



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

AUTOMATICKÁ TVORBA MAPY TERÉNU DRONEM

AUTOMATIC CONSTRUCTION OF A TERRAIN MAP BY A DRONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ ZAVIAČIČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÍTĚZSLAV BERAN, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce



141470

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)
Student: **Zaviačič Tomáš**
Program: Informační technologie
Specializace: Informační technologie
Název: **Automatická tvorba mapy terénu dronem**
Kategorie: Počítačové vidění
Akademický rok: 2022/23

Zadání:

1. Seznamte se s metodami pro skládání obrazů (mosaicing), registrací obrazů a datovými strukturami pro správu mapových podkladů.
2. Navrhněte systém, který bude s využitím informací o poloze a orientaci kamery spravovat snímání obrazy dronem a za běhu vytvářet mapu terénu. Uvažujte rovinný terén.
3. Vytvořte vhodnou datovou sadu pro vývoj a testování navrženého řešení.
4. Realizujte navržený systém s využitím vhodných existujících knihoven.
5. Demonstrujte a vyhodnoťte vlastnosti řešení na reálném dronu nebo na testovacích datech.
6. Prezentujte klíčové vlastnosti řešení formou plakátu a krátkého videa.

Literatura:

- M. Sonka, V. Hlaváč, R. Boyle. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, CL-Engineering, ISBN-13: 978-0495082521, 2007.
- Gary R. Bradski, Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, ISBN 10: 0-596-51613-4, September 2008.
- Dále dle pokynu vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:
Body 1., 2., 3. a částečně 4.

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

Vedoucí práce: **Beran Vítězslav, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2022
Termín pro odevzdání: 17.5.2023
Datum schválení: 31.10.2022

Abstrakt

Práce popisuje nástroj pro automatickou tvorbu mapy oblasti zmapované dronem. Mapování probíhá systematickým pořizováním leteckých snímků zemského povrchu. Pořízené snímky jsou následně zpracovány pomocí navržených metod, o kterých práce pojednává. První metoda je postavená na polohovacích metadatech v každém snímku a zbývající dvě metody provádějí analýzu obrazu pomocí algoritmů počítačového vidění. Tyto metody jsou zrealizovány v programovacím jazyce Python za pomoci knihovny OpenCV, Numpy a Exif. Pro experimenty se na vlastní datové sady aplikovaly navržené metody. Vstupem nástroje jsou snímky, které se pomocí jedné z navržených metod zpracují a vytvoří se z nich na výstup výsledná mapa.

Abstract

The thesis describes a tool for the auto-creation of a map of an area mapped by a drone. The mapping is done by systematically taking aerial images of the Earth's surface. The acquired images are then processed using the proposed methods discussed in this thesis. The first method is based on positional metadata in each image and the remaining two procedures perform image analysis using computer vision algorithms. These methods are implemented as a Python code utilizing the OpenCV library, Numpy and Exif. During the experiments, the proposed methods were applied to the custom datasets. The input to the tool is the images, which are processed using one of the proposed methods to produce the output map.

Klíčová slova

zpracování obrazu, počítačové vidění, skládání obrazů, mapování

Keywords

image processing, computer vision, image stitching, mapping

Citace

ZAVIAČIČ, Tomáš. *Automatická tvorba mapy terénu dronem*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Beran, Ph.D.

Automatická tvorba mapy terénu dronem

Prohlášení

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

.....
Tomáš Zaviačič
16. května 2023

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Vítězslavovi Beranovi, Ph.D. za cenné rady, podnětné připomínky a poskytnuté konzultace během vypracovávání bakalářské práce. Dále chci poděkovat mé nejbližší rodině a kamarádům, kteří mě neustále v průběhu studia podporovali.

Obsah

1	Úvod	2
2	Teorie	3
2.1	Ortomozaiika	3
2.2	Snímkování dronem	6
2.3	Ortorektifikace	9
2.4	Globální družicový polohovací systém (GPS)	11
2.5	Spojování snímků	13
3	Návrh	18
3.1	Analýza problému	18
3.2	Postup řešení	19
3.3	Metoda polohovacích metadat	20
3.4	Metoda obrazových příznaků mezi snímky	22
3.5	Metoda postupného skládání mapy	24
4	Realizace	27
4.1	Architektura skriptu	27
4.2	Klíčové funkce metody polohovacích metadat	28
4.3	Klíčové funkce metody obrazových příznaků mezi snímky	29
4.4	Klíčové funkce metody postupného skládání mapy	30
4.5	Datové sady	31
4.6	Experimenty	31
5	Závěr	36
	Literatura	37
A	Vytvořené mapy při experimentování	39

Kapitola 1

Úvod

Mapy byly vždy nezbytnou součástí života člověka. Od začátku nového tisíciletí se mapy postupně z fyzických a těžkopádných formátů přenesly do jednodušších a lépe dostupnějších internetových aplikací. Posun k internetovým aplikacím napomohl nejen k rychlejšímu pochopení vazeb mezi objekty na zemském povrchu, ale také k vytvoření dalších výhod, které můžou aplikace poskytnout, a to například přidání polohovací služby nebo také přesné měření vzdáleností a rozměrů viditelných objektů na mapě. O polohovacích službách pojednává podkapitola 2.4.

K pokroku mapovacích služeb přispělo počítačové vidění jako odvětví výpočetní techniky. To se snaží replikovat části lidského vnímání obrazu (z angl. human vision system), které pomáhá počítači lépe porozumět tzn. identifikovat a zpracovat objekty na snímku nebo videu podobně jako tomu je právě u lidského oka. Mezi hlavní témata počítačového vidění patří identifikace objektu, rozpoznávání obličeje, segmentace obrazu a klasifikace obrazu. Algoritmy počítačové vidění se používají při vytváření mapy ze snímků. Postupem s algoritmy počítačového vidění se zabývá podkapitola 2.5.

Při vytváření mapových služeb se snímky povrchu terénu získávají pomocí letadel nebo satelitů. Pořízené snímky je potřeba zpracovat pomocí ortorektifikace, která je popsána v podkapitole 2.3. Tato práce se zabývá vytvářením mapy pomocí dronu, který patří do kategorie bezpilotních letadel. Drony jsou v poslední době čím dál více používanější na problémy při vytváření mapových služeb. Příkladem jejich použití je při záchranných misích, detekci znečištěných oblastí atd. Mezi značné výhody použití bezpilotního letadla patří například nižší náklady na provoz, možnost vzdáleného ovládání při monitorování oblasti s vysokým rizikem havarování nebo pokrytí oblasti pomocí přednaplánované trasy letu. Snímkování pomocí dronu je popsáno v podkapitole 2.2.

Navrhnuté řešení pojednává o případě, ve kterém chce uživatel zmapovat oblast pouze za pomoci dronu. Ten posbírání snímky tvořící jednotlivé části celkové mapy. Po získání potřebného množství dat se následně může vytvořit mapa pomocí jedné z navržených metod, o kterých pojednává kapitola 3. Popisem realizace navržených metod spolu s výsledným experimentováním se zabývá kapitola 4.

Kapitola 2

Teorie

V této části je popsána teorie potřebná při řešení problému týkajících se počítačového vidění, snímkování pomocí dronu a vytváření map.

2.1 Ortomozaika

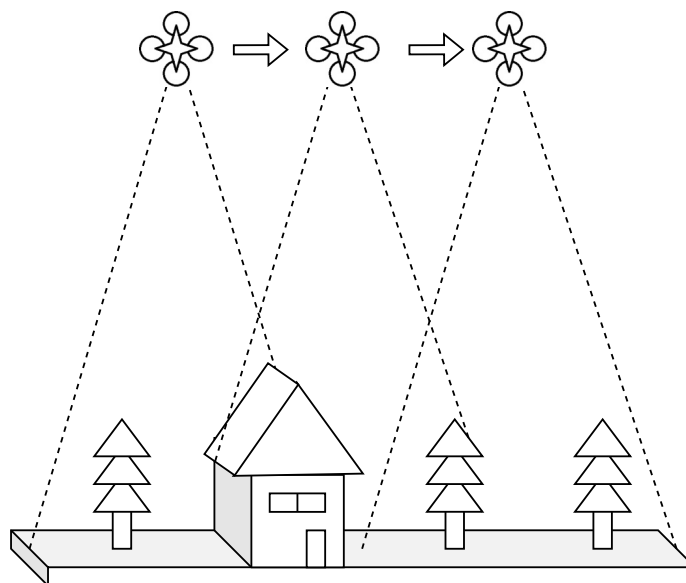
Následující podkapitola čerpala informace z [2].

Mapa tvořená ortomozaikou je nedílnou součástí studijního oboru s názvem fotogrammetrie. Zabývá se zpracováním informací na fotografických snímcích a jedním z jejích výstupů jsou ortomozaické mapy. Dalšími výstupy jsou GIS vrstvy nebo 3D modely. Rozlišujeme fotogrammetrii na krátké vzdálenosti a fotogrammetrii leteckou, do které patří problém zabývající se tato práce.

Při fotogrammetrii na krátké vzdálenosti se vytváří 3D modely nebo ortofotky, které ale popisují jiné části zemského povrchu, jako například budovy, než fotogrammetrie letecká. Dalším rozdílem je natočení senzoru horizontálně, šikmo, nebo dokonce směrem nahoru v případě mapování konstrukce mostu.

Fotogrammetrie letecká vyžaduje použití senzoru na satelitech, letadlech s pilotem nebo bez pilota a nejčastěji bývá natočený rovně směrem dolů ve směru tzv. nadir¹ viditelné na obrázku 2.1. Snímky jsou při letu nad požadovanou oblastí pořizovány s určitým překryvem. Tato data jsou potom zpracovávána a upravena tak, aby výsledná mapa měla opravdu charakter mapy. Dále také vytváří zmiňované GIS vrstvy [8].

¹<https://cs.wikipedia.org/wiki/Nadir>



Obrázek 2.1: Tento obrázek ukazuje leteckou fotogrammetrii dronem.

Ortomozaičné mapy

Mapy tvořené pomocí ortomozaičky se dají přirovnat k službě Google Earth², která uživateli poskytuje možnost prohlížet planetu Zemi jako ze satelitu. Velkým problémem služby Google Earth je neaktuálnost některých oblastí země, protože průběžně jich mnoho neaktualizuje a člověk může narazit na stará data. Náklady na pořízení a čas na implementování satelitních nebo leteckých snímků jsou relativně náročné při rozsahu, který je na pokrytí celé země potřeba. K vytvoření mapy ortomozaičkou se velmi často používá dron, který dodává velký potenciál při situacích, kde je aktuální stav velmi důležitým faktorem. To může být například při velmi přesném měření objektů v oblasti, mapování nově dokončených konstrukcí, mapování terénu ovlivněného katastrofickou událostí, v oblasti zemědělství, provádění letecké inspekce, monitorování zásob atd.

Nedílnou součástí ortomozaičky je proces ortorektifikace, díky kterému vznikají snímky vhodné pro tvorbu map tzv. ortofotky (z angl. orthophoto). Tento proces upravuje nedostatky vznikající při pořizování snímků požadované oblasti, kde se ve snímku začnou objevovat zkreslení. Více o ortorektifikaci lze najít v podkapitole 2.3.

Ortofotky

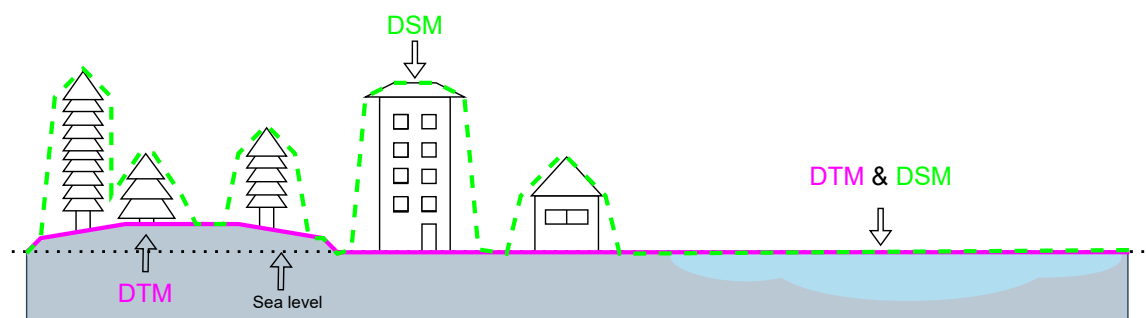
Získaná data zachycují povrch země z dostatečně velké výšky za použití kamery obsahují nepřesnosti unikátní každému snímku. Může se jednat o různé typy zkreslení v obraze způsobené pohybem letadla nebo satelitu, ale zejména jde o špatnou reprezentaci povrchu země kvůli perspektivnímu zkreslení. To znamená, že na snímku lze vidět boční strany domu, panelového domu nebo vegetace. Z takových snímků se špatně vytváří přehledná mapa, a proto se při vytváření ortomozaičkových map začaly snímky ortorektifikovat. Díky ortorektifikaci snímku vzniká tzv. ortofotka, která již neobsahuje zkreslení a je připravená k použití na tvorbu ortomozaičné mapy. Dále se rozděluje ortofotka na obyčejnou ortofotku a opravdovou ortofotku (z angl. true orthophoto). Rozdíly mezi nimi jsou dva, první je při vytváření,

²<https://www.google.cz/intl/cs/earth/>

kdy u obyčejné ortofotky je použit DTM (digitální model terénu) a opravdová ortofotka je vytvořena pomocí DSM (digitální model povrchu). Druhý rozdíl je ve kvalitě, protože u obyčejné ortofotky lze stále vidět boční strany budov z důvodu použití DTM, který modeluje pouze přírodní vzhled planety země tzn. nepopisuje vegetaci ani žádné struktury vytvořené člověkem. Opravdová ortofotka je skoro ideálním prostředkem pro tvorbu ortomozaických map, protože neobsahuje žádné zkreslení a její obraz připomíná pohled ze shora dolů bez viditelných bočních stran objektů, ve kterém lze vidět každý bod povrchu země [3].

Digitální model popisující geoprostorové rysy země

Existují tři modely, které popisují geoprostorové rysy povrchu země. Data těchto modelů jsou sítě bodů obsahující výšku, které dohromady tvoří výškovou mapu dané oblasti. Prvním modelem je digitální výškový model (DEM), který reprezentuje pouze přírodní vzhled planety bez vegetace a objektů postavených člověkem. Druhým modelem je digitální model terénu (DTM), kde už najdeme řeky a pahorky. Od něj je odvoditelný výškový model. Posledním modelem je digitální model povrchu (DSM). Ten zachovává všechny přírodní rysy a také všechny objekty, které jsou postavené člověkem. Pro zjišťování modelů se obvykle používá Lidar³ zařízení [20].



Obrázek 2.2: Rozdíl v datech mezi digitálním modelem terénu a digitálním modelem povrchu.

Použití ortomozaiky pro přesné měření

Jeden z příkladů užití ortomozaických map je schopnost přesně měřit rozměry pokryté části bez nutnosti fyzicky přeměřovat vzdálenosti, a to na přesnost až několika desítek centimetrů. Při měření je potřebné vědět, jaká vzdálenost se urazí na mapě, pokud bychom se na ortomozaické mapě posunuli od středu pixelu do středu vedlejšího pixelu. To popisuje konkrétní vzdálenost tzv. Ground Sampling Distance (GSD). Využití této technologie našly např. konstrukční firmy, které díky ní dokáží vzdáleně odhadnout cenu materiálu na konstrukci. Další použití je také v zemědělství [8].

Ground sampling distance (GSD)

Na snímku zachycujícím povrch země může být dobré znát, jaká vzdálenost se na zachyceném povrchu urazí mezi dvěma pixely. Tuto informaci poskytuje právě GSD nejčastěji

³<https://cs.wikipedia.org/wiki/Lidar>

v přesnosti centimetr na pixel. Hodnota se vypočítá pomocí ohniskové vzdálenosti, rozměru senzoru kamery a vzdálenosti mezi kamerou a povrchem. Pro výpočet GSD se použijí rovnice

$$GSD_h = \frac{h \cdot S_h}{f \cdot I_h}, \quad GSD_w = \frac{h \cdot S_w}{f \cdot I_w}. \quad (2.1)$$

Proměnná h značí výšku, S značí rozměry senzoru, f značí ohniskovou vzdálenost a I rozměry snímku. Vypočítané hodnoty značí, kolik se urazí vzdálenosti v použité jednotce při výpočtu na jeden pixel. Tato přesnost se liší na šířku a výšku snímku, a proto se vybere taková, která má menší přesnost, aby při použití GSD byla minimální přesnost vždy splněna. Nejtypičtější použití je ve fotogrammetrii pro měření vzdáleností [15].

Použití ortomozaiky v zemědělství

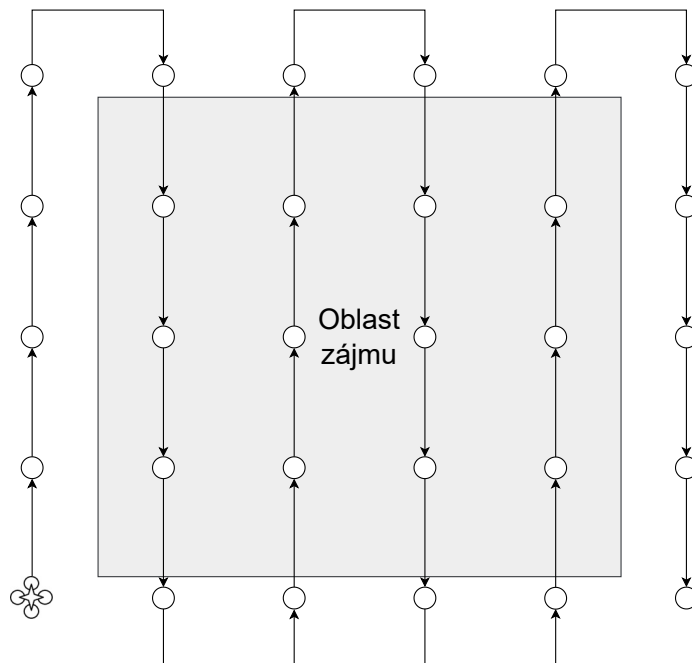
V zemědělství si ortomozaické mapy našly své využití. Používá se zde nejen obyčejná kamera, ale také kamera schopná zaznamenávat multispektrální snímky. Obyčejné snímky se zde využívají pro jednoduchý přehled u rozměrově náročnějších pozemků. Z multispektrální snímku se mnohem rychleji zachytí případná nákaza plodin a díky tomu se zamezí používání přípravků škodících přírodě [5].

2.2 Snímkování dronem

Tato podkapitola se zabývá procesem mapování oblasti pomocí dronu. Nejprve je rozebrán obecný postup popisující pořizování snímků na tvorbu mapy. Dále jsou zmíněny i možné chyby při snímkování dronem a nakonec je probrána kalibrace kamery.

Postup a využití

Díky posunu v technologii bezpilotních letadel je dnes možné pořídit snímek na povrchu země z pohledu ptačí perspektivy bez nutnosti použití letadla nebo jiných leteckých dopravních prostředků. Jedním z typických příkladů je dron. Jedná se o letadlo bez posádky, které je řízeno dálkově pilotem. Také může být schopno létat samostatně pomocí předprogramovaných letových plánů. Drony se začaly bohatě používat v oblasti fotogrammetrie při sběru snímků z ptačí perspektivy, nejčastěji při natočení kamery kolmo dolů směrem k Zemi. Pilot řídící dron pořizuje snímky při letu nad oblastí s dostatečným překryvem. Let se dělá systematicky pro pokrytí co největší plochy oblasti a nejčastěji se provádí ve tvaru mřížky, jak lze vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Názorná ukázka přednaplánované cesty dronu do tvaru mřížky.

Kromě tvaru naplánovaného letu je taky důležité určit rychlost letu, aby nedošlo při vyšších rychlostech ke zhoršení kvality rozmazáním snímku. Dron také nemusí fotit při letu, ale může zastavit na každém bodu, provést fotku nebo focení při otáčení o 360 stupňů a letět dále k dalšímu bodu. Dalším důležitým prvkem při pořizování snímků je gimbal⁴. Jedná se o stabilizační zařízení, které při focení a natáčení stabilizuje a podpoří kameru, aby eliminoval otřesy. Také je schopný otáčet s kamerou v ose sklonu a během pořizování snímků Zemského povrchu je důležité, aby byl gimbal skloněný s kamerou kolmo směrem dolů, pokud to technologie daného dronu dovoluje. Na posledním a neméně důležitém místě je správná volba kamerového nastavení. To by mělo mít při zaznamenávání povrchu země co nejvyšší kvalitu s žádným digitálním nebo optickým zvětšením, ale celkové nastavení kamery bude záležet na konkrétní situaci [18].

Celý postup při snímkování dronem spočívá v těchto krocích:

1. Naplánovat trasu letu s dostatečným překryvem u snímků.
2. Určit, zda-li se bude dron u každého snímku zastavovat, nebo bude pořizovat snímky s konstantní rychlostí, při které nedochází na snímcích k rozostření pohybem.
3. Před zahájením zkontrolovat všechna nastavení kamery, dronu a gimbal sklonit směrem kolmo dolů.
4. Provedení letu/sběru dat.

Během pořizování dat by měl každý pilot dbát na bezpečnost a neporušovat legislativu a pravidla létání v dané zemi. V České republice se při provozování jakéhokoliv dronu vybavený kamerou musí každý pilot registrovat a podle případu použití složit pouze test

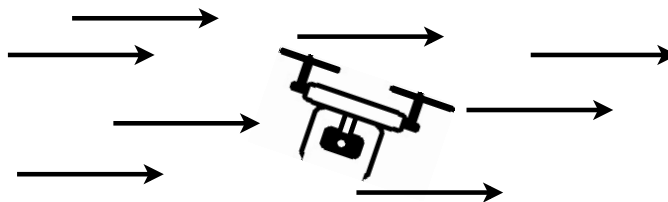
⁴<https://www.xdynamics.com/blog/what-is-a-gimbal/>

ve webovém prohlížeči, a nebo podstoupit zkoušku na úřadě pro civilní letectví⁵. Případ použití je závislý na typu modelu dronu a v jakých lokalitách jej plánuje pilot operovat. Mezi základní bezpečnostní pravidla, kterými by se měl každý pilot řídit, patří:

- Dodržování maximální stanovené výšky v dané zemi. V České republice nesmí dron letět více jak 120 metrů nad zemí.
- Pilot musí mít dron při letu stále v dohledu.
- Dron nesmí létat nad shromážděním osob ani nad zásahy integrovaného záchranného systému.
- Dodržování bezletových zón, mezi které patří hlavně oblasti kolem letiště.

Problémy

Při pohledu na senzor bezpilotního letounu, který je používán výhradně na lety v nízké nadmořské výšce, obvykle člověk najde nemetrickou digitální kameru tzn. kameru původně určenou na jiné použití než právě na ortomozaiku nebo-li fotogrammetrii. Snímky pořízené nemetrickou digitální kamerou budou obsahovat optické zkreslení, které je schopné ovlivnit přesnost při hledání shody mezi obrázky, při ortorektifikaci, vytváření mozaické mapy atd. Kromě optického zkreslení se ve snímcích také objeví perspektivní zkreslení. S tím se vypořádává ortorektifikace, která je probrána v podkapitole 2.3, kde jsou také vysvětlena optické zkreslení v obraze. Ve fázi přípravy nebo i během samotného procesu pořizování snímků se pilot operujícího s dronem musí často vypořádávat s problémy, které mohou mít vliv na let a pořízené snímky dronu.



Obrázek 2.4: Náčrt dronu ovlivněný prouděním vzduchu.

Dron může někdy vážit několik desítek kilogramů, a nebo může jít o drona nepřekračujícího více jak 250 gramů s baterií a kamerou. I v případě těžšího modelu se jedná o relativně malé letadlo, které není schopné odolávat náročnému nebo extrémnímu stavu počasí a pokud bude dron odnášen kvůli silné rychlosti proudícího vzduchu, jako je znázorněno na obrázku 2.4, tak snímky pořízené v takové situaci nebudou odpovídat dobrému výsledku. V případě silného deště, padání sněhu nebo mlhy mohou být ovlivněné samotné obrazové snímky v důsledku špatné viditelnosti. V situaci, kdy se oblast nachází na špatně přístupném místě, může hrát roli také zdroj napájení, který je jeden ze silně limitujících faktorů dronů. Průměrný dron vydrží létat na jednu baterku okolo 15 až 25 minut, ze kterých je obvykle alespoň 5 minut rezervních v případě řešení problémů během letu. Pilot musí počítat s energií spotřebovanou kamerou na pořízení jednoho snímku. Také náročný terén může ovlivnit výdrž baterie. Velikost oblasti ovlivňuje délku letu a počet snímků potřebných k celému pokrytí [18].

⁵<https://dron.caa.cz/>

Kalibrace kamery

Všechny kamery mohou obsahovat zkreslení, která se později promítnou do výsledných snímků. Zkreslení může být problémem pro mnoho úloh v počítačovém vidění, a proto je kalibrace kamery tolik důležitá. Kalibrační algoritmy se používají pro tzv. Pinhole Camera model nebo tzv. Fisheye Camera Model⁶.

Pinhole Camera model je jednoduchou kamerou obsahující jednu malou clonu. Paprsky prochází skrze clonu a promítají převrácený obraz na druhé straně kamery. Parametry modelu jsou v podobě matice nazývané kamerová matice (z angl. camera matrix), která mapuje zachycenou 3D scénu do roviny obrazu. Rovnicí kamerové matice je

$$P = K \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

kde K značí vnitřní parametry kamery, R a t značí vnější parametry, rotaci a posun. Vnější parametry kamery značí, kde se kamera nachází a jak je polohovaná. Obsahují tedy souřadnice v 3D prostoru a orientaci, kam je kamera namířena. Jedná se o vektor s šesti stupni volnosti. Vnitřní parametry kamery jsou vlastnosti objektivu. Jsou tvořeny ohniskovou vzdáleností, koeficientem zkreslení a tzv. principal point značí pixel na obraze, který protíná optická osa kamery. Tyto parametry jsou pevně dané výrobcem, ale skutečné hodnoty se můžou podle kusu lišit.

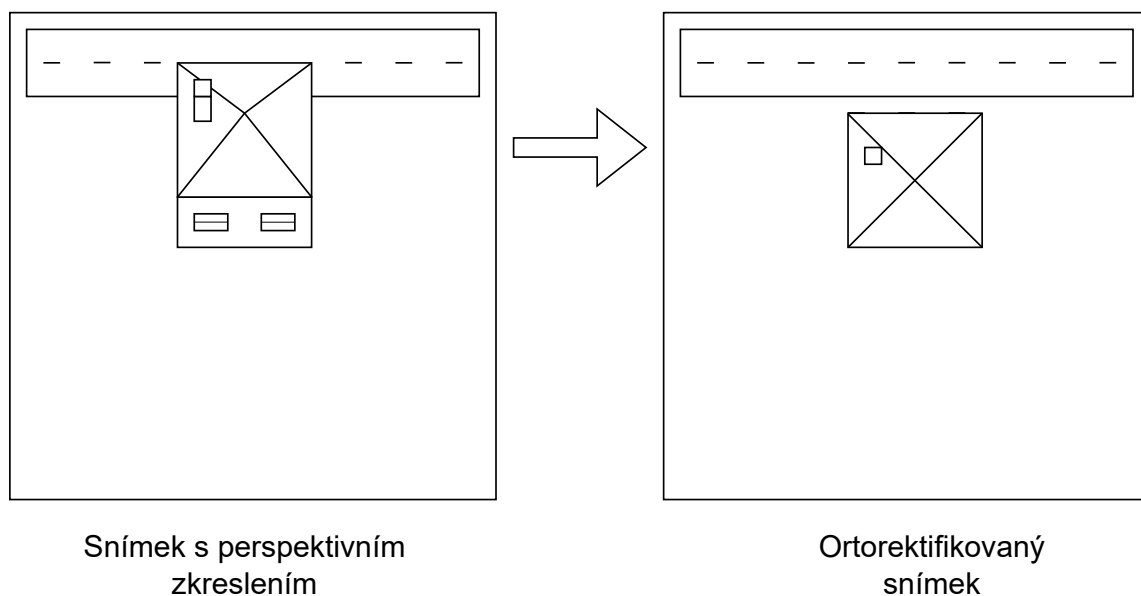
Pro získání vnitřních parametrů se používá metoda tzv. Zhang's calibration method. Metoda používá ke kalibraci objekt, u kterého jsou známy všechny jeho vlastnosti např. šachovnice. Tu položíme před kameru a pořídíme několik snímků, kde na každém bude šachovnice jinak natočená. Algoritmus používá získané body rohů z šachovnicového vzoru pro výpočet projektivní transformace mezi nalezenými body z několika různých snímků. Potom jsou vnitřní a vnější kamerové parametry získány pomocí analytického řešení, zatímco pomocí lineárního řešení metodou nejmenších čtverců získáme radiální zkreslení. Získané hodnoty lze použít pro odstranění optických zkreslení ze snímků, které pořídila zkoumaná kamera [14].

2.3 Ortorektifikace

Nejčastějším zkreslením na snímcích jsou radiální zkreslení, která se dělí na dva základní typy. Prvním je negativní posunutí připomínající tvar barelu, kdy jsou body posunuty z jejich správných pozic směrem ke středu snímku. Druhý typ radiálního zkreslení je pozitivní posunutí připomínající tvar polštáře, u kterého jsou body posunuty z jejich správných pozic směrem ven od středu snímku. Dále také existuje kombinace obou zkreslení [10]. Tato zkreslení lze opravit pomocí kalibrace kamery.

Ve snímcích z dronu se také projevují perspektivní zkreslení vyvolané vykřivením snímače objektivu, nebo kvůli členitosti povrchu Země. Kvůli tomuto zkreslení nejsou všechny povrchové body v zachycené oblasti na snímku vidět. Typická situace je vidět na obrázku 2.5.

⁶<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/fisheye-calibration-basics.html>



Obrázek 2.5: Příklad perspektivního zkreslení, které u snímku není vhodné pro tvorbu mapy.

Tento jev se vytváří kvůli objektům, které se nachází v rozdílné výšce. Objekty nacházející se ve větší výšce budou posunuty radiálně směrem ven od středu snímku [19]. Takové zkreslení se nevyřeší pomocí kalibrace kamery, ale pomocí ortorektifikace.

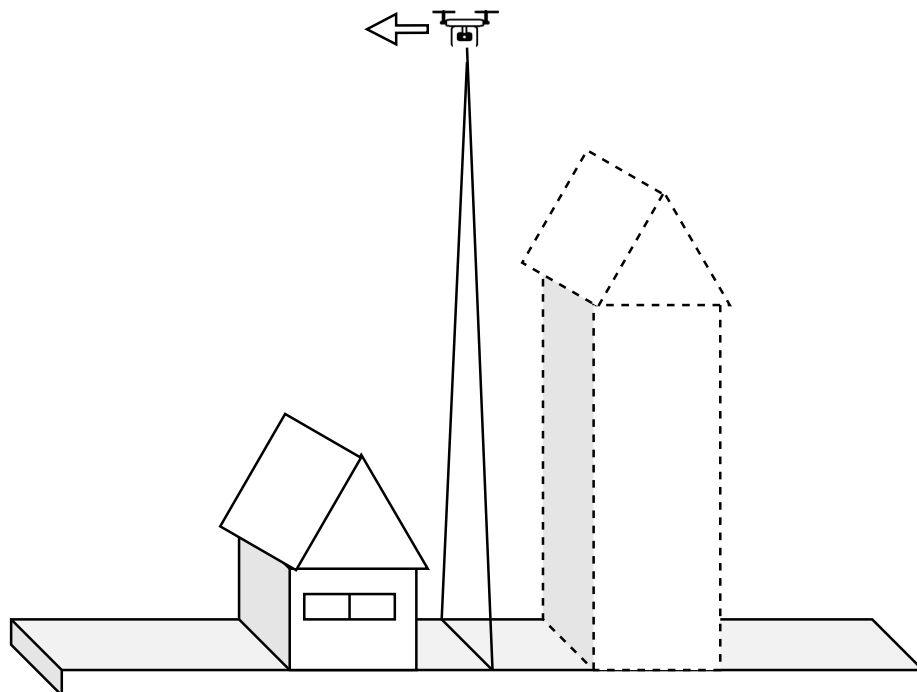
Přesnost ortorektifikace

Vstupem ortorektifikace jsou snímky obsahující zkreslení a jejím výstupem jsou snímky bez zkreslení obsahující všechny body povrchu oblasti, kterou snímek zachytává. Pro úspěšné provedení ortorektifikace je potřeba si zajistit nejen snímky oblasti z dronu, ale také data popisující povrch zachycené oblasti. Tato data jsou v podobě digitálního modelu. Modely se dělí na typy podle objektů, které na povrchu země zachycují a popisují. Přesnost výstupu ortorektifikace potom závisí na použitém postupu a také na použitém digitálním modelu. Digitální modely se dělí na výškový model, model terénu a model povrchu. Výškový model obsahuje nejméně dat o povrchu Země, model terénu obsahuje přírodní rysy a model povrchu obsahuje kromě přírodních rysů i objekty postavené člověkem. Více o digitálních modelech lze najít v podkapitole 2.1. Pokud se vezme digitální model terénu při ortorektifikaci, výstupem bude ortofotka se špatně umístěnými objekty nad úroveň terénu, protože nejsou modelovány v použitém digitálním modelu. Na výsledku lze vidět naklánějící se budovy a špatně umístěné mosty. Problémy vzniklé použitím digitálního modelu terénu lze vyřešit použitím digitálního modelu povrchu, který již modeluje objekty nad úroveň terénu a ortorektifikace je díky tomu správně dokáže umístit. Takový snímek se potom nazývá opravdovou ortofotkou (z angl. true orthophoto) [9].

Omezení ortorektifikace

Hlavní nevýhodou používání ortorektifikace je sběr požadovaných dat na úspěšný proces ortorektifikace. Drony jsou dnes více dostupné, a proto není tolik složité získat snímky na tvorbu ortomozaické mapy. V případě získávání kvalitních a přesných digitálních modelů povrchu země už tomu tak není, protože pro vytvoření tak kvalitního modelu je už potřeba

zařízení jako Lidar, které dokáže pomocí laserových paprsků vytvořit 3D síť bodů reprezentující povrch planety s přesností až na jednotku centimetru. Sběr takových dat je znázorněn na obrázku 2.6. Pokud se použije jiný digitální model než DSM snímané oblasti, může být na ortomozaické mapě stále vidět optické zkreslení kvůli nedostatečné ortorektifikaci snímků.



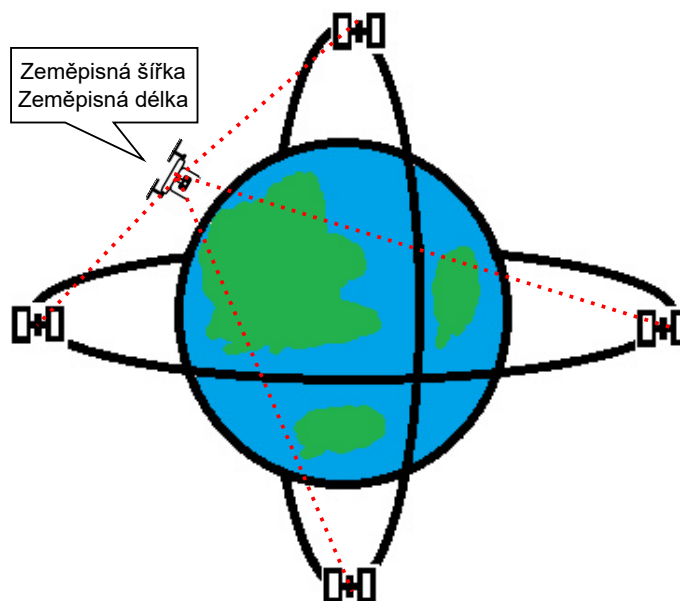
Obrázek 2.6: Znázornění dronu, který pořizuje data pro vytvoření digitálního modelu popisující geoprostorové rysy povrchu země.

2.4 Globální družicový polohovací systém (GPS)

Drony potřebují znát svoji polohu během letu, aby se dokázaly udržet na místě a nezačaly se pohybovat ve směru působení proudění vzduchu. Dále používají polohu například u přednaplánovaných letů nebo vrácení se na místo vzletu. Kromě aktivního použití GPS při letu dron také přidává svoji aktuální polohu do snímků, které pořídí.

Jak GPS funguje

GPS je globální družicový polohový systém. Je tvořen sítí satelitů a zařízeními, které jsou schopné přijímat informace od všech satelitů. Podle získané informace zjistí, kde se daný satelit nachází a jak dlouho cestovala jeho informace právě k tomuto zařízení. Na základě sběru informací alespoň od čtyř satelitů dokáže určit svou polohu na přesnost až jednoho metru, některé zařízení na přesnost v jednotkách centimetrů. Jak lze na obrázku 2.7 vidět, drony používané na fotogrammetrii jsou vybaveny modelem GPS, který komunikuje pomocí radiových vln s minimálně čtyřmi satelity, aby zjistil svoji polohu [7].



Obrázek 2.7: Znázornění dronu, který podle přijímané informace ze satelitů zjišťuje svoji současnou polohu.

Přesnost GPS dronu

Pro výpočet pozice dronu je potřeba získat data od dostupných satelitů a na základech získaných dat se vypočítá příslušná zeměpisná šířka a délka. U dronů se přesnost v dobrých podmínkách pohybuje okolo 1 metru tzn. pokud by se kolem naměřené pozice nakreslil kruh s poloměrem jednoho metru, tak by se skutečná pozice měla nacházet v právě nakresleném kruhu. Tato přesnost se může lišit podle pozice satelitů tzn. že na určitých místech lze získat informace od méně satelitů, přesnost se může také lišit kvůli kvalitě GPS zařízení atd.

Omezení GPS

Díky rádiovým vlnám je možné předávat informace od satelitů ve velmi krátkém čase, ale to vytváří jedno z omezení GPS. Nevýhoda radiových vln je neschopnost procházet fyzickými bariérami např. skrze zeď a ani skrze jiné objekty podobného typu [11].

Práce s GPS souřadnicemi u dronu

Po pořízení dat o oblasti zájmu dronem je možné u každého snímku díky modulu GPS získat příslušnou GPS pozici v podobě zeměpisné šířky a délky. Při vytváření ortomozaické mapy jsou snímky seřazené za sebou chronologicky podle pořizování. V situaci dvou snímků pořízených za sebou budou výsledkem dva páry GPS souřadnic, podle kterých lze zjistit, jak daleko jsou od sebe vzdálené. Díky tomu lze zjistit, jakou vzdálenost dron urazil, a použít tuto vzdálenost při tvorbě mapy.

Zeměpisná šířka a délka udává pouze 2D souřadnice, ale pro tvorbu mapy je potřeba vědět, v jaké výšce se dron pohyboval. K tomu používá barometrický senzor, který zaznamenává dvě hodnoty o výšce. První je absolutní, která je odvozena z atmosferického tlaku, kde se právě nachází. Tato výška je udávána jako nadmořská výška tzn. není měřena od nadmořské výšky oblasti, kde se dron pohybuje. Hodnota absolutní výšky je nepřesná

a vzhledem k formátu špatně použitelná pro tvorbu map. Druhou výškou je výška relativní, kterou už lze použít pro tvorbu map. Tato výška je odvozena tak, že si barometrický senzor nastaví na místě vzletu výšku nula a zaznamenává stoupání dronu.

Inerciální měřicí jednotka

Díky GPS zná dron svoji aktuální pozici v prostoru, ale z toho nelze určit, jak je dron napoložovaný. K tomu používá kompas a inerciální měřicí jednotku obsahující gyroskop a akcelerátor. Dohromady nabízí informace o orientaci v prostoru a zrychlení. Mimo jiné v sobě obsahuje již popsany barometrický senzor. Orientaci v prostoru lze rozložit na směr, sklon a náklon.

Haversinův vzorec

V případě dvou GPS souřadnic může být potřeba spočítat vzdálenost mezi nimi po povrchu Země. Tuto vzdálenost lze vypočítat pomocí Haversinova vzorce, který vypočítá nejkratší cestu po zemském povrchu. Rovnice pro výpočet jsou

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (2.3)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (2.4)$$

$$d = R \cdot c, \quad (2.5)$$

kde φ je zeměpisná šířka, λ značí zeměpisnou délku, R značí poloměr Země [4].

Rotace souřadného systému

U jedné z metod je potřeba zjistit souřadnice vektoru při rotaci souřadného systému. K tomu se použije vzorec pro výpočet nových souřadnic po rotaci souřadného systému kolem středu, který se zapisuje

$$x = x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta) \quad (2.6)$$

$$y = x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta). \quad (2.7)$$

Proměnná x a y značí nové souřadnice, x' a y' značí původní souřadnice a θ je úhel, o jaký se má souřadný systém kolem středu otáčet proti směru hodinových ručiček [17].

2.5 Spojování snímků

Pokud je mise získávání dat v požadované oblasti úspěšná, tak nastává další důležitý úkol, a tím je najít způsob spojení pořízených snímků obsahujících překryv mezi sebou dohromady. Nejtypičtějším příkladem úlohy pro spojování snímků je vytváření panoramatu. Nedokonalé spojené panorama lze vidět na obrázku 2.8. Panoramatická fotka zachycuje prostředí ve velkém úhlu pohledu, a tím se celkově blíže přibližuje způsobu, jak lidé vnímají svět kolem sebe. Nejčastěji se panorama vytváří v oblastech s dobrou viditelností a s atraktivním prostředím jako jsou např. hory, moře atd.



Obrázek 2.8: Nedokonale spojené panorama, na kterém jdou dobře vidět jednotlivé snímky.⁷

Dalším příkladem je situace, při které je potřeba spojit dva nebo více překrývajících se snímků. Ke spojení dvou snímků lze dojít splněním následujících kroků:

1. Nejdříve bude potřeba u obou snímků najít zájmové body a získat jejich popis v podobě příznakových vektorů.
2. Příznakové vektory zájmových bodů nalezených z prvního snímku se porovnávají s příznakovými vektory zájmových bodů nalezenými ve druhém snímku a pomocí algoritmů pro hledání nejpodobnějších příznaků se najdou dvojice obrazových příznaků, které lze najít na obou snímcích. Nalezené dvojice jsou ještě otestovány tzv. Lowe's ratio testem, který ověřuje u každé nalezené dvojice její unikátnost a vyřadí příliš podobné.
3. U výsledných nejpodobnějších dvojic se používá jejich poloha pro nalezení geometrické transformace mezi snímky nebo-li parametry homografie. Všechny nalezené dvojice nemusí být správně napárované, a proto by mohly přinést do výpočtu parametrů homografie chyby při standardním využití metody nejmenších čtverců. Z toho důvodu se namísto metody nejmenších čtverců používá metoda RANSAC⁸.
4. Posledním krokem je s vypočítanou homografií spojit oba snímky do jednoho výsledného snímku.

Detekce obrazových příznaků

Při spojování snímků je základním stavebním kamenem najít podobnosti mezi snímky, které zachycují stejnou oblast. Snímky se za tímto účelem pořizují s dostatečným překryvem, aby se mezi snímky vyskytovaly stejné zájmové body. Při hledání podobnosti by se měl prozkoumat každý pár pixelů k nalezení podobnosti. Jednalo by se o velmi náročný proces a raději se přistoupilo k porovnávání o dost menšího počtu bodů tzv. zájmových bodů (z angl. interest points). Zájmové body není nutné pouze najít, ale i popsat jejich okolí pomocí příznakových vektorů. Zájmové body hledáme ve snímcích v podobě rohů. Na rozdíl od okrajů jsou rohy velmi zajímavou oblastí, díky čemu jsou dobře rozpoznatelné. Pokud člověk dostane libovolný roh a libovolný okraj vyříznutý z obrázku, dokáže roh velmi rychle na původním obrázku najít, protože podobných okrajů bývá na snímcích více než podobných rohů. Jeden z typických algoritmů je tzv. SIFT: Scale invariant feature transport⁹. Ten kromě základního problému řeší problémy běžných předmětů, které jsou

⁷https://cs.wikipedia.org/wiki/Panoramatick%C3%A1_fotografie

⁸https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88688-4_37

⁹<https://ieeexplore.ieee.org/document/790410>

ovlivněné změnou měřítka, polohy a osvětlení nebo mohou být částečně zakryté. Výsledkem algoritmu SIFT jsou nalezené zájmové body a k nim příslušné příznakové vektory viditelné na obrázku 2.9 [13].



Obrázek 2.9: Výstřižek ze snímku, kde byly nalezené obrazové příznaky pomocí algoritmu SIFT vyznačeny barevnými kolečky.

Hledání nejbližších dvojic příznakových vektorů

Hledání nejbližších dvojic příznakových vektorů znamená najít takové dvojice zájmových bodů mezi snímky, aby jejich příznakové vektory byly co nejpodobnější. Jedním algoritmem pro nalezení nejpodobnějších dvojic je porovnávání každý s každým. Ten funguje tak, že v situaci dvou setů příznakových vektorů z překrývajících snímku se vezme příznakový vektor z prvního setu a porovnává se se všemi příznakovými vektory ze druhého setu. Porovnávání funguje na základě porovnávání vzdáleností a je vrácena taková dvojice, která je nejbližší k sobě. Takový postup je robustní a dosáhne přesného výsledku, ale metoda porovnávání každý s každým je výpočetně náročná.

Další algoritmus pro nalezení nejbližších dvojic příznakových vektorů používá metodu vyhledávání přibližných nejbližších sousedů¹⁰ (z angl. Approximate Nearest Neighbors) přizpůsobenou pro mnoho dat. Takového výsledku lze dosáhnout za kratší čas, ale získaný výsledek už nebude tak přesný, jako tomu je u prvního algoritmu [1].

Tyto algoritmy jsou dostupné v mnoha nástrojích a knihovnách. Použitá knihovna OpenCV obsahuje oba algoritmy.

¹⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Nearest_neighbor_search

Lowe's ratio test

Účelem metody je odstranit takové nalezené nejpodobnější dvojice obrazových příznaků, které mají druhou nejpodobnější nalezenou dvojici s jiným bodem skoro stejnou jako první nejpodobnější nalezená dvojice bodů. Při použití algoritmu pro nalezení nejpodobnějších dvojic mezi sety dostaneme dvojice, ve kterých jsou ke každému bodu z prvního setu podle jeho příznakového vektoru nalezené body z druhého setu s nejmenší Euklidovskou vzdáleností, která popisuje nejmenší možnou vzdálenost mezi body. Potom tyto dvojice obsahují kombinace bodu z prvního setu a body z druhého setu, mezi kterými je nejmenší Euklidovská vzdálenost ze všech kombinací mezi bodem z prvního setu a body ze setu druhého. Základní myšlenkou Lowe's ratio test je, že bod z prvního snímku se nemůže ve druhém objevit dvakrát. Díky tomu si lze brát postupně každou nalezenou dvojici, u které se porovnává její nejlepší a druhý nejlepší výsledek a vyřadit ji, pokud si jsou jejich Euklidovské vzdálenosti až moc podobné. Taková dvojice přináší dvojznačnou informaci [12].

Geometrické transformace

Při zpracovávání snímků bývá snahou zbavit je nechtěného geometrického zkreslení, jako je např. radiálního zkreslení, tangenciálního zkreslení¹¹ a dalších. Tato zkreslení vznikají při pořízení snímků a nástrojem na jejich eliminaci jsou právě geometrické transformace. Jedná se o vektor funkce T mapující pixely (x, y) na novou pozici (x', y') . Funkce T je definována dvěma rovnicemi

$$x' = T_x(x, y), \quad y' = T_y(x, y).$$

Transformační funkce T_x a T_y jsou předem známe, nebo mohou být vypočítány. Při předem známých transformacích se obvykle jedná o otáčení, posunutí nebo změnu velikosti snímku. Jinak může být transformační funkce vypočítána mezi dvěma snímky, u kterých jsou přítomné shodné pixely.

Geometrická transformace se vykoná ve dvou krocích. Prvním krokem je vypočítání, kam se každý bod snímku přenese po aplikaci transformační funkce. Vypočítaná hodnota každého bodu nemusí vyjít přesně na digitální mřížku bodů, a proto je nutné vykonat druhý krok. Ten spočívá v nalezení co nejlepší pozice v digitální mřížce pro danou vypočítanou hodnotu. Následně zbývá jen vypočítat jas každého bodu nejčastěji pomocí interpolace.

Mezi geometrické transformace patří homografie, která reprezentuje transformaci mezi dvěma rovinami. Dokáže eliminovat zkreslení rotací, posunem, zkosením a také perspektivní zkreslení. Homografie je reprezentována maticí 3×3 obsahující 8 stupňů volnosti [16].

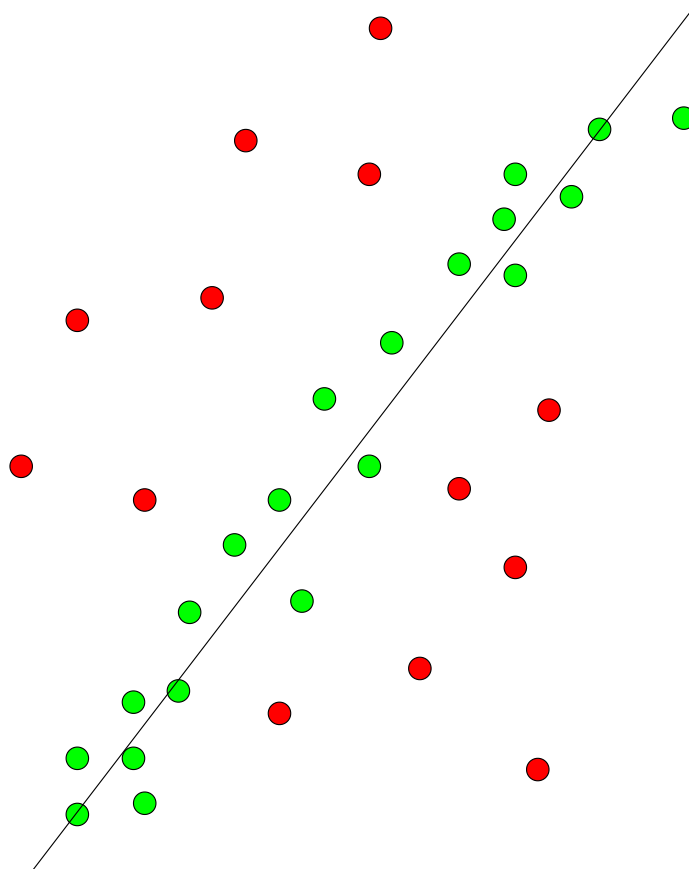
Výpočet homografie pomocí iterativní metody RANSAC

Pro určení homografie jsou vstupem nalezené nejpodobnější dvojice zájmových bodů mezi dvěma snímky. Ve všech nalezených dvojicích můžeme najít i takové, které nejsou správné a při použití metody nejmenších čtverců by tyto dvojice přinášely do výpočtu chybu. Proto se používá iterativní metoda RANSAC, jejíž funkce je znázorněna na obrázku 2.10 a probíhá následovně:

1. Vybere se náhodně minimum bodů, ze kterých lze spočítat homografii, a vypočítá se s vybranými body homografie.

¹¹https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-31439-6_479

2. Se spočítanou homografií se otestuje, kolik ze zbylých dvojic patří do tzv. inliers a kolik do tzv. outliers. Inliers značí dvojice, které odpovídají vypočítané homografii. Outliers značí dvojice, které naopak neodpovídají vypočítané homografii.
3. Potom se uloží, kolik vyšlo outliers s náhodně vybranými dvojicemi pro výpočet homografie.
4. Proces se opakuje znova od prvního kroku např. stokrát.
5. Po všech cyklech se vybere taková homografie, u které vyšlo nejméně outliers.



Obrázek 2.10: Ukázka výpočtu homografie iterativní metodou RANSAC. Na obrázku lze vidět výslednou homografii, při které bylo nalezeno nejméně outliers. Inliers jsou označené zelenou barvou, zatímco outliers jsou označené červenou barvou.

Kapitola 3

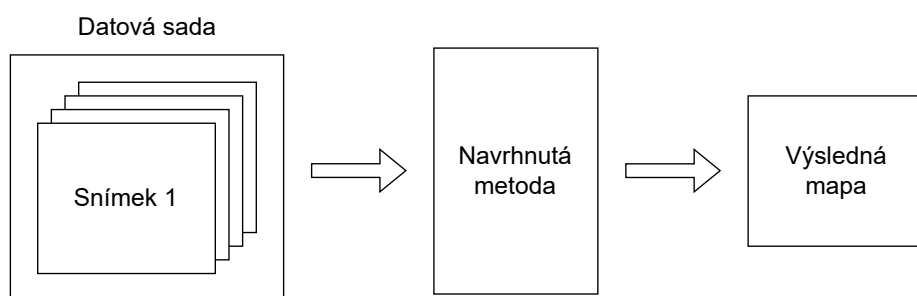
Návrh

V této kapitole bude popsáno jaké požadavky jsou potřeba adresovat, potom jaký je návrh pro splnění stanovených požadavků a jak se budou řešit problémy, které při návrhu vzniknou.

3.1 Analýza problému

Cílem této práce je vytvořit mapu pomocí navrhnutých metod. Pro vytvoření výsledné mapy budou tyto metody aplikovány na data, která zachycují požadovanou oblast v podobě leteckých snímků, jak naznačuje obrázek 3.1. Sběr dat probíhá pomocí bezpilotního letounu tzn. dronu zaznamenávající své aktuální letové informace. Ty ukládá do každého snímku během jejich pořizování. Mezi každými za sebou pořízenými snímky je dostatečný překryv pro vytvoření výsledné mapy.

Navrhnuté metody se budou zabývat zjištěním pozice všech snímků a jakým způsobem je následně spojit dohromady, aby jako celek vytvářely výstupní mapu. Při zjišťování pozice každého snímku bude cílem najít takovou pozici, při které budou snímky na sebe navazovat, aby dobře reprezentovaly zachycenou oblast. Jakmile budou známy jednotlivé pozice všech snímků, tak bude potřeba je do daných pozic posunout a vytvořit z nich mapu o minimální velikosti.

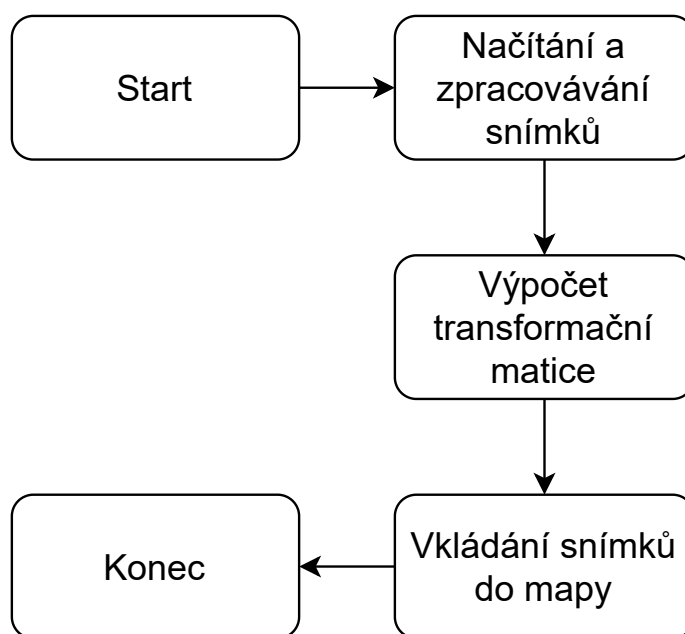


Obrázek 3.1: Základní pohled na výsledné řešení, které přijímá na vstupu datovou sadu, na kterou použije navrhnuté řešení. Výstupem je mapa vytvořená ze vstupních snímků.

3.2 Postup řešení

Nejpodstatnějším problémem při vytváření mapy bude způsob výpočtu a provedení spojení jednotlivých snímků dohromady tak, aby jako celek vytvořily mapu. Cílem metod bude vypočítat transformaci u každého snímku, pomocí které se budou správně pozicovat na výsledné mapě. Každá transformace bude zastoupena transformační maticí a postup výpočtu se bude lišit podle navržené metody. V první metodě se budou používat polohovací metadata, která lze najít u každého snímku k výpočtu jeho transformační matice. Ve druhé metodě se k výpočtu transformační matice použijí obrazové příznaky mezi snímky s algoritmy počítačového vidění, které jsou více popsány v podkapitole 2.5. Třetí metoda také používá obrazové příznaky k výpočtu transformační matice, ale namísto hledání příznaků mezi snímky je hledá mezi aktuálně zpracovávaným snímkem a všemi zatím zpracovanými snímky.

Dekompozice problému na menší části



Obrázek 3.2: Dekompozice řešení na menší části.

Navrhnutá dekompozice problému je popsána na obrázku 3.2. Na vstup přichází postupně snímky zachycující zájmovou oblast, které se podle vybrané navržené metody začínou zpracovávat.

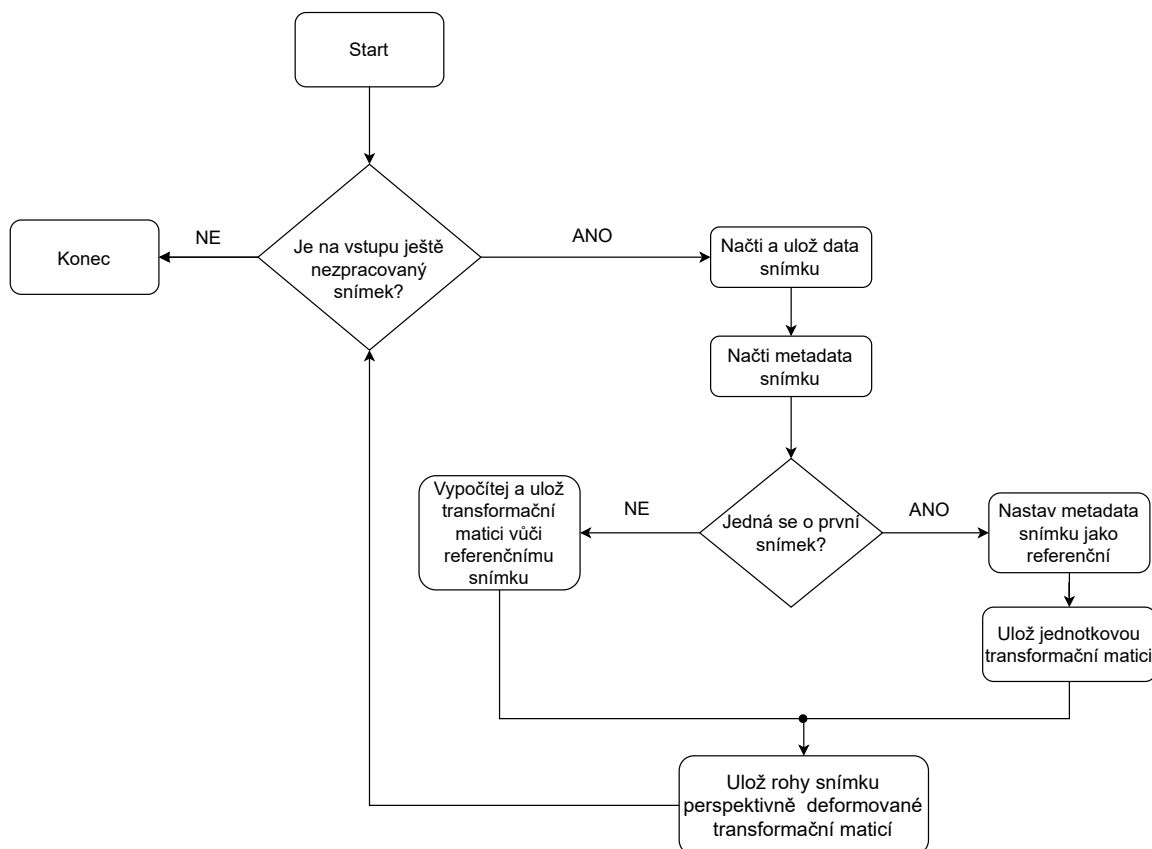
Ve všech metodách se nejdříve uloží obraz snímku ve formě matice. Potom v případě metody používající polohovací metadata se ze snímku získají letové informace, které uložil dron při jejich pořízení. V části výpočtu transformační matice používá jiný postup pouze metoda polohovacích metadat, protože další dvě metody používají obrazové příznaky. V postupu vkládání snímků do mapy se liší pouze třetí metoda, která hledá obrazové příznaky mezi aktuálním snímkem a všemi již zpracovanými snímky. Mapa je potom pomalu sestavována postupným zpracováváním snímků.

3.3 Metoda polohovacích metadat

Cílem tohoto řešení je vytvořit mapu pouze na základě polohových metadat, která jsou obsažena v každém pořízeném snímku dronem. Dron při zaznamenávání ukládá do snímku aktuální data, která dostává z GPS modulu a z inerciální měřicí jednotky. Jedná se zejména o letové informace, informace o kameře, nastavení kamery, parametry snímku a také polohu s natočením dronu. Řešení bude potřebovat GPS souřadnice, relativní výšku dronu a úhel otáčení kolem svislé osy (z angl. yaw degree) také známý jako směr. Tento úhel je ve formátu od -180 do 180 stupňů a značí úhel svírající natočení dronu se severem. Navrhnuté řešení si u každého snímku načte jeho metadata, podle kterých vypočítá posun a rotaci tohoto snímku vůči prvnímu referenčnímu snímku. Vypočítaný posun a rotace jsou v podobě transformační matice. Kromě transformační matice si ještě uloží všechny čtyři x -ové a y -ové hodnoty rohů snímku, které perspektivně deformuje (z angl. perspective warp). Obě hodnoty se potom používají při vytváření výsledné mapy.

Popis řešení

Vstupem jsou snímky zachycené oblasti dronem a výstupem jsou snímky s transformační maticí a deformované rohy snímku transformační maticí. Transformační matice se vypočítá pouze na základě metadat ze snímků a je potom použita pro transformaci snímku do správné pozice na výsledné mapě. Zjednodušený postup řešení znázorněný formou vývojového diagramu lze vidět na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Vývojový diagram popisující řešení s využitím GPS polohy.

Celý proces se odehrává při zpracovávání snímků, které program nalezne na vstupu. První nalezený snímek na vstupu se označí jako referenční. Polohovací metadata referenčního snímku se použijí pro výpočet GSD popsaného v podkapitole 2.1. Jeho transformační matice se nastaví na jednotkovou matici, protože se od tohoto snímku budou vypočítávat transformační matice všech ostatních snímků. Referenční snímek je potom teoreticky začátkem souřadné soustavy a např. u pátého snímku se bude počítat jeho transformační matice jako posun a rotace vůči prvnímu referenčnímu snímku. Rotace snímku se udává pomocí úhlu, který svírá natočení dronu se severem.

Po zpracování referenčního snímku se začínají zpracovávat všechny ostatní. Zpracovávání každého dalšího snímku probíhá nejdříve načtením jeho polohovacích metadat. Následně se vypočítá posun mezi referenčním snímkem a aktuálním snímkem v pixelech pomocí GSD a GPS souřadnic. Dále se vypočítá potřebná rotace, která aktuální snímek orotuje tak, aby byl natočený stejně jako referenční snímek tzn. aby svíral stejný úhel se severem jako svírá referenční snímek. Vypočítaný posun a potřebná rotace se spojí do jedné matice, díky čemu vznikne transformační matice aktuálního snímku. Tento proces se opakuje pro každý snímek na vstupu.

Výpočet posunu snímku vůči referenčnímu snímku

První je potřeba zjistit vzdálenost mezi souřadnicemi prvního snímku a mezi souřadnicemi druhého snímku v ose x a y . Na výpočet vzdálenosti v ose x se vezmou dva body, které mají zeměpisnou délku stejnou jako souřadnice prvního snímku, ale zeměpisnou šířku budou mít oba rozdílnou podle souřadnic obou snímků. Podobně se vypočítá vzdálenost v ose y . Použitým vzorcem pro výpočet vzdálenosti mezi dvěma souřadnicemi je Haversinův vzorec popsáný v podkapitole 2.4.

Získané vzdálenosti pro posun snímku v x -ové a y -ové ose jsou v souřadném systému hlavních světových stran tzn. pokud by se dron posunul o 20 metrů po x -ové ose, tak se posunul směrem na východ. Získané vzdálenosti se v tom případě musí upravit, protože se transformační matice každého snímku počítá podle snímku referenčního. Rozdíl mezi vytvářením transformačních matic podle světových stran, nebo podle referenčního snímku lze vidět na obrázku 3.4.

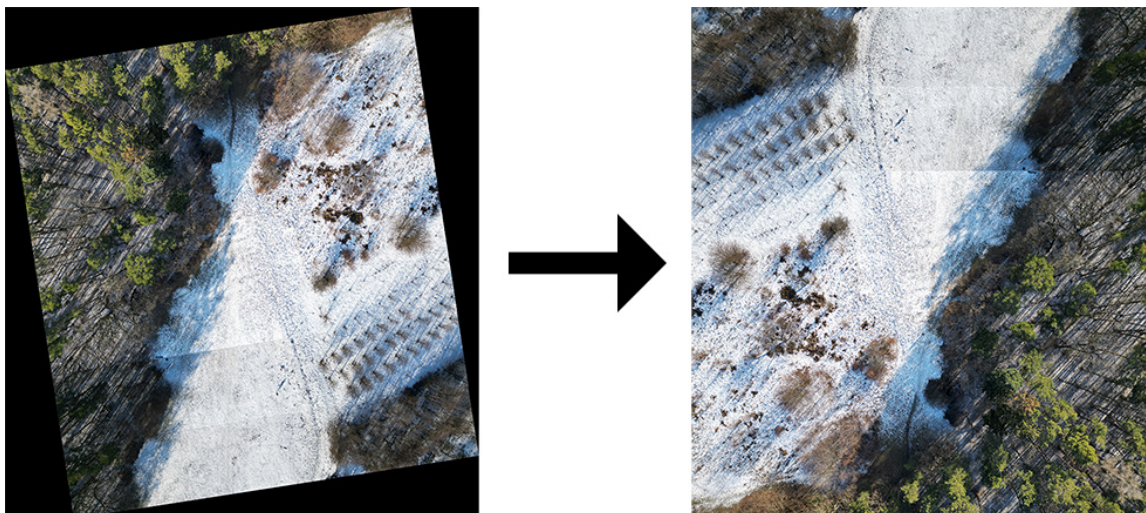
Vzdálenosti se upravují pomocí rotace souřadného systému kolem středu, která byla probrána v podkapitole 2.4.

Vytvoření mapy

Po spuštění metody nad snímky jsou známy všechny transformační matice pro úspěšnou tvorbu mapy. Pomocí získaných deformovaných rohů se předpočítá výsledná velikost mapy a každý snímek se začne transformovat transformační maticí a vkládat do mapy na správné pozice.

Rizika metody

Největším rizikem řešení je nepřesnost, která vzniká hned kvůli několika faktorům. Prvním je, že používání pouze metadat k určení transformační matice nestačí k vytvoření dobré mapy. Čistě pomocí GPS souřadnic a natočení dronu nelze vytvořit transformační matici tak, aby zohlednila i perspektivu a správně transformovala snímky do jedné perspektivy. Druhým faktorem je metoda pro převod vzdálenosti na pixely. Každý pixel pohybující se směrem ven od středu obrazu reprezentuje čím dál větší vzdálenost na povrchu země. Ta-



Obrázek 3.4: Ukázka dvou map vytvořených ze tří snímků. Snímky na levé mapě jsou orotované podle souřadného systému světových stran. Snímky na pravé mapě jsou orotované podle souřadného systému referenčního snímku.

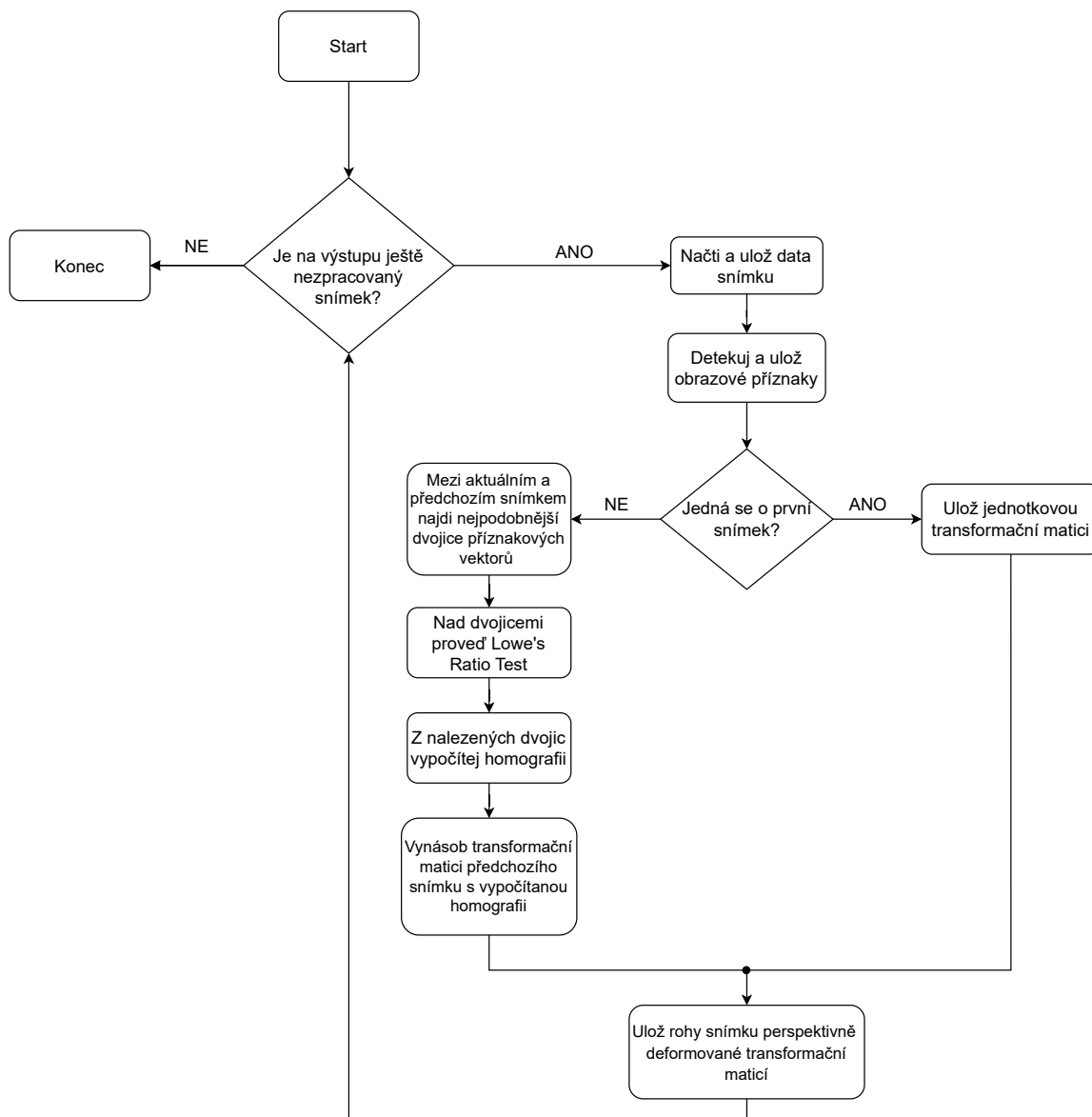
kovým způsobem výpočtu potom vzniká chyba, která zapříčiní, že snímek není na správné pozici. Dalším problémem je nepřesnost GPS popsaná v kapitole 2.4, nebo neortorektifikované snímky, na kterých lze vidět např. boční stěny domů, stromů a jiných objektů, které jsou vůči povrchu vyvýšené.

3.4 Metoda obrazových příznaků mezi snímky

Druhá metoda se zaměřuje na cíl vytvořit mapu na základě obrazových příznaků, které lze najít na snímcích. Na vstup přicházejí snímky zachycující určitou oblast a výstupem jsou transformační matice s deformovanými rohy snímku transformační maticí. Metoda hledá obrazové příznaky mezi sebou tak, jak byly pořízeny za letu, a proto musí na vstup přicházet ve stejném uspořádání. Následně je vypočítána transformační matice, která snímky správně uloží na výslednou mapu. Postup řešení lze vidět ve zjednodušené podobě na obrázku 3.5 v podobě vývojového diagramu.

Popis řešení

Výpočet transformačních matic snímků se odehrává při jejich zpracovávání. Metoda zpracovává snímky na vstupu jeden po druhém. První snímek je zpracováván jinak, protože se transformační matice počítá mezi aktuálně zpracovávaným a předchozím snímkem. Transformační matice prvního snímku se nastaví jako jednotková matice. U dalších snímků se transformační matice počítá nejdříve nalezením zájmových bodů a jejich příslušných příznakových vektorů, jak je znázorněno na obrázku 3.6. Příznakové vektory se začnou porovnávat mezi snímky a najdou se nejpodobnější dvojice. Nad nalezenými dvojicemi se provede Lowe's ratio test a pomocí zbylých dvojic se vypočítá homografie, která popisuje jakým způsobem namapovat body aktuálně zpracovávaného snímku do roviny předchozího snímku. Výsledná transformační matice se získá vynásobením transformační matice předchozího snímku se získanou homografií. Tento proces se opakuje, dokud jsou na vstupu nezpracované snímky.



Obrázek 3.5: Vývojový diagram metody obrazových příznaků mezi snímky.

Vytvoření mapy

Mapa se začne tvořit, jakmile jsou známy všechny transformační matice. Pomocí transformovaných rohů se vytvoří minimální velikost výsledné mapy. Následně je každý snímek transformován a vložen do výsledné mapy.

Rizika metody

Používání obrazových příznaků při spojování snímků povede u transformací nad snímky ke zkreslení v měřítku a změně vzdáleností mezi objekty na mapě. To se projeví, pokud bude na mapě více stejných objektů, ale každý bude mít rozdílné rozměry. Dále se velmi často mluví o akumulativní chybě, která značí jak moc se odhadnutý výsledek liší od správného výsledku. Tento rozdíl vzniká při výpočtu homografie, která není nikdy úplně přesná. Rozdíl



Obrázek 3.6: Dva snímky, mezi kterými byly nalezeny a vizuálně zvýrazněny obrazové příznaky pomocí SIFT algoritmu.

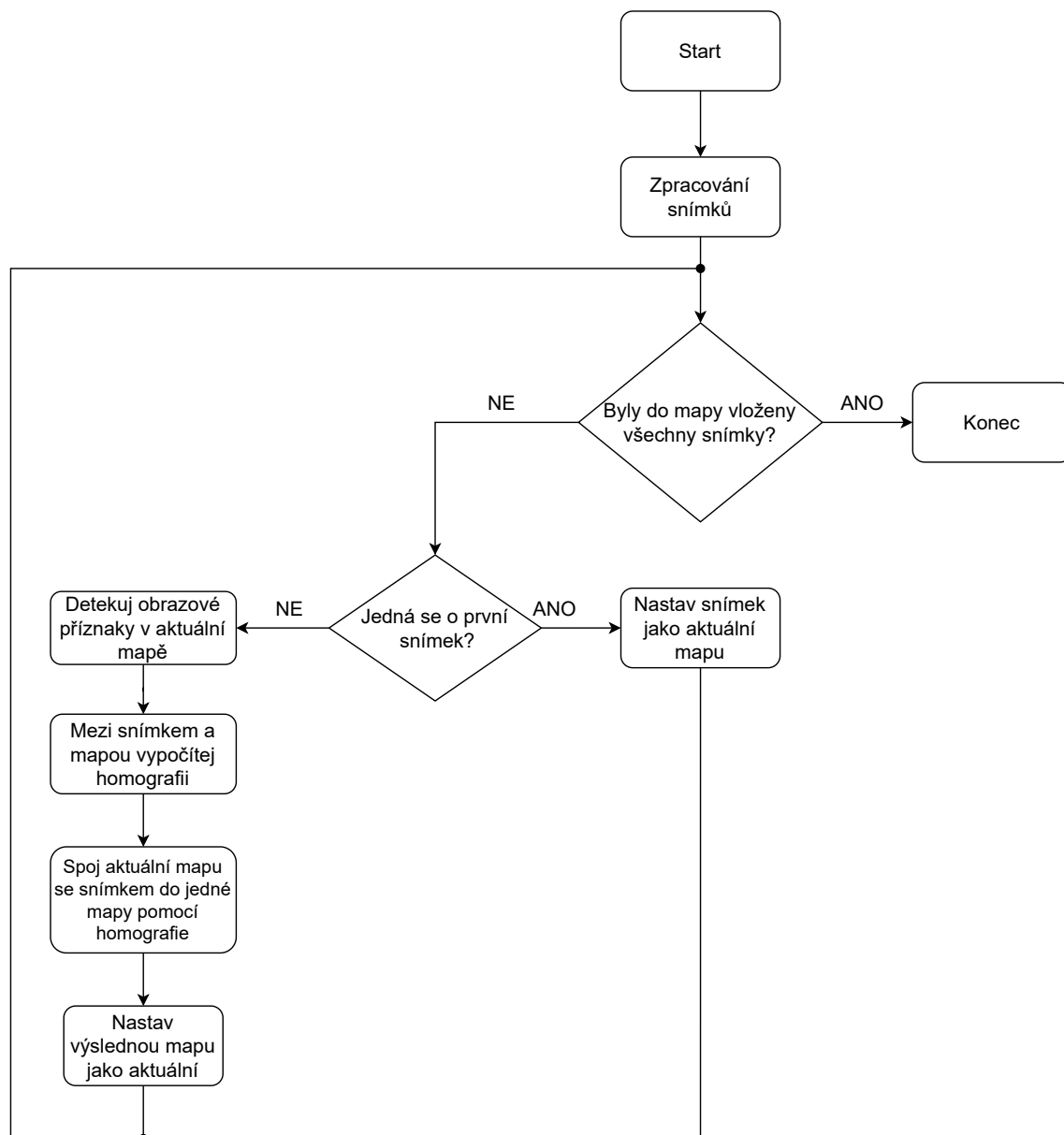
začne narůstat kvůli přidávání dalších homografií za sebou při zpracovávání dalších snímků a bez korekčního postupu se chyba znatelně projeví na výsledku. Řešení také neprovádí ortorektifikaci, a proto použité snímky pro hledání obrazových příznaků nebudou tvořit dobrou mapu kvůli obsahujícímu zkreslení.

3.5 Metoda postupného skládání mapy

Tato metoda se zaměřuje na obrazové příznaky stejně jako předchozí metoda. Na rozdíl od hledání obrazových příznaků mezi za sebou jdoucími snímky tato metoda porovnává obrazové příznaky mezi již spojenými snímky dohromady a právě zpracovávaným snímkem. Mapa je tedy postupně skládána zpracováváním dalších snímků, které se hned spojují s již zpracovanými snímky. Kvůli tomu se postup této metody bude lišit od předchozích metod, protože transformační matice se nedá předpočítat. Metoda stále počítá s uspořádáním snímků podle jejich porízení. Dekompozici metody na menší části v podobě vývojového diagramu lze vidět na obrázku 3.7.

Popis řešení

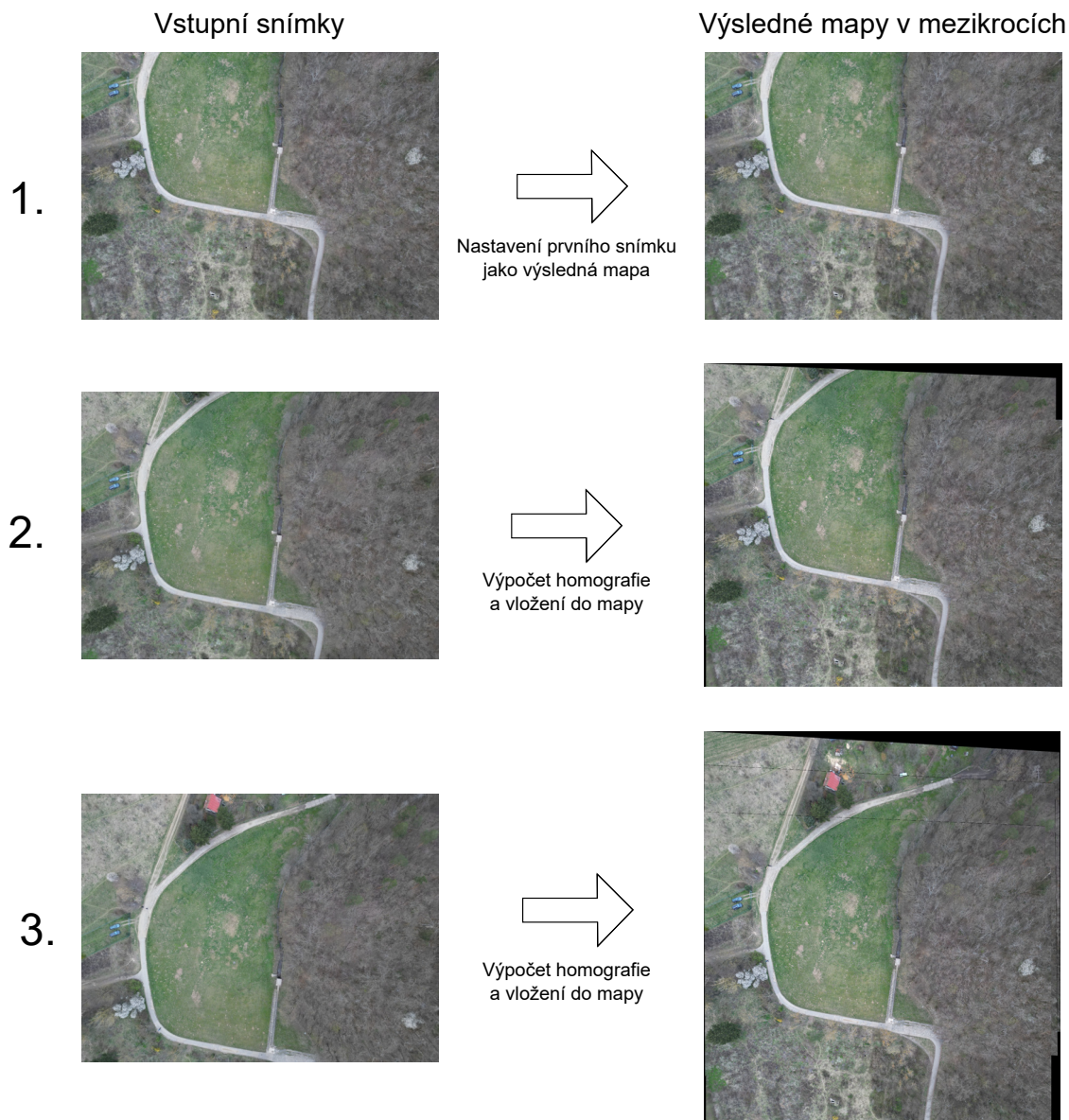
Metoda nejdříve zpracuje všechny snímky detekováním všech zájmových bodů s příslušnými příznakovými vektory, které si uloží na pozdější výpočet homografie. Po zpracování snímků se začíná tvořit mapa. První snímek se nastaví jako aktuální mapa. Vezme se další snímek, u kterého se začne počítat homografie mezi aktuální mapou. Výpočet homografie začíná detekováním všech obrazových příznaků v aktuální mapě. Nalezené příznaky se porovnají s uloženými aktuálního snímku, které se předpočítaly na začátku, a najdou se nejbližší dvojice. Na dvojice se aplikuje Lowe's ratio test a se zbylými dvojicemi se vypočítá výsledná homografie. Po výpočtu homografie se aktuálně zpracovávaný snímek spojí s aktuální mapou. Tento proces se opakuje, dokud se do výsledné mapy nevloží všechny snímky, čímž vznikne výsledná mapa. Názorný příklad použití metody postupného skládání mapy lze vidět na obrázku 3.8.



Obrázek 3.7: Vývojový diagram metody postupného skládání mapy pomocí obrazových příznaků.

Rizika metody

Metoda bude sdílet stejná rizika s předchozí metodou, protože obě používají homografii k spojení snímků. Stejnými riziky je myšleno zkreslení v měřítku a změně vzdáleností mezi objekty na mapě, akumulativní chyba způsobena počítáním homografie a posledním rizikem použití neortorektifikovaných vstupních snímků. Metoda přináší další riziko při výpočtu homografie, kdy s přibývajícími snímky se začínají detekovat postupně více obrazových příznaků. S přibývajícím počtem se můžou nějaké obrazové příznaky mezi sebou podobat a vnést do výpočtu homografie nesmyslná data. Dalším problémem je detekování obrazových příznaků v celkové mapě, protože jednotlivé snímky jsou transformací deformovány do



Obrázek 3.8: Názorný příklad zpracovávání tři snímků metodou postupného skládání mapy. První snímek se nastaví jako výsledná mapa a další se již vkládají do mapy s výpočtem homografie podle aktuální mapy.

roviny prvního snímku. To může vést k nedostačujícímu počtu dobrých dvojic pro výpočet homografie mezi snímky.

Kapitola 4

Realizace

Následující kapitola se bude zabývat realizací navržených metod z kapitoly 3. Kromě návrhu také popisuje jaké nástroje byly použité, jaké datové sady jsou potřeba a výsledné experimentování s navrženými metodami.

4.1 Architektura skriptu

Celé řešení je rozdělené na několik modulů, ve kterých jsou uloženy logické části navržených metod a třídy. Řešení je realizováno pomocí knihovny OpenCV¹, Numpy² a Exif³ v programovacím jazyce python. Skript se spouští přes hlavní tělo `stitchImages`. Ten za použití vstupních argumentů řídí celý proces vytváření mapy. Pomocí modulu `imagesList` plní list snímky zpracovány pomocí vybrané navržené metody, podle které se dále zpracované snímky spojují do mapy pomocí modulu `stitcher` nebo `stitcherFtcS`.

Modul `imagesList` obsahuje třídy s listem, který bude naplněn podle zvolené metody spojování snímků. V případě metody používající polohovací metadata se list naplní pomocí modulu `ImageDataGpsTransform`. V případě metody obrazových příznaků mezi snímky se list naplní pomocí modulu `ImageDataFeatureTransform` a při metodě postupného skládání mapy pomocí obrazových příznaků se list naplní pomocí modulu `ImageDataContinuousFeatureTransform`. Všechny vyjmenované moduly obsahují třídy, které zpracovávají snímky podle návrhu konkrétní metody.

¹<https://opencv.org/>

²<https://numpy.org/doc/>

³<https://pypi.org/project/exif/>

4.2 Klíčové funkce metody polohovacích metadat

Metoda zjišťuje vzdálenost v x -ové a y -ové ose, kterou dron urazil mezi pořízením prvního a n -tého snímku. Názorný postup k výpočtu posunu mezi snímky lze vidět v podobě pseudokódu v algoritmu 1.

Algoritmus 1: Získání posunu pomocí polohovacích metadat

```
1:  $sirkaRef \leftarrow$  zeměpisnou šířku referenčního snímku
2:  $delkaRef \leftarrow$  zeměpisnou délku referenčního snímku
3:  $sirkaAkt \leftarrow$  zeměpisnou šířku aktuálního snímku
4:  $delkaAkt \leftarrow$  zeměpisnou délku aktuálního snímku
5:  $GSD \leftarrow$  vypočítaná hodnota GSD podle referenčního snímku

6:  $bodA \leftarrow (sirkaRef, delkaRef)$ 
7:  $bodB \leftarrow (sirkaRef, delkaAkt)$ 
8:  $bodD \leftarrow (sirkaAkt, delkaRef)$ 

9:  $AB \leftarrow$  vzdálenost mezi bodem  $bodA$  a  $bodB$ 
10:  $AD \leftarrow$  vzdálenost mezi bodem  $bodA$  a  $bodD$ 

11: if  $delkaAkt < delkaRef$  then
12:    $AB \leftarrow -AB$ 
13: end if
14: if  $sirkaAkt < sirkaRef$  then
15:    $AD \leftarrow -AD$ 
16: end if

17:  $rotAB \leftarrow$  nová  $x$ -ová souřadnice po rotaci souřadného systému kolem středu
18:  $rotAD \leftarrow$  nová  $y$ -ová souřadnice po rotaci souřadného systému kolem středu

19:  $posunX \leftarrow$  vynásobením  $rotAB$  s  $GSD$ 
20:  $posunY \leftarrow$  vynásobením  $rotAD$  s  $GSD$ 
```

Nejdříve se vytvoří tři body. První bod má souřadnice referenčního snímku. Druhý bod má stejnou zeměpisnou délku jako referenční snímek, ale zeměpisnou šířku má totožnou se zpracovávaným snímkem. Třetí bod je také kombinací, ale používá zeměpisnou délku zpracovávaného snímku a zeměpisnou šířku referenčního snímku. Spočítá se vzdálenost od prvního ke druhému bodu a od prvního ke třetímu bodu. K tomu je použit Haversinův vzorec. Získané vzdálenosti budou vždycky kladné, a proto se musí upravit podle toho, jak jsou souřadnice vůči sobě napolohované. To je vyřešeno porovnáváním zeměpisných souřadnic referenčního snímku se zpracovávaným snímkem. Vypočítané vzdálenosti jsou potom souřadnicemi, pokud je počátkem souřadnic referenční snímek. Posledním krokem je zjistit nové souřadnice po orotování soustavy souřadnic kolem středu do natočení referenčního snímku, aby byly známy posuny v x -ové a y -ové ose.

Třída na zpracování snímků v metodě polohovacích metadat

Třída na zpracování metadat snímků počítá a ukládá výstup procesu navrhnutého řešení s využitím metadat ve snímcích. Obsahuje maticové zastoupení snímku, jeho příslušnou

transformační matici a deformované rohy transformační maticí. Snímky jsou potom připraveny, aby byly transformovány a správně uloženy na výslednou mapu.

4.3 Klíčové funkce metody obrazových příznaků mezi snímky

Cílem této metody je najít transformaci mezi dvěma snímky, která namapuje body prvního snímku do roviny druhého snímku. Snímky se zpracovávají jeden po druhém a transformace se hledá vždycky mezi zpracovávaným a předchozím snímek. Nejdříve metoda pomocí funkce detekuje a uloží obrazové příznaky aktuálního snímku, které následně používá ve funkci pro výpočet homografie. Funkce na detekci obrazových příznaků lze vidět v podobě pseudokódu v algoritmu 2 a funkce na výpočet homografie lze vidět v podobě pseudokódu v algoritmu 3.

Algoritmus 2: Funkce pro detekci obrazových příznaků

Output: *zajmBodyAkt, prizVektoryAkt*

- 1: *zajmBodyAkt, prizVektoryAkt* $\leftarrow$ detekované zájmové body a příznakové vektory
 - 2: **return** *zajmBodyAkt, prizVektoryAkt*
-

Algoritmus 3: Funkce pro výpočet homografie

Input: *predchoziSnimek, zajmBodyAkt, prizVektoryAkt*

Output: *H*

- 1: *zajmBodyPred* $\leftarrow$ nalezené zájmové body z *predchoziSnimek*
 - 2: *prizVektoryPred* $\leftarrow$ nalezené příznakové vektory z *predchoziSnimek*
 - 3: *matches* $\leftarrow$ nejpodobnější dvojice mezi *prizVektoryAkt* a *prizVektoryPred*
 - 4: *goodMatches* $\leftarrow$ aplikování Lowe's ratio test na *matches*
 - 5: *dstBody* $\leftarrow$ *zajmBodyPred* patřící do *goodMatches*
 - 6: *srcBody* $\leftarrow$ *zajmBodyAkt* patřící do *goodMatches*
 - 7: *H* $\leftarrow$ vypočítanou pomocí *dstBody* a *srcBody*
 - 8: **return** *H*
-

Ve zpracovávaném snímku se detekují umístění zájmových bodů a také jejich příslušné příznakové vektory pomocí SIFT algoritmu. Nalezené příznakové vektory jsou dále porovnávány s příznaky z předchozího snímku k nalezení nejpodobnějších dvojic pomocí knihovny FLANN. Na nalezené nejpodobnější dvojice příznakových vektorů se dále aplikuje Lowe's ratio test. Zbylé dvojice, které po testu nebyly vyřazeny, se použijí při výpočtu homografie s využitím iterativní metody RANSAC v rámci knihovny OpenCV. Nakonec se transformační matice aktuálního snímku spočítá vynásobením transformační matice předchozího snímku s nalezenou homografií.

Třída na zpracování snímků v metodě obrazových příznaků mezi snímky

Třída na zpracování snímků pomocí obrazových příznaků vypočítá a uloží výstup procesu navrhnutého řešení, které využívá obrazové příznaky. Ukládá o každém snímku jeho mati-

ové zastoupení, detekované obrazové příznaky, transformační matici a deformované rohy transformační maticí. Po zpracování všech snímků jsou data připravena k použití v modulu `stitcher`, kde se ze všech snímků poskládá výsledná mapa.

4.4 Klíčové funkce metody postupného skládání mapy

Metoda používá pro výpočet transformační matice u každého snímku homografii stejně jako tomu je u metody obrazových příznaků mezi snímky. Také podobně zpracovává snímky, u kterých pouze předpočítá obrazové příznaky, a transformační matice se začnou počítat až při spojování mapy. Část funkce, kterou metoda používá pro počítání transformační matice a skládání snímků do mapy, lze vidět v podobě pseudokodu v algoritmu 4.

Algoritmus 4: Část funkce pro postupné skládání mapy.

```
1: imgList  $\leftarrow$  zpracované snímky
2: imgCount  $\leftarrow$  počet snímků v imgList
3: resultMap  $\leftarrow$  první snímek imgList[0]
4: for i in (imgCount - 1) do
5:   imgData  $\leftarrow$  imgList[i + 1]
6:   zajmBodyMapy, prizVektoryMapy  $\leftarrow$  detekování zájmových bodů
     a příznakových vektorů z resultMap
7:   matches  $\leftarrow$  nejpodobnější dvojice mezi příznakovými vektory z imgData
     a prizVektoryMapy
8:   goodMatches  $\leftarrow$  aplikování Lowe's ratio test na matches
9:   dstBody  $\leftarrow$  zajmBodyMapy patřící do goodMatches
10:  srcBody  $\leftarrow$  zájmové body z imgData patřící do goodMatches
11:  H  $\leftarrow$  vypočítanou pomocí dstBody a srcBody
12:  resultMap  $\leftarrow$  mapa po přidání aktuálního snímku pomocí H do
     resultMap
13: end for
```

První snímek se nezpracovává a rovnou se nastaví jako výsledná mapa. U dalších snímků se již počítá homografie. První se naleznou obrazové příznaky v aktuální výsledné mapě pomocí algoritmu SIFT. Nalezené příznakové vektory se porovnají s příznakovými vektory aktuálního snímku za použití knihovny FLANN. Výsledkem budou nejpodobnější dvojice, na které se dále aplikuje Lowe's ratio test. Zbylé dvojice se použijí na výpočet homografie pomocí iterativní metody RANSAC v rámci knihovny OpenCV. Výsledná homografie se použije pro spojení snímku s aktuální mapou pro vytvoření nové aktuální mapy.

Třída na zpracování snímků v metodě postupného skládání mapy

Třída u metody postupného skládání mapy ukládá u zpracovaných snímků jejich maticové zastoupení s nalezenými obrazovými příznaky. Ty se potom používají na výpočet homografie při postupném vytváření mapy.

4.5 Datové sady

Datová sada potřebná pro vyhodnocení navržených metod bude v podobě složky, ve které se budou nacházet snímky pořízené dronem. Popis a postup pořizování leteckých snímků pomocí dronu je popsán v podkapitole 2.2. Každý snímek obsahuje metadata o své poloze, ve které se dron nacházel při pořízení a také natočení dronu. U snímků bude určitý překryv.

Použité sady

Datové sady používané při experimentech jsou pořízené pomocí dronu DJI mini 3 Pro⁴. Při testování se použily 3 sady. Dron při každém snímku zastavil, aby pořídil snímky s určitým překrytím. Při pořizování nebylo použito žádné přiblížení a kamera mířila kolmo dolů. Všechny snímky mají stejnou velikost 4032 na 3024 pixelů. Jednotlivé informace o použitých sadách jsou uvedeny v seznamu:

1. První datová sada zachycuje zimní přírodní oblast psí louky s okrajem lesa z výšky 80 metrů. Povrch zachycené oblasti začne už ze začátku mírně klesat dokud dron neletí zpět. V oblasti se vyskytují vysoké stromy a na jednom místě lze na kraji snímku vidět panelový dům. Povětrnostní podmínky byly ideální. Datová sada obsahuje 17 snímků. Všechny snímky mají stejný směr, protože se dron při vracení neotáčel.
2. Druhá datová sada zachycuje jarní přírodní oblast kolem zahrádkářské osady z výšky 119 metrů. Povrch zachycené oblasti je spíše rovný. V oblasti se vyskytují nízké chatové objekty a sloupy vysokého napětí spolu s kabely. Povětrnostní podmínky byly ideální. Při zpětném vracení se dron ke konci vychýlil ze své dráhy. Datová sada obsahuje 41 snímků.
3. Třetí datová sada zachycuje stejnou oblast jako první ve výšce 80 metrů, ale tentokrát na jaře. Povrch zachycené oblasti také mírně klesá. Na snímcích se vyskytují vysoké stromy a panelové domy. Povětrnostní podmínky byly ideální. Datová sada obsahuje 92 snímků.

4.6 Experimenty

Cílem experimentování bude zjistit rychlost výpočtu transformačních matic a celkovou kvalitu mapy s návazností jednotlivých snímků jeden na druhý. Každá datová sada se bude používat pro všechny tři metody. U metod používající obrazové příznaky může nastat situace, kdy se mapa ze všech snímků vytvořit nepovede. V takovém případě se neúspěch zaznamená a vytvoří se mapa ze stejného datového setu pouze po snímek, po který se mapu podaří vytvořit. Dále se u obou metod bude srovnávat návaznost jednotlivých snímků, která se nejlépe pozoruje u silnic, chodníků nebo u pěší cesty.

Všechny snímky jsou zmenšeny na 25% jejich původní velikosti při experimentech. Výsledné mapy vytvořené při experimentech lze najít v příloze A.

⁴<https://store.dji.com/cz/product/dji-mini-3-pro>

Výsledky experimentů na datových sadách

Metoda	Datová sada	Počet použitých snímků	Průměrná doba výpočtu transformační matice (s)
Polohovacích metadat	Sada 1	17/17	0,025
	Sada 2	41/41	0,019
	Sada 3	92/92	0,022
Obrazových příznaků mezi snímky	Sada 1	17/17	1,946
	Sada 2	41/41	0,368
	Sada 3	92/92	Neúspěšné
		49/92	1,144
Postupného skládání	Sada 1	17/17	3,544
	Sada 2	41/41	1,8
	Sada 3	92/92	Neúspěšné
		24/92	2,512

Tabulka 4.1: Tabulka popisující experimenty na datových sadách.

Výsledek experimentů u metody polohovacích metadat

Při porovnání výsledků průměrné doby času zpracování transformačních matic z tabulky 4.1 tato metoda podle očekávání dosahuje nejlepšího výsledku. Metoda nemusí detekovat žádné zájmové body ve snímcích a pouze počítá posun a rotaci z polohovacích metadat.

Při zaměření na přechody mezi snímky lze vidět špatné umístění určitých objektů jako na obrázku 4.1a a nesrovnalosti mezi přechody snímků viditelné na obrázku 4.1b. Špatně umístěné objekty nejsou na povrchu země, ale ve výšce, a proto se na každém snímku podle perspektivy zobrazují jinak. Tento problém se dal očekávat, protože se u vstupních snímků nepoužívá ortorektifikace, která by tento problém vyřešila. Nenavazující cesty jsou posunuté až o několik desítek pixelů nejčastěji v celém sloupci jednoho směru focení dronu. Při porovnání výsledků první sady s výsledky druhé a třetí sady lze říct, že cesty navazují mnohem lépe u první sady, kdy jsou všechny snímky stejně orientované. Bude se jednat o implementační chybu při vkládání snímků do mapy. Další nesrovnalosti mezi přechody snímků jsou zapříčiněné nepřesností GPS zmíněnou v podkapitole 3.3.



(a) Výstřižek z mapy A.7, na kterém lze vidět více výskytů jednoho objektů u metody polohovacích nenávaznost cest u metody polohovacích metadat.
 (b) Výstřižek z mapy A.4, na kterém lze vidět výskytů jednoho objektů u metody polohovacích metadat.

Obrázek 4.1: Ukázka dvou výstřižků z map generovaných pomocí metody polohovacích metadat.

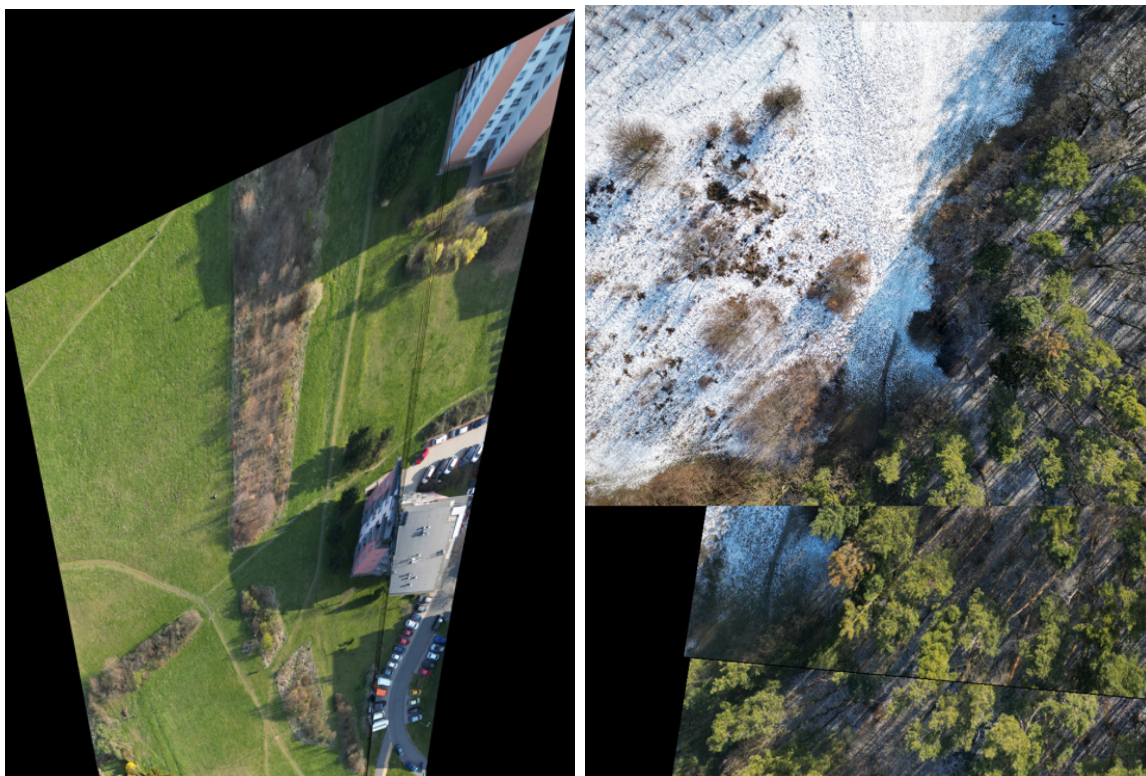
Ve srovnání s dalšími dvěma metodami není metoda polohovacích metadat na ničem závislá při vytváření transformačních matic, a proto uspěla při vytváření mapy u všech datových sad.

Výsledek experimentů u metody obrazových příznaků mezi snímky

Průměrný čas metody na vytvoření transformační matice je delší kvůli detekci obrazových příznaků, hledání nejpodobnějších dvojic a následné počítání homografie.

Mapy vytvořené pomocí metody obrazových příznaků mezi snímky vykazují postupné zvětšování a deformace snímku viditelné na obrázku 4.2a. Jedná se o problém výběru špatného referenčního snímku, podle kterého by se měly počítat homografie dalších snímků. Metoda používající obrazové příznaky počítá homografii mezi snímky jeden po druhém tak, jak jsou uspořádané v datovém setu. Homografie se potom počítá podle individuálního pohledu každého snímku, a to přináší chyby v podobě zvětšování a deformace snímků [6]. Řešením je vytvářet mapu postupně nabalováním jednotlivých snímků na sebe a počítat homografii mezi aktuální podobou mapy a právě zpracovávaným snímkem názorně ukázané na obrázku 4.2b. To by vyřešilo i nenávaznost snímků, které za sebou nenásledují. Dále třetí experiment neproběhl na všech snímcích, protože v některých případech metoda nenajde dostatečný počet dvojic mezi snímky.

Stejně jako u metody polohovacích metadat se i u této objevují špatně umístěné objekty, které nejsou na povrchu země, kvůli neortorektifikaci vstupních snímků.



(a) Výstřižek z mapy A.8, na kterém lze vidět zvětšování a deformace snímku u metody obrazových příznaků mezi snímky. (b) Výstřižek z mapy A.2, na kterém lze vidět jak první a poslední snímek nesedí a také jde vidět dvakrát jedna cesta.

Obrázek 4.2: Ukázka dvou výstřižků z map generovaných pomocí metody obrazových příznaků mezi snímky.

U metody si lze všimnout zlepšení oproti metodě polohovacích metadat v návaznosti jednotlivých snímků za sebou.

Výsledek experimentů u metody postupného skládání mapy

Metoda postupného skládání mapy je podle očekávání nejpomalejší metodou, protože postupně prohledává větší mapu.

Mapy generované experimentováním stále projevují zvětšování a deformace snímku, ale už v menší míře. Cesty na mapě už navazují lépe, avšak ne všechny. Příkladem je obrázek 4.3.

U metody se projevuje problém podobných obrazových příznaků nalezených na celé mapě. To zapříčiní, že se do výpočtu homografie dostanou dvojice, které by tam být neměly, a výsledná homografie je potom chybná. Tento problém jde vidět na mapě A.9, u které neproběhl experiment se všemi snímky. Řešením by bylo omezit oblast pro detekci obrazových příznaků pouze na oblasti, kterou lze najít na přidávaném snímku.

Metoda také trpí na špatné umístování objektů nad povrchem země kvůli absenci ortorektifikace vstupních snímků.



Obrázek 4.3: Výstřižek z mapy A.5, na kterém lze vidět nenávaznost cest u metody postupného skládání.

Výsledné mapy vytvořené metodou postupného skládání jsou nejpřehlednější a neprojevují se na nich nedostatky metody obrazových příznaků, jako návaznost mezi všemi snímky. Tato metoda také zlepšuje problém s deformací a zvětšováním snímků.

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce je vytvořit mapu oblasti, která byla zmapována za pomoci bezpilotního letadla. Při dekompozici problému se řešení rozdělilo na zpracování pořízených snímků, výpočet transformační matice u každého snímku a spojení do výsledné mapy. Práce experimentuje se dvěma základními postupy řešení úlohy, z nichž každá má své výhody i nevýhody. První postup je postavený na základě polohovacích metadat a druhý postup vytváří mapu na základě analýzy obrazu. Podle základních postupů byly navrženy tři metody, nad kterými byly provedeny experimenty. K experimentování se použily vlastní datové sady zachycující zejména přírodní oblasti s výskytem vyšších objektů.

První metoda používá polohovací metadata. Výsledné mapy jsou na základě polohy rychle vyhodnoceny, a proto jsou vhodné jako první vizualizace zachyceného povrchu před zhotovením přesnějších map. Na druhou stranu použití pouze polohovacích metadat zapříčiní nepřesnost, kvůli které je potom tato metoda nevhodným zastoupením zachyceného povrchu.

Základem druhé i třetí metody je analýza obrazu, která podle očekávání má dopad na dobu vyhodnocení map u obou metod. Druhá metoda detekuje obrazové příznaky pouze mezi dvěma snímky tak, jak jsou seřazené na vstupu. Jednotlivé snímky v mapách na výstupu druhé metody dobře navazují za sebou a celkově vytváří reprezentaci povrchu vhodnější než mapy tvořené metodou polohovacích metadat. Zároveň se u map projevuje zvětšování spolu s deformací snímků a závislost metody na nalezení dostatečného počtu vhodných dvojic obrazových příznaků mezi snímky.

Třetí metoda detekuje příznaky mezi snímkem a aktuální mapou, kterou postupně rozšiřuje s přibývajícimi snímky. Díky tomu jsou vytvořené mapy nejvhodnější reprezentací, protože oproti mapám generovanými pomocí druhé metody navazují i takové snímky, které nejsou na vstupu bezprostředně za sebou. Nevýhodou metody je častější výskyt nevhodně napárovaných dvojic kvůli detekování obrazových příznaků na větší ploše.

Možným rozšířením této práce by byla ortorektifikace vstupních snímků, která by zabránila špatnému vyobrazení objektů nacházejících se nad povrchem země.

Literatura

- [1] Feature Detection and Description. *OpenCV* [online]. [cit. 3. května 2023]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/dc/dc3/tutorial_py_matcher.html.
- [2] Introduction to ortho mapping. *Pro.arcgis.com* [online]. 11. listopadu 2021 [cit. 28. dubna 2023]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/help/data/imagery/introduction-to-ortho-mapping.htm>.
- [3] What is the difference between orthophotos, orthophotomaps, orthomosaics and true orthophotos? *Geoawesomeness* [online]. 24. května 2022 [cit. 28. dubna 2023]. Dostupné z: <https://geoawesomeness.com/eo-hub/what-is-the-difference-between-orthophotos-orthophotomaps-orthomosaics-and-true-orthophotos/>.
- [4] Haversine formula. *Wikipedia* [online]. Wikimedia Foundation, 12. května 2023 [cit. 3. května 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula.
- [5] ABDUL RAHMAN, A. S. B., IZHAR, L. I., SEBASTIAN, P. a ROHMAH, R. N. Multispectral Image Analysis for Crop Health Monitoring System. In: *2022 IEEE 5th International Symposium in Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*. 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/ROMA55875.2022.9915668.
- [6] BELLAVIA, F. a COLOMBO, C. Estimating the Best Reference Homography for Planar Mosaics From Videos. In: *Březen 2015*, sv. 3. DOI: 10.5220/0005297305120519.
- [7] COSTA, H., SPROUT, E., TENG, S., MCDANIEL, M., HUNT, J. et al. GPS. *Education* [online]. 19. prosince 2022 [cit. 2. května 2023]. Dostupné z: <https://education.nationalgeographic.org/resource/gps/>.
- [8] DOGGETT, S. What is an orthomosaic? Orthomosaic Maps & Orthophotos explained. *Dronegenuity* [online]. [cit. 28. dubna 2023]. Dostupné z: <https://www.dronegenuity.com/orthomosaic-maps-explained/>.
- [9] GÜNAY, A., AREFI, H. a HAHN, M. True Orthophoto production using Lidar data. Leden 2007. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228719772_True_Orthophoto_production_using_Lidar_data.
- [10] JEDLIČKA, J. a POTUCKOVA, M. CORRECTION OF RADIAL DISTORTION IN DIGITAL IMAGES. Leden 2007. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/255610429_CORRECTION_OF_RADIAL_DISTORTION_IN_DIGITAL_IMAGES.
- [11] KUMAR, S. a MOORE, K. The Evolution of Global Positioning System (GPS) Technology. *Journal of Science Education and Technology*. Březen 2002, sv. 11, s. 59–80. DOI: 10.1023/A:1013999415003.

- [12] LOWE, D. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. Listopad 2004, sv. 60, s. 91–. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- [13] LOWE, D. Object recognition from local scale-invariant features. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. 1999, sv. 2, s. 1150–1157 vol.2. DOI: 10.1109/ICCV.1999.790410.
- [14] REMONDINO, F. a FRASER, C. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *Ine. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* Listopad 2005, sv. 36. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228672107_Digital_camera_calibration_methods_Considerations_and_comparisons.
- [15] ROTH, L., HUND, A. a AASEN, H. PhenoFly Planning Tool: Flight planning for high-resolution optical remote sensing with unmanned areal systems. *Plant Methods*. Prosinec 2018, sv. 14. DOI: 10.1186/s13007-018-0376-6.
- [16] SONKA, M., HLAVAC, V. a BOYLE, R. *Image processing, analysis, and Machine Vision*. Cengage Learning, 2015. ISBN 1133593607.
- [17] TECHNIQUES, S. *Translation and rotation of axes calculator, definition, formula-[scholar techniques]*. Blogger, 21. prosince 2022. Dostupné z: <https://www.math-scholar.com/2022/12/translation-and-rotation-of-axes.html>.
- [18] WHITEHEAD, K. a HUGENHOLTZ, C. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. Září 2014, sv. 02, s. 69–85. DOI: 10.1139/juvs-2014-0006.
- [19] ZHOU, G., CHEN, W., KELMELIS, J. a ZHANG, D. A comprehensive study on urban true orthorectification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005, sv. 43, č. 9, s. 2138–2147. DOI: 10.1109/TGRS.2005.848417.
- [20] ZHOU, Q. Digital Elevation Model and Digital Surface Model. In:.. Březen 2017. DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg0768.

Příloha A

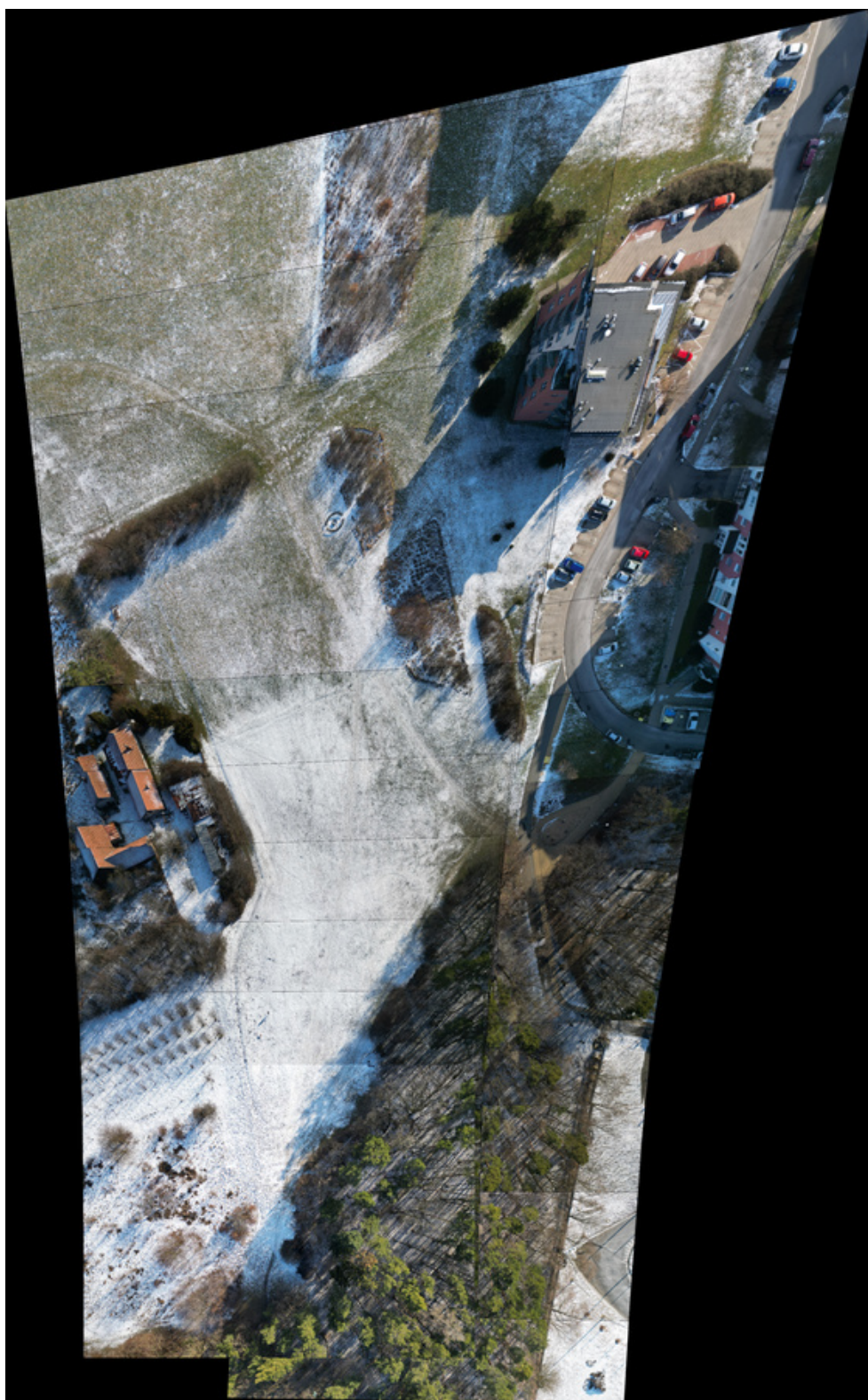
Vytvořené mapy při experimentování



Obrázek A.1: Vytvořená mapa s využitím polohovacích metadat ze snímků první datové sady



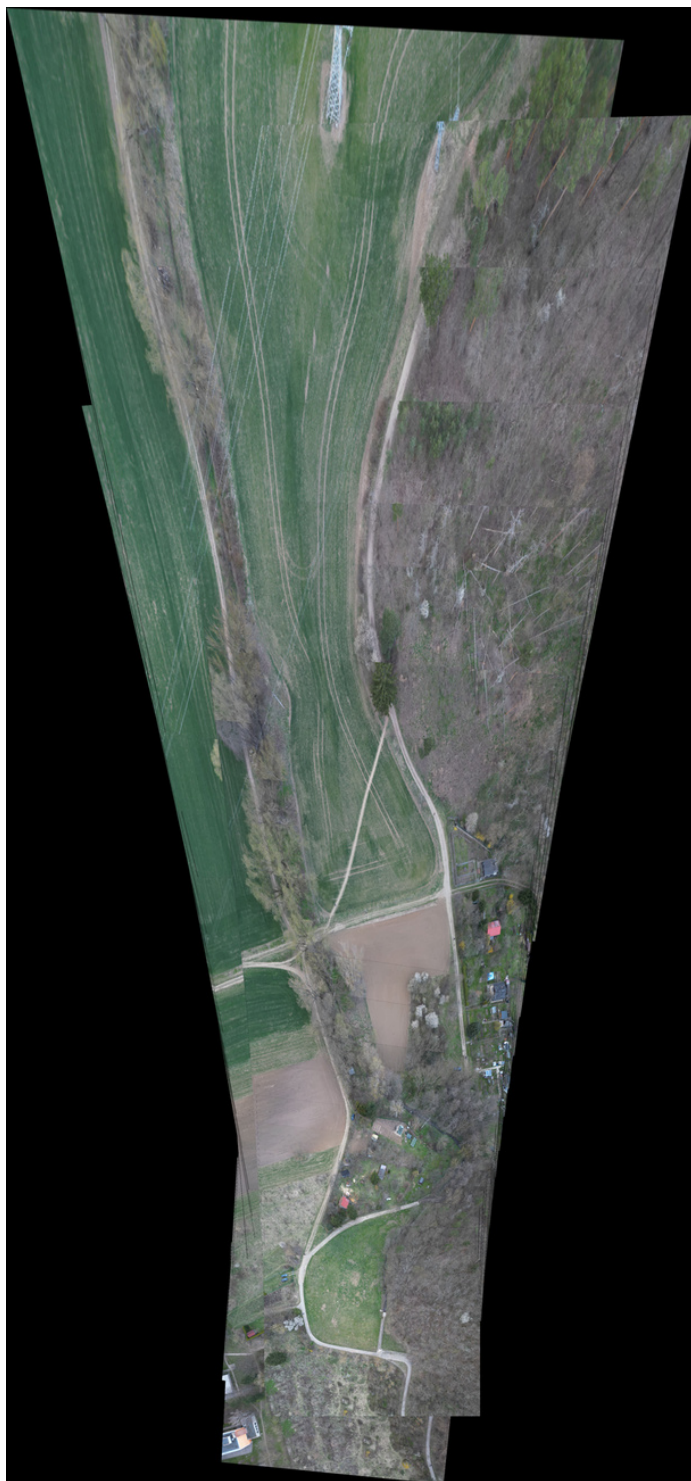
Obrázek A.2: Vytvořená mapa s využitím obrazových příznaků ze snímků první datové sady



Obrázek A.3: Vytvořená mapa s využitím postupného skládání ze snímků první datové sady



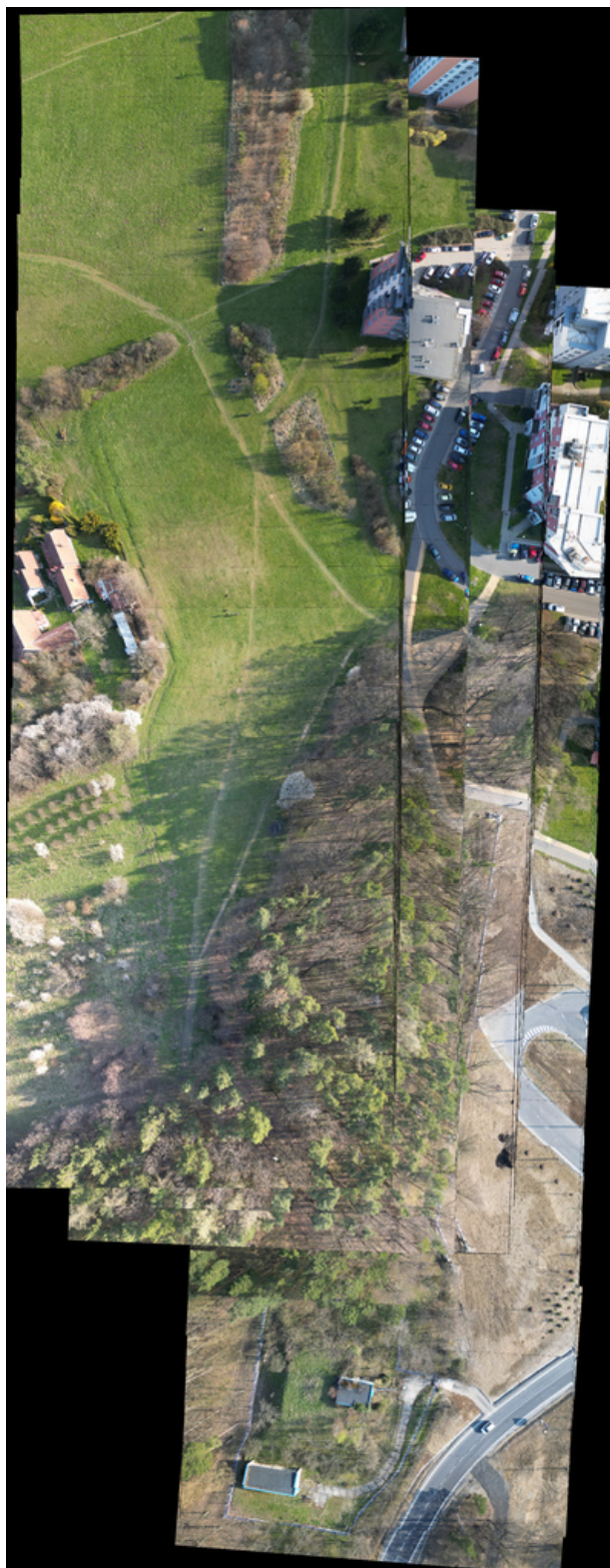
Obrázek A.4: Vytvořená mapa s využitím polohovacích metadat ze snímků druhé datové sady



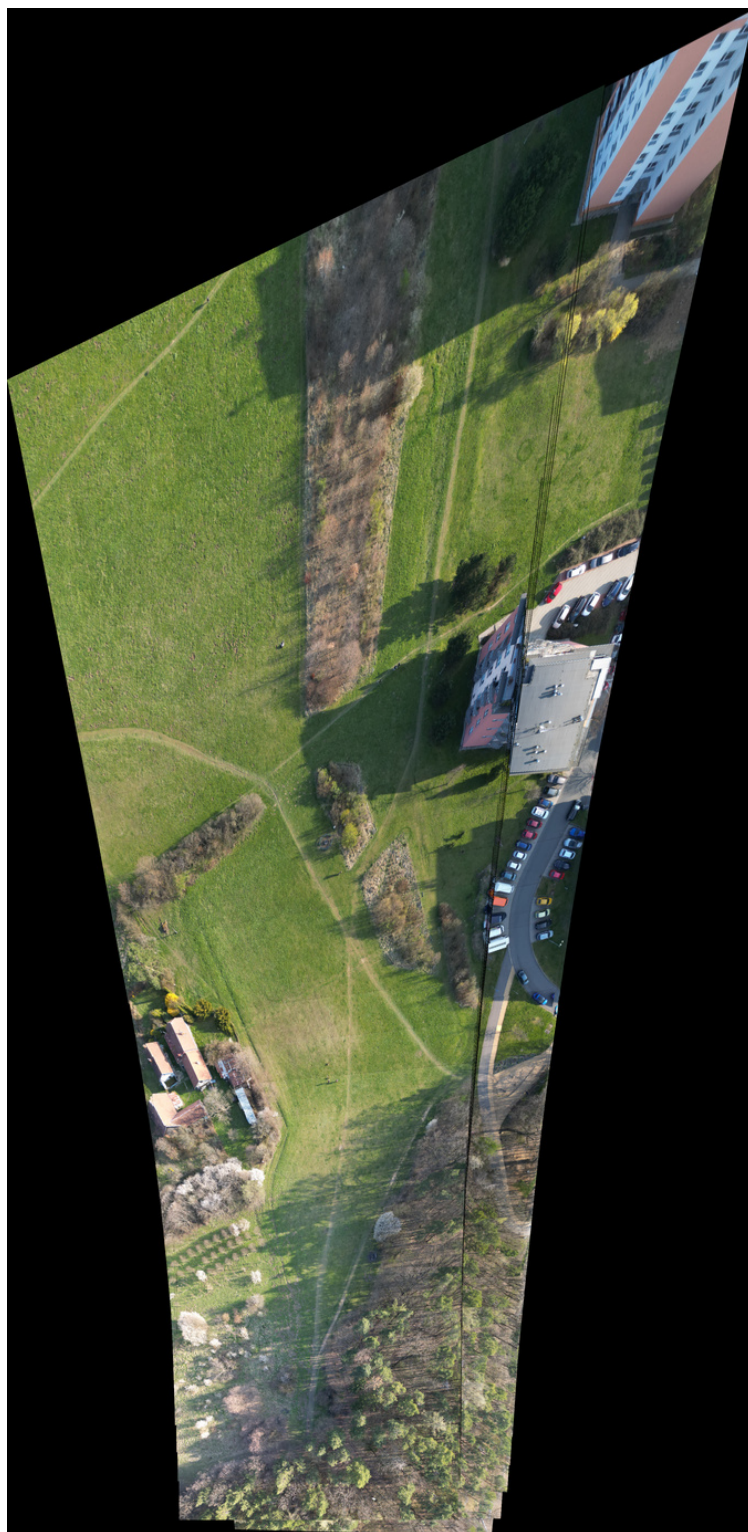
Obrázek A.5: Vytvořená mapa s využitím obrazových příznaků ze snímků druhé datové sady



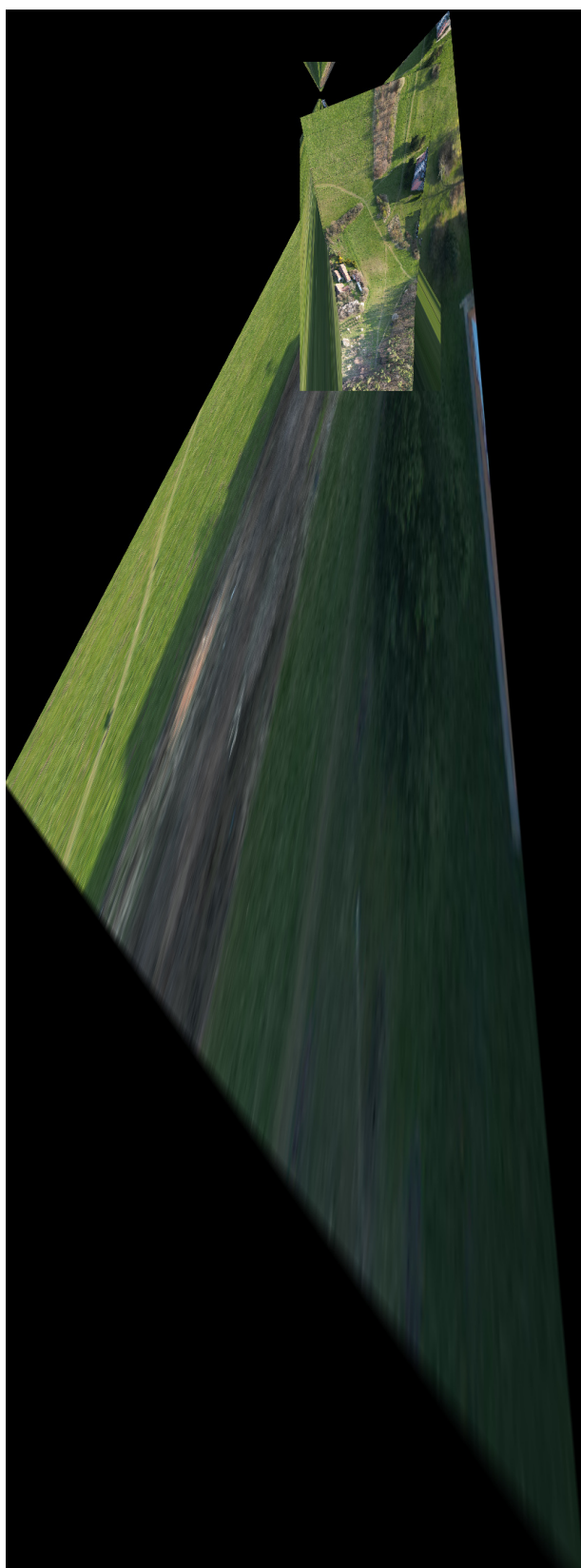
Obrázek A.6: Vytvořená mapa s využitím postupného skládání ze snímků druhé datové sady



Obrázek A.7: Vytvořená mapa s využitím polohovacích metadat ze snímků třetí datové sady



Obrázek A.8: Vytvořená mapa s využitím obrazových příznaků ze snímků třetí datové sady



Obrázek A.9: Vytvořená mapa s využitím postupného skládání ze snímků třetí datové sady