mise

Více-dronové mise patří mezi moderní trendy v oblasti leteckých technologií. Použití více dronů umožňuje provádět komplexní operace s vyšší efektivitou a rychlostí při pokrytí velkých oblastí oproti využívání jednotlivých zařízení, ale zároveň vyžaduje vyšší nároky na koordinaci a spolupráci mezi jednotlivými piloty a veliteli mise [3].

V současné době se aplikace využívající více dronů, tzv. roje (*aerial swarms*) zaměřují především na záchranné mise, pátrání po pohřešovaných osobách, inspekce infrastruktury, logistiku a monitorování rozsáhlých oblastí [1].

Použití více dronů pomáhá překonat omezení jako je příliš velká plocha pro prohledávání nebo výdrž baterie dronu tím, že distribuují úkoly mezi několik menších a agilnějších dronů [1]. Například při záchranných akcích mohou roje dronů rychleji prohledat velké a těžko přístupné oblasti, a tím pádem významně zvýšit pravděpodobnost úspěšného nalezení osob.

Více-dronové mise lze obecně rozdělit na bezpilotní a pilotované. Bepilotní mise spoléhají výhradně na autonomní schopnosti dronů, kdy operátor zasahuje jen minimálně nebo vůbec. Naproti tomu pilotované mise vyžadují aktivní zapojení operátora (pilota), který přímo ovlivňuje průběh mise a rozhodování dronu. Každý z těchto přístupů má své specifické výhody i omezení.

Z hlediska bezpilotních misí je nejvýraznější překážkou vyřešit přesnou lokalizaci a koordinaci trajektorií letových tras dronů v reálném čase, zajistit efektivní komunikace mezi nimi a dosáhnout vysoké úrovně autonomního rozhodování bez nutnosti zásahů lidského operátora [1]. Tato překážka se ještě stupňuje s narůstajícím počtem dronů v misi, pak musí být naplánování mise skutečně na vysoké úrovni a stejně tak i důvěra v autonomní schopnosti dronů.

Na druhou stranu pilotované mise přinášejí výhodu lidského faktoru, který přináší větší flexibilitu, rychlejší reakci na nečekané situace a umožňuje rozhodování v nejistých momentech [11]. Přítomnost operátora umožňuje rychle vyhodnocovat důležité informace a přizpůsobit strategii během mise podle aktuálních potřeb.

Z pohledu velitele představují více-dronové mise především mentální zátěž, protože musí sledovat několik pohledů z dronů současně a koordinovat jejich činnost. Z toho důvodu je kladen velký důraz na vhodný návrh uživatelského rozhraní a s ním i na celou ergonomii systému [11]. Je důležité najít balanc v zobrazování informací o průběhu mise veliteli, aby nedošlo k přehlcení nepodstatnými detaily, ale stále zůstaly přehlední informace, jako jsou polohy dronů, důležité body terénu nebo nálezy. Právě schopnost rozlišit kritické informace a rychle je interpretovat je výhodou lidského faktoru oproti autonomnímu systému.

Důležitou otázkou je také důvěra velitele a operátorů v autonomní schopnosti rojů dronů. Operátoři i velitelé často preferují spolehnout se na úsudek skutečné osoby před automatizovanými rozhodnutími systému, zvláště v kritických situacích. Z tohoto důvodu je nezbytné při návrhu pilotovaných rojů věnovat pozornost nejen technologickým aspektům, ale také psychologickým a ergonomickým faktorům.

Následující podkapitoly jsou zaměřeny na jednotlivé příklady více-dronových misí.

Záchranné mise

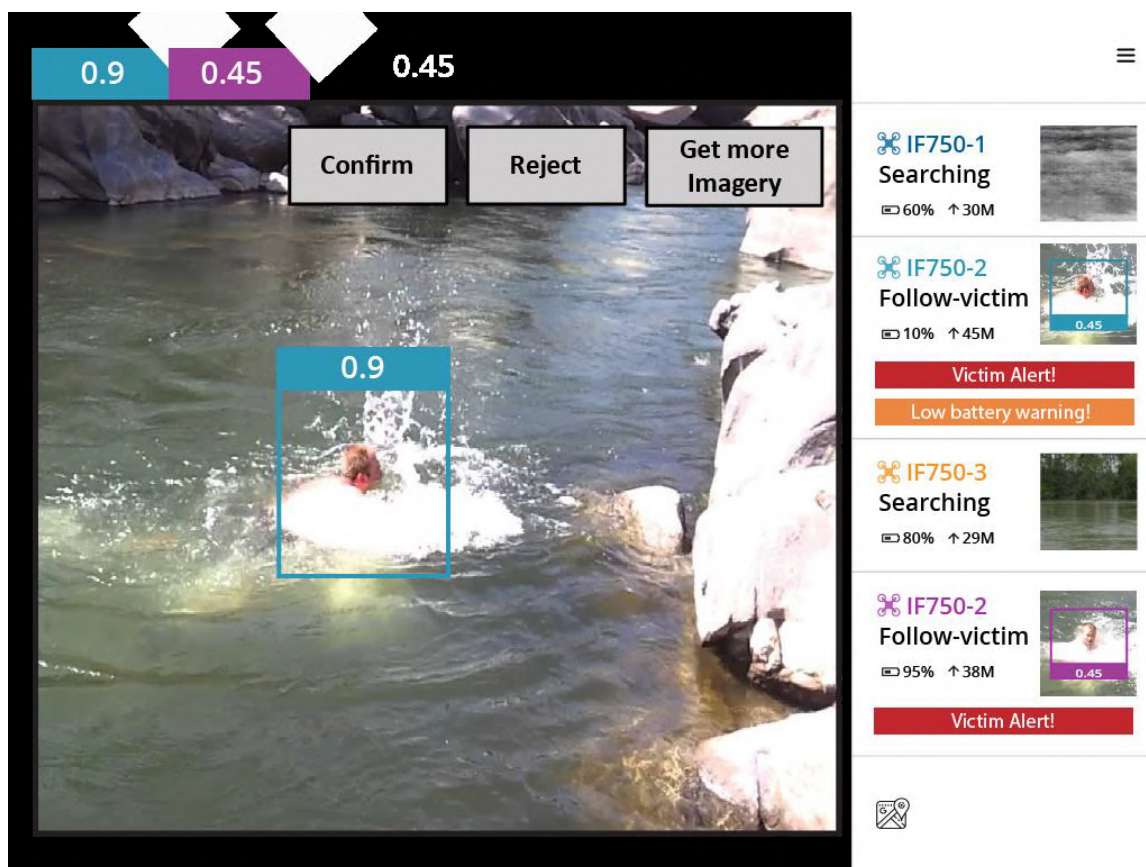
Jednou z oblastí, kde může nasazení více dronů přinést výrazné výhody, jsou záchranné akce. V těchto situacích je kladeno důraz především na rychlost provedení operace a na to, jak důkladně dokážeme pokrýt danou oblast. A právě díky zapojení více dronů lze tuto efektivitu výrazně zvýšit, a tím i složitější scénáře, jako je hledání osob v nepřehledném terénu, efektivněji zvládnout. Tyto mise jsou navíc často časově kritické, takže jejich úspěch závisí nejen na rychlosti zpracování informací, ale i na schopnosti jednotek efektivně spolupracovat.

Více dronů v rámci jedné záchranné mise bylo využito například při misi pro vyhledávání osob v říčním prostředí [2]. V tomto scénáři operovalo několik dronů vybavených senzory, včetně termálních kamer, jejichž úkolem bylo automaticky prohledávat vymezenou oblast. Když některý z dronů identifikoval potenciální oběť pomocí algoritmu na zpracování obrazu, předal tuto informaci operátorům na zemi prostřednictvím video-streamu, jak

můžete vidět na obrázku 2.1. Operátoři pak museli rychle rozhodnout, zda se skutečně jedná o pohřešovanou osobu, a v případě potřeby koordinovat záchranné složky na místě. Úspěšnost takovéto mise stála především na vhodně navrženém uživatelské rozhraní, které umožňovalo včasné a správně operátorům reagovat na situaci.

Role dronu v záchranných misích nekončí jen rychlým zmapováním dané oblasti, ale hraje významnou roli jako komunikační kanál mezi účastníky mise, k tomuto účelu bývá využit video přenos z kamery dronu. Systémy mohou být doplněny o strojové učení, které automaticky vyhodnocuje obrazy a označuje podezřelé objekty k dalšímu prozkoumání. Využití umělé inteligence v této oblasti může výrazně snížit množství chyb a zajistit efektivnější využití dostupných zdrojů [2].

Z hlediska teorie situačního povědomí (Situational Awareness, SA)¹ je u záchranných misí s drony zajistit všechny tři úrovně povědomí. První úroveň zahrnuje vnímání aktuálních informací, druhá úroveň se týká pochopení jejich významu a třetí úroveň představuje schopnost předvídat další vývoj situace. Operátoři se přitom musí vyvarovat typických problémů v komunikaci a interakci se systémem, mezi které patří například informační přetížení, chybné umístění upozornění nebo nedostatečné pochopení autonomního chování dronů [2].



Obrázek 2.1: Snímek z aplikace při záchranné misi v řece [2].

¹<https://www.blackberry.com/us/en/solutions/critical-event-management/situational-awareness>

Dalším příkladem využití dronů v záchranných operacích je projekt Vulture [12]. Hlavním přínosem tohoto projektu bylo úspěšné vytrénování neuronové sítě YOLOv3² pro lokalizaci osob. Autoři se rovněž museli vypořádat s významnou technickou výzvou v podobě omezeného rozlišení živého přenosu z dronů, což vyřešili rozdělením velkých obrazových dat na menší segmenty, které umožňovaly detailnější analýzu snímků.

Nasazení více-dronových systémů v záchranných misích se neomezuje pouze na vyhledávání osob, ale zahrnuje také monitoring přírodních katastrof, například povodní, požárů či sesuvů půdy. Drony mohou v těchto situacích poskytnout kritické informace o rozsahu katastrofy a pomoci při koordinaci záchranných prací. Díky integraci s dalšími technologiemi, jako jsou satelitní snímky nebo meteorologická data, lze ještě lépe předvídat a řídit krizové situace.

Inspekce infrastruktury a rozsáhlých oblastí

Další velkou kategorií využití dronů jsou inspekce rozsáhlých infrastruktur, jako jsou mosty, výškové budovy a průmyslové komplexy. Oproti manuální kontrole za použití vysokozdvíhacích plošin či horolezeckého vybavení, které jsou navíc velmi nákladné a časově náročné, nabízí nasazení dronů výrazně bezpečnější, rychlejší a efektivnější alternativu pro tyto inspekční práce. Díky jejich flexibilitě lze provádět inspekce na těžko přístupných místech bez nutnosti zastavení provozu nebo vystavení pracovníků riziku.

Následující studie popisuje využití dronů pro inspekci infrastruktury, v tomto případě mostů [13]. Tento výzkum ověřoval, zdali je možné ze snímků pořízených dronem identifikovat různé typy poškození mostní konstrukce, jak jsou praskliny, koroze nebo úniky vody. Dron DJI Phantom 4³, který byl v této studii využit, byl vybaven kamerou schopnou zaznamenávat snímky a videa ve vysoké kvalitě, a následně byly tyto snímky analyzovány. Výsledkem této studie bylo, že skutečně je využití dronů pro tyto mise vhodné, neboť byly schopny detekovat většinu poškození a zachytili je i ve vysoké kvalitě, takže snímky byly vhodné i pro následující analýzu hloubky poškození. Drony navíc umožňují bezpečné provádění inspekcí v těžko dostupných oblastech, například na spodní straně mostních konstrukcí (jak můžete vidět na obrázku 2.2, bez nutnosti zastavování dopravy či nasazení pracovníků do rizikového prostředí).

²<https://docs.ultralytics.com/models/yolov3/>

³<https://www.rcprofi.cz/rc-dron-dji-phantom-4.html>



Obrázek 2.2: Snímek z kontroly mostu v rámci studie [13].

Kromě mostů se drony uplatňují také v inspekcích rozsáhlých průmyslových areálů a energetických sítí. Například pro monitoring větrných elektráren, rozvodných sítí či plynovodů umožňují rychlé a přesné mapování těchto velkých území. Díky pokročilým sensorům, včetně termokamer, mohou drony odhalovat přehřívající se součásti a identifikovat potenciální poruchy dříve, než dojde k havárii, a to za nižších nákladů a s vyšší bezpečností provozu.

Další studie uvádí příklad využití při prohledávání velkých oblastí za využití inovativního přístupu ke koordinované spolupráci více dronů při rozsáhlých 3D skenovacích operacích [7]. Jejich metodika zahrnuje optimalizaci trajektorií letu jednotlivých dronů tak, aby byla zajištěna maximální efektivita a přesnost získaných dat. Tento přístup vznikl kombinací autonomní plánování letu a optimalizaci pohledů a umožňuje dronů sbírat data v optimálním úhlu pohledu a minimalizovat přeryvy snímků. Výsledkem je velmi přesná 3D rekonstrukce snímané oblasti, která má své využití například pro přesnou analýzu průmyslových zařízení.

Využití více dronů k inspekcím rozsáhlých území rovněž umožňuje efektivnější a rychlejší provádění těchto operací. Autonomní drony jsou schopny systematicky pokrýt velké plochy, sbírat data v reálném čase a poskytovat podrobné analýzy s minimálním lidským zásahem. Díky pokročilým algoritmům lze tyto mise optimalizovat tak, aby drony létaly v neefektivnějších trajektoriích a maximalizovaly přesnost získaných dat.

Logistika a doručování zásilek

V posledních letech se drony stávají zásadní technologií i v oblasti logistiky a doručování zásilek. Díky své rychlosti, flexibilitě a schopnosti vyhnout se dopravním překážkám činí z dronů efektivní alternativu k tradičním pozemním doručovacím metodám. Logistické společnosti, jako Amazon⁴, DHL⁵ nebo Wing⁶ (viz obrázek 2.3), aktivně testují a implementují využívání dronů pro doručování zásilek.

Jedním z nejvýznamnějších projektů v této oblasti je Amazon Prime Air. Hlavním specifickým tohoto projektu je implementace systému *sense-and-avoid*, jedná se o pokročilou technologii pro vyhýbání se překážkám, která umožňuje dronům bezpečně operovat bez vizuálního dohledu operátora a úspěšně přistávat za účelem doručení zásilky. Projekt Prime Air byl vyvíjen téměř deset let s cílem snížit závislost na pozemní dopravě a ekologickou stopu. Tento projekt si získal i podporu veřejnosti, neboť Amazon umožnil obyvatelům Lockefordu, kde spustil tento program, zapojit se do programu a přijímat své objednávky pomocí dronů, čímž získala společnost početnou zpětnou vazbu potřebnou pro další vývoj a optimalizaci technologie [4].

Studie zabývající se přepravováním zásilek pomocí heterogenních více-dronových systémů [14] představila moderní přístup, kde velký dron funguje jako mateřská loď a přepravuje menší drony na místa doručování. Výhodou tohoto konceptu je eliminace hlavního problému menších dronů – krátká výdrž baterie a tím výrazné zvýšení jejich doletu. Podle studie by tento heterogenní více-dronový systém mohl zvýšit efektivitu doručování až o 50% a zároveň snížit náklady na doručování o 30% oproti tradičním metodám. Analýza rovněž ukazuje, že optimální nosnost dronů pro maximální úsporu nákladů je 9,2 kg, přičemž vyšší nosnost nad 11 kg zvyšuje náklady na údržbu a spotřebu energie [14].

S rostoucími požadavky na ekologickou dopravu v oblasti logistiky se spolu s možností rychlého doručování stává nasazení dronů pro firmy stále atraktivnější. Hlavními výzvami v tomto hledisku jsou pro firmy letecké regulace, kapacita baterií a přijetí této technologie veřejností [4]. Drony v logistice přinášejí revoluční změny a již nyní ukazují, že mohou významně zlepšit rychlost a efektivitu doručování, zejména v městských a těžko dostupných oblastech.

⁴<https://www.aboutamazon.com/>

⁵<https://www.dhl.com>

⁶<https://wing.com/>



Obrázek 2.3: Dron společnosti Wing doručuje zásilku⁷.

2.3 Rozšířena realita

Rozšířená realita (AR) je technologie, která propojuje fyzický svět s digitálními informacemi a virtuálními objekty. Umožňuje v reálném čase do reálného prostředí uživatele vkládat počítačem vytvořené prvky, jako jsou 3D modely, obrázky nebo video. To se často provádí za pomoci zařízení s podporou AR, jako jsou chytré telefony, tablety, chytré brýle, nebo náhlavní soustavy [9].

AR zařízení nejdříve přijímá videozáznam z uživatelova zorného pole a pomocí senzorů snímá a sleduje fyzické objekty i polohu a orientaci uživatele. AR software pak zpracuje nasbíraná data a buď najde jejich virtuální 3D model v cloudu, nebo použije umělou inteligenci k rozpoznání fyzických prvků v okolí. Poté se počítačem generovaný obsah vykreslí v odpovídající perspektivě a orientaci tak, aby se jevil jako součást skutečného světa. Nakonec se hotový digitální obsah superponuje na zobrazení uživatele a umožní mu s ním interagovat dotykem, fyzickými gesty nebo hlasovými povely, které software přijme a přenesení na AR objekty [9].

Využití rozšířené reality v dronových misích

Ve studii ohledně využití rozšířené reality pro inspekci budov [16] autoři představují podpůrné rozhraní, které pilotům umožňuje snadno označovat body zájmu (point of interest). Piloti mohou jednoduchým klepnutím do zobrazeného videa z kamery vyznačit místo defektu například trhlinu, odlupující se omítku či jiné poškození. V AR scéně se na daném místě zobrazí červený kruh, který zůstává pevně spojen s reálnou souřadnicí na fasádě, což

⁷<https://siliconangle.com/2023/03/09/alphabets-wing-previews-automated-drone-delivery-system/>

usnadňuje následnou navigaci zpět k vyznačené oblasti pro detailní dokumentaci či analýzu bez nutnosti přepínání mezi obrazovkami nebo ručního zápisu poznámek.

Součástí rozhraní je také vizualizace pokrytí inspekční oblasti, která pilotům poskytuje okamžitou zpětnou vazbu o tom, jaké části fasády již byly zkontrolovány, jak jde vidět na obrázku 2.4. Po označení každého defektu systém na budovu promítá průhlednou plochu či symbol potvrzující úspěšné pořízení dat z dané oblasti. Díky tomu má operátor neustálý přehled o prozkoumaných segmentech a může se soustředit na nezpracované části bez nutnosti přepínat pohled na 2D mapu, čímž se výrazně snižuje kognitivní zátěž a riziko opomenutí některé části inspekční trasy [16].



Obrázek 2.4: Označení budovy k inspekci s trajektorií průletu dronu [16].

Rozšířená realita tak představuje flexibilní a interaktivní prostředí, ve kterém se virtuální informace přirozeně prolínají s reálným světem. Díky přesnému sledování polohy a zpracování obrazu umožňuje AR uživatelům, jako jsou piloti dronů či inspektoři, snadno označovat klíčové body, vizualizovat pokrytí oblastí a okamžitě přijímat zpětnou vazbu bez nutnosti přepínat mezi různými rozhraními. Tento způsob zobrazování a interakce významně snižuje kognitivní zátěž, zrychluje rozhodovací procesy a zvyšuje celkovou bezpečnost a efektivitu misí.

2.4 Existující nástroje pro řízení dronů a misí

V této kapitole se čtenář seznámí s vybranými aplikacemi pro pilotování dronů a správu více-dronových misí.

DJI Fly

Aplikace DJI Fly⁸ představuje oficiální ovládací aplikací pro spotřebitelské drony firmy DJI a je navržena jako jednotný nástroj pro pilotáž, záznam, základní střih i publikaci leteckých záběrů. Vystihuje se pro svou významnou jednoduchost a intuitivnost, tudíž je ideální aplikací i pro úplné začátečníky. Po připojení dronu je většina obrazovky zaplněna živým pohledem z kamery dronu a nezbytné telemetrické údaje jako: letový režim, výška, vzdálenost apod. jsou umístěny v malém pruhu u okraje obrazovky. Z uživatelského hlediska je významná také široká hardwarová kompatibilita (viz seznam podporovaných modelů⁹).

DJI Fly zavedla koncem roku 2022¹⁰ funkci *Waypoints*, která je ale dostupná převážně pro dražší modely DJI dronů. Funkce umožňuje pilotům naplánovat si trajektorii mise přímo ve své mobilní aplikaci pomocí zadávání bodů do mapy, u každého bodu uživatel definuje nadmořskou výšku, rychlost přeletu nebo dobu setrvání na bodu. Nevýhoda spočívá u plánování delších a složitějších misí, které se v mobilní aplikaci zadávají složitě a také to, že funkcionalita není nabízena pro všechny drony značky DJI [17].

Litchi for DJI

Zmiňovaná omezení řeší aplikace Litchi for DJI Drones¹¹, která představuje alternativní platformu třetí strany, která prostřednictvím oficiálního DJI SDK¹² zpřístupňuje pokročilé funkce v aplikaci DJI Fly. Výše zmiňovaný režim *waypoint*, který aplikace nabízela už od svých prvních verzí, je jedním z hlavních důvodů využívání této aplikace. Letovou misi lze detailně naplánovat na desktopovém portálu Mission Hub¹³ a následně ji bezdrátově synchronizovat do mobilního zařízení, takže uživatel může definovat body trasy ještě před odjezdem do terénu. Aplikace dále nabízí autonomní režimy, ve kterých lze obraz skrze telefon zobrazit ve brýlích pro virtuální realitu.

Závislost na DJI SDK ovšem přináší i omezení: nově uvedené drony nelze v Litchi obsluhovat do doby, než DJI uvolní příslušné knihovny, a některé systémové úkony – aktualizace firmwaru, kalibrace senzorů či správa bezletových zón – je nutné provádět v oficiální aplikaci DJI Fly. Další nevýhodou oproti může být, že oproti DJI Fly vyžaduje aplikace Litchi už ve své základní verzi jednorázovou platbu.

DJI FlightHub

DJI FlightHub 2¹⁴ je platforma pro správu a řízení více dronů současně. Jedná se o cloudový systém, který pracuje jako v rámci webového rozhraní.

Velitel zásahu může v reálném čase sledovat polohu, výšku i stav senzorů všech nasazených dronů na 3D mapových podkladech a paralelně si může zobrazit až 16 živých

⁸<https://www.dji.com/cz/dji-fly>

⁹<https://www.dji.com/cz/downloads/djiapp/dji-fly>

¹⁰<https://dronedj.com/2022/12/12/dji-mavic-3-drone-waypoint/>

¹¹<https://flylitchi.com>

¹²<https://developer.dji.com/>

¹³<https://flylitchi.com/hub>

¹⁴<https://enterprise.dji.com/flighthub-2>

video-streamů z dronů v mřížce [15]. Aplikace také obsahuje integrovaný nástroj pro plánování misí, který umožňuje veliteli předem definovat cílové body mise a zároveň může průběh letu anotovat či vkládat do mapy zóny. Díky funkci *Virtual Cockpit*¹⁵ dovoluje veliteli přes webové rozhraní naklánět gimbal nebo přepínat senzory, s tím že latence deklarovaná výrobcem nepřesahuje jednu sekundu.

Stejně jako předchozí zmíněné aplikace i tato je jen pro drony značky DJI. Nevýhodou této aplikace mohou být pro některé uživatele pravidelné licenční poplatky za cloudové služby. A také to, že některé funkce (například generování 3D mesh modelů) jsou dostupné jen ve vyšších tarifních úrovních a při zpracování objemných dat mohou vyžadovat delší dobu pro vykreslení.

V levé části uživatelského rozhraní se nachází přehled všech dronů nasazených v aktuální misi, včetně jejich identifikačních štítků. Aplikace umožňuje integrovat živé video-streamy z jednotlivých dronů přímo do rozhraní velitele. Uživatel má možnost jednotlivá okna s přenosem libovolně přesouvat, měnit jejich velikost nebo je skrývat, a tím si přizpůsobit rozložení zobrazených dat podle aktuálních potřeb.

Rozhraní dále umožňuje rozdělit obrazovku buď horizontálně, nebo vertikálně – v jedné části je zobrazena 3D mapa s aktuální polohou všech dronů, ve druhé probíhá živý přenos z vybraného stroje.

UgCS

UgCS (Universal Ground Control Software)¹⁶ je software pro plánování a řízení letů dronů, zaměřený na automatizované mise a koordinaci více dronů na jednou. Je to desktopová aplikace, která podporuje širokou škálu modelů dronů včetně DJI. Umožňuje uživateli si detailně v mapě naplánovat letovou misi: může definovat cíle mise s různými akcemi, výškový profil letu včetně kopírování terénu nebo zóny, kterým se má dron vyhnout. Takto naplánovaná mise je pak připravena na nahrání do dronu a autonomní provedení. Aplikace se tedy především vyjímá možností si dopodrobna naplánovat autonomní dronovou misi a pomocí rozšíření UgCS Commander¹⁷ umožňuje navíc centrálně monitorovat celou flotilu dronů.

UgCS je dostupná v bezplatné edici, jejíž možnosti jsou však omezeny – například délkou naplánované trasy či absencí síťového streamování videa. Pro odemknutí těchto a dalších pokročilých funkcí je nutné zakoupit placenou licenci (verze Expert nebo Enterprise). Stejně jako aplikace Litchi musí vlastníci nových dronů od společnosti DJI počkat, až budou uvolněny knihovny pro integraci DJI SDK.

Navzdory těmto limitům patří UgCS k nejrozšířenějším profesionálním nástrojům: využívají jej geodeti, inspekční týmy i záchranáři, například při vyhledávání osob zasypaných lavinou [6].

2.5 DroCo

DroCo je nástroj pro efektivní vzdálené řízení dronů s využitím rozšířené reality, který podporuje komunikaci na misi s více drony [5]. Je vyvíjen výzkumnou skupinou Robo@FIT¹⁸ na Fakultě informačních technologií VUT v Brně.

¹⁵<https://enterprise-insights.dji.com/blog/dji-flighthub-2-virtual-cockpit-now-available>

¹⁶<https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>

¹⁷<https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs-commander>

¹⁸<https://www.fit.vut.cz/research/group/robo/en>

Primárním cílem aplikace je usnadnit řízení dronů při komplexních misích, zejména při ovládání více dronů současně, létání v blízkosti infrastruktury, či při misích s prostorově vzdálenými cíli.¹⁹

DroCo pracuje ve dvou režimech: klient a server. V režimu klient se aplikace připojuje k samotnému serveru, který sbírá data z více dronů (příklad serveru²⁰). V režimu server je přímo součástí DroCo aplikace websocketový server²¹, který umožňuje lokální spojení s více drony. V tomto případě přijímá data z dronů bez prostředníka, což minimalizuje latenci přenosu.

DroCo je postaveno na herním enginu Unity (verze 2022.3.23) a využívá mapové vrstvy ArcGIS²², které poskytují jak 2D, tak 3D geografická data. Hlavní scéna aplikace je složena ze dvou mapových vrstev: základní 2D mapa, která je dostupná všude, a volitelná 3D vrstva s terénem a modely budov. Pro nastavené oblasti, jako například město Brno nebo Plzeň, aplikace stahuje speciální 3D objekty a terénní vrstvy z dostupných ArcGIS zdrojů²³. 3D vrstva je volitelná, protože ne všude aplikace získá dostupnou 3D reprezentaci modelů, v takových místech zobrazuje pouze 2D mapu. Schéma hlavní scény a zobrazení videostreamu z kamer dronů lze vidět na obrázku 2.5.

DroCo umožňuje pilotovi řídit dron v režimu FPV (first-person-view), tedy z pohledu kamery umístěné přímo na dronu, a kdykoli přepnout do režimu TPV (third-person-view). V režimu TPV může operátor svobodně měnit úhel pohledu a získat lepší orientaci v prostoru²⁴.

¹⁹https://github.com/robofit/drone_vstool/blob/DroCoV2/README.md

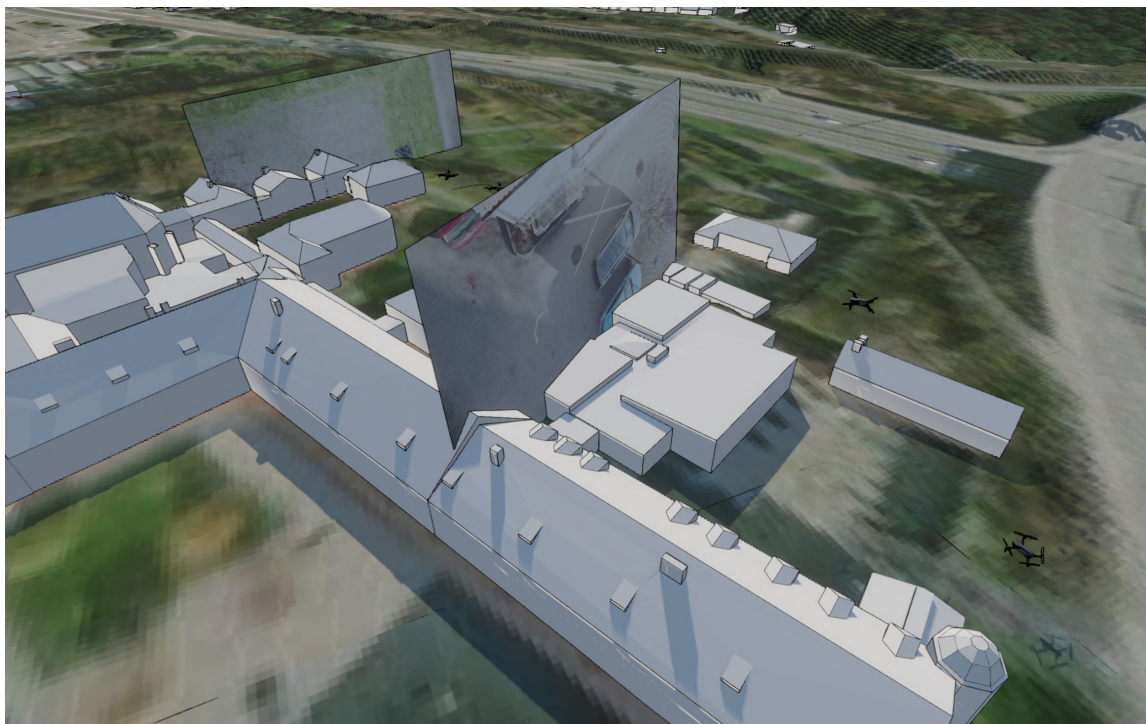
²⁰https://github.com/robofit/drone_server

²¹<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6455>

²²<https://www.arcgis.com/index.html>

²³<https://hub.arcgis.com/maps/a06c3105afd04f338463a5997de2a377>

²⁴https://github.com/robofit/drone_vstool/blob/DroCoV2/README.md



Obrázek 2.5: Přehledová scéna DroCo: dva drony ve 3D modelu zástavby, jejich video-streamy jsou promítnuty na virtuálních „plátnech“ před drony²⁵.

²⁵https://github.com/robofit/drone_vstool

Kapitola 3

Vlastní návrh řešení

V této kapitole bude čtenář seznámen s cílem návrhu řešení, následně podrobněji s návrhem uživatelského rozhraní a nakonec i se samotnou podobou aplikace.

3.1 Použité nástroje

Při vývoji a tvorbě této práce bylo využito několik nástrojů, které usnadnily programování, návrh uživatelského rozhraní, tvorbu grafických prvků a komunikaci s vedoucím práce.

- **Visual Studio Code (VSCode)** – Hlavní integrované vývojové prostředí pro psaní a úpravu skriptů v jazyce C#.
- **Unity Editor** – Použit pro vytváření vizuální části aplikace, přidávání objektů do scény, propojení se skripty, tvorbu prefabů a správu celého projektu v prostředí herního enginu.
- **Canva** – Webová aplikace pro tvorbu a úpravu obrázků, použita zejména pro přípravu podkladů k experimentům a vizualizace v práci.
- **Linearity Curve** – Nástroj pro vytváření a export grafických prvků (např. ikon a anotací použitých v aplikaci), inspirace byla čerpána z webu FlatIcons¹, který nabízí sadu již navržených ikon.
- **Google Disk** – Sloužil pro zálohování složky **Assets** a jako nástroj pro verzování projektu. Umožnil práci z více zařízení a zajišťoval konzistenci prostředí.
- **Draw.io** – Nástroj pro tvorbu diagramů a vizualizaci architektury systému.
- **Google Forms** – Použito pro vytvoření a distribuci dotazníků pro účastníky uživatelského testování.
- **Microsoft Excel** – Sloužil k vyhodnocení výsledků dotazníků a tvorbě grafického znázornění odpovědí ve formě sloupcových grafů.
- **MS Teams a e-mail** – Prostředky pro pravidelnou komunikaci s vedoucím práce a sdílení zpětné vazby.

¹<https://www.flaticon.com/>

- **ChatGPT** – Asistent při vysvětlování složitějších částí kódu a formální úpravě textu. Pomohl také s jazykovým zpřesněním a strukturací jednotlivých částí práce.

Kombinace těchto nástrojů výrazně přispěla k efektivitě vývoje, přehlednosti výsledného řešení a srozumitelnosti samotného textu práce.

3.2 Cíle výsledného řešení

Primárním cílem rozšíření bylo přizpůsobit nástroj DroCo potřebám více-dronových misí. Byla navržena samostatná rozhraní pro pilota i velitele a integrováno komunikační rozhraní. Jakmile velitel vytvoří anotaci v mapě, systém automaticky vygeneruje a pošle pilotovi zprávu s podrobnými údaji o dané anotaci. Tento přístup minimalizuje závislost na verbálních pokynech.

Z hlediska velitelské aplikace spočíval klíčový úkol v implementaci mechanismu pro vkládání anotací přímo do trojrozměrné mapy. Tyto značky následně budou viditelné i v aplikaci pilota, aby udržovaly synchronní stav obou aplikací. Návrh uživatelského rozhraní navazoval na stávající moduly DroCo – zejména na vizualizaci polohy dronů a mini-mapu – a rozšířil je o nástroje pro vytváření, úpravu a správu anotací. Současně bylo potřeba nové komponenty navrhnout tak, aby nezakrývaly klíčové informace, jako jsou letová data nebo živý video-stream.

Na straně pilota bylo úkolem navrhnout rozhraní, které umožní paralelní připojení k vlastnímu dronu i k veliteli mise. Do konceptu byly zakomponovány vizuální prvky pro podporu orientace v prostoru, detekci překážek a krokové plnění úkolů mise, a to vše bez nutnosti přerušovat práci verbální komunikací.

3.3 Počáteční návrhy a varianty uživatelského rozhraní

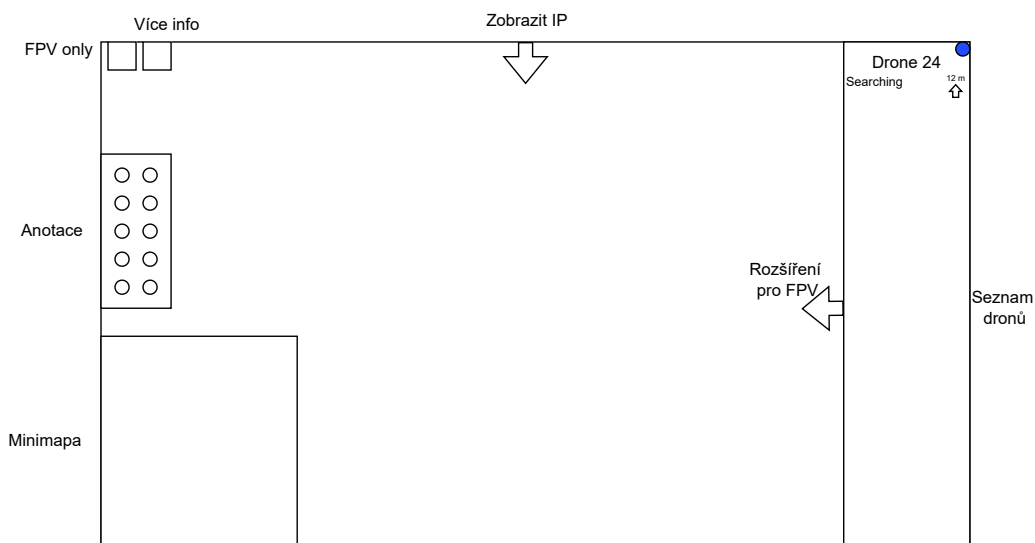
V této části budou představeny první koncepty a pracovní varianty uživatelského rozhraní. Čtenář se zde seznámí s původními návrhy a s jejich odlišnostmi oproti výslednému řešení.

Návrh rozhraní pro velitele

Na obrázku 3.1 je zachycen jeden z prvních návrhů uživatelského rozhraní velitelské aplikace. Levá část obrazovky byla původně vyhrazena pro mini-mapu a menší sadu tlačítek sloužících k přidávání anotací. Během vývoje se však ukázalo, že tato tlačítka byla příliš malá a obtížně použitelná na dotykových zařízeních. Takže byla zvětšena pro lepší čitelnost a snadnější ovládání, dále byly přidány tlačítka pro zasílání instrukcí.

Pravý panel byl v tomto návrhu určen primárně pro seznam připojených dronů, včetně jejich názvů a aktuálních misí. Zároveň byla navržena možnost zvětšení tohoto panelu až na polovinu obrazovky, aby velitel mohl pohodlně sledovat náhledy kamerových přenosů z více dronů současně. Vstup pro zadávání IP adresy byl plánován jako skrytý prvek mimo hlavní pohled uživatele, který se objeví až po rozkliknutí a následně opět zmizí.

Finální verze pravého panelu nakonec přímo navazuje na původní uživatelské rozhraní aplikace DroCo, přičemž byla upravena tak, aby kladla větší důraz na přehlednost a prezentovala pouze klíčové informace.



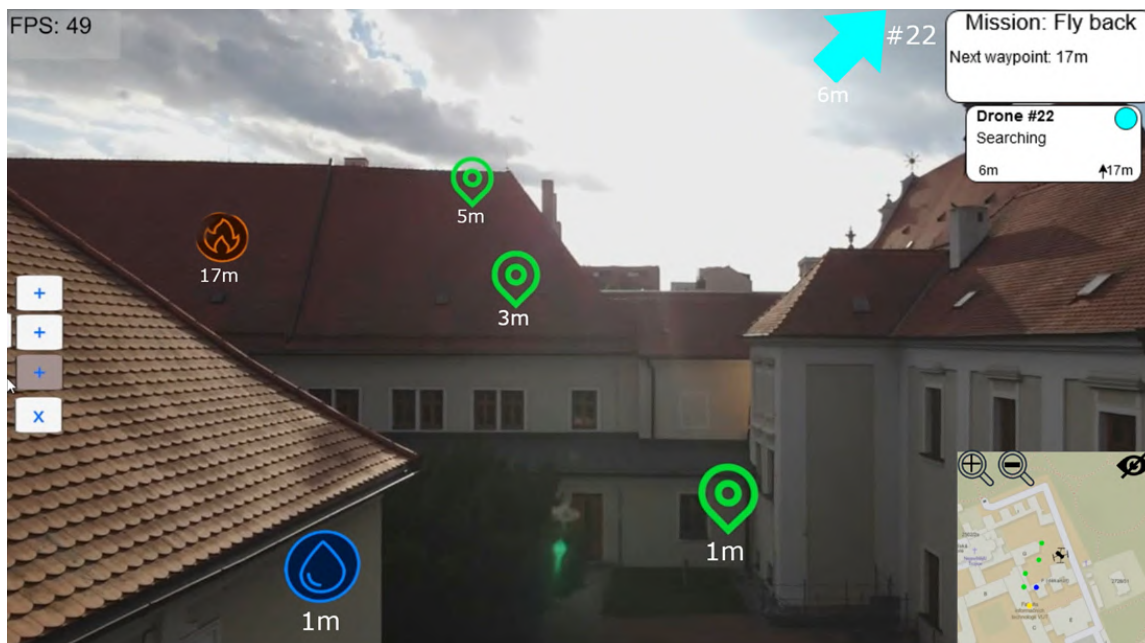
Obrázek 3.1: Návrh uživatelského rozhraní pro aplikaci velitele.

Návrh rozhraní pro pilota

Obrázek 3.2 zobrazuje koncept uživatelského rozhraní pilotní aplikace, konkrétně zachycený ve fázi vývoje s dodatečnými poznámkami. Základním cílem tohoto návrhu bylo umožnit pilotovi lepší orientaci v prostředí s více drony najednou. Pro tento účel byla navržena mini-mapa umístěná vpravo dole, která měla pilotovi nabídnout možnost přiblížování a oddalování.

Indikátory mimo zorné pole byly původně plánovány k signalizaci polohy dalších dronů v misi, které nejsou aktuálně v záběru. V tomto konceptu byla také použita sada ikon s přidáním vzdáleností pro lepší orientaci pilota přímo v záběru kamery dronu. Ikona ohně byla vykreslena trochu jinak, aby znázorňovala, že je za budovou.

Nakonec však bylo řešení přepracováno a ve výsledném návrhu byl větší důraz kladen na komunikaci jednoho pilota s jedním velitelem, přičemž některé pokročilé funkce plánované pro práci s více drony byly omezeny či zjednodušeny.



Obrázek 3.2: Návrh uživatelského rozhraní pro pilota.

3.4 Výsledné uživatelské rozhraní

V této sekci je již detailně popsáno výsledné řešení uživatelského rozhraní, které vzešlo z předchozích návrhů. Čtenář zde najde popis jednotlivých vizuálních a interakčních prvků, jejich účel a výslednou podobu aplikace.

Typy ikon a jejich význam

Pro bezprostřední a jednoznačnou komunikaci mezi velitelem mise a pilotem dronu byly navrženy následující typy ikon, které pilotovi poskytují rychlé vizuální vodítko k různým úlohám a stavům mise:

Cílový bod – slouží k naplánování trasy, po níž má dron postupně letět (viz obr. 3.3a).

Zaměřit – žádost o detailní prohlídku místa; pilot natočí kameru a pořídí snímky s vyšším rozlišením (viz obr. 3.3b).

Oheň – označení ohniska požáru nebo umělé dýmové clony (viz obr. 3.3c).

Voda – potenciální zdroj hasební vody (hydrant, nádrž) nebo již uhašený objekt (viz obr. 3.3d).

Nebezpečí – obecný varovný symbol pro rizika typu elektrické vedení, kterým se dron musí vyhnout (viz obr. 3.3e).

Osoba – poloha civilisty nebo zraněné osoby vyžadující zásah (viz obr. 3.3f).

Bezletová zóna – prostor s legální či bezpečnostní restrikcí, kam se dron nesmí přiblížit (viz obr. 3.3g).

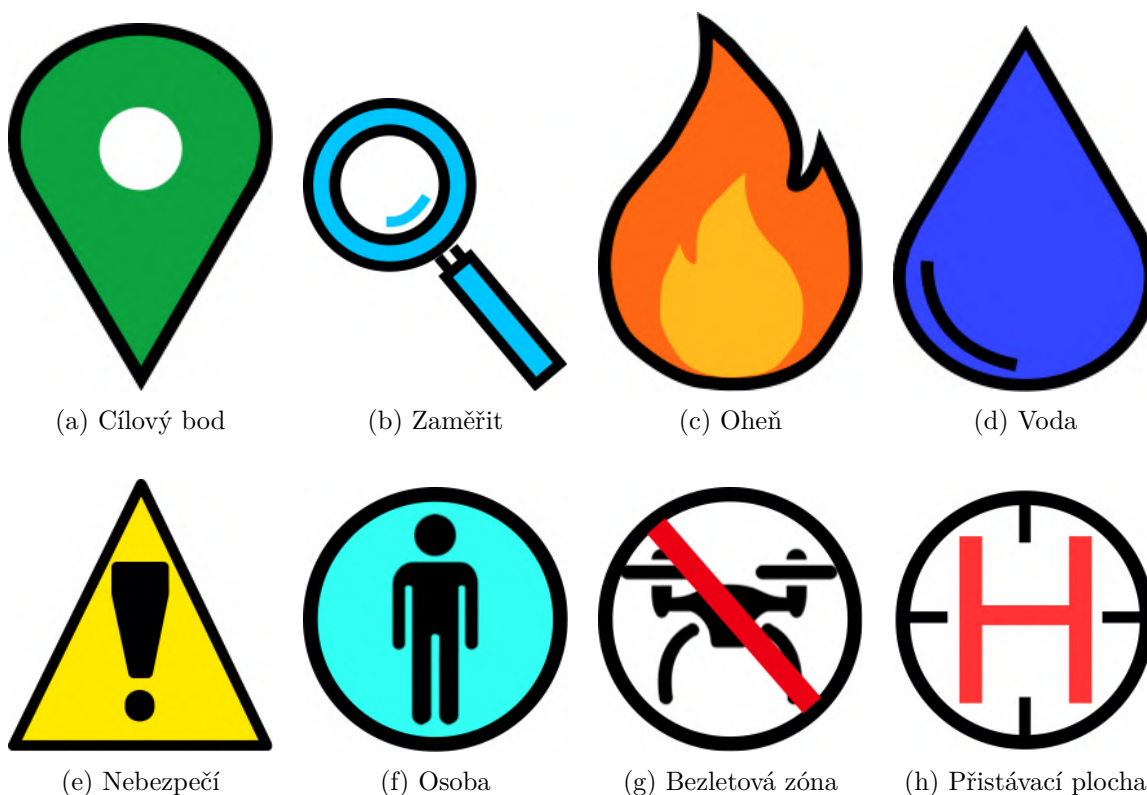
Přistávací plocha – doporučené místo pro bezpečné přistání (viz obr. 3.3h).

Barevné odlišení Barvy ikon byly zvoleny tak, aby byly přehledné a snadno rozeznatelné. Barvy byly rozděleny do dvou skupin:

- **Teplé odstíny** (žlutá, oranžová, červená) byly přiřazeny k upozorněním a potenciálním rizikům, aby okamžitě upoutaly pozornost, aniž by však působily příliš alarmujícím dojmem.
- **Chladné odstíny** (zelená, tyrkysová, modrá) byly použity pro neutrální či bezpečné stavy, jako jsou cílové body, humanitární prvky nebo neutrální objekty.

Dále byly do palety začleněny světlé a neutrální tóny (bílá, světle šedá) pro přistávací plochy, bezletové zóny.

Barvy ikon byly voleny tak, aby jejich odstíny i kontrast zajišťovaly jasnou viditelnost a výraznost na různých typech mapových podkladů. Ikony jsou zároveň navrženy tak, aby byly dobře rozpoznatelné i ze vzdálenější perspektivy a aby se při přiblížení pilotovi postupně zvětšovaly – až v těsné blízkosti zabírají větší část obrazovky a dávají jasně najevo, že cíl je dosažen.



Obrázek 3.3: Symboly využívané při plánování mise.

Uživatelské rozhraní pro velitele

V následující obrázku je zachyceno uživatelské rozhraní aplikace pro velitele mise. Levý panel obsahuje kruhové ikony pro označování úkolů a stavů mise, přičemž je zde zašedle

zvýrazněna ikona „Zaměřit“, aby bylo jasné, kterou funkci velitel právě vybral pro vložení do mapy. Pravý panel pak uvádí seznam připojených dronů.



Obrázek 3.4: Snímek uživatelského rozhraní aplikace.

Levý panel V levé části obrazovky byly umístěny kruhové ikony sloužící k označování úkolů a stavů mise. K již popsaným symbolům byly přidány následující ovládací prvky:

- *Smazat ikonu* – odstraní vybranou anotaci,
- *Smazat všechny ikony* – odstraní všechny ikony najednou,
- *Zvýraznit ikonu* – dočasné označení vybrané anotace na mapě,
- *Vytvořit oblast* – nakreslení obdélníkové oblasti pro prohledání (viz 4.3),
- tlačítka pro odeslání instrukcí (viz 4.5).

Nad sadou ikon bylo implementováno rozbalovací menu pro výběr cílového příjemce instrukce. Velitel může zvolit buď „All“, nebo konkrétní jméno dronu. Díky tomu se ikony a instrukce zobrazují pouze vybranému pilotovi a je zajištěná možnost komunikace pouze s určitým účastníkem mise.

Navíc byly vyvinuty dvě nové ikony umístěné v horní části panelu:

- přepínač mezi pohledem z ptačí perspektivy a náklonem 45° (ikona fotoaparátu se šipkami),
- vypínač záznamového plátna (ikona přeškrtnutého plátna) – skrývá vizualizaci kamerového záznamu dronu.

Oba prvky vznikly na základě úvodních testů a zjednodušují práci velitele s mapou. Přepínač pohledu z ptačí perspektivy poskytuje jednoduchý dvourozměrný pohled, přičemž zachovává možnost orientace podle modelů budov, sloužící tak jako vhodná alternativa k zadávání ikon do mini-mapy. Druhý přepínač umožňuje zapínat a vypínat záznamová plátna – ta při nasazení více dronů na omezeném prostoru často zabírala nadměrný prostor na obrazovce a snižovala přehlednost.

Pravý panel Pravý panel vychází z původní implementace DroCo, která byla přizpůsobena především ladění aplikace. Nová verze oproti ní obsahuje následující úpravy, kterými zobrazuje pouze podstatné a klíčové informace:

- výpis připojených dronů již neobsahuje dlouhé identifikátory klientů, ale pouze stručné názvy,
- souřadnice dronů byly zaokrouhleny na dvě desetinná místa,
- u každého dronu bylo přidán tlačítko *FPV* pro zobrazení pohledu z paluby kamery,
- pod ikonou dronu je vyhrazen prostor pro aktuální instrukci, kterou pilot obdržel. Tato dynamická informace se automaticky maže po splnění úkolu a umožňuje veliteli přehledné řízení.

Uživatelské rozhraní pro pilota

Uživatelské rozhraní pro pilota mise se skládá z několika klíčových prvků: v horní části obrazovky se zobrazuje ikona aktuální instrukce, po stranách pak indikátory překážek a objektů mimo zorné pole. Při příchodu nové instrukce je ikona krátce animovaně zvětšena a poté vrácena do výchozí velikosti, aby pilot okamžitě zaregistroval změnu.

Indikátor mimo zorné pole se zobrazuje jako šipka, která směřuje pilota k objektům mise ležícím mimo aktuální záběr kamery. Tím se zlepšuje jeho prostorová orientace a usnadňuje plnění zadaných úkolů.

A pro podporu rychlé orientace pilota v okolí dronu byl navržen deseti-segmentový indikátor překážek. Osm segmentů tvoří osmiúhelník kolem dronu (ptačí pohled), dva další signalizují objekty nad a pod dronem (boční pohled). Každý segment mění barvu podle míry rizika, které představuje detekovaná překážka:

- **Zelená** – objekt je detekován, ale jeho vzdálenost je dostatečná a není nutná žádná akce.
- **Žlutá** – překážka se nachází již poměrně blízko; doporučuje se zvýšit pozornost.
- **Červená** – překážka v kritické vzdálenosti; je nutné okamžitě upravit trajektorii letu, aby nedošlo ke kolizi.

Kromě změny odstínu se dynamicky upravuje také sytost barvy podle vzdálenosti objektu, aby vizuální zpětná vazba byla ještě výraznější.

Barevné schéma vzniklo na základě iterativního testování během vývoje. Původně bylo navrženo tříúrovňové rozlišení se žlutou, oranžovou a červenou barvou. V praxi se však ukázalo, že rozdíl mezi oranžovou a červenou není dostatečně výrazný, zejména v kritických situacích. Proto byla paleta zjednodušena na tři dobře rozlišitelné barvy, které pilot ihned vnímá i při rychlém přezkoumání obrazovky.

Indikátory, znázorněné na obrázku 3.5, byly umístěny do levého spodního rohu obrazu, aby nezasahovaly do výhledu z hlavní kamery dronu. Ačkoli se běžně používá rozmístění indikátorů blízkých překážek kolem středu obrazovky pro zvýšení viditelnosti, u tohoto řešení to není vhodné, protože detekce pracuje pouze s objekty vygenerovanými v mapě (budovy, terén) a nezahrnuje živé či doplňkové překážky, jako jsou stromy nebo stožáry. Přesná funkčnost závisí na úplnosti a kvalitě mapových dat a správné konfiguraci kolizních komponent u modelů (více viz 4.6). Umístění v levém dolním rohu tak minimalizuje rušení hlavního záběru, ale stále zajišťuje přehlednou vizualizaci blízkých překážek.



Obrázek 3.5: Vizuální znázornění směrových indikátorů překážek.

3.5 Architektura řešení

DroCo nabízí dva režimy spuštění: server a klient. Z této struktury vychází i celková architektura tohoto řešení, která odpovídá modelu server–klient. Schéma architektury řešení můžete vidět na obrázku 3.6.

DroCo v režimu „Pilot“ přijímá od dronu data (video-stream, GPS, orientace kamery) prostřednictvím externí aplikace DroneDJIStreamer², která je z dronu získává. Aplikace Pilot se pak spouští ve dvou režimech:

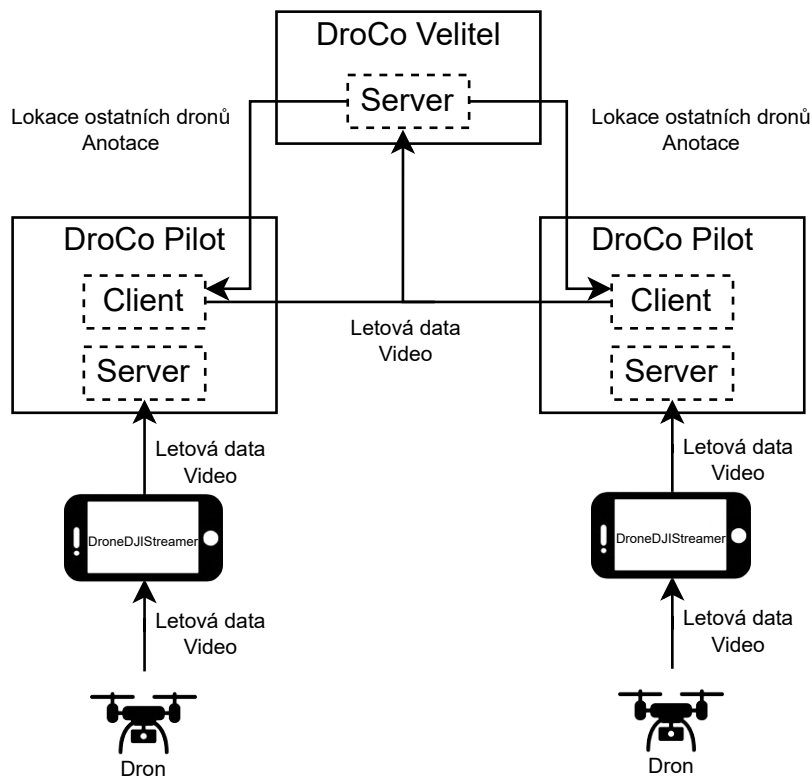
1. **Server-mode:** DroCo-Pilot funguje jako lokální websocketový server, ke kterému se připojuje DroneDJIStreamer (přes Wi-Fi dronu). Tím pilot získává video-stream i telemetrii s minimální latencí, což je klíčové pro bezpečné pilotování.
2. **Client-mode:** DroCo-Pilot zároveň běží v klientském režimu a naváže spojení s instancí DroCo-Velitel (běžící v režimu server). Tento kanál slouží k sdílení obrazu a

²https://github.com/robofit/drone_dji_streamer/

telemetrie s velitelskou aplikací. Latence přenosu k veliteli je o něco vyšší, ale pro koordinaci mise je stále akceptovatelná.

Ve výchozí konfiguraci probíhá veškerá komunikace v rámci lokální sítě (LAN). Pro otestování přenosu „přes internet“ byla využita služba *ngrok*³, jež přeměruje lokální port na veřejnou URL, což umožnilo pilotovi vzdálený přístup k instanci DroCo-Velitel. Toto řešení však není standardně podporováno a slouží pouze jako demonstrace možnosti dálkového připojení.

Velitelská aplikace (DroCo-Velitel) běží výhradně v režimu server, přijímá data od všech pilotů a zobrazuje je pro operátora. Piloti pak prostřednictvím klientských instancí sdílejí své video-streamy a telemetrii. Velitelská aplikace navíc posílá pilotům doplňující informace o aktuální poloze ostatních členů mise (jejich GPS souřadnice) a o právě vytvořených anotacích. Díky tomu má každý pilot přehled o celé situaci a může snadno reagovat na pokyny velitele; zároveň je zajištěna koordinace všech zúčastněných pilotů a orientace o stavu a poloze každého dronu v misi.



Obrázek 3.6: Schéma architektury řešení.

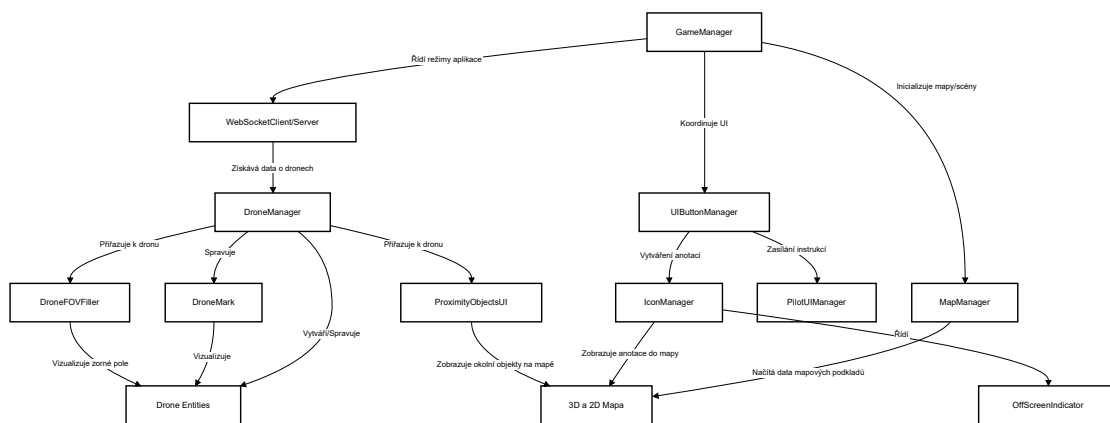
³<https://ngrok.com/>

Kapitola 4

Implementace

Tato kapitola popisuje implementační část práce, která zahrnuje několik komponent integrovaných do nástroje DroCo. Součástí jsou i snímky z aplikace a ladicího režimu, které slouží k vizuálnímu doplnění a ilustraci popisovaných funkcí řešení.

Schéma řešení 4.1 ukazuje hlavní komponenty navrženého systému, které jsou v této kapitole podrobněji popsány.



Obrázek 4.1: Komponentní schéma řešení vizualizačního nástroje, zachycující moduly a popisující hlavní datové toky mezi nimi.

4.1 Komunikace mezi pilotem a velitelem

Původní implementace aplikace DroCo nabízela navázaní spojení mezi jednotlivými instancemi aplikace, ale nebyly definovány další typy zpráv, které by mezi sebou dokázaly posílat a zpracovávat (viz 4.2a). Aplikace sice dokázaly navázat WebSocket spojení, ale komunikace se omezovala pouze na potvrzení připojení bez podpory strukturované výměny informací v rámci mise.

Aby bylo možné realizovat výše popsanou obousměrnou výměnu dat mezi pilotní a velitelskou aplikací, bylo nutné vytvořit vlastní vrstvu komunikace založenou na technologii WebSocket. Ta umožňuje stálé obousměrné spojení mezi klientem a serverem a tím i okamžité předávání zpráv.

Základní princip je následující: jakmile dojde na straně serveru (velitele) ke změně v datech mise – například vytvoření nové ikony na mapě, označení oblasti nebo její smazání (blíže popsáno v kapitolách 4.2 a 4.3) – vytvoří se strukturovaná zpráva ve formátu JSON¹. Tato zpráva je následně odeslána vybranému klientovi (podle jeho identifikátoru klienta) případně všem klientům současně, pomocí metody `MySendMessageToClient`.

Na straně klienta (pilota) je zpráva přijata a zpracována metodou `HandleReceivedData`, která na základě typu zprávy (klíč `type` v JSON objektu) volá odpovídající funkci, která provede danou operaci v klientské aplikaci. Tím je zajištěna konzistence mezi stavem mise na serveru a všech klientů. Schéma komunikace po implementaci je znázorněno na ukázkovém případu viz 4.2b.

Přenos dat ze serveru na klienta

Veškeré zprávy směřující z velitele k pilotovi jsou serializovány do JSON objektu. Při vytvoření anotace (například ikony) je vygenerována zpráva s typem `cmd_icon`. Ta obsahuje geografickou polohu ikony (zeměpisnou šířku a délku, nadmořskou výšku), její název a ID. Pro příklad zprávy viz 1.

```
1  {
2    "type": "cmd_icon",
3    "data": {
4      "latitude": 51.5540,
5      "longitude": -0.1091,
6      "altitude": 31.12,
7      "iconName": "point",
8      "iconID": 14,
9      "clientID": "21_pilots"
10   }
11 }
```

Listing 1: Ukázka JSON zprávy pro vytvoření ikony „Cílový bod“ v aplikaci pilota.

Přenos dat z klienta na server

Komunikace je obousměrná – pilot zasílá veliteli pravidelně data o aktuální poloze svého dronu spolu s video-streamem a případně další informace. Tato data jsou serializovaná do formátu JSON a odesílána metodou `SendToServer`.

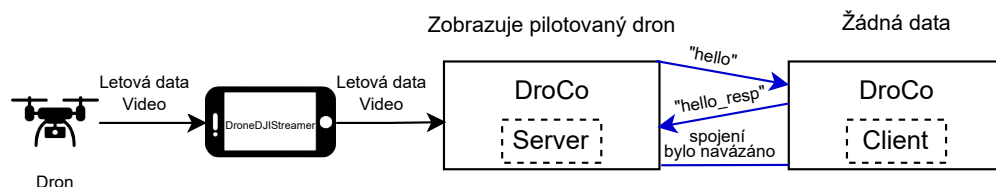
Při testování se ukázalo, že odesílání dat po každém snímku v kombinaci s video-streamem výrazně zatěžovalo pilotní aplikaci. Výsledkem bylo zpomalení a ztráta plynulosti, což činilo aplikaci prakticky nepoužitelnou. Proto byl zaveden jednoduchý mechanismus vzorkování, který omezuje odesílání letových dat pouze na pravidelné časové intervaly.

Každá zpráva je nejprve zpracována metodou `EnqueueFlightDataToCommander`, která doplní identifikátor klienta a uloží zprávu do proměnné `pendingMessage`. Metoda `Update`, volaná v každém snímacím cyklu Unity, sleduje čas od posledního přenosu. Pokud uply-

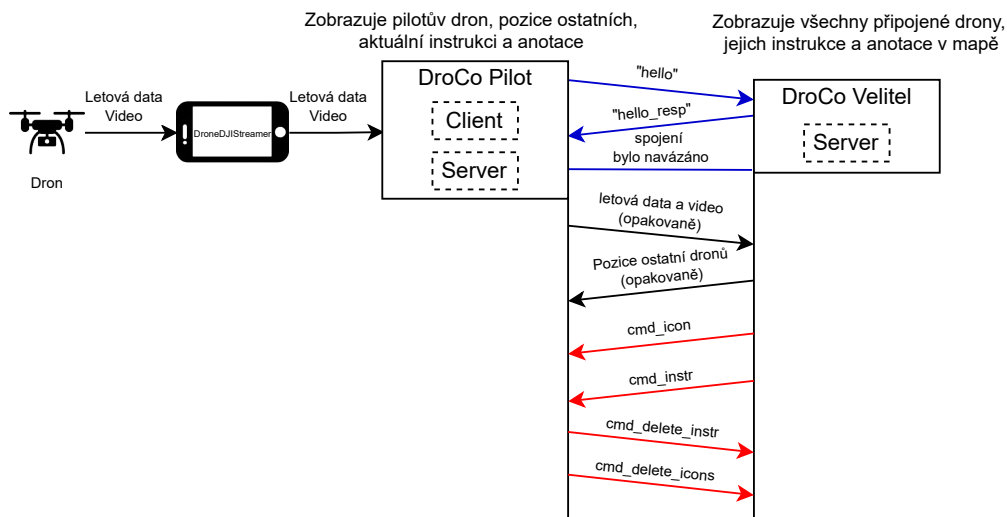
¹<https://www.json.org/json-en.html>

nul dostatečný interval, zpráva se odešle synchronně pomocí `DirectSend`. Tento přístup zajišťuje stabilní a pravidelný přenos bez nadměrného zatížení hlavního vlákna.

Vedle toho se v aplikaci používá i asynchronní odesílání, určené pro méně frekventované zprávy, jako je odstranění nebo zvýraznění anotace či aktualizace průběhu prozkoumání oblasti. Tyto zprávy nejsou kritické na přesné načasování, a proto je jejich odeslání realizováno přímo metodou `SendToServer` bez použití fronty.



(a) Server pouze naváže WebSocket spojení s dronem a zobrazí jeho data. Klient se může připojit, ale po handshake neodesílá ani nezpracovává žádné strukturované zprávy.



(b) Pilotní aplikace zobrazuje model a videopřenos pouze svého dronu, u ostatních dronů pouze jejich GPS pozici. Velitelská aplikace vykresluje model i video-přenos všech připojených dronů. Po handshake (modře) následují periodické letové a videodata (černě) a řídicí příkazy pro vytvoření, splnění i odstranění ikony (červeně).

Obrázek 4.2: Komunikační sekvence mezi pilotní a velitelskou aplikací: 4.2a původní implementace bez aplikačních příkazů; 4.2b rozšířená výměna zpráv včetně periodické výměny letových dat mezi instancemi aplikací, video-přenosu a řízení anotací.

4.2 Vytváření anotací – ikony

Pro rychlou, neverbální komunikaci mezi velitelem mise a pilotem dronu byl vyvinut specializovaný nástroj, který umožňuje vkládat vizuální ikony přímo do trojrozměrné mapy. Velitel tak jediným kliknutím označí bod či oblast zájmu, okamžitě jej vidí ve své 3D scéně

a současně je stejná ikona vytvořena i na klientské aplikaci pilota. Pilot tak bez potřeby hlasové komunikace získává aktuální instrukce včetně přesné geografické lokace.

Vytvoření ikony

Velitel si nejprve v uživatelském rozhraní zvolí konkrétní typ ikony a následně klikne do scény. K dispozici jsou tři pohledy: 3D zobrazení, okno mini-mapy nebo překryv rozšířené reality s živým obrazem z dronu. Aplikace při stisku myši zavolá metodu `ScreenPointToRay`, která převádí obrazovou souřadnici kurzoru na směrový paprsek (`Raycast`); ten je omezen maskou `myLayerMask`, aby kolidoval výhradně s relevantními vrstvami (například terénem a budovami) a ignoroval uživatelské rozhraní i další nerelevantní objekty. Ikony ve 3D mapě velitele jsou znázorněny obrázkem 4.4. Jak bylo zmíněno, velitel může vkládat ikony i přes FPV pohled z dronu. To se hodí zejména v případech, kdy chce velitel umístit ikonu na konkrétní místo, jež v mapových podkladech není dostatečně detailní (např. okno budovy). Bez FPV by musel umístění odhadovat podle 3D modelu, zatímco FPV mu umožňuje ikonu vložit přesně tam, kam zamýšlí (viz. 4.5).

Dojde-li ke kolizi, tedy pokud paprsek narazí na objekt obsahující kolizní komponentu (`Collider`), metoda `ConvertCoordinates` přepočte zasažené Unity souřadnice na geografické hodnoty ve formátu ArcGIS – konkrétně zeměpisnou délku, šířku a výšku. Stejný mechanismus se využívá i při vkládání čtyř rohů oblasti k prohledání (popsané v kapitole 4.3). Rozdíl spočívá pouze v typu objektu, který je na základě získaných souřadnic do scény vytvořen.

Instance ikony

Ke každé instanci ikony je přiřazen skript `IconPrefab`, který obsahuje definici stejnojmenné třídy. Již v okamžiku instanciací volá řídicí třída `IconManager` inicializační metodu `InitIcon`. Ta nejprve aktivuje `ArcGISLocationComponent` a předá mu přesnou zeměpisnou délku, šířku a výšku v souřadnicové soustavě WGS-84²; Unity si tyto hodnoty interně přepočte do vlastního souřadnicového systému, takže objekt zaujme správnou pozici ve 3D scéně. Současně metoda vytváří 2D protějšek značky v mini-mapě, přiděluje jednoznačný identifikátor a připravuje textový prvek, který bude později zobrazovat vzdálenost od dronu. Aby byla zaručena plná viditelnost i ve složitém terénu, všechny ikony využívají speciální *shader* `IconShaderGame`; ten nastavuje parametry `ZTest Always`³ a `ZWrite Off`⁴, tímto nastavením se ikony vykreslují až po všech ostatních objektech a nemůže dojít k jejich nežádoucímu prolínání s budovami nebo terénem.

Aby měl pilot lepší přehled o umístění ikony, tak v jeho aplikaci dochází k aktualizaci vzdálenosti mezi dronem a ikonami, která probíhá pokaždé, když dron odešle své nové souřadnice. `IconManager` tehdy zavolá metodu `UpdateDistanceToIcon`, která iteruje přes všechny existující značky a u každé spouští metodu `SetNewDistance`. Tato metoda promítne polohu dronu i ikony do roviny a pomocí knihovny `ArcGIS GeometryEngine`⁵ vypočítá přesnou metrickou vzdálenost. Výsledek uloží do atributu `distanceToDrone` a okamžitě aktualizuje textový štítek, takže pilot má neustále k dispozici aktuální informaci o tom, jak daleko se od cíle nachází. Znázornění vzdálenosti nad ikonou je znázorněno na obrázku 4.3.

²<https://www.gisonline.cz/slovník/wgs-84/>

³<https://docs.unity3d.com/Manual/SL-ZTest.html>

⁴<https://docs.unity3d.com/6000.0/Documentation/Manual/SL-ZWrite.html>

⁵<https://developers.arcgis.com/javascript/latest/api-reference/esri-geometry-geometryEngine.html>

Během prvotního testování se ukázalo, že pilot často nedokáže spolehlivě rozlišit, zda se ikona nachází před budovou, nebo je za ní skryta. Proto byla doplněna metoda `CheckVisibility`, která se periodicky (každých 0.1 s) spouští pomocí korutiny v aplikaci pilota. Z pozice kamery pro pohled první osoby (FPV) jsou vyslány tři paprsky (na střed, horní a dolní okraj ikony) a zjišťuje se, zda je značka zakrytá budovou. Pokud všechny tři paprsky narazí na geometrii budovy, skript vyhodnotí značku jako zakrytou a sníží její alfa kanál přibližně o třetinu.

Pro zpřehlednění případu, kdy velitel zadá více ikon typu *cílový bod* najednou, byla implementována fronta ikon `IconQueue`, do které se tyto ikony postupně přidávají v pořadí jejich vytvoření. Vždy je plně viditelná pouze první (nejstarší) ikona ve frontě, zatímco všechny následující mají sníženou průhlednost nastavením alfa kanálu na přibližně deset procent. Po smazání či splnění prvního bodu se automaticky zvýší viditelnost další ikony ve frontě, tím pilot získá informaci o tom, který bod na mapě je právě aktivní.



Obrázek 4.3: Pohled z aplikace pilota na vložené ikony za využití rozšířené reality.



Obrázek 4.4: Stejná situace z aplikace velitele a pohledu na 3D mapu.



Obrázek 4.5: Ukázka FPV režimu v aplikaci velitele při vkládání ikony „Cílový bod“ pro dron Mavic Mini na konkrétní okno. Díky FPV pohledu lze ikonu umístit přesně na zamýšlené místo; nad ikonou se zobrazuje jméno vybraného dronu (na rozdíl od pilotovy aplikace, kde se u ikony zobrazuje vzdálenost). Pokud je ikona určena všem dronům, žádné označení nad ní není.

4.3 Vytváření anotací – oblast k prohledání

Další možnost pro efektivní neverbální komunikaci mezi velitelem a piloty je nástroj pro označení konkrétní čtyřúhelníkové oblasti v trojrozměrné mapě. Tato oblast se následně zobrazí i v aplikaci pilota a je připravena k průzkumu. Obě strany (velitel i pilot) mají v reálném čase přehled o průběhu prohledávání dané oblasti.

Vytvoření oblasti

Velitel ve své aplikaci označí čtyři body na mapě, ze kterých jsou získány jejich geografické souřadnice: zeměpisná šířka, délka a výška. Následně je zavolána inicializační metoda třídy `AreaPrefab`, která spočítá aritmetický průměr souřadnic těchto bodů a tím určí geografický střed oblasti. Tento bod je použit jako pivotní referenční bod pro instanci objektu `AreaPrefab` ve scéně. Jedná se o běžný přístup, kdy pouze kořenový objekt obsahuje komponentu `ArcGISLocationComponent`, zatímco všechny jeho podobjekty (rohy, mřížka buněk apod.) jsou umístěny relativně pomocí lokálních souřadnic. Díky tomu, že jsou rohové body zpracovávány relativně ke středu, lze tímto způsobem snadno reprezentovat i oblasti, které neleží v horizontální rovině, například stěny budov či šikmé plochy.

Vizuální reprezentace oblasti je realizována pomocí komponenty `LineRenderer`, která propojuje čtyři zadané rohy a vytváří z nich uzavřený čtyřúhelník.

Hned poté je oblast rozdělena na jemnější mřížku, která se skládá z maximálně 100 buněk. Tento počet byl zvolen s ohledem na optimalizaci výkonu aplikace, jelikož příliš vysoký počet buněk by mohl způsobovat zbytečnou zátěž na systém. Vyšší počet buněk by sice umožnil jemnější granularitu a tím i přesnější zobrazení pokrytí oblasti, avšak z důvodu udržení plynulého běhu aplikace byl zvolen právě tento kompromis.

Pro oblast k vyplnění buňkami se vypočítají dva směrové vektory – určené jako spojnice mezi rohy 0-1 a 0-3. Tyto dva vektory určují výšku a šířku vyplňovaného obdélníku a vymezují rovinu, ve které bude mřížka vytvořena. Výsledný tvar tvoří pravidelný čtyřúhelník, který je jednoduché rovnoměrně rozdělit. Pokud velitelem označená oblast není ideálně pravoúhlá, může dojít k mírné nepřesnosti při rozložení mřížky. V případě pravidelného obdélníku však bude vyplnění přesné. Tento přístup je zvolen záměrně, protože zachovává jednoduchost implementace a výpočetně nenáročné rozdělení prostoru.

Každá buňka je reprezentována jako plochý kvádr s velmi nízkou výškou a je vybavena komponentou `GridCellData`, která sleduje její pozici v mřížce (`GridX`, `GridY`) a počet detekcí v zorném poli dronu `countInView`.

Původní řešení pracovalo s tím, že byly buňky zpočátku neaktivní (neviditelné) a aktivovaly se teprve po průzkumu, aktivace byla znázorněna zelenou barvou buňky (viz 4.8). V praxi se však ukázalo jako efektivnější opačné chování: všechny buňky jsou od počátku aktivní a zbarveny červeně (viz obrázek 4.7. Jakmile pilot danou oblast dostatečně prozkoumá, dojde k deaktivaci buňky. Tím je pilotovi jasně signalizováno, že příslušná část oblasti již byla pokryta.

Barva buněk byla původně příliš výrazná, což zhoršovalo přehlednost mapy. Proto byla upravena jejich průhlednost změnou alfa kanálu na hodnotu 0.25, čímž se zlepšila čitelnost rozhraní bez ztráty informační hodnoty.

Prohledávání oblasti

K prohledávání oblasti je využita třída `DroneFOVFiller`, která si při vytvoření nového dronu ve scéně automaticky získá referenci na tento objekt a tím i přístup k jeho aktuální

poloze a směru pohledu v mapě. Tato třída tedy slouží k detekci, zda se jednotlivé buňky nachází v zorném poli kamery dronu.

Zorné pole dronu je definováno pomocí šesti rovin, které společně vytváří oblast viditelnosti ve tvaru kolmého jehlanu. Pravá a levá rovina jsou vypočítány rotací hlavního směrového vektoru (forward) kolem vektoru směřujícího vzhůru (up), zatímco horní a spodní rovina se určují obdobným způsobem s využitím vektoru směřujícího doprava (right). K těmto čtyřem stranám se přidává také „blízká“ rovina (near plane), která se nachází v místě modelu dronu, a „vzdálená“ rovina (far plane), která je určena bodem dopadu středového paprsku.

Středový paprsek je generován z pozice dronu ve směru kamery a je realizován pomocí technologie **Raycast**. Pokud paprsek narazí na překážku, použije se tato vzdálenost jako hloubka zorného pole. V místě dopadu se zorné pole graficky zobrazuje jako obdélník.

K určení rozměrů zorného pole dronu se vychází z horizontálního a vertikálního zorného úhlu kamery (HFOV, VFOV). Pro správné vykreslení obdélníkové projekce zorného pole ve scéně je potřeba znát jeho šířku a výšku v dané vzdálenosti od dronu. Tyto hodnoty jsou počítány podle vzorců uvedených níže 4.2.

Z dokumentace k dronu DJI Mavic Mini ⁶, který byl využit pro testování aplikace, vyplývá, že diagonální zorný úhel kamery je 82° a poměr stran senzoru je 4:3. Vzhledem k tomu, že výrobce neuvádí přímo hodnoty horizontálního a vertikálního FOV, je nutné je dopočítat na základě známé diagonály a poměru stran. Výpočet je uveden v rovnici 4.1.

$$\text{HFOV} = 2 \arctan \left(\frac{\left(\frac{4}{3}\right) \tan\left(\frac{82^\circ}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{4}{3}\right)^2 + 1}} \right), \quad (4.1)$$

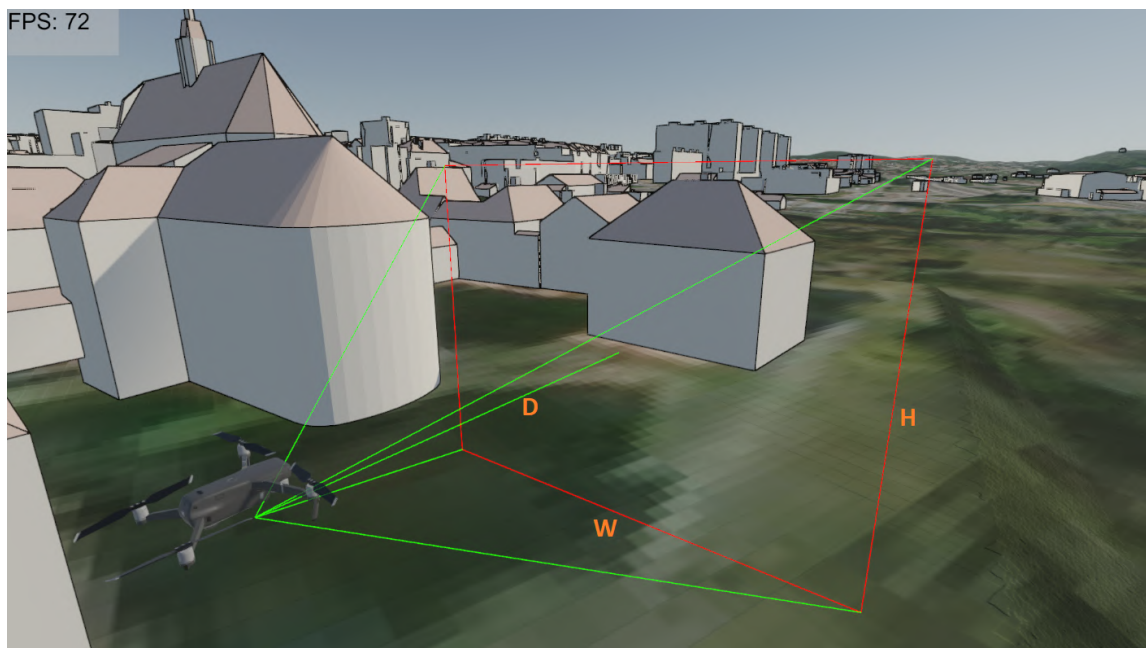
$$\text{VFOV} = 2 \arctan \left(\frac{\tan\left(\frac{82^\circ}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{4}{3}\right)^2 + 1}} \right).$$

$$W = 2D \tan\left(\frac{\text{HFOV}}{2}\right), \quad (4.2)$$

$$H = 2D \tan\left(\frac{\text{VFOV}}{2}\right)$$

Z rovnic (4.1) vyplývá, že horizontální zorný úhel kamery činí přibližně 70° a vertikální 55°. V implementaci však byly použity nižší hodnoty: 63° pro horizontální a 40° pro vertikální úhel. Důvodem této úpravy bylo zlepšení detekce buněk, které nejsou vůči kameře dronu zcela kolmé. Za tímto účelem byla vzdálená rovina (far plane), tedy ta, která odpovídá místu dopadu obdélníku znázorňujícího zorné pole (viz obrázek 4.6), uměle posunuta o několik jednotek dále. Posunutím této roviny došlo k mírnému rozšíření výřezu zorného pole, následkem toho byla více zkreslená a nepřesná detekce. Proto byly zorné úhly následně zúženy, aby tento efekt kompenzovaly a zachovaly přesnost detekce i při snímání pod méně ideálními úhly.

⁶https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_Mini/Mavic_Mini_User_Manual_v1.0_en_1.pdf



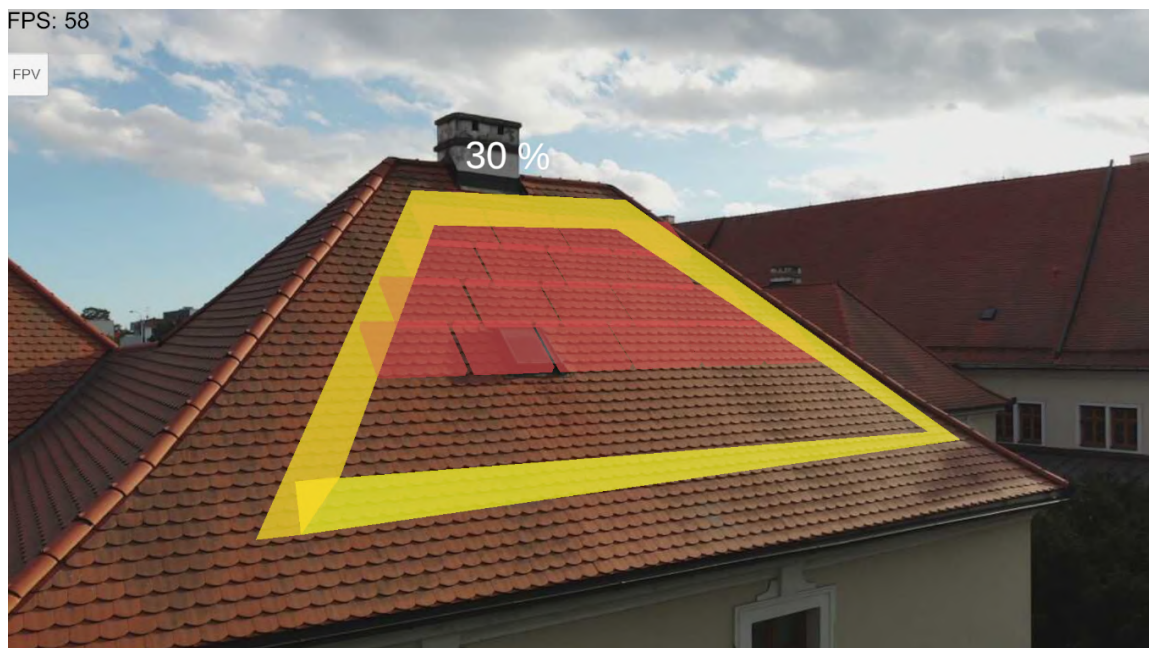
Obrázek 4.6: Vizualizace zorného pole dronu v prostředí Unity pomocí nástroje Gizmos.

Každá buňka mřížky je testována metodou `IsCellInFOV`, která ověřuje všech osm rohů jejího ohraničujícího kvádru (*bounding box*). Pokud se alespoň jeden z rohů nachází uvnitř všech rovin tvořících zorné pole dronu (vyjma blízké roviny), a zároveň žádný z rohů neleží za touto blízkou rovinou, je buňka označena jako potenciálně viditelná.

Prvotní řešení v tomto místě končilo, a pokud byla buňka označena jako potenciálně viditelná, byla okamžitě považována za prohledanou. Ačkoliv tento přístup technicky fungoval, v praxi se ukázal jako nedostatečný. Docházelo totiž k situacím, kdy byla buňka označena za prozkoumanou i při velmi krátkém a nevhodném záběru – například pokud se dron na danou oblast podíval jen na zlomek sekundy a navíc pod výrazně šikmým úhlem. Zvláště při průzkumu fasád budov nebo jiných přesně definovaných oblastí je však důležité, aby byla každá část sledována stabilně a pod vhodným úhlem. Z tohoto důvodu bylo původní chování nahrazeno přesnějším vyhodnocením, které lépe odpovídá požadavkům na praktické použití.

Nové řešení proto zavádí doplňující kontrolu, která zvyšuje spolehlivost průzkumu. Pilot musí mít danou buňku v zorném poli alespoň dvě sekundy, než je považována za definitivně prozkoumanou. Každá buňka má k tomu určenou proměnnou `countInView`, která se inkrementuje při každé iteraci korutiny. Korutina `DoAreaDetection` je spouštěna v pravidelném intervalu 0.2 sekundy, a pokud tedy dojde k deseti detekcím splňujícím podmínky, buňka je označena jako prozkoumaná. Tímto způsobem je pilot vizuálně informován, že daná část oblasti byla již dostatečně nasnímána.

Zároveň je implementována kontrola úhlu mezi normálou buňky a směrem pohledu dronu. Pokud je prostorový úhel menší nebo roven nastavené toleranci ($\pm 15^\circ$), je buňka považována za správně natočenou vůči pohledu kamery. Tím se eliminuje možnost, že by byla oblast označena za prozkoumanou při sledování z extrémního nebo nevhodného úhlu.



Obrázek 4.7: Zobrazení oblasti k prohledání v rozhraní pilotní aplikace s podporou rozšířené reality.



Obrázek 4.8: Zobrazení v aplikaci velitele s počátečním návrhem, kdy se buňky aktivovaly po prohledání a zbarvily zeleně. Na obrázku je 3D model dronu skenující budovu a v popředí záběr z jeho FPV kamery.

4.4 Zvýraznění anotací

Po vyhledání oblasti nebo vložení ikony je důležité, aby pilot snadno identifikoval, na kterou anotaci se má aktuálně soustředit. Za tímto účelem byl navržen systém zvýraznění anotací. Zvýraznění je vždy iniciováno ze strany velitele, který buď přímo vybere konkrétní anotaci prostřednictvím uživatelského rozhraní, nebo jej nepřímo spustí odesláním instrukce pilotovi. V takovém případě se na základě přijaté instrukce na straně pilota automaticky rozhodne, která anotace má být zvýrazněna, a tato informace se následně zpětně přepośle veliteli. Podrobnější popis tohoto mechanismu je uveden v kapitole věnované instrukcím (4.5).

V případě ikon je zvýraznění realizováno pomocí pulzující změny měřítko – ikona se rytmicky zvětšuje a zmenšuje. U oblastí k prohledání se zvýraznění projevuje změnou barvy vybraného čtyřúhelníku ze standardní červené na výrazně žlutou. Díky tomu je daná oblast na mapě jednoznačně odlišena od ostatních.

Vlastní zvýraznění se provádí pomocí metody `ToggleHighlight`, která kromě přepnutí vizuálního stavu také eviduje, pro které klienty je daná anotace zvýrazněna. Zvýrazňovací mechanismus je přitom oddělen zvlášť pro ikony a zvlášť pro oblasti, takže u jednoho klienta může být současně zvýrazněna jedna ikona a zároveň jedna oblast. Nikdy však nemůže být zvýrazněno více ikon nebo více oblastí najednou – pokud dojde k výběru další anotace téhož typu, předchozí zvýraznění se automaticky zruší a nahradí novým.

Směrový ukazatel

Pro zajištění přehledu o zvýrazněných objektech, které se nacházejí mimo aktuální zorné pole kamery, byl implementován směrový indikátor ve formě šipky umístěné na okraji obrazovky. Tato šipka ukazuje směrem k danému objektu a dynamicky se přizpůsobuje velikosti a poměru stran obrazovky tak, aby vždy zůstala viditelná a správně orientovaná. Šipka můžete vidět na obrázku 4.9.

Indikátor se zobrazuje pouze tehdy, pokud není zvýrazněný objekt (ikona nebo oblast) viditelný v rámci kamery. V opačném případě je skryt. Každý objekt, který je zvýrazněn metodou `ToggleHighlight`, se zároveň zaregistruje do komponenty `OffscreenIndicator`, která zařídí vytvoření a aktualizaci odpovídající šipky. Vizuální styl indikátoru je navržen tak, aby nerušil, ale zároveň poskytoval jasnou navigační informaci o směru k důležitému cíli.

4.5 Instrukce pro pilota

Instrukce slouží jako jednoduchý prostředek, jak může velitel upoutat pozornost pilota na konkrétní cíl či úkol. Jsou to vizuální prvky zprostředkované prostřednictvím ikony zobrazené v horní části obrazovky pilotní aplikace. Tato ikona reprezentuje typ požadované činnosti (například změnu pozice, přistání či prohledání oblasti) a zůstává zobrazená, dokud instrukce není splněna, nebo dokud velitel nepošle novou, případně výslovně nezruší stávající pokyn.

Hlavním účelem instrukcí je propojení s anotacemi v mapě. Jakmile pilot obdrží instrukci, jeho aplikace vyhodnotí, která anotace je s daným typem instrukce nejrelevantnější, a tu následně zvýrazní. Konkrétně:

Změna pozice – zvýrazní se první ikona ve frontě typu *Cílový bod* – tedy ta, která byla zadána nejdříve.

Přistání – vybere se nejbližší ikona typu *Přistávací plocha* vzhledem k aktuální poloze dronu.

Prohledání oblasti – zvýrazní se nejstarší oblast, která byla dosud označena, ale ještě nebyla zcela zpracována.

Zaměření – vybere se nejbližší ikona typu *Zaměření* – pilot se má zaměřit kamerou na tento bod.

Zvýraznění vždy probíhá na straně pilota, aby bylo možné lokálně rozhodnout, která anotace nejlépe odpovídá danému kontextu (například nejbližší ikona typu *Zaměření*). Po vyhodnocení pilotní aplikace odešle zpětně veliteli informaci o tom, která konkrétní anotace byla zvýrazněna, a ta se zvýrazní i v jeho aplikaci.



Obrázek 4.9: Zobrazení směrového ukazatele v aplikaci pilota. Šipka ukazuje na zvýrazněnou ikonu, jejíž zvýraznění bylo vyvoláno přijatou instrukcí (viditelnou v horní části obrazovky).

4.6 Vizualizace blízkých překážek

Pro zvýšení situačního přehledu pilota a podporu bezpečné navigace dronu je implementována nástroj pro detekci blízkých překážek. Tato komponenta funguje na základě prostorové analýzy okolí modelu dronu ve scéně (tedy na základně mapových podkladů) a následného oznámení detekovaných překážek skrze vizuální indikátory v uživatelském rozhraní.

Detekce překážek ve scéně

Celá funkcionality je implementována ve třídě *ProximityObjectsUI*, která je připojena k hernímu objektu odpovědnému za směrové indikátory v rámci uživatelského rozhraní pi-

lota. Podobně jako jiné komponenty v systému si tato třída po spuštění dynamicky získává referenci na dron umístěný ve scéně. Z jeho aktuální pozice následně periodicky vysílá množství směrových paprsků do okolního prostředí za účelem detekce potenciálních překážek.

Každý paprsek kontroluje, zda zasáhne objekt, který se nachází v rámci předem definovaného detekčního poloměru a zároveň náleží do některé z vrstev určených pomocí tzv. `detectionMask`. Princip filtrování pomocí vrstev je obdobný jako u mechanismu vytváření ikon, popsaného v kapitole o vytváření anotací (4.2).

K pokrytí prostoru okolo dronu je použito celkem deset primárních směrů: osm v horizontální rovině a dva vertikálně, jak můžete vidět na snímku 4.10. Z těchto směrů je následně generován vějíř dalších směrových vektorů, které vytvářejí hustší síť paprsků. Tento vějíř je vytvořen metodou `AddFanPatternRays` a zajišťuje dostatečnou prostorovou přesnost.

Počet použitých paprsků není konstantní, ale adaptivně se mění v závislosti na vzdálenosti detekovaného objektu. Čím je objekt blíže dronu, tím více směrových paprsků je k jeho detekci použito. Naopak vzdálenější objekty jsou kontrolovány s menším počtem paprsků, tento princip výrazně snižuje výpočetní náročnost. Tato strategie je implementována v metodě `ProcessColliders`, která dynamicky určuje optimální rozsah detekce s ohledem na výkon a přesnost.

Každý zásah paprsku je dále analyzován pomocí funkce `DetermineDirection`, která na základě úhlu mezi směrovým vektorem a lokální orientací dronu (dopředu, doprava, vzhůru) přiřazuje detekci do jednoho z definovaných směrů. Pokud je objekt již detekován v daném směru, uchovává se pouze ten s menší vzdáleností.

Vizualizace v uživatelském rozhraní

Po spuštění korutiny `DetectObstaclesRoutine` se nejprve načte seznam detekovaných objektů a zavolá se metoda `UpdateUI`, která zajišťuje grafickou odezvu na aktuální stav okolí dronu. Nejdříve se voláním `ResetSegments` obnoví všechny segmenty indikátorů na výchozí průhlednou barvu.

Poté se u každého záznamu `DetectionInfo` v kolekci `detectedObjects` vypočte intenzita průhlednosti metodou `CalculateIntensity`, jež využívá prahové hodnoty `criticalWarningThreshold` a `proximityWarningThreshold`. Na základě této intenzity se v metodě `CalculateWarningColor` určí odstín barvy (zelená, žlutá, červená) a její alfa složka.

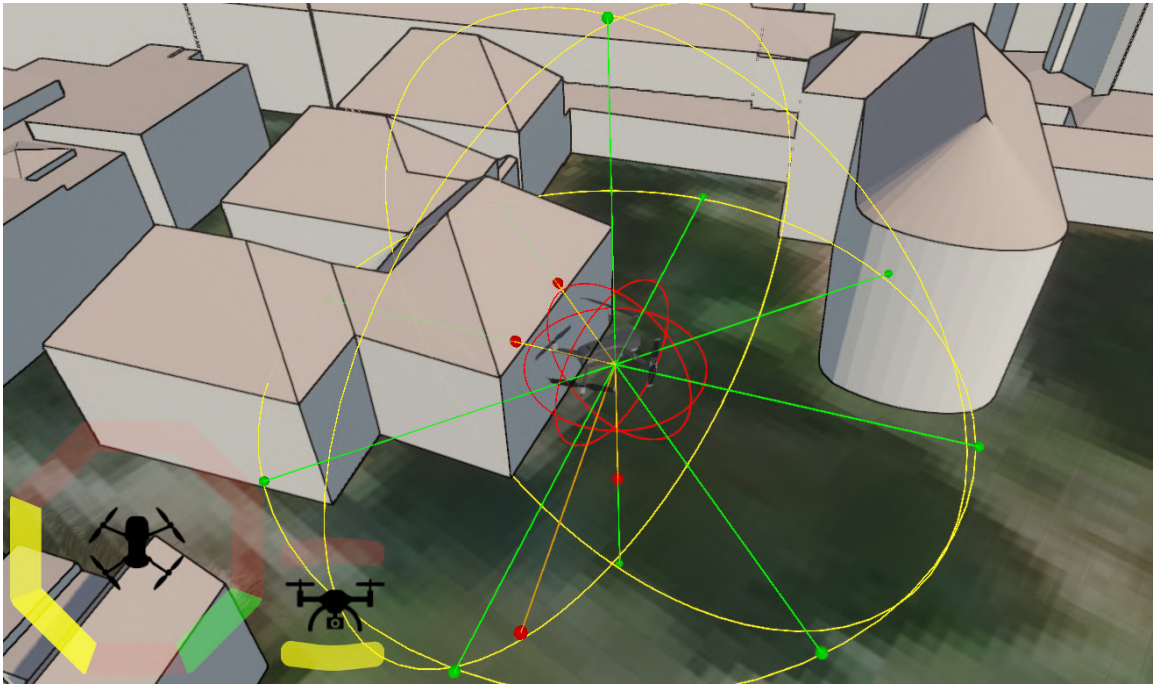
Výsledná barva je následně přiřazena příslušnému segmentu podle směru detekovaného objektu metodou `UpdateSegmentForDirection`. Aby se snížila výpočetní náročnost, není `UpdateUI` volána v každém snímku (například v `Update`), ale je spouštěna korutinou s periodicitou 0.2 sekund. Tento přístup zajišťuje plynulou a zároveň efektivní aktualizaci uživatelského rozhraní.

Ladění a vizualizace v editoru

Na obrázku 4.10 je zachycen stav po aktivaci režimu ladění, který zobrazuje pomocí nástroje `Gizmos` všechny klíčové prvky detekce v editoru Unity. Zelené paprsky představují primární směrové vektory detekce, ze kterých se vytvářejí vějířovité vzory pro přesnější rozložení směrových paprsků. Žlutě je znázorněna hranice celkového detekčního rádia, zatímco červené kružnice uprostřed definují kritickou oblast v bezprostřední blízkosti dronu.

Žluté detekční paprsky indikují, že došlo k zásahu objektu, a končí malou červenou sférou označující místo dopadu. Na obrázku je dále patrné, že v reakci na tuto detekci dochází

k aktualizaci uživatelského rozhraní (vlevo dole), kde jsou příslušné segmenty osmiúhelníku a spodní indikátor obarveny podle vzdálenosti detekovaných objektů.



Obrázek 4.10: Zobrazení směrových detekcí v režimu ladění pomocí Gizmos.

4.7 Pozice ostatních dronů v misi

Pro zvýšení přehlednosti situace v misi je pro pilota implementována komponenta `DroneMark`, která označuje ostatní drony červeným čtvercem. Komponenta se aktivuje, jakmile se k veliteli připojí více dronů, a začne ostatní piloty informovat o aktuální poloze dalších dronů v misi. To se děje pomocí zaslání zprávy obsahující identifikátor klienta (`client_id`) spolu s jeho geografickými souřadnicemi.

Aplikace pilota nejdříve zkontroluje, zda se podle `client_id` nejedná o jeho vlastní dron. V případě, že data odpovídají jeho vlastnímu dronu, zprávu ignoruje. Pokud data patří jinému dronu, pilotní aplikace ověří, zda již existuje instance objektu `DroneMark` odpovídající přijatému identifikátoru. Existující instance aktualizuje svoji pozici na základě přijatých GPS dat. Jestliže instance neexistuje, vytvoří novou pomocí metody `AddDroneMark`. Celou tuto funkcionalitu zajišťuje metoda `HandleReceivedDronePosition` ze třídy `DroneManager`.

Komponenta `DroneMark` se v pilotově aplikaci vizuálně zobrazuje jako červený čtverec, který je umístěn ve scéně na pozici jiného dronu zapojeného do mise. Vzhledem k tomu, že pilot během letu využívá pohled rozšířené reality (AR), je tento čtverec promítán do obrazu z kamery dronu pomocí prolínání jednotlivých vrstev scény – čímž vzniká efekt, že je cizí dron označen přímo v reálném obrazu. Tento čtverec je však pouze vizualizací přijatých dat ze zařízení jiného pilota a jeho poloha tedy může být mírně zpožděná v závislosti na síťové latenci nebo frekvenci aktualizací. V důsledku toho nemusí být čtverec v AR pohledu vždy přesně zarovnan s reálnou pozicí dronu, zvláště při rychlém pohybu.

Na obrázku 4.11 je zachycena ukázka z pilotní aplikace, kde je viditelné označení cizího dronu červeným čtvercem v pohledu AR. Naproti tomu ve velitelské aplikaci, která zobrazuje situaci na 3D mapě, nejsou červené čtverce použity – místo nich se ve scéně nacházejí modely všech aktivních dronů s jejich identifikátory (viz obr. 4.12).



Obrázek 4.11: Zobrazení cizího dronu pomocí komponenty DroneMark v AR pohledu pilota.



Obrázek 4.12: Pohled velitele na 3D mapu s modely všech aktivních dronů a jejich pohledy z kamery.

Kapitola 5

Testování a vyhodnocení nástroje

Již během vývoje aplikace bylo pravidelně prováděno testování nově implementovaných komponent. Protože pro správnou komunikaci mezi jednotlivými instancemi Unity aplikace, je vyžadováno, aby každá instance byla v popředí, tak byl od vedoucího vypůjčen další notebook. Tím bylo umožněno spustit aplikaci pilota a velitele samostatně na dvou různých zařízeních. Vzhledem k tomu, že aplikace pro pilota byla plánovaná pro provoz na tabletu, musel být i na toto brán zřetel a po větších zásazích do implementace byla aplikace sestavena i pro operační systém Android. Z tohoto důvodu byl zapůjčen tablet Samsung Galaxy Tab S6 s operačním systémem Android verze 12.

5.1 Praktické testování v terénu

Následně proběhlo také testování aplikace přímo v terénu. Pro tyto účely bylo nezbytné získat osvědčení o způsobilosti dálkově řídicího pilota kategorie A1/A3¹. Pro terénní zkoušky byl vedoucím práce zapůjčen dron Mavic Mini 1. První lety byly prováděny pod dohledem vedoucího, s kterým byly poté také zaletěny lety s využitím implementované aplikace. Už v rámci těchto testů byly identifikovány různé oblasti pro zlepšení aplikace, na jejichž základě byly následně provedeny další optimalizace. Mezi ně patří implementace tlačítka umožňujícího vypnutí vrstvy s videem z kamery dronu a přidání režimu zobrazení z ptačí perspektivy. Tyto změny vedly k lepší přehlednosti mapy pro velitele mise. Z pohledu pilota byla provedena úprava velikosti ikon, které dříve příliš překrývaly obraz, a byla opravena chyba nesprávné orientace ikon v mapě.

Pro první testy v terénu se původně plánovalo využití fakultní Wi-Fi sítě eduroam². Z důvodu časté vytíženosti této sítě se však nakonec přistoupilo k použití mobilního hotspotu. Prostřednictvím tohoto hotspotu byla realizována komunikace mezi zařízením pilota (tablet), velitelskou aplikací (notebook) a mobilním telefonem, na kterém běžela aplikace DroneDJStreamer³. Aplikace DroneDJStreamer slouží jako prostředník mezi dronem a aplikací DroCo. Získává a předává nezbytná data, jako jsou videozáznamy a informace o aktuální lokaci dronu, která aplikace DroCo následně zpracovává.

¹<https://dron.caa.cz/>

²<https://www.eduroam.cz/cs/start>

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

5.2 Návrh experimentů

Pro ověření použitelnosti aplikace v reálných podmínkách při řízení dronu byly navrženy následující experimenty, jejichž cílem bylo posoudit efektivitu neverbální komunikace prostřednictvím ikonických anotací v porovnání s verbální komunikací mezi pilotem dronu a velitelem mise.

Každý z experimentů se skládal ze dvou částí. V první části měl pilot k dispozici pouze aplikaci DroneDJISreamer, která mu poskytovala přehled o poloze dronu prostřednictvím videozáznamu. Velitel mise měl v této části k dispozici pouze mapu s vyznačenými body a musel sledovat aktuální polohu dronu. Testeři byli požádáni, aby simulovali komunikaci na dálku (například prostřednictvím vysílačky), takže nemohli využívat gesta ani vzájemně ukazovat své obrazovky.

Ve druhé části experimentu měl pilot k dispozici kompletní implementovanou aplikaci na tabletu. Díky ní mohl využívat pohled kamery dronu doplněný o prvky rozšířené reality, tedy zejména anotace vytvořené velitelem. Velitel v této části rovněž používal implementovanou aplikaci, a to v režimu velitele. Díky tomu mohl nejen vidět aktuální polohu dronu a videozáznam, ale také aktivně přidávat anotace přímo do mapy.

Cílem experimentů bylo ověřit, zda integrované ikony v aplikaci a využití prvků rozšířené reality pomáhají eliminovat možný komunikační šum mezi velitelem a pilotem dronu, a zároveň získat zpětnou vazbu týkající se celkové uživatelské zkušenosti.

Přípravná fáze

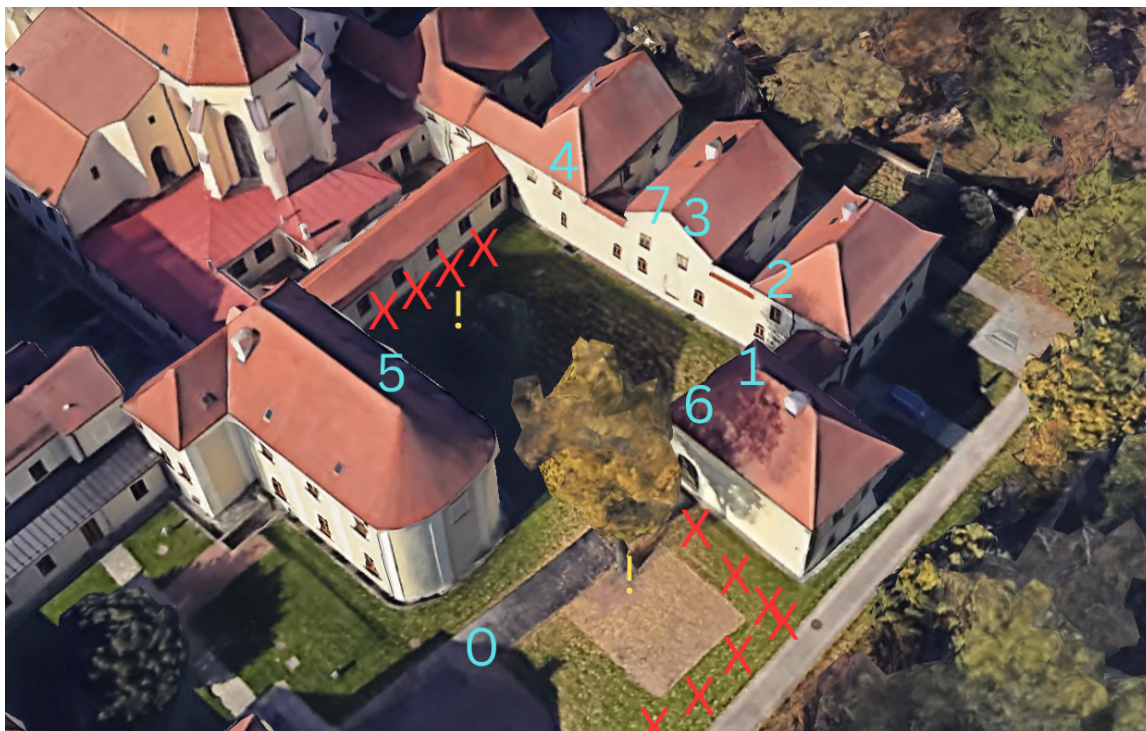
Před zahájením experimentů byli oba účastníci obeznámeni s funkcemi aplikace. Pilot, který již měl předchozí zkušenosti s ovládáním dronu, se seznámil s aplikací a provedl několik úkolů, které spočívaly v navigaci k vyznačeným bodům, průzkumu označených oblastí a vyhýbání se překážkám. Byla mu rovněž vysvětlena technika práce s instrukcemi, způsob jejich zvýrazňování a použití navigační šipky k nalezení objektů mimo aktuální zorné pole.

Velitel byl obeznámen s aplikací v režimu pro velitele. Bylo mu vysvětleno, jak vkládat jednotlivé ikony do mapy, jak pilotovi zasílat instrukce a jakým způsobem se instrukce propojují se zvýrazňováním ikon. Dále byl seznámen s postupem odstranění jednotlivých nebo všech anotací z mapy. Následně velitel prakticky ověřil své dovednosti zadáním několika ikon a instrukcí pilotovi.

Experiment – průlet územím

První experiment spočíval v průletu oblastí vyznačenou na mapě. V tomto scénáři měl velitel k dispozici mapu s vyznačenými body (viz obrázek 5.1) a jeho úkolem bylo navigovat pilota tak, aby danou oblast proletěl. Kromě kontrolních bodů na mapě jsou vyznačené i dvě zakázané oblasti a dvě překážky, kterým se pilot musí vyhnout.

Experiment tedy simuloval průzkum střechy daného objektu. Velitel navigoval pilota postupně tak, aby byla celá oblast efektivně a bez zbytečných přeletů prozkoumána. V průběhu letu bude pilot rovněž vyzván, aby se vrátil a provedl podrobnější průzkum vybraných částí objektu (označených čísly 6 a 7 na mapě).



Obrázek 5.1: Mapa s vyznačenými kontrolními body pro první experiment. Čísla na mapě znázorňují posloupnost kontrolních bodů, kterými musí pilot proletět. Červené křížky označují bezletové zóny a žlutý vykřičník představuje oblast s nebezpečím, kterému se pilot musí vyhnout.

Experiment – průzkum fasády

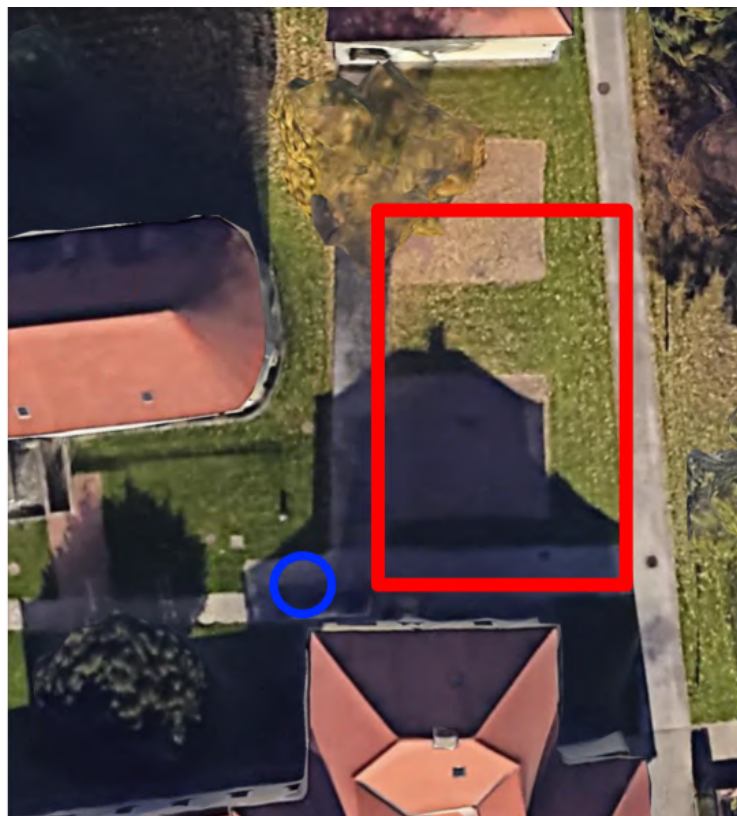
Druhý experiment spočíval v průzkumu oken objektu, která měl velitel vyznačená na mapě (viz obrázek 5.2). Na rozdíl od prvního experimentu nebyly kontrolní body uspořádány logicky podle nejkratší či nejjednodušší cesty, ale byly rozmístěny tak, aby se zvýšila obtížnost navigace a kladl se větší důraz na přesnost a jednoznačnost komunikace mezi velitelem a pilotem dronu.



Obrázek 5.2: Mapa s vyznačenými kontrolními body pro druhý experiment. Obdobně jako na obrázku i zde čísla u zakroužkovaných oken znázorňují jejich pořadí průletu pilotem.

Experiment – průzkum oblasti

Třetí experiment byl zaměřen na využití funkce označení oblasti k průzkumu přímo v mapě (viz sekce 4.3). Úkolem pilota bylo co nejpřesněji prozkoumat vyznačenou oblast (viz obrázek 5.3). V průběhu experimentu byla navíc nasimulována situace nutné výměny baterie dronu – pilot se tedy musel vrátit na výchozí místo, bezpečně přistát, vyčkat několik sekund a následně pokračovat v průzkumu tam, kde před přerušением skončil.



Obrázek 5.3: Mapa s vyznačenou oblastí k průzkumu pro třetí experiment. Červeným obdélníkem je vyznačena oblast, kterou měl pilot prozkoumat, modrý kruh označuje místo určené k přistání při simulované výměně baterie.

Průběh experimentů

Testování probíhalo ve dvou samostatných dvojicích. Každou dvojici tvořil pilot a velitel mise.

První dvojice účastníků začala s experimentem „průlet územím“ bez využití aplikace, následovala s druhým experimentem „průzkum fasády“ s využitím aplikace a pohledu s rozšířenou realitou. Nakonec absolvovali i třetí experiment „průzkum oblasti“, rovněž s využitím aplikace.

Druhá dvojice prováděla experimenty ve stejném pořadí, ale s opačným vybavením, takže začali s experimentem „průlet územím“ s využitím pohledu rozšířené reality a aplikace pro velitele, pokračovali s experimentem „průzkum fasády“ bez aplikace a třetí experiment „průzkum oblasti“ již bez podpory vizualizačního nástroje. Přehled rozložení experimentů mezi obě dvojice je uveden v tabulce 5.1.

Dvojice	Průlet územím	Průzkum fasády	Průzkum oblasti
1	bez aplikace	s aplikací	s aplikací
2	s aplikací	bez aplikace	bez aplikace

Tabulka 5.1: Přehled průběhu experimentů.

5.3 Výsledky experimentů

Pro vyhodnocení provedených experimentů byl použit standardizovaný dotazník NASA-TLX⁴, který účastníci vyplnili vždy hned po dokončení jednotlivých testovacích scénářů. Po ukončení všech experimentů byl dále předložen autorův dotazník B.1 zaměřený na využitelnost zobrazení v rozšířené realitě při létání s dronem a na celkovou přehlednost a intuitivnost aplikace.

Během samotných experimentů byli účastníci pozorováni, především byla pozorována jejich efektivita a kvalita vzájemné komunikace. Hlavní důraz byl kladen na to, zda byly pokyny od velitele správně pochopeny, jak často se museli opravovat nebo případně blíže specifikovat, jakým způsobem účastníci formulovali své instrukce a jaké bylo vzájemné porozumění.

K vyhodnocování byla využita i možnost aplikace DroneDJIStreamer ukládat letový a kamerový záznam. Takže bylo i po skončení letu možné provést dodatečnou analýzu letu. Tato analýza byla realizována za pomoci vytvořeného skriptu v jazyce Python, který umožnil zpětně přehrát uložené záznamy letu a následně vizuálně vyhodnotit průběh jednotlivých experimentů.

Dotazník NASA-TLX

Tato sekce nejprve stručně představuje dotazník NASA-TLX a následně se věnuje vyhodnocení výsledků získaných jeho prostřednictvím.

Popis dotazníku NASA-TLX

NASA TLX (Task Load Index) je nástroj pro subjektivní hodnocení mentální a fyzické pracovní zátěže operátorů pracujících s různými systémy rozhraní člověk–stroj [8]. Metoda vychází z hodnocení šesti dílčích dimenzí, které společně tvoří celkové skóre zátěže. Jedná se o:

- **Mentální náročnost (Mental Demand)**
- **Fyzická náročnost (Physical Demand)**
- **Časový tlak (Temporal Demand)**
- **Vnímaný výkon (Performance)**
- **Úsilí (Effort)**
- **Frustrace (Frustration)**

Odpovědi se do dotazníku zaznamenávají na dvacetibodové škále od hodnoty 0 po 20. Dotazník naleznete v příloze viz A.1.

Vyhodnocení dotazníku NASA-TLX

Z grafu výsledků (viz 5.4) je patrný pokles míry frustrace při využívání aplikace ve srovnání s experimenty, kdy účastníci aplikaci nepoužívali. Tento trend byl patrný u obou testovaných dvojic a odpovídá i pozorovanému chování během experimentu. V případech bez využití

⁴<https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>

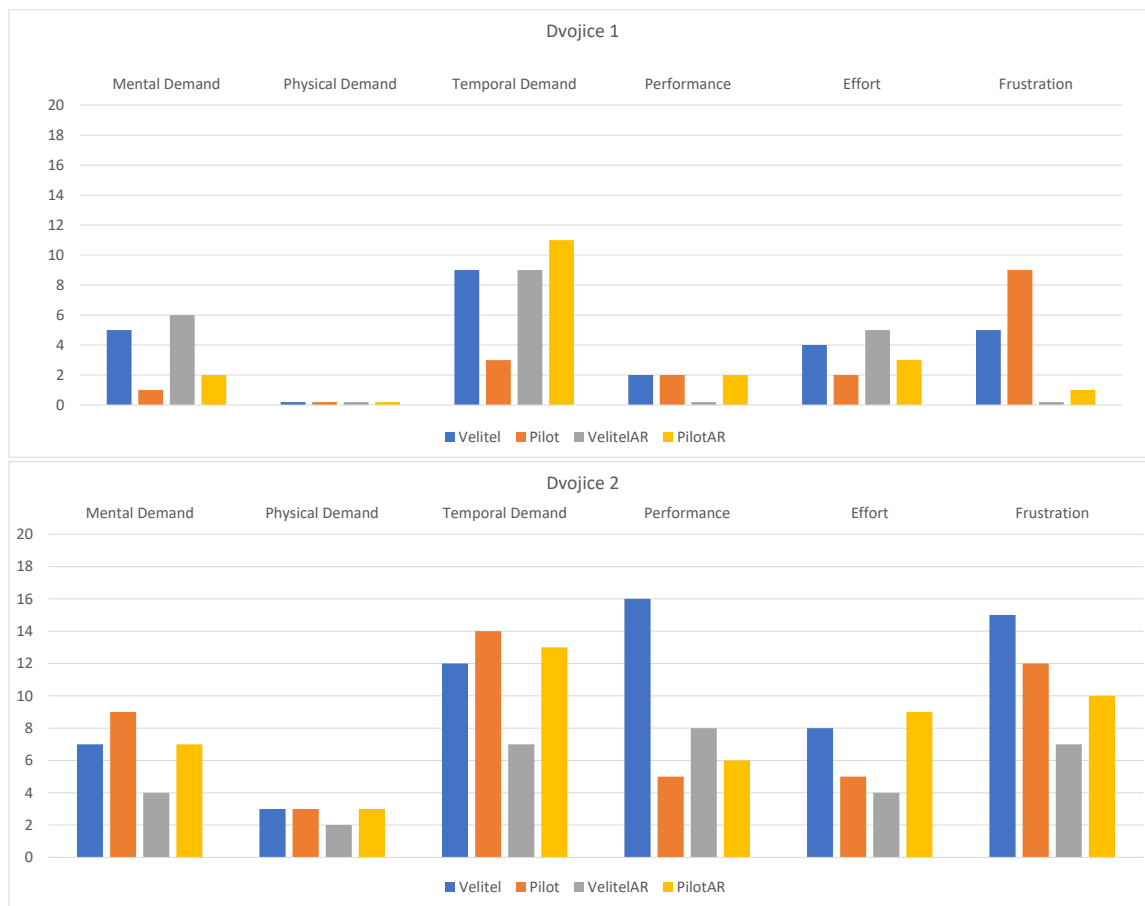
aplikace byla komunikace mezi velitelem a pilotem náročná zejména při určování prvních kontrolních bodů. Docházelo k nejasnostem v tom, kterou část budovy měl velitel na mysli (např. konkrétní stěnu či střechu), a rovněž se lišil výklad směrových pokynů (např. „doleva“ nebo „doprava“) – velitel často uvažoval při pohledu na model dronu, zatímco pilot se orientoval podle obrazu z kamery.

Naopak při použití aplikace komunikace mezi účastníky výrazně ustoupila, ačkoliv nebyla výslovně zakázána. Interakce probíhala minimálně. Tento posun lze částečně přičíst tomu, že účastníci byli více soustředěni na samotné ovládání aplikace a práci s rozhraním, avšak současně to svědčí o tom, že rozšířená realita a vizuální instrukce výrazně snížily potřebu dodatečného slovního upřesňování.

Z hlediska vnímaného výkonu (Performance) byly výsledky interpretovány oběma dvojicemi jako pozitivní. První dvojice hodnotila výsledky obou variant (s i bez aplikace) jako srovnatelné, přičemž výrazný rozdíl nepocítovala. Druhá dvojice naopak zaznamenala zřetelný posun – zejména velitel ocenil podporu ze strany aplikace a uvedl, že výsledky byly jednoznačně lepší, a to i vzhledem k přehlednosti a možnosti přesně zadávat pokyny.

Hodnocení časového nátlaku (Temporal Demand) ukazuje na výrazný rozdíl zejména u druhé dvojice. U velitele došlo při využití aplikace k citelnému poklesu časové zátěže, což lze přičíst tomu, že si misi předem naplánoval a během letu již pouze odesílal připravené příkazy. Naopak u první dvojice nebyl rozdíl mezi oběma scénáři tak výrazný. Velitel zde plánoval trasu jen po jednotlivých krocích a současně během letu aktivně doplňoval body i instrukce.

V případě úsilí (Effort) bylo možné u obou pilotů pozorovat mírné zvýšení při využití aplikace. Zatímco v experimentech bez aplikace ležela větší odpovědnost na veliteli, který musel pilotovi slovně přesně a srozumitelně předat instrukci, při použití aplikace se část této zodpovědnosti přesunula na pilota samotného. Ten musel instrukce a vizuálně označené body v prostředí aplikace správně interpretovat a na jejich základě samostatně reagovat.



Obrázek 5.4: Grafy výsledků dotazníku NASA-TLX. Ve většině případů znamená hodnota 0 „velmi nízké zatížení“ a 20 „velmi vysoké zatížení“. Výjimku tvoří otázka zaměřená na vnímaný výkon, kde 0 znamená „perfektní výkon“ a 20 „naprosté selhání“.

Vlastní dotazník

Po vyplnění všech scénářů experimentu účastníci obdrželi autorem sestavený dotazník zaměřený na využitelnost zobrazení v rozšířené realitě při řízení dronu a na celkovou přehlednost a intuitivnost aplikace. Při jeho vyplňování byli respondenti vyzváni k uvedení případných poznámek nebo doplnění odpovědí, pokud měli potřebu podrobněji vyjádřit své zkušenosti. Následně proběhl krátký rozhovor, ve kterém se účastníci vyjadřovali k celkovému dojmu z používání aplikace, diskutovali o jejím možném nasazení v reálném provozu a uváděli, co považovali za přínosné, případně jaké nedostatky vnímali.

Následuje shrnutí získaných poznatků z dotazníků a pozorování účastníků experimentů. Odpovědi na jednotlivé otázky vycházely z Likertovy škály⁵.

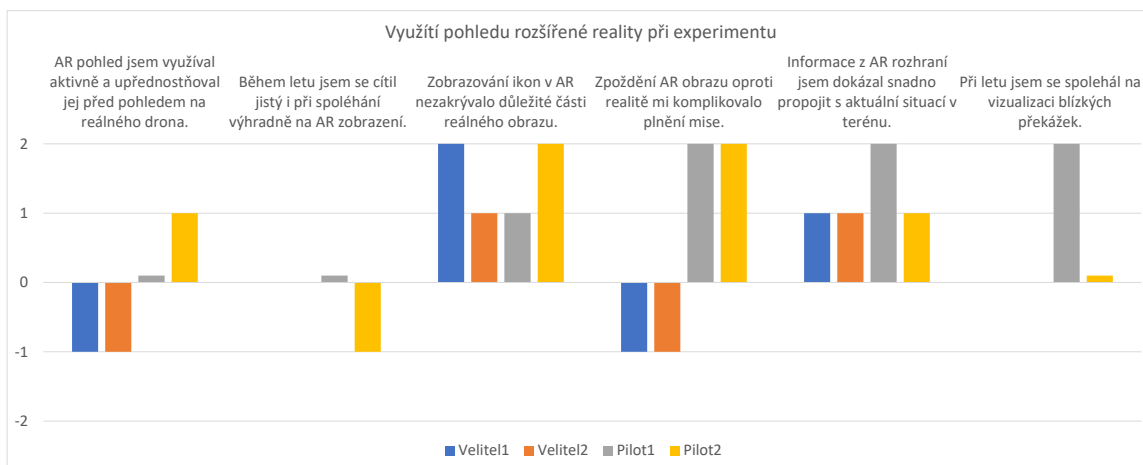
⁵<https://blog-cz.surveio.com/typy-otazek/likertova-skala>

Pohled rozšířené reality v aplikaci nebyl veliteli během mise aktivně využíván. Jeden z velitelů jej dokonce deaktivoval pomocí tlačítka a soustředil se výhradně na zobrazení modelu dronu v mapě. Naopak piloti se snažili AR pohled využívat, avšak uváděli jako hlavní výhradu zpoždění zobrazení, které dosahovalo přibližně jedné sekundy. Toto zpoždění bylo navíc ovlivněno vzdáleností mezi dronem a ovládacím tabletem.

Pozitivním zjištěním bylo, že všichni respondenti se shodli na vhodné velikosti anotací v AR pohledu. Anotace nezakrývaly důležité části obrazu, a to mimo jiné i díky implementaci chování, kdy anotace cílového bodu po přiblížení pilota na vzdálenost 5 metrů automaticky zmizela po 1.5 sekundě, nebo mohla být manuálně deaktivována velitelem zasláním nové instrukce.

Uživatelé rovněž kladně hodnotili významovou srozumitelnost anotací v kontextu aktuální situace v terénu. Ani jeden z pilotů se však při letu nespolehal výhradně na AR pohled a ve většině případů využívali současně i pohled z aplikace DroneDJISreamer.

Poslední otázka této sekce se týkala využívání vizualizace blízkých překážek. Piloti byli v této souvislosti předem seznámeni s tím, že tato funkce je omezena pouze na detekci budov a že rozpoznávání některých jejich částí může být nepřesné. První pilot tuto funkci při letu aktivně testoval a byl s její funkčností spokojen. Druhý pilot si vizualizace příliš nevěšmal a spolehal především na vlastní úsudek na základě pohledu z kamery dronu.



Obrázek 5.5: Odpovědi účastníků na otázky týkající se využití pohledu rozšířené reality při experimentu. Jednotlivé možnosti označeny čísly: od rozhodně souhlasím (2) přes neutrální (0) až po rozhodně nesouhlasím (-2).

Druhá část dotazníku se věnovala samotnou využitelností a pochopitelností aplikace.

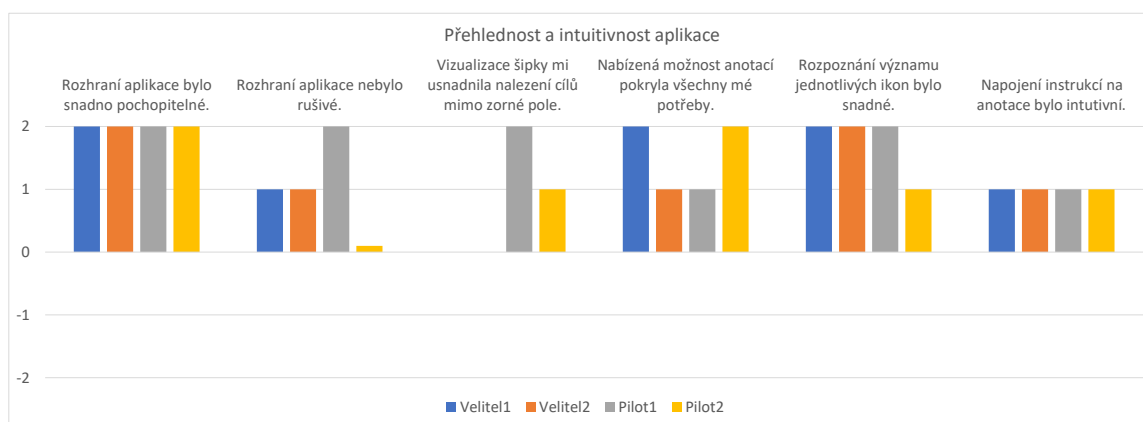
Odpovědi respondentů byly převážně pozitivní. Uživatelé ocenili jednoduchost rozhraní a fakt, že i bez potřeby vysvětlujících dialogových oken bylo možné orientovat se v aplikaci díky barevnému rozlišení a zvýraznění aktivních prvků. Velmi dobře byla hodnocena také funkce šipky, která pilotům pomáhala lokalizovat cíl mimo jejich zorné pole.

Respondenti rovněž vyjádřili spokojenost s nabízeným výběrem ikonických anotací. Ačkoli byli v rámci experimentu k jejich využívání vedeni scénářem mise, ani jeden z účastníků neuvěděl, že by mu chyběla některá specifická ikona. Někteří účastníci navrhli rozšířit množství prvků, které lze do mapy vkládat. Konkrétně byla zmíněna absence plnohodnotného prvku pro označení bezletové zóny. Stávající ikona nebyla považována za dostatečně výraznou a respondenti by preferovali možnost vyznačení prostorově definované 3D zóny, která

by byla pro pilota lépe viditelná přímo v prostředí mapy i rozšířené reality. Tento nedostatek byl potvrzen také při zpětné analýze záznamu letu, kdy pilot nevědomky vletěl do zakázané oblasti. Podobná připomínka se týkala i ikony pro označení nebezpečí. Uživatelé uvedli, že místo běžné ikony by byl vhodnější například 3D prvek ve formě sloupku nebo pilíře, který by byl trvale viditelný z pilotního pohledu a výrazněji by signalizoval riziko v konkrétní oblasti.

Napojení instrukcí na zvýraznění ikon bylo hodnoceno jako srozumitelné, avšak respondenti upozornili, že bez úvodního zaškolení v rámci přípravné fáze by tato možnost nemusela být zcela zřejmá.

Jeden z pilotů poukázal na částečný problém s viditelností instrukcí – ikona instrukce se totiž zobrazovala v horní části obrazovky, kam bylo nutné vědomě přesunout zrak. Tento účastník však zároveň ocenil funkci animovaného zvětšení ikony při příchodu nové instrukce, která mu vždy jasně signalizovala, kdy se má na horní část rozhraní zaměřit.



Obrázek 5.6: Odpovědi účastníků na otázky zaměřené na přehlednost, intuitivnost a celkovou použitelnost aplikace. Jednotlivé možnosti jsou označeny čísly: od rozhodně souhlasím (2) přes neutrální (0) až po rozhodně nesouhlasím (-2).

Některé otázky z obou částí dotazníku byly zaměřeny spíše na specifické role – buď na pilota (například otázka ohledně šipky mimo zorné pole), nebo na velitele mise. Pokud respondent neměl s danou situací přímou zkušenost, byl požádán, aby zvolil neutrální odpověď. V rámci přípravné fáze však byli všichni účastníci seznámeni s rozhraním obou rolí, a proto se často snažili odpovídat i na otázky týkající se druhé perspektivy na základě této zkušenosti.

Některé poznatky získané z rozhovorů byly již zmíněny výše, například návrh na nahrazení ikony pro bezletovou zónu či ikony označující nebezpečí. Dále se objevil podnět týkající se samotného procesu vkládání ikon. Jeden z velitelů upozornil, že po každém vložení ikony je nutné znovu ručně vybrat typ ikony, a kvůli tomu musel kliknout vícekrát než, kdyby zvolení ikon pracovalo na principu přepínače. Naopak druhý, který zadával cíle až v průběhu letu a zároveň přidával i další typy anotací, tento přístup ocenil, protože mu umožnil větší kontrolu a flexibilitu. Oba velitelé však pozitivně hodnotili možnost připravit si část mise dopředu. Ačkoli druhý velitel plánoval pouze jednotlivé kroky postupně, vnímal tuto funkci jako přínosnou.

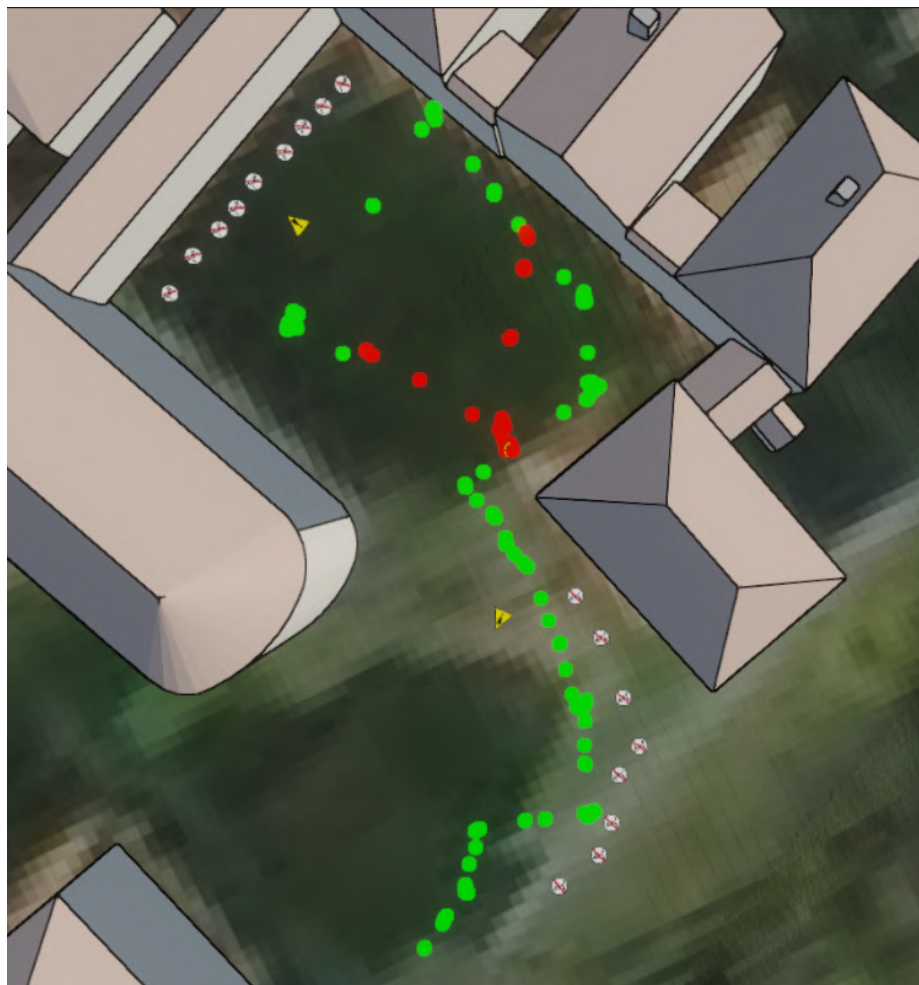
Druhý velitel rovněž vyjádřil nespokojenost s kvalitou mapových podkladů. Postrádal v nich prvky jako stromy, sloupy či jiné orientační body, a negativně vnímal také skutečnost, že budovy jsou vizualizovány pouze jako jednobarevné šedé objekty bez detailů.

Jeden z pilotů, který má zkušenosti s inspekcemi staveb, ocenil nejen jednoduchost ikonického systému, ale i potenciál aplikace pro praktické využití v podobných scénářích. Kladně byla hodnocena i funkce označení oblasti k prozkoumání. Ačkoli její využití v rámci experimentu nebylo zcela průkazné (jak ukazují výsledky níže), samotná myšlenka vyznačení prostoru a vizualizace postupu průzkumu byla vnímána jako přínosná.

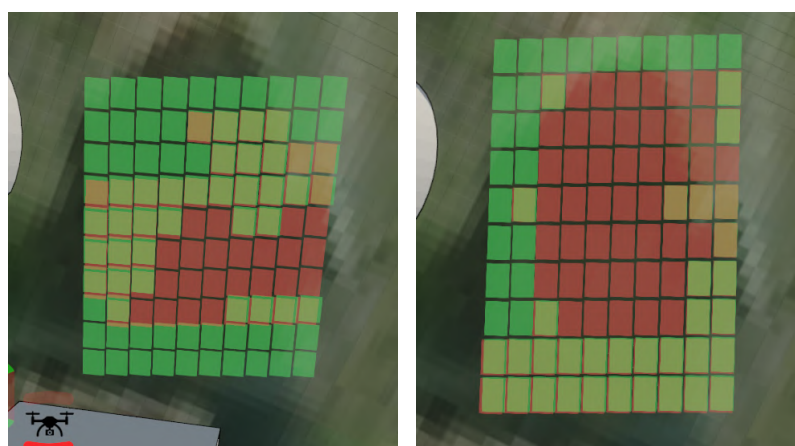
Analýza letů

Pro účely analýzy byl zaznamenaný let znovu přehrán v aplikaci. Pomocí jednoduchého skriptu, který každou sekundu zobrazoval na aktuální pozici dronu značící sféru, byla vytvořena vizualizace celé trajektorie letu. Do mapy byly zároveň zakresleny i bezletové zóny a překážky – stejně jako na referenčním obrázku 5.1. Výsledný záznam je zachycen na obrázku 5.7, kde je patrné, že pilot během letu nedopatřením vletěl do první bezletové zóny, a to navzdory tomu, že mu ji velitel předem označil. Na druhou stranu se pilotovi podařilo úspěšně vyhnout druhé bezletové zóně i oběma překážkám znázorněným ikonou nebezpečí.

Aby bylo vizuálně zřetelnější opakované navrácení se k bodům 6 a 7, byla tato část trajektorie vyznačena červeně, čímž se odlišuje od zbytku průběhu letu.



Obrázek 5.7: Vygenerovaná trasa pilota, který využíval zobrazení v aplikaci.



Obrázek 5.8: Porovnání mapy pokrytí bez použití aplikace (vlevo) a s využitím AR zobrazení (vpravo).

Na obrázku 5.8 je znázorněn výsledek třetího experimentu zaměřeného na detailní průzkum vymezené oblasti. Obrázek porovnává průběh mise bez použití aplikace a při jejím využití. Zelené čtverce znázorňují oblast pokrytou před simulovanou výměnou baterie, červené po ní; překryv těchto dvou sad tvoří žluté čtverce.

V obou případech se pilotům podařilo pokrýt celou vymezenou oblast. Výpočet překryvu ukázal mírně vyšší hodnotu u letu bez využití aplikace (36%) oproti letu s aplikací (34%). Na základě těchto dat tedy nelze potvrdit, že by využití aplikace vedlo k výrazně přesnějšímu nebo efektivnějšímu pokrytí prostoru.

Přesto však lze při využití aplikace pozorovat strukturovanější průběh letu. Překryv zde vzniká téměř výhradně v posledních řádcích oblasti, zatímco hlavní část oblasti byla pokryta plynule, bez zbytečného opakování. Naproti tomu v letu bez aplikace bylo navazování jednotlivých průletů méně přesné a vykazovalo znaky chaotičtějšího řízení.

Oba piloti byli před začátkem testu seznámeni s cílem důkladného prozkoumání celé oblasti, což je vedlo k volbě postupného „skenování“ v rovnoběžných pruzích. Díky tomu bylo možné na průzkum snadno navázat i po přerušení mise kvůli simulované výměně baterie.

Z rozhovorů po skončení testu vyplynulo, že piloti preferovali práci s aplikací. Ocenili zejména možnost průběžně sledovat pokrytí oblasti přímo v aplikaci, díky čemuž měli lepší přehled o průběhu mise a snižovalo riziko opomenutí některé části prostoru.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo rozšířit existující aplikaci DroCo o vizualizační nástroj využívající rozšířenou realitu, určený pro pilota dronové mise. Tento nástroj měl pilotovi usnadnit plnění úkolů mise zobrazováním důležitých prvků, jako jsou cíle mise, překážky v okolí a instrukce od velitele. S tímto cílem souvisela i potřeba navrhnout a implementovat uživatelské rozhraní pro velitele mise, které mu umožní vkládat anotace do mapy. Ty se následně promítají v reálném čase do rozhraní pilota.

V úvodní fázi práce jsem se seznámil s architekturou aplikace DroCo a s vývojovým prostředím Unity. Spolu s vedoucím práce jsme navrhli konkrétní rozšíření systému tak, aby naplňovalo stanovené cíle. Prvním krokem byla implementace obousměrné komunikace mezi velitelskou a pilotní aplikací, která umožňuje přenos dat o anotacích v reálném čase spolu s letovými daty pilota. Dále byl navržen systém ikon a logika jejich zobrazení v mapě, včetně možnosti cílit pokyny na konkrétní piloty. Následovalo rozšíření o funkci označování oblastí k prohledání a systém instrukcí napojených na konkrétní anotace.

Aplikace byla průběžně testována během vývoje, přičemž finální testování proběhlo formou tří experimentálních scénářů s využitím pilotů a velitelů v simulovaných podmínkách. K vyhodnocení byla využita metoda NASA-TLX, autorský dotazník a pozorování chování účastníků. Výsledky ukázaly, že aplikace je prakticky použitelná a že vizuální forma komunikace pomocí anotací představuje efektivní alternativu k verbální komunikaci. Pozitivně byla hodnocena přehlednost uživatelského rozhraní i intuitivnost systému pokynů.

Zároveň byly identifikovány oblasti pro další rozvoj aplikace. Především se jednalo o potřebu kvalitnějších mapových podkladů, které by obsahovaly více detailních prvků. Dále se ukázala jako žádoucí možnost zobrazovat prostorové zóny přímo v rozšířené realitě a optimalizovat latenci zobrazení přenosu z kamery dronu.

Výsledná aplikace umožňuje veliteli efektivně řídit průběh mise zadáváním pokynů formou vizuálních anotací a koordinovat více dronů současně. Pilotovi pak nabízí prostředí, ve kterém může sledovat aktuální instrukce, vyhýbat se překážkám a v reálném čase reagovat na vývoj mise díky kombinaci video přenosu a rozšířené reality.

Literatura

- [1] ABDELKADER, M.; GÜLER, S.; JALEEL, H. a SHAMMA, J. S. Aerial swarms: Recent applications and challenges. *Current robotics reports*. Springer, 2021, sv. 2, s. 309–320. ISSN 2662-4087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00063-4>.
- [2] AGRAWAL, A.; ABRAHAM, S. J.; BURGER, B.; CHRISTINE, C.; FRASER, L. et al. The next generation of human-drone partnerships: Co-designing an emergency response system. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, s. 1–13. CHI '20. ISBN 9781450367080. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376825>.
- [3] ALQUDSI, Y. a MAKARACI, M. UAV swarms: research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Science*. Springer, 2025, sv. 72, č. 1, s. 12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3>.
- [4] AMAZON. *Amazon Prime Air Prepares for Drone Deliveries*. 2021. [online]. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries>.
- [5] BERAN, V.; BAMBUŠEK, D.; HUBINÁK, R. a SEDLMAJER, K. *DroCo - Multi-Drone Control Vizualization Tool* Faculty of Information Technology, Brno University of Technology. 2020. [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/product/c168740/>.
- [6] BRASS, K.; DOBROVOLSKIY, A.; MONGELOS, P.; FERNÁNDEZ, I. S.; RODRÍGUEZ, J. R. et al. *Using a Drone-based Ground Penetrating Radar for Avalanche Victim Search: A Case Study from Northern Spain*. White paper. SPH Engineering, May 2021. [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.radsys.lv/userfiles/files/avalanche-victim-search-report.pdf>.
- [7] CHEN, F.; LU, Y.; CAI, B. a XIE, X. Multi-Drone Collaborative Trajectory Optimization for Large-Scale Aerial 3D Scanning. In: *2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. 2021, s. 121–126. ISBN 978-1-6654-1298-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct54149.2021.00034>.
- [8] HART, S. a CENTER, N. A. R. *NASA Task Load Index (TLX)*. 2020. [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>.

- [9] HAYES, M. a DOWNIE, A. *What is augmented reality?* IBM Think Blog. 2024. [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/think/topics/augmented-reality>.
- [10] JAVED, S.; HASSAN, A.; AHMAD, R.; AHMED, W.; AHMED, R. et al. State-of-the-Art and Future Research Challenges in UAV Swarms. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, sv. 11, č. 11, s. 19023–19045. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3364230>.
- [11] KÄLLBÄCKER, J. a BJURLING, O. Human-swarm interaction in semi-voluntary search and rescue operations: Opportunities and challenges. In: *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2023*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, s. 1–7. ECCE '23. ISBN 9798400708756. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3605655.3605684>.
- [12] QUAN, A.; HERRMANN, C. a SOLIMAN, H. Project Vulture: A Prototype for Using Drones in Search and Rescue Operations. In: *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. 2019, s. 619–624. ISSN 2325-2944. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2019.00113>.
- [13] SEO, J.; DUQUE, L. a WACKER, J. Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 2018, sv. 94, s. 112–126. ISSN 0926-5805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006>.
- [14] WEN, X. a WU, G. Heterogeneous multi-drone routing problem for parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, sv. 141, s. 103763. ISSN 0968-090X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103763>.
- [15] WILLOUGHBY, J. *Key Features Of DJI FlightHub 2 Drone Management Software*. 2022. [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.heliguy.com/blogs/posts/dji-flighthub-2-vs-dji-flighthub/>.
- [16] XU, P.; GARCIA, J.; OOI, W. T. a JOUFFRAIS, C. SafeSpect: Safety-First Augmented Reality Heads-up Display for Drone Inspections. In: *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2025. CHI '25. ISBN 9798400713941. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3706598.3714283>.
- [17] ZMEJEVSKIS, L. a TEAM, P. *DJI Drone Settings and Features – DJI Fly App Extensive Guide Part 1*. 2024. [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.pix-pro.com/blog/dji-fly-guide-part1>.

Příloha A

Dotazník NASA-TLX

Figure 8.6

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date

Mental Demand How mentally demanding was the task?

Very Low Very High

Physical Demand How physically demanding was the task?

Very Low Very High

Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?

Very Low Very High

Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?

Perfect Failure

Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?

Very Low Very High

Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

Very Low Very High

Obrázek A.1: Dotazník NASA-TLX.

Příloha B

Vlastní dotazník k experimentům

Dotazník k experimentu

Využití pohledu rozšířené reality při experimentu

	Rozhodně nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Neutrální	Spíše souhlasím	Rozhodně souhlasím
AR pohled jsem upřednostňoval před pohledem na reálný dron.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Během letu jsem se cítil jistý i při spoléhání výhradně na AR zobrazení.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zobrazování anotací v AR nezakrývalo důležité části reálného obrazu.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zpoždění AR obrazu oproti realitě mi komplikovalo plnění mise.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Informace z AR rozhraní jsem dokázal snadno propojit s aktuální situací.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Při letu jsem se spoléhal na vizualizaci blízkých překážek.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Přehlednost a intuitivnost aplikace

	Rozhodně nesouhlasím	Spíše nesouhlasím	Neutrální	Spíše souhlasím	Rozhodně souhlasím
Rozhraní aplikace bylo snadno pochopitelné.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rozhraní aplikace nebylo rušivé.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vizualizace šipky mi usnadnila nalezení cílů mimo zorné pole.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nabízená možnost anotací pokryla všechny mé potřeby.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rozpoznání významu jednotlivých ikon bylo snadné.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Napojení instrukcí na anotace bylo intuitivní.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Obrázek B.1: Dotazník k využití rozšířené reality a přehlednosti aplikace.