

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**STANOVENÍ OPTIMÁLNÍHO POSTUPU PRO
POUŽITÍ VIDEO JAKO ZDROJE DAT PRO
FOTOGRAMMETRII**

Diplomová práce

Bc. David MOTLÍČEK

Vedoucí práce RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2024

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá analýzou základních požadavků na použití videa jako zdroje dat pro fotogrammetrii. Z nastavení videa je zkoumána optimální snímková frekvence ve vztahu k překryvům a rychlosti pohybu kamery. Bylo provedeno testování formou experimentu na třech případových studiích, během kterých bylo dbáno na zachování stejných podmínek během testování. První případová studie byla vypracována v oblasti fyzickogeografické za pomoci dronu. Objektem zájmu byla kaple v poli, nad ní byl proveden snímkový let a výstupem byla výsledná ortomozaika. Druhá případová studie spočívala v pořízení videozáznamu objektu malého rozměru na kameru a výsledným výstupem byl 3D model. Ve třetí případové studii byla natočena část budovy za účelem tvorby modelu. Pořízené videozáznamy byly zpracovány v programu Agisoft Metashape Professional a výsledky porovnány mezi sebou.

Z testování vyplynulo, že rozlišení videa zásadně ovlivňuje vzhled finálního modelu nebo ortomozaiky. Ve většině případů je dostačující snímková frekvence 25 FPS, vyšší frekvence má spíše negativní vliv. Mají smysl jen při použití odpovídající rychlosti pohybu.

Hlavním výstupem je stanovení optimálního postupu při použití videa. Dále také doporučené nastavení pro zpracování dat ve výše zmíněném programu. Dalším výstupem je vytvořená kalkulačka v programu Microsoft Excel stažitelná z webových stránek práce, která slouží k výpočtům překryvů, nastavení videa a plánu letu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotogrammetrie; videogrammetrie; rozlišení; FPS

Počet stran práce: 51

Počet příloh: 7 (z toho 1 volná a 2 elektronické)

ANOTATION

The thesis deals with the analysis of the basic requirements for the use of video as a data source for photogrammetry. From the video setup, the optimal frame rate is investigated in relation to overlays and camera movement speed. Testing in the form of an experiment on three case studies was carried out, taking care to maintain the same conditions during testing. The first case study was developed in the physical-geographical domain using a drone. The object of interest was a chapel in a field, an image flight was performed over it and the output was the resulting orthomosaic. The second case study consisted of taking video footage of a small-scale object with a camera and the resulting output was a 3D model. In the third case study, a portion of the building was filmed to create the model. The captured video footage was processed in Agisoft Metashape Professional and the results were compared with each other.

The testing showed that the resolution of the video significantly affects the appearance of the final model or orthomosaic. In most cases a frame rate of 25 FPS is sufficient, higher frame rates have a rather negative effect. They are only meaningful when using appropriate motion speeds.

The main output is the determination of the optimum procedure when using video. Also the recommended settings for data processing in the above mentioned program. Another output is a Microsoft Excel spreadsheet downloadable from the thesis website, which is used to calculate overlays, video settings and flight plan.

KEYWORDS

Photogrammetry; videogrammetry; resolution; FPS

Number of pages: 51

Number of appendixes:

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne 5.5. 2024

David Motlíček

Rád bych poděkoval vedoucímu práce RNDr. Jakubovi Miřijovskému, Ph.D. za připomínky, cenné rady a čas, který mi během vypracování práce byl ochoten věnovat. Dále bych chtěl poděkovat Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého za zapůjčení vybavení k testování.

Také děkuji své rodině a přátelům za neustálou podporu.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. David MOTLÍČEK
Osobní číslo: R220010
Studijní program: N0532A330009 Geoinformatika a kartografie
Téma práce: Stanovení optimálního postupu pro použití videa jako zdroje dat pro fotogrammetrii
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

Zásady pro vypracování

Cílem práce je analyzovat základní požadavky na použití videa jakožto zdroje dat pro fotogrammetrii. Student se bude zabývat celým komplexem vlastností video záznamu, které jsou podstatné pro fotogrammetrii. Bude to např.: stanovením optimální snímkové frekvence ve vztahu k překryvům a rychlosti pohybu kamery – analýza použitelnosti různého rozlišení snímků – efekt „rolling shutter“; ve fotogrammetrii Hlavním výstupem bude stanovení optimálního postupu pořízení a zpracování dat při použití videa ve fotogrammetrii. Veškeré postupy budou demonstrovány nejméně na třech případových studiích. Jedna případová studie bude v oblasti městské zástavby, druhá v oblasti fyzickogeografické. Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá výtisk posteru ve formátu A2 a přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Forma zpracování diplomové práce: elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. LILLESAND, T., KIEFER, R., CHIPMAN, J. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc., New York, 756 s., 2008.
2. CAMPBELL, J., B., WYNNE, R. H. Introduction to Remote Sensing. 5th ed. Guilford Press, New York, 667 s., 2011.
3. Pavelka, K. (2002). Fotogrammetrie 10, 2.přepřac. vyd. Praha: FSv ČVUT, 198 s.
4. Manuály programů Trimble Inpho a Agisoft.
5. Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 5. prosince 2022
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Úvodní část práce bude věnována zejména analýze současného stavu výzkumu v oblasti ...
2. Cíle práce: ...
3. Metodika: ...
4. Očekávané výsledky: ...
5. Závěr: ...

LS.

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 1. září 2023

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 9 |
| ÚVOD | 10 |
| 1 CÍLE PRÁCE | 11 |
| 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 12 |
| 3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ | 17 |
| 3.1 Použité metody | 17 |
| 3.2 Použité přístroje | 18 |
| 3.3 Použitá data..... | 19 |
| 3.4 Použité programy | 19 |
| 3.5 Postup zpracování..... | 21 |
| 4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ..... | 22 |
| 4.1 První případová studie – Kaplička..... | 22 |
| 4.1.1 Prvotní testování | 22 |
| 4.1.2 Terénní výzkum a sběr dat | 23 |
| 4.1.3 Zpracování dat | 26 |
| 4.1.4 Vyhodnocení | 31 |
| 4.2 Druhá případová studie – Kostka | 39 |
| 4.2.1 Prvotní testování | 39 |
| 4.2.2 Laboratorní výzkum a sběr dat | 41 |
| 4.2.3 Vyhodnocení | 42 |
| 4.3 Třetí případová studie – Budova | 46 |
| 4.3.1 Vyhodnocení dat | 47 |
| 5 VÝSLEDKY | 51 |
| 6 DISKUZE | 55 |
| ZÁVĚR..... | 57 |
| POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE..... | 59 |
| PŘÍLOHY | |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| Zkratka | Význam |
|----------------|--|
| FPS | Frames Per Second |
| Bpv | Balt po vyrovnání |
| CD | Compact Disc |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor |
| CSV | Comma-Separated Values |
| DEM | Digital Elevation Model |
| FHD | Full High Definition |
| GIS | geografický informační systém |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| GPS | Global Positioning System |
| GSD | Ground Sampling Distance |
| JPEG | Joint Picture Experts Group |
| MOV | QuickTime Movie |
| QHD | Quad High Definition |
| RTK | Real-Time Kinematic |
| SfM | Structure from Motion |
| SIFT | Scale invariant feature transform |
| S-JTSK | Systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |

ÚVOD

V dnešní době rychlého technického pokroku se zvyšuje kvalita i fotoaparátů a kamer, takže fotogrammetrii s relativně přesnými výstupy může dělat i člověk s malým finančním rozpočtem a bez odborných znalostí. Kvalita fotografických snímačů se neustále vylepšuje, stejně tak i výkon těchto zařízení v oblasti videa. Dnešní cenově dostupné digitální kamery mají tedy velký potenciál využití i ve fotogrammetrii. (Gruen 1997)

Dnešní technologický pokrok umožňuje navíc využívat i cenově dostupné kamery pro tvorbu kvalitních 3D modelů. Jak uvádí Pavelka (2015), výhodou technologií tvorby 3D modelů z fotografických snímků je, že lze snadno vytvořit 3D model objektu či předmětu bez nutnosti použití drahého a transportně problematického laserového či triangulačního skeneru.

Využití klasické fotogrammetrie vyžaduje odbornost a znalost metody Structure-from-Motion, která definuje úhly a překryvy jednotlivých snímků. Tento problém by mohlo řešit využití videozáznamu, jako zdroje dat pro následné zpracování. Video, jakožto sekvence fotek, zachovává vysoké procento překryvů, což usnadňuje pořízení vstupních dat.

Tato skutečnost s sebou nese jen pozitiva, ale i negativa. Na natočení videa se vztahují stejné nároky jako na pořízení fotografie, například je potřeba správně nastavit expozici a vady objektivu ovlivňují nejen fotku, ale i kvalitu videa.

V současné době převažuje způsob nahrávat videozáznamy z ručních zařízení, inovativním přístupem je natočení videa ze vzduchu za použití bezpilotních letounů, například dronu. Použitím vyšší snímkové frekvence umožňuje vyšší rychlost dronu, čímž se zkrátí doba letu a celkový čas strávený v terénu.

V praxi je tedy potřeba brát v potaz všechna pozitiva i negativa, která obnáší využití videa místo fotografií. Tato práce si klade za cíl stanovit optimální postup pořízení a následné zpracování dat při použití videa ve fotogrammetrii. Výstupy a výsledky z této práce pomohou při terénních pracích jak odborníkům, tak i laické veřejnosti.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je analyzovat základní požadavky na použití videa jakožto zdroje dat pro fotogrammetrii. Bude zkoumána optimální snímková frekvence ve vztahu k překryvům a rychlosti pohybu kamery, proběhne analýza použitelnosti různého rozlišení snímků a bude zkoumán efekt „rolling shutter“ ve fotogrammetrii. Bude provedeno vlastní testování formou experimentu na nejméně třech případových studiích. Jedna případová studie bude v oblasti fyzickogeografické, druhá v oblasti městské zástavby. V případových studiích budou použita zařízení, která lze využít ve fotogrammetrii, tedy dron a digitální fotoaparát. Jednotlivé případové studie budou vypracovány tak, aby výstupy z nich mohly být porovnány mezi sebou. Videozáznamy budou vytvořeny bezprostředně po sobě při stejných rychlostech a drahách pohybu. Na testovaných přístrojích bude měněno nastavení spočívající ve změně rozlišení a snímkové frekvence. Dále bude zaměřeno potřebné množství vřícovacích a kontrolních bodů, aby mohly být výsledky porovnány mezi sebou číselně. Data budou zpracována v programu Agisoft Metashape Professional.

Hlavním výstupem bude stanovení optimálního postupu pořízení a zpracování dat při použití videa ve fotogrammetrii. Dalšími výstupy budou grafy a tabulky vyhodnocení analyzovaných dat pro porovnání nastavení jednotlivých případových studií. Dále bude vytvořena kalkulačka v programu Microsoft Excel se vzorci na výpočet překryvů, měřítkového čísla snímkování a dalších parametrů. Ta bude volně ke stažení na webu vytvořeném k diplomové práci.

Výsledky práce pomohou při výběru vhodné metody fotogrammetrie či videogrammetrie a postupu zpracování. Vytvořená kalkulačka umožní výběr vhodného nastavení při plánování leteckého snímkování metodou videogrammetrie.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Fotogrammetrie představuje klíčovou disciplínu nejen v geodézii a geoinformatice, ale také v širším spektru aplikací. Tato disciplína umožňuje získávat prostorová data z obrazových záznamů, což je klíčové pro mnoho oblastí vědy a průmyslu. Jak uvádí Pavelka (2003), „*Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.*”

Zatímco tradiční fotogrammetrie pracuje přímo s fotografickými snímky, videogrammetrie využívá jako zdroj dat video, konkrétně se jedná o snímky či sekvence snímků z videa. Jak zdůrazňuje Li (2018), video je elektronická reprezentace sekvence obrazů nebo snímků, které jsou sestaveny tak, aby simulovaly pohyb a interaktivitu. V důsledku toho nabízí videogrammetrie nové možnosti pro analýzu dynamických procesů a pohybujících se objektů v reálném čase.

Výhodou videogrammetrie je, že může být prováděna s jakýmkoli zařízením, což je zvláště užitečné vzhledem k nízkým nákladům na zařízení. Na rozdíl od většiny zařízení používaných k výrobě 3D modelů, které jsou drahé a vyžadují odborné znalosti pro správu a vytváření, je technika videogrammetrie cenově dostupná a snadno použitelná. (Rashidi 2014)

Základy videogrammetrie se zabýval už v roce 1997 Armin Gruen, který tvrdil, že jde o vysoce automatizovanou měřicí techniku, která poskytuje vysokou přesnost a možnosti zpracování dat v reálném čase. Stanovil, že hlavními faktory ovlivňující přesnost a spolehlivost videogrammetrického systému jsou konfigurace sítě (geometrické uspořádání kamer), počet a umístění vřícovacích bodů, kvalita přenosu dat u kamery do počítače, typ a kvalita kamery a objektivu a další. Závěry článku jsou, že videogrammetrie se ukázala jako velmi vhodná měřicí technika při řešení velkého množství různých problémů (Gruen 1997).

Herráez a kol. (2016) ve svém výzkumu porovnal videogrammetrii a laserové skenování a došel k závěru, že videogrammetrie je schopna generovat velké množství snímků (což znamená vysoký počet bodů bodového mračka) v kratším čase a bez ohledu na typ materiálu. Získané výsledky jeho výzkumu potvrzují, že videogrammetrie dosahuje podobné přesnosti jako EScan (přenosný 3D skener s vysokým rozlišením pro reverzní inženýrství) a vyšší přesnosti než laserový skener architektury. Vyvinutý systém je jednoduchý, levný a flexibilní. Potvrdil, že videogrammetrická metoda je zvláště účinná pro objekty s nepravidelnou geometrií, včetně konkávních oblastí, které mohou být náročné pro jiné techniky 3D modelování.



Obr. 2.1. Způsob testování videogrammetrie (Herrález a kol. 2016).

Videem, jako zdrojem dat pro fotogrammetrii, respektive pro tvorbu 3D modelů, se zabýval Ioannis Brilakis (2011). Ten ve své studii otestoval sadu levných videokamer s vysokým rozlišením s cílem vytvořit husté 3D mračno bodů. Ve svém výzkumu využil kalibrovanou sadu dvou kamer, ze kterých pořídil záznam. Jeho navrhovaný postup zavádí významnou automatizaci při získávání prostorových dat pomocí kamery. Jeho navrhovaný postup umožňuje pohyb kamerové soustavy, což řeší problém okluze, kterému čelí statické fotogrammetrické metody.

Dalšími autory, kteří se zabýval použitím videa byli Torresani a Remondino (2019), kteří použili přímo mobilní telefony k natočení soch a dalšího kulturního dědictví k následné 3D rekonstrukci. Ve své práci vytvořili skript, který zkoumal jednotlivé snímky. Buďto podle času, tedy pravidelného intervalu, nebo na základě 2D selekce, kde byla zkoumána mimo jiné rozostřenost nebo smaz. Ve 3D selekci byl použit algoritmus ORB-SLAM. Z použitých přístupů se ukázala jako nejvhodnější metoda 2D selekce, která vybírá největší množství použitelných snímků. V závěrech výzkumu uvedli, že videogrammetrický přístup může poskytnout srovnatelné 3D výsledky jako fotogrammetrické řešení se snímky pořízenými z digitální zrcadlovky.

Další prací na odborné úrovni byl výzkum na téma Srovnávací analýzy různých kamerových vstupů pro videogrammetrii výzkumníků z univerzity v Malajsii. Ti ve své studii použili několik zařízení, například různé mobilní telefony značky Iphone, digitální fotoaparát značky Casio a DSLR fotoaparát Nikon a porovnávali video výstupy s různým rozlišením a snímkovou frekvencí pro účely 3D mračen bodů. Ve svém výzkumu zaměřili 146 značek totální stanicí (Obr. 2.2) a z jednotlivých zařízení natočili videozáznam. Ten následně zpracovali v programu EyesCloud3D a vygenerovali mračno bodů. Výsledky kalibrace byly použity ke kalibraci modelu.



Obr. 2.2 Kalibrace kamer (Ahmad a kol 2019).

Následně byl proveden videozáznam modelu, kdy každá kamera zaznamenala stejný model s použitím jiného rozlišení a snímků za sekundu. Zdůrazňují, že natáčet videozáznam modelu by se mělo provádět v odpoledních hodinách, aby se zabránilo jakémukoliv stínu v blízkosti modelu. Z jejich závěrů vzešlo, že dobrý výsledek mračen bodů lze získat, pokud je video natočené za konzistentního osvětlení, má dobrý kontrast a vzdálenost mezi modelem a kamerou zůstává stejná. Nejnižší počet bodů byl dosažen se zařízením s maximálním rozlišením 720p 30 FPS a 1080p 24 FPS. Uvádí, že čím vyšší je rozlišení a FPS určité kamery, tím vyšší bude počet bodů výsledného mračna. Avšak při pořizování záznamu s rozlišením 4K a 60 snímků za sekundu vznikne velký video soubor s rozmazanými a nadbytečnými snímky (Ahmad a kol. 2019).

| Camera | Resolution | Fps | Number Point Clouds |
|-------------------------------|------------|--------|---------------------|
| Iphone 5s | 1080p | 30 fps | 3,789,377 points |
| Iphone 7+ | 1080p | 30 fps | 3,500,624 points |
| | 1080p | 60 fps | 3,898,404 points |
| | 4K | 30 fps | 4,028,648 points |
| Iphone X | 1080p | 30 fps | 3,874,748 points |
| | 1080p | 60 fps | 3,832,829 points |
| | 4K | 60 fps | 3,567,064 points |
| Digital Camera (Casio Exilim) | 720p | 30 fps | 1,423,320 points |
| DSLR (Nikon D7000) | 1080p | 24 fps | 3,032,781 points |

Obr. 2.3. Výsledky výzkumu (Ahmad a kol. 2019).

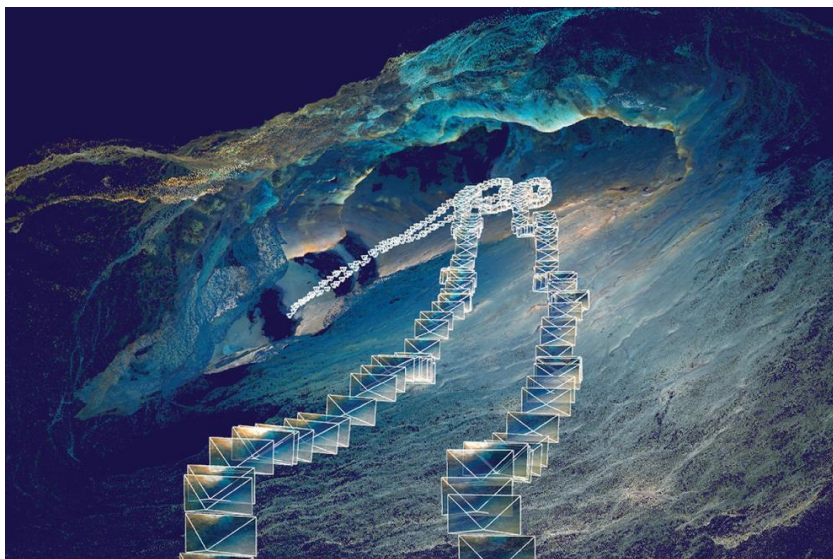
V České republice byla metoda videogrammetrie využita v roce 2017 kdy se spojily instituce Správa jeskyní ČR, Česká speleologická společnost a firma GEO-cz, aby otestovali novou metodu mapování zatopených prostor Chýnovské jeskyně. První pokusy o zmapování trvale zatopených prostor proběhly již v 80. letech minulého století, které vedly ke vzniku první mapy. Potápěči k tomu tehdy využívaly metody magnetického tahu,

která se běžně používá i dodnes. Nejdříve byly pořizovány orientační náčrty jednotlivých chodeb až byla postupně zakreslena celá mapa.

Vzhledem k problémům spojeným například s velmi rychlým zakalením vody při průzkumu či členitosti prostoru se tak vědci v roce 2017 rozhodli využít jinou metodu mapování založenou na fotogrammetrii. Bylo to v době, kdy matematici zdokonalili tzv. SIFT metodu a algoritmy tak umí rozpoznávat výrazné obrazové body při změně měřítka, šumu i osvětlení. Pomocí této metody již dříve bylo zdokumentováno několik památek v ČR i zahraničí, včetně kopií uměleckých děl a přírodních fenoménů. Fotografování se v náročném terénu však ukázalo jako zdlouhavé a neefektivní, snímky navíc často nepokrývali všechny potřebné části dokumentovaných objektů, rozhodli se tedy nahradit fotografie videozáznamem. Skenování zatopené Chýnovské jeskyně tedy provedli dva potápěči, z nichž každý měl dvě kamery ve stereo páru (Obr. 2.4). To umožnilo kombinovat různé matematické postupy při finální tvorbě, nakonec bylo využito stereofotogrammetrických a průsekových výpočtů.

Před samotnou videogrammetrickou částí dokumentace proběhlo ještě osazení lomových bodů hlavního polygonu signalizačními znaky a také kontrolní zaměření klasickou metodou magnetického tahu. Jasně signalizované body navíc posloužily ve výpočetní fázi projektu pro snadnější spojování dílčích skenů jednotlivých chodeb. Základní polygon byl převeden do souřadnicového systému S-JTSK a výškového systému Bpv. Pečlivým přeměřením tohoto polygonu jsme sledovali především jednoznačnou kontrolu výstupů nově testované metody v zatopených prostorách většího rozsahu. Půdorysné plány a řezy, vygenerované z výsledného modelu, vykazují se základním polygonem velmi dobrou shodu. Drobné nuance na dvou lomových bodech připisujeme spíše nedostatečně přesnému měření výšek hloubkoměrem.

Kontrolními výpočty byla potvrzena celková maximální chyba vzniklého modelu do 20 cm. Během pouhých dvou ponorů dokázala dvojice potápěčů zmapovat více než 220 m členitých chodeb s převýšením 43 metrů. Podobné práce v Chýnovské jeskyni pokračují i nadále. (Šindelář a Krejča 2019)



Obr. 2.4. Pozice kamer z videozáznamu (zdroj Správa Chýnovské jeskyně).

Software

Pro tvorbu 3D modelů z videa lze v dnešní době použít velké množství programů, které za použití umělé inteligence umí zpracovat krátká videa do věrohodných modelů, avšak za cenu značné nepřesnosti a nemožnosti využít přesně zaměřené vličovací body. Z online

nástrojů s omezenou funkcionalitou je to například 3dpresso.ai, který umožňuje zpracovat ve free verzi minutová videa. U nástrojů tohoto typu nelze jednoznačně identifikovat postupy zpracování vstupních dat. Uživatel natočí video, které následně nahraje na portál a přibližně za 30 minut mu přijde e-mail s odkazem na vygenerovaný model, který si může zobrazit, případně i stáhnout. Jediná možnost v podobě editace je pouze oříznutí výsledného modelu. Pro jednoduché vizualizace bez potřeby přesných výstupů (3Dpresso.ai 2024)



Obr. 2.5 Výsledný model (vytvořil autor práce).

Dalším online nástrojem, který je placený, ale umožňuje pokročilejší nastavení a delší videozáznam, případně více videí, je lumalabs.ai. „Rozhraní API očekává videoprohlídky objektů nebo scén zvenčí, ze 2-3 úrovní. Výstupem je interaktivní 3D scéna, kterou lze přímo vkládat, hrubě texturované modely, na kterých lze stavět interakce v tradičních 3D pipeline, a předrenderované 360° obrázky a videa.” (Luma Ai 2024)

Mezi programy instalované na počítač uživatele dominuje celá řada programů od společnosti Adobe. Adobe Substance je řada programů pro tvorbu 3D modelů. Kromě modelování umožňuje právě i fotogrammetrii, případně videogrammetrii s pokročilými možnostmi zpracování, jako je ořez Mesh a další. Výstupy však slouží primárně pro vizualizaci například do počítačových her. (Adobe 2024)

Na profesionální odborné úrovni však takových programů už tolik nenajdeme. Pix4D je program pro fotogrammetrické účely, který umožňuje i import videa. Před převedením videa na jednotlivé snímky umožňuje definovat interval, ve kterém jsou snímky extrahovány. Je zde možnost definovat model kamery, protože tato informace se při záznamu videa neukládá. (Pix4D 2024)

Dominuje zde program Agisoft Metashape, který provádí fotogrammetrické zpracování digitálních snímků a generuje 3D prostorová data pro použití v aplikacích GIS, dokumentaci kulturního dědictví a produkci vizuálních efektů i pro nepřímá měření objektů různých měřítek.(Agisoft 2024) Ten je primárně určen na práci s fotografiemi, ale obsahuje i nástroj, který vložené video rozdělí na jednotlivé snímky, se kterými pak dále pracuje. Při extrahování snímků z videa lze snížit snímkovou frekvenci nastavením kroku exportu konkrétním čísle, nebo vybráním možnosti Small, Medium Large, které umožní programu automatický krok snímku pro přeskočení podobných fotografií. Obsahuje i možnost oříznout délku vstupního videa z jeho začátku nebo konce.

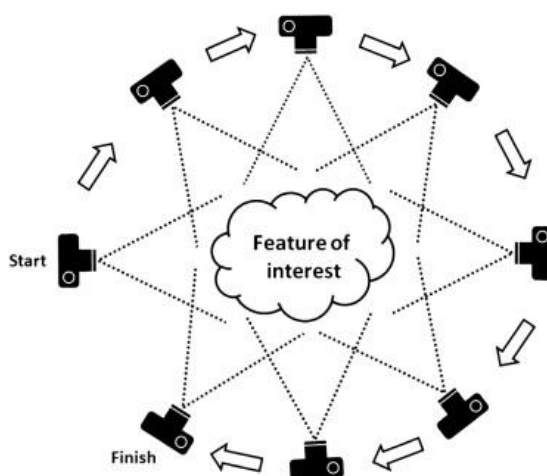
3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Po obdržení zadání byla nejprve provedena rešerše problematiky. Bylo nastudováno nastavení programu Metashape z manuálu a fóra dostupného na stránkách Agisoft. Po nastudování problematiky byl navržen postup práce. Byla vybrána testovaná zařízení a podle nich i dostupná nastavení rozlišení a snímkové frekvence videa.

Zpracování případových studií probíhalo experimentálním způsobem. Zařízení a nastavení byla testována tak, aby mohla být mezi sebou porovnávána. V případě testování ve venkovním prostředí byla jednotlivá videa nahrávána bezprostředně po sobě, aby byly světelné podmínky co nejvíce podobné. V případě testování ve vnitřním prostředí byla kamera umístěna na zařízení s konstantní dráhou pohybu. Zároveň světelné podmínky byly konstantní pro všechna nastavení.

3.1 Použité metody

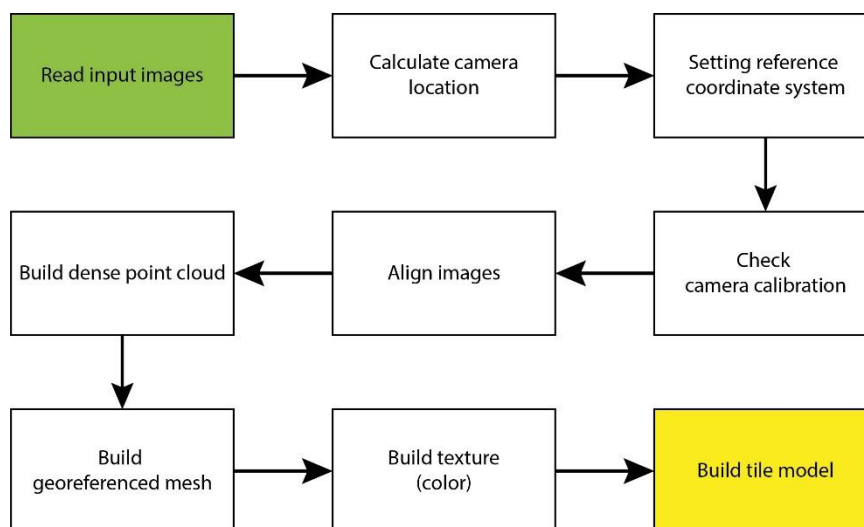
V rámci diplomové práce bylo provedeno několik experimentů s využitím metody Structure from Motion (SfM). Směrem pohybu okolo objektu zájmu se zabýval v roce 2012 Westoby ve své studii s názvem “*Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*” (Westoby a kol. 2012), stejně tak i Pavelka a kol. (2015). Oba uvedli, že fotografie je vhodné pořídít pravidelně okolo objektu s velkým překryvem 70 % - 80 % a ideálně v několika řadách. Stejně doporučení se dočteme i v nápovědách jednotlivých programů uvedených v kapitole 2.



Obr. 3.1 Pozice kamer při metodě SfM (Westoby a kol. 2012).

Cílem experimentů bylo mimo jiné zkoumat, jak efektivně SfM dokáže rekonstruovat trojrozměrné scény z videosekvencí, které slouží jako vstupní data pro fotogrammetrické analýzy. Prvním krokem této metody je vytvoření snímků s velkým překryvem ve směru pohybu okolo objektu zájmu Obr 3.1.1. Následně po nahrání snímků do programu software detekuje a spáruje klíčové body v jednotlivých snímcích videa, aby bylo možné analyzovat jejich vzájemné pohyby a odhadnout geometrii scény.

Poté jsou provedeny rekonstrukce trojrozměrného uspořádání scén a odhad pohybu kamery během celého záznamu. Detailně je celý proces znázorněn na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Postup zpracování metody SfM (Razi a kol. 2018).

Pro úplné porozumění experimentu je potřeba vymezit základní parametry videa, které byly předmětem testování. Mezi ně patří FPS (frames per second), což je sekvence snímků za sekundu (Li a Fu 2018). Vyšší hodnota FPS znamená plynulejší pohyb ve videu, tedy i vyšší procento překryvů a vyšší počet jednotlivých snímků z videa. Další důležitým parametrem je rozlišení videa. To udává počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru (Oujezdský 2011). Vyšší rozlišení videa obvykle znamená lepší kvalitu obrazu, tedy i jednotlivých snímků, ale také větší velikost souboru. V dnešní době je nativní rozlišení Full HD, které nabízí 1920×1080 pixelů, mezi další standardy patří QHD, 2,7K, 4K a další.

Rolling shutter

Efekt rolující závěrky je zásadní vada snímače typu CMOS (Hedborg a kol 2011). Je způsobena čtením dat ze snímače především u elektronických závěrek kamer, kdy snímač zaznamenává obraz řádek po řádku, a proto je každý řádek exponován během jiného časového intervalu. Oproti tomu zařízení s global shutter exponují celý snímek v jeden moment. Tato vlastnost při vysokých rychlostech způsobuje, že svislé linie jsou zaznamenány jako šikmé, nebo že rotující vrtule letadla jsou deformovány. Řešením těchto problémů může být upravení rychlosti závěrky na dvojnásobek snímkové frekvence, což by ovšem mohlo způsobit smaz obrazu. Proto, je-li to možné, je řešením snížit rychlost pohybu kamery (Hedborg et al. 2011).

Při testování všech případových studií nebyl zaznamenán vliv efektu rolling shutter na výsledné snímky z videa, což bylo způsobeno malou rychlostí pohybu. U dronu Phantom 4 Pro to prokázal i experiment od Forlani který uvádí, že při rychlosti do 2 m/s je zkreslení nepatrné (Bruno a Forlani 2023).

3.2 Použité přístroje

DJI Phantom 4 Pro

Pro zpracování první případové studie bylo potřeba leteckého snímání za použití UAV dronu DJI Phantom 4 Pro. Dron je vybaven vysokorychlostní kamerou schopnou natáčet video ve vysokém rozlišení a zachytit fotografie s vysokým rozlišením a jasnými detaily. Díky svému integrovanému systému GPS a pokročilému stabilizačnímu mechanismu dokáže dron udržovat stabilní polohu a plynulý let i při nepříznivých povětrnostních podmínkách.

Olympus fotoaparáty a objektivy

Pro zpracování druhé a třetí případové studie byly použity fotoaparáty značky Olympus. Konkrétně modely Olympus M1 Mark II a Olympus M10 Mark II. Na fotoaparátu Olympus byl při řešení první případové studie nasazen objektiv Olympus M.Zuiko Digital ED 12-40 mm f/2,8 Pro, nastaven na ohnisko 12 mm, respektive 24 mm při přepočtu na fullframe. Při testování třetí případové studie byly použity 2 fotoaparáty v jeden okamžik. První fotoaparát s objektivem Olympus M.Zuiko Digital ED 14-42mm f/3,5-5,6 EZ Pancake nastaveným na ohniskovou vzdálenost 17 mm, a druhý s objektivem Olympus M.Zuiko Digital ED 17 mm f/1,8.

Geodetická GPS Trimble R4

Pro zaměření vřícovacích a kontrolních bodů v první a třetí případové studii byla použita Geodetická GPS Trimble R4. Jedná se o vysoce spolehlivý geodetický přijímač GNSS, který umožňuje přesné určení polohy a sběr geodetických dat s vysokou přesností a spolehlivostí také díky přesnému určování polohy metodou RTK. Trimble R4 je vybaven širokou škálou funkcí a možností, včetně podpory více družicových systémů GNSS, což umožňuje získávat data i v obtížných terénních podmínkách nebo v urbanizovaných oblastech s omezenou viditelností satelitů. Pro nastavení a spuštění měření je zařízení vybaveno kontrolní jednotkou s operačním systémem Windows mobile. Pro správné přesné zaměření bodů je nutný přístup k internetu, který byl zprostředkován přes wifi hotspot z mobilního telefonu Xiaomi Redmi Note 9 Pro. Výška GNSS přijímače při měření byla 180 cm a doba měření jednotlivých bodů byla minimálně 5 sekund.

Autonomní robotické vozidlo

Pro testování druhé případové studie bylo vytvořeno zařízení, které udržovalo konstantní rychlost a směr pohybu. Vozidlo bylo vytvořeno ze stavebnice LEGO za použití elektromotorů a bateriového napájení a dálkového ovládání.

Mezi zařízení, která byla zahrnuta z důvodu nevyhovujících požadavků, patří dron DJI Mavic Mini 1, protože neumožňuje plán letu. A mobilní telefon Xiaomi Redmi Note 9 Pro, který neumožňuje pokročilé nastavení expozice u videa.

3.3 Použitá data

Veškerá data zpracována v diplomové práci byla data primární, vytvořená autorem přímo pro tuto práci. Pořízená primární data jsou letecké snímky a videa zaznamenané z UAV a fotoaparátů. Fotografie byly pořízeny s rozlišením 20 Mpx ve formátu JPEG, videa byla nahrána ve formátu MOV s rozlišením 4K nebo FHD.

3.4 Použité programy

Pro plán letu, zaměření vřícovacích bodů a zpracování pořízených dat byly použity následující programy.

Trimble Access

Trimble Access 2021.20 v kontrolní jednotce GPS Trimble R4 slouží pro nastavení metody měření, výšky přijímače a dalších. Po zaměření všech potřebných bodů v zájmové oblasti proběhl export bodů do souboru CSV a přenos do mobilního zařízení a následným přenos do počítače.

DJI Pilot

V mobilní aplikaci DJI Pilot verze v2.5.1.17 byl nastaven automatický plán letu i následné ruční ovládání při řešení první případové studie. Nastavení letového plánu pro fotogrammetrické snímkování 75% příčný a 80% podélný překryv, výška letu byla 25 m, rychlost letu 1,8 m/s. Podrobně je toto nastavení popsáno v kapitole 4.1 První případová studie – Kaplička.

Agisoft Metashape Professional

Zpracování pořízených dat probíhalo v programu Agisoft Metashape Professional verze 2.0.3. Do programu byla nahrána pořízená data a po zarovnání snímků a zpracování hustého bodového mračna zpřesněného o vřícovací body následně vytvořeny výsledné ortofoto mozaiky, DEM a 3D modely.

Veškeré vlastnosti a nastavení programu Agisoft Metashape jsou podrobně popsány ve volně dostupném manuálu na webových stránkách (Agisoft 2019). Pro účely této práce se však některá nastavení ukázala jako zásadní. Jedním z klíčových prvků každého projektu je zarovnání snímků pomocí nástroje Align photos, které zásadně ovlivňuje přesnost a dobu zpracování. Zvolení přesnosti při zarovnávání má významný dopad na výsledky. Například vysoká přesnost pracuje s fotografiemi původní velikosti, kdežto nastavení střední přesnosti způsobí zmenšení snímků dvakrát. Nastavení nízké přesnosti zmenší vstupní snímky až čtyřikrát, což může být v některých případech užitečné pro prvotní odhad polohy. Naopak nejvyšší přesnost zvětšuje vstupní snímky a je doporučeno spíše pro výzkumné účely."

Mezi pokročilé nastavení zarovnání snímků, použité v této práci, patří také nastavení parametrů limitu klíčových bodů. Toto číslo stanovuje horní limit počtu bodů na každém snímku, které je třeba vzít v úvahu během aktuální fáze zpracování. Například použití nulové hodnoty umožní programu najít co nejvíce klíčových bodů, což může vést k velké odchylce. Doporučená hodnota je 40 000.

Další důležitým parametrem je limit vázacích bodů, který udává horní limit vázacích bodů pro každý snímek. Doporučená hodnota je 4 000, která se zvyšuje, pokud je objekt malý a je potřeba vysoká přesnost (Agluck 2018).

Jedním z užitečných nástrojů je také Generic Preselection, který urychluje proces zpracování tím, že umožňuje výběr páru snímků, které mají být porovnány. Tato metoda vybírá překrývající se dvojice až po předběžné analýze fotografií s nižší přesností.

Mezi další možnosti patří funkce Exclude stationary tie points, která umožňuje vyloučit spojovací body, které zůstávají na místě na více různých snímcích. Toto nastavení by mělo být užitečné při zarovnávání fotografií se statickým pozadím, například v situaci, kdy je kamera pevně na místě a sledovaný objekt se otáčí na otočném podstavci. Tato funkce byla v rámci této práce otestována, nicméně bylo zjištěno, že její využití je omezené a nedosahuje očekávaných výsledků. Zarovnání fotografií s vyloučením stacionárních bodů vedlo k zarovnání pouze malého počtu vstupních snímků, což nebylo dostačující pro další zpracování.

Dále je zde možnost využít funkci Řízeného porovnávání snímků, které efektivně zvyšuje počet klíčových bodů na snímek bez výrazného prodloužení doby zpracování. Tento nástroj je vhodný zejména pro situace s fotografiemi s vegetací nebo s profesionálními kamerami s vysokým rozlišením.

Adaptivní model fotoaparátu je další užitečnou funkcí, která umožňuje automatický výběr parametrů kamery na základě jejich spolehlivosti. Tato funkce je užitečná při pořizování snímků budov z různých úhlů nebo v letových datech, kde pomáhá zabránit odchylkám některých parametrů.

Další použité programy

Hodnoty z výstupních reportů byly porovnány a vizualizovány v programu Microsoft Excel. Grafické výstupy byly zpracovány v programu Adobe Illustrator.

3.5 Postup zpracování

Příložený vývojový diagram graficky zobrazuje postup zpracování.



Obr. 3.3 Postup zpracování.

4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Byly zpracovány 3 případové studie. Předcházelo jim prvotní testování, ve kterém byly vyzkoušeny různé přístupy k jednotlivým případovým studiím. První případová studie se zabývala využitím videa místo klasických fotografií pro leteckou fotogrammetrii. Druhá případová studie se zabývala využitím videa pro tvorbu modelu malého měřítka a třetí případová studie byla vypracována v oblasti městské zástavby. Zařízení byla testována formou experimentu za použití téměř stejných podmínek, aby mohly být výsledné výstupy porovnány mezi sebou pouze s rozdílem nastavení rozlišení a snímkové frekvence.

4.1 První případová studie – Kaplička

První případová studie byla zpracována s pomocí UAV zařízení – dronu. Spočívala v otestování a porovnání leteckého snímkování podle plánu letu a nahrávání videozáznamu při stejném leteckém plánu. Byl otestován a porovnán i let v podobě obletění objektu zájmu po kružnici.

4.1.1 Prvotní testování

V rámci prvotního testování první případové studie byly provedeny dva snímkové lety s dronem DJI Mavic Mini 1. Jako objekt zájmu byl nejprve vybrán myslivecký posed poblíž Židlochovic. Na dronu byl nastaven automatický režim s obletěním kolem vybraného objektu a bylo zapnuto nahrávání. Následně se však ukázalo, že toto nastavení není vhodné, protože dron se nepohybuje konstantní rychlostí a posed má příliš složitou konstrukci na testování. Světelné podmínky během testování také nebyly zcela vhodné. Přesto byly provedeny dva oblety s nastavením videa 2,7K 30 FPS a FHD 50 FPS.



Obr. 4.1 Výsledný model posedu.

Jako další objekt zájmu byla vybrána rozhledna Akátová věž. Okolo rozhledny bylo v manuálním režimu obletěna celkem pětkrát s ručním ovládáním. Vzhledem k tomu, že tento dron autor práce vlastní již řadu let, tak s ním má dlouhodobé zkušenosti a dokázal letět po přibližně stejné dráze. Ovšem i přesto se toto zpracování ukázalo jako ne zcela vhodné, a to z důvodu, že dron byl stále ovládán pouze manuálně, což mohlo mít vliv na výsledky, dále že dron nedisponuje rozlišením 4K, ale pouze 2,7K a dostatečnou snímkovou frekvencí při nastaveném nejvyšším rozlišení. Zároveň nebyly zaměřeny žádné vličovací ani kontrolní body, takže výsledky nemohly být srovnány číselně.



Obr. 4.2 Výsledný model rozhledny.

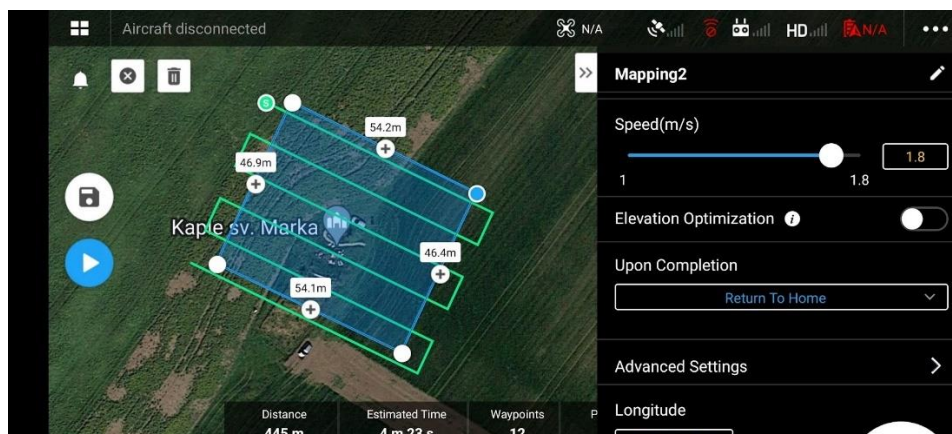
4.1.2 Terénní výzkum a sběr dat

Jako objekt zájmu byla vybrána Výklenková kaple sv. Marka v poli u obce Starovice, a to z důvodu jednoduchosti konstrukce a vhodného umístění mimo zástavbu a elektrické vedení. Datum terénního výzkumu bylo 6.2. 2024 přibližně ve 13 hodin. Tento den bylo jasno s mírnými poryvy větru.



Obr. 4.3 Umístění kapličky.

Nejprve byl vytvořen plán letu pro dron DJI Phantom 4 Pro v aplikaci DJI Pilot s nastavením výšky letu na 25 m, rychlostí pohybu 1,8 m/s, podélným překryvem 80 % a příčným překryvem 75 % (Obr. 4.4). Vyšší rychlost nemohla být nastavena omezením aplikace. V zájmové oblasti bylo geodetickou GPS zaměřeno 8 vřícovacích a 4 kontrolní body s přesností 0,005 m, na které byly umístěny žluté CD pro následné zpřesnění prvků vnější orientace. Celkově měla oblast snímkování 2 500 m², bylo tedy automaticky vytvořeno 6 letových drah (Obr. 4.5). Při tomto nastavení bylo vytvořeno celkem 93 snímků. Expozice fotografií byla následující: clonové číslo f/5, délka expozice 1/500 sekund a hodnota citlivosti ISO 200.



Obr. 4.4. Plán letu.

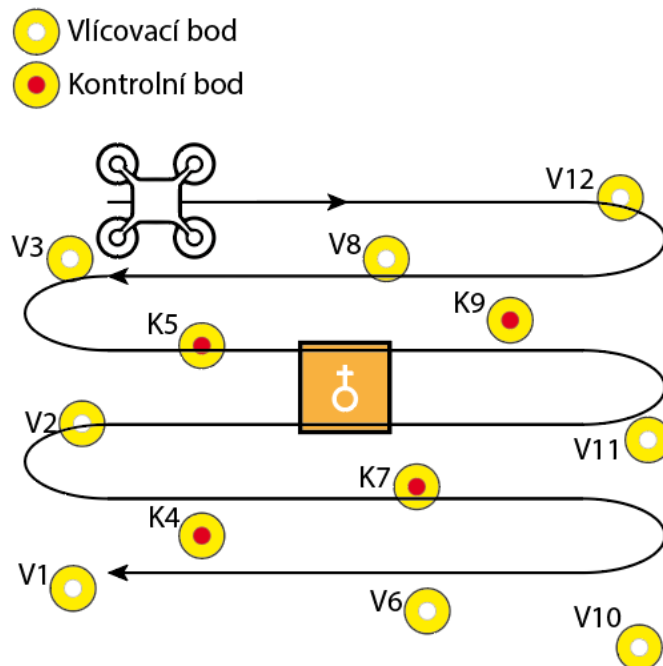
Se stejným nastavením, ale v režimu video, byly provedeny další snímkové lety. Nejprve při nastavení videa s rozlišením 4K a snímkovou frekvencí 25 FPS, dále 4K 50 FPS, FHD 25 FPS a FHD 50 FPS. Doba letu byla přibližně 5 minut. Po zaznamenání snímků a videí při letu podle předem stanoveného plánu byly provedeny další dva lety s ručním ovládáním. Dron obletěl kapličku v poloměru přibližně 30 metrů při rychlosti pohybu 6 m/s ve výšce 25 metrů, s úhlem kamery 34° a se stejným nastavením expozice, jako při automatickém letu. Tento let byl proveden dvakrát s nastavením rozlišení na 4K a snímkovou frekvencí 25 FPS a 50 FPS. Doba letu byla 30 sekund (Obr. 4.6)

Přehledně jsou všechny tyto informace znázorněny v následující tabulce:

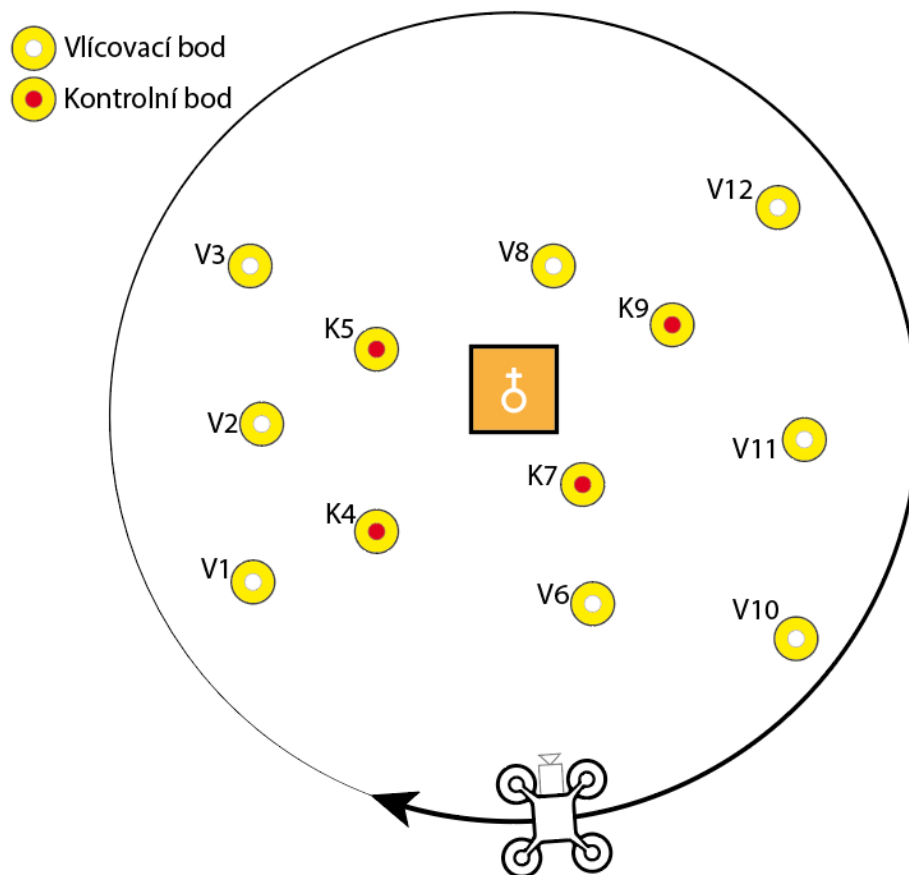
Tab. 4.1 Nastavení snímkování

| | | | |
|---------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Dron | DJI Phantom 4 Pro | | |
| Výška snímkování | 25 metrů nad zemí | | |
| Režim snímání | Fotografie | Videozáznam | Videozáznam |
| Rychlost | 1,8 m/s | 1,8 m/s | 6 m/s |
| Počet letových drah | 6 | 6 | 1 |
| Příčný překryv | 75 % | 75 % | |
| Podélný překryv | 80 % | | |
| Doba letu | 5 minut | 5 minut | 40 sekund |
| Clonové číslo | f/5 | | |
| Rychlost závěrky | 1/500 s | | |
| ISO | 200 | | |
| Ovládání: | Automatické | Automatické | Manuální |

| | | | |
|------------------------|------------------------|--------|-------|
| Počet vlíčovacích bodů | 8 | | |
| Počet kontrolních bodů | 4 | | |
| | | | |
| Nastavení videa | Očekávaný počet snímků | | |
| 4K 25 FPS | | 7 500 | 1 000 |
| 4K 50 FPS | | 15 000 | 2 000 |
| FHD 25 FPS | | 7 500 | |
| FHD 50 FPS | | 15 000 | |



Obr. 4.5. Snímkování podle plánu letu.

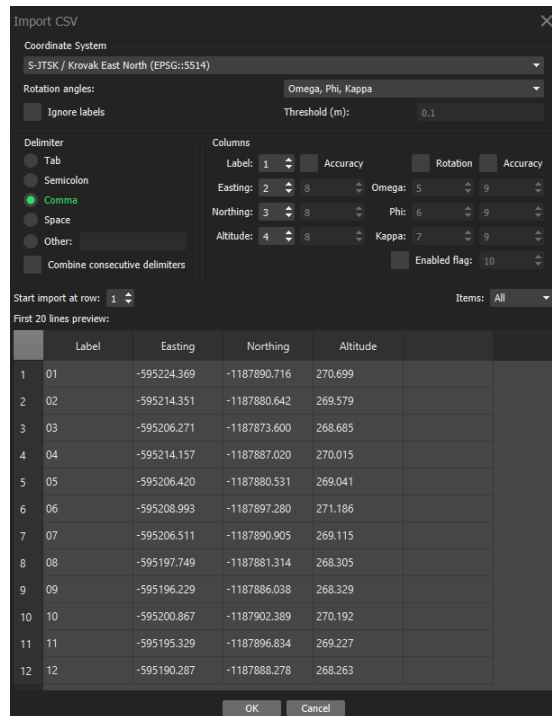


Obr. 4.6. Snímkování s ručním ovládáním

4.1.3 Zpracování dat

Zpracování dat probíhalo v programu Agisoft Metashape Professional. Bylo stanoveno použít stejné nastavení programu pro různá nastavení videa, z důvodu časové a výpočetní náročnosti zpracování však muselo být použito odlišné nastavení v jednom kroku pro fotogrammetrii a pro videogrametrii při zpracování snímkové frekvence 25 FPS.

Nejprve bylo zpracováno nastavení pro klasickou fotogrammetrii. Pořízené snímky byly nahrány do programu a zarovnány. Pro zarovnání fotografií byl použit nástroj *Align Photos*, přesnost zarovnání byla nastavena na High, Key point limit byl nastaven na 40 000 a Tie point limit byl nastaven na 4 000. Vzhledem k tomu, že počet snímků byl pouze 93, doba zpracování byla 1 minuta a 30 sekund. Následně byla vytvořena Mesh z vázacích bodů. Zařízení DJI Phantom 4 Pro při pořizování fotografií ukládá souřadnice jednotlivých snímků v souřadnicovém systému WGS84. Vzhledem k tomu, že vlčovací a kontrolní body byly zaměřeny geodetickou GPS v souřadnicovém systému S-JTSK, je nutné souřadnice fotografií převést právě do souřadnicového systému S-JTSK. Pro tento převod byl použit nástroj *Convert*. V nastavení tohoto nástroje byl vybrán sedmi-prvkový stupeň transformace. Následoval import vlčovacích a kontrolních bodů. Body byly zaměřeny geodetickou GPS s přesností na 5 mm. Body byly uloženy a následně vyexportovány do souboru CSV, který byl přímo importován do programu.



Obr. 4.7. Import zaměřených vřícovacích a kontrolních bodů.

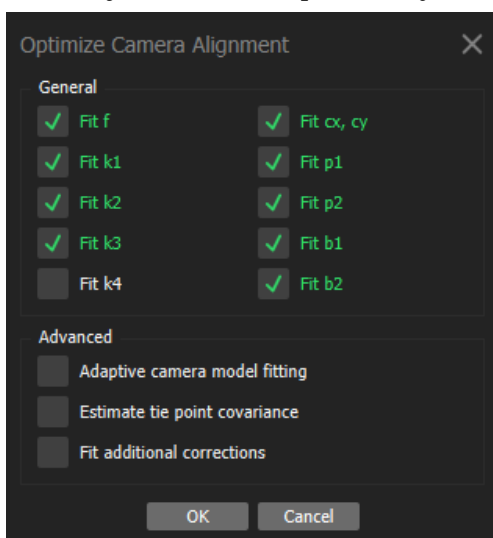
Poté byly body na snímcích ručně přiřazeny k naměřeným souřadnicím. Po přiblížení se nad konkrétní bod na snímku a kliknutí pravým tlačítkem myši byl vybrán příslušný bod. Po přidání souřadnice k bodu na jednom snímku se na následujících fotografiích zobrazí pomocné linie, které jsou programem vypočítány podle předchozího zarovnání. Tyto vodící linie pomáhají uživateli přiřadit souřadnici ke správnému bodu (Obr. 4.8).



Obr. 4.8. Pomocné vodící linie při přiřazení souřadnic k bodům.

Takto byly body u zpracování fotogrammetrické metody přiřazeny na všech snímcích, v průměru na 12 fotografiích. Následně byly vybrány pouze vřícovací body a byla provedena optimalizace zarovnání kamer. Při té době dojde k přepočtení prvků vnější orientace a ke

zpřesnění bodového mračna. Byl vybrán nástroj *Optimize Camera Alignment*, kde byly vybrány všechny kalibrace vad objektivu a další parametry.

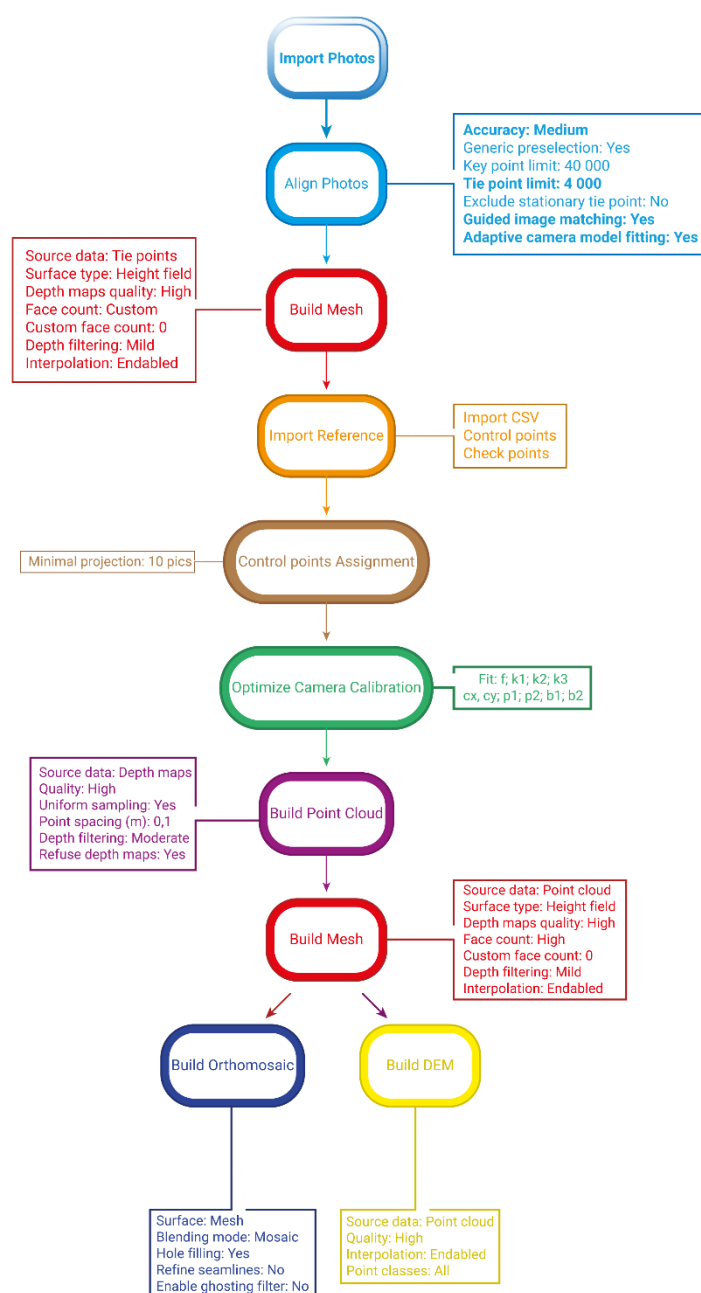


Obr. 4.9. Nastavení nástroje Optimize Camera Alignment.

Po optimalizaci bylo vytvořeno bodové mračno pomocí nástroje *Build Point Cloud*. Vstupní data tohoto procesu byla *Depth maps*, kvalita procesu zpracování byla nastavena na *High*, filtrace jemné hloubky byla nastavena na *Moderate*. Vytvořený Point Cloud sloužil jako vstupní vrstva dat pro vytvoření polygonální sítě *Mesh*. V nastavení nástroje byla v možnostech *Surface type* nastavena možnost *Height field* a *Face count* na *High*.

Následně byla vytvořena ortofotomozaika a DEM. V nastavení nástroje *Build Orthomosaic* byla zvolena vstupní vrstva *Mesh* a možnost vyplnění případných děr. U nástroje *Build DEM* pro vytvoření výškového modelu byl zvolen *Point Cloud*, jako vstupní vrstva, kvalita zpracování byla nastavena na *High*.

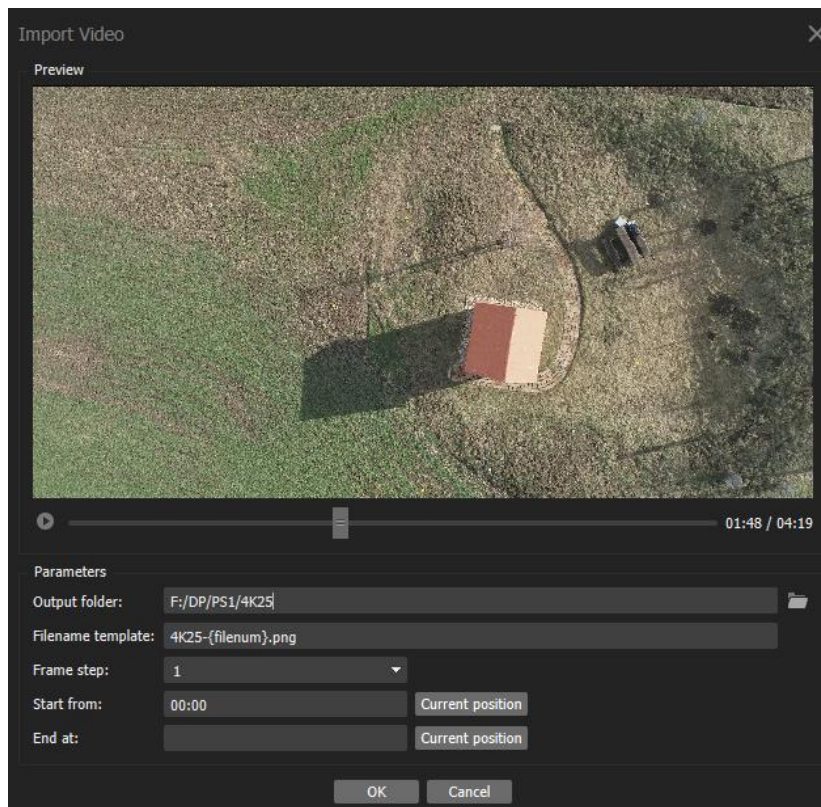
Přehledně je celý postup zpracování i s úplným nastavením znázorněn na následujícím diagramu:



Obr. 4.10 Postup zpracování fotogrammetrie.

Obdobným postupem bylo zpracován i pořízený videozáznam s tím rozdílem, že celému procesu předcházelo převedení videa na jednotlivé snímky. To je možné buď přímo v programu Agisoft Metashape, případně v jiném programu na zpracování videí.

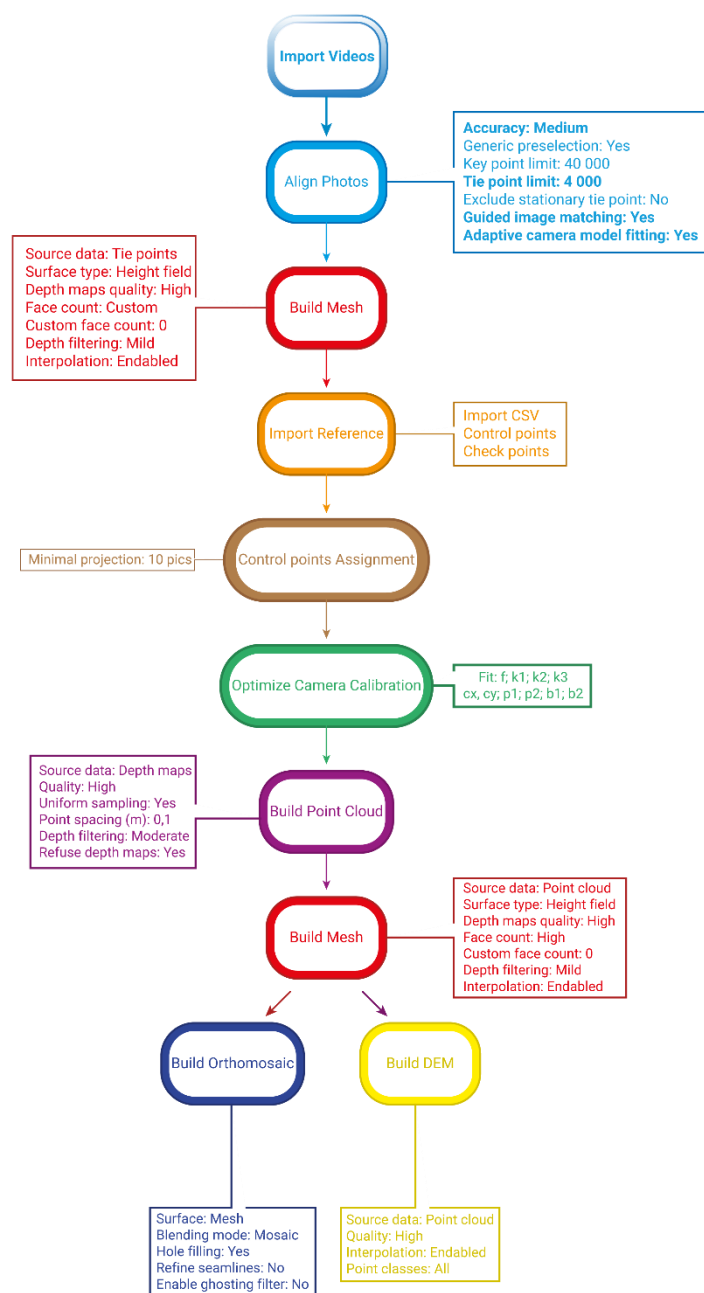
Na záložce File v možnosti Import se vybere možnost Import Video a v průzkumníku souborů se vybere příslušný soubor. V dialogovém okně se nastaví složka pro uložení snímků, název snímků, Frame step, tedy zda se z videa použijí všechny snímky podle nastaveného FPS při nahrávání, nebo se snímková frekvence ještě sníží. Případně zda se má video oříznout.



Obr. 4.11 Nastavení nástroje Import Video.

Z vytvořených videozáznamů nemohla být všechna videa zpracována. Nastavení s 50 snímků za sekundu by vytvořilo 15 000 fotografií, které by zabraly až 270 GB úložiště a jejich zpracování by bylo nemožné. Z tohoto důvodu byly použity pouze videa se snímkovou frekvencí 25 FPS. Počet těchto fotografií byl následně zredukován na polovinu a na třetinu a bylo k němu přistupováno jako k dalšímu videosouboru.

Po převedení videa na jednotlivé fotografie následovalo opět zarovnání snímků. Při použití snímkové frekvence 25 FPS s nastavením přesnosti zarovnání na *Medium*, a to z důvodu, že na možnost *High* zpracování trvalo několik dní a několikrát skončilo chybou, nebo nebyl zarovnán dostatečný počet snímků. Při zredukováném počtu fotografií byla přesnost zarovnání nastavena opět na *High*. Po vytvoření *Mesh* nebyly snímky převedeny do souřadnicového systému S-JTSK, a to z důvodu, že snímky vytvořené z videa neobsahovaly souřadnice záznamu fotografie. Následovalo ručním přiřazení vřícovacích bodů na snímcích k souřadnicím zaměřených vřícovacích bodů. Vzhledem k tomu, že se celkový počet snímků pohyboval v řádech tisíců, byly souřadnice s body propojeny v průměru na dvanácti snímcích, stejně jako u zpracování fotogrammetrie. Konkrétní výběr jednotlivých snímků byl náhodný, ale vybrané fotografie byly při natáčení pořízeny v dostatečných vzdálenostech od sebe. Následovaly kroky stejné, jako při předchozím postupu zpracování fotogrammetrie. U videa natočeného se šikmou kamerou s dráhou letu okolo kapličky je možnost vytvořit i 3D model objektu. Přesné nastavení je znázorněno na diagramu Obr. 4.12



Obr. 4.12 Postup zpracování videogrammetrie.

4.1.4 Vyhodnocení

V této případové studii bylo celkem zpracováno 9 odlišných nastavení. První, referenční, bylo fotogrammetrické zpracování, při kterém byl dron ovládán automaticky, dle předem nastaveného plánu letu, při tomto nastavení vzniklo 93 snímků. Všechny snímky byly programem úspěšně zarovnané a po dalším zpracování vznikla výsledná ortomozaika a DEM. Následovalo zpracování videogrammetrie, při kterém sice vznikla čtyři videa s rozlišením 4K a FHD a snímkovou frekvencí 25 a 50 FPS. Z důvodu časové a výpočetní náročnosti nemohla být nastavení s 50 FPS zpracována. Při zpracování 25 FPS bylo vyexportováno okolo 7 450 jednotlivých snímků, což se ukázalo jako pro počítač s parametry 16 GB RAM, Intel(R) Core(TM) i7-9750H 2.60GHz CPU a NVIDIA GeForce GTX 1650 GPU jako velice náročné na zpracování. Doba zpracování zarovnání snímků

s rozlišením 4K a 25 FPS byla 25 hodin. Z těchto důvodů bylo zarovnáno pouze necelých 50 % pořízených snímků. I přesto bylo přistoupeno k dalšímu zpracování, při kterém byly výstupem opět DEM a ortomozaika. Z videozáznamu se 25 FPS jednotlivých rozlišení byly vybrány všechny sudé a následně i každý třetí snímek a bylo k nim přistupováno jako k videu pořízenému se snímkovou frekvencí 12,5 FPS a 8,3 FPS. Tento přístup se ukázal jako vhodný, protože bylo úspěšně zarovnáno více než 80 % vstupních snímků při obou rozlišení i snímkové frekvenci. Další nastavení videogrammetrie, při kterém byl proveden manuální let po kružnici okolo objektu zájmu se šikmou kamerou, bylo provedeno s rozlišením 4K a snímkovou frekvencí 25 a 50 FPS. Při tomto nastavení bylo vyexportováno 920, respektive 2 000 snímků. V obou případech program úspěšně zarovnal 100 % z nich.

Tab. 4.2 Úspěšnost zarovnání snímků

| | Ovládání | Rozlišení snímků | Snímková frekvence | Snímků celkem | Snímků zarovnaných | Úspěšnost zarovnání snímků |
|-------------|-----------|------------------|--------------------|---------------|--------------------|----------------------------|
| Foto | Plán letu | 5472 × 3648 | 0,4 | 93 | 93 | 100,00 % |
| 4K 25 | Plán letu | 4096 × 2160 | 25,0 | 7 403 | 3 591 | 48,51 % |
| 4K 25/2 | Plán letu | 4096 × 2160 | 12,5 | 3 746 | 3 132 | 83,61 % |
| 4K 25/3 | Plán letu | 4096 × 2160 | 8,3 | 2 498 | 2 042 | 81,75 % |
| FHD 25 | Plán letu | 1920 × 1080 | 25,0 | 7 578 | 3 780 | 49,88 % |
| FHD 25/2 | Plán letu | 1920 × 1080 | 12,5 | 3 789 | 3 166 | 83,56 % |
| FHD 25/3 | Plán letu | 1920 × 1080 | 8,3 | 2 526 | 2 094 | 82,90 % |
| 4K 25 šikmý | Ruční | 4096 × 2160 | 25,0 | 920 | 920 | 100,00 % |
| 4K 50 šikmý | Ruční | 4096 × 2160 | 50,0 | 2 034 | 2 034 | 100,00 % |

Dalším porovnáním je počet vázacích bodů, které byly zjištěny při zarovnání snímků. U fotogrammetrického zpracování se tento počet blíží k 61 000, což je ze všech testovaných nastavení nejméně. To bylo způsobeno nejmenším procentuálním překrytím jednotlivých fotografií – podle plánu letu 75 % příčný překryv a 80 % podélný překryv. U videogrammetrie je podélný překryv, dle výpočtu v kapitole ??? mezi 97 % a 99,5 %. Přesto u nižšího rozlišení FHD je počet vázacích bodů mnohem nižší než u rozlišení 4K. Další rozdíly mezi vázacími body u stejného rozlišení ale odlišné snímkové frekvence byly zapříčiněny rozmístěním zarovnaných snímků. U nastavení 4K 25/3 bylo nezarovnáno velké množství fotografií v první letové dráze, díky čemuž vznikla v tomto místě díra a nemohly být nalezeny vázací body.

Počet bodů následně vytvořeného bodového mračna byl nejhustší u fotogrammetrie, nejmenší hustota byla zjištěna při nastaveném rozlišení FHD a 25/3 tedy 8,3 snímků za sekundu. U letu se šikmou kamerou bylo zjištěno necelých 24 mil. A necelých 29 mil. bodů, což je při porovnání s rozlišením 4K velmi vysoké číslo, vezme-li se v potaz, že šikmý let trval přibližně 30 sekund a let se svislou kamerou přibližně 5 minut.

Tab. 4.3 Počet vázacích bodů a bodového mračna

| Nastavení | Tie points | Point cloud |
|-----------|------------|-------------|
| Foto | 60 925 | 55 532 218 |
| 4K 25 | 1 024 268 | 37 136 851 |
| 4K 25/2 | 2 003 821 | 35 652 143 |
| 4K 25/3 | 748 795 | 34 804 156 |

| | | |
|-------------|---------|------------|
| FHD 25 | 133 905 | 12 022 659 |
| FHD 25/2 | 410 337 | 8 773 210 |
| FHD 25/3 | 181 895 | 7 490 348 |
| 4K 25 šikmý | 277 824 | 24 154 559 |
| 4K 50 šikmý | 358 689 | 28 619 593 |

Jak již bylo zmíněno dříve, ve snímkové oblasti bylo geodetickou GPS zaměřeno osm vřícovacích a čtyři kontrolní body s přesností 0,005 m. K bodům na snímcích byly při zpracování přiřazeny příslušné souřadnice a následně byly zjištěny odchylky zpracování. Konkrétní hodnoty jednotlivých odchylek jsou uvedeny na následujících tabulkách.

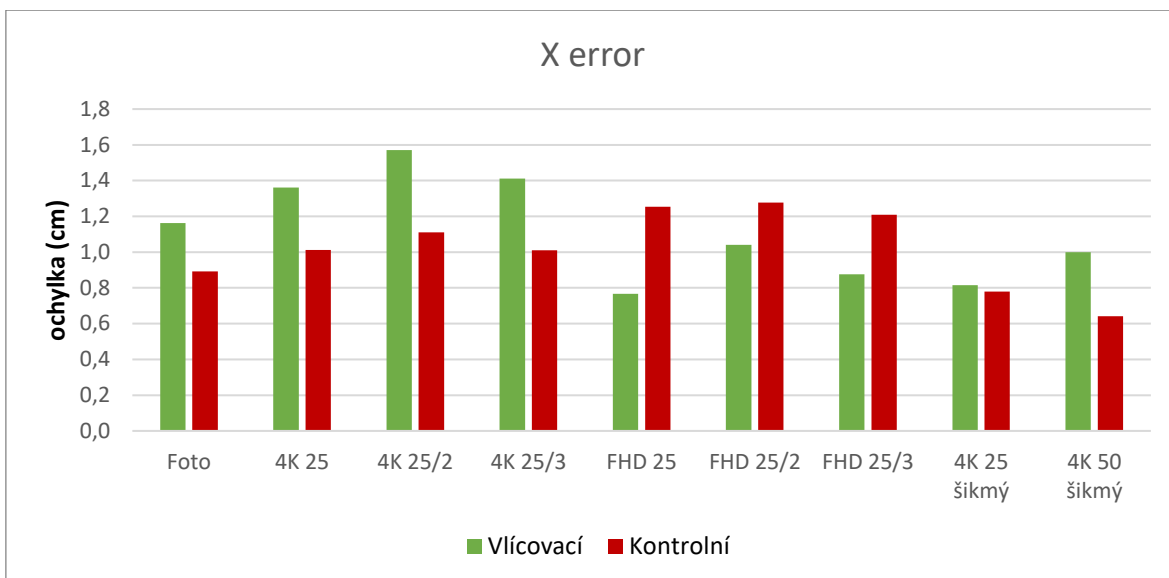
Tab. 4.4 Hodnoty odchylek vřícovacích bodů

| Vřícovací body | | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Nastavení | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) |
| Foto | 1,162 | 1,169 | 0,516 | 1,727 |
| 4K 25 | 1,361 | 1,344 | 0,441 | 1,963 |
| 4K 25/2 | 1,570 | 1,513 | 0,332 | 2,206 |
| 4K 25/3 | 1,412 | 1,522 | 0,525 | 2,142 |
| FHD 25 | 0,766 | 0,754 | 0,410 | 1,151 |
| FHD 25/2 | 1,041 | 0,989 | 0,383 | 1,487 |
| FHD 25/3 | 0,876 | 0,989 | 0,210 | 1,337 |
| 4K 25 šikmý | 0,816 | 0,765 | 0,387 | 1,183 |
| 4K 50 šikmý | 0,999 | 0,847 | 0,432 | 1,379 |

Tab. 4.5 Hodnoty odchylek kontrolních bodů

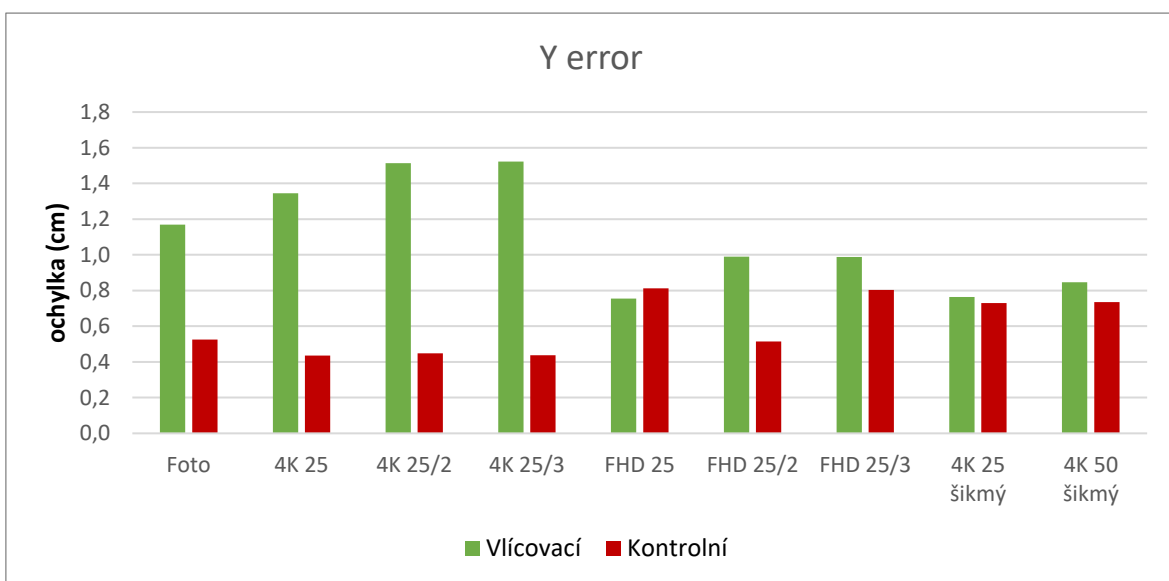
| Kontrolní body | | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Nastavení | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) |
| Foto | 0,891 | 0,526 | 1,956 | 2,213 |
| 4K 25 | 1,012 | 0,436 | 1,142 | 1,586 |
| 4K 25/2 | 1,110 | 0,449 | 1,081 | 1,613 |
| 4K 25/3 | 1,010 | 0,438 | 1,717 | 2,040 |
| FHD 25 | 1,255 | 0,812 | 6,575 | 6,743 |
| FHD 25/2 | 1,278 | 0,515 | 1,166 | 1,805 |
| FHD 25/3 | 1,210 | 0,803 | 2,106 | 2,558 |
| 4K 25 šikmý | 0,779 | 0,730 | 0,887 | 1,388 |
| 4K 50 šikmý | 0,642 | 0,736 | 1,328 | 1,649 |

Pro lepší porovnání jsou odchylky znázorněny i na následujících grafech. Největší odchylka v ose X byla na vřícovacích bodech naměřena při nastavení rozlišení 4K a snímkové frekvence 25/2. Oproti tomu nejnižší hodnoty byly dosaženy při nastavení FHD a 25 FPS. Obecně lze říci, že při rozlišení 4K byly chybové odchylky na vřícovacích bodech vyšší, než při rozlišení FHD. U šikmého snímání při 4K byly odchylky srovnatelné s rozlišením FHD. Avšak u kontrolních bodů byla situace opačná, Nejvyšší hodnoty byly naměřeny při rozlišení FHD a nejnižší při šikmém letu a fotogrametrii.



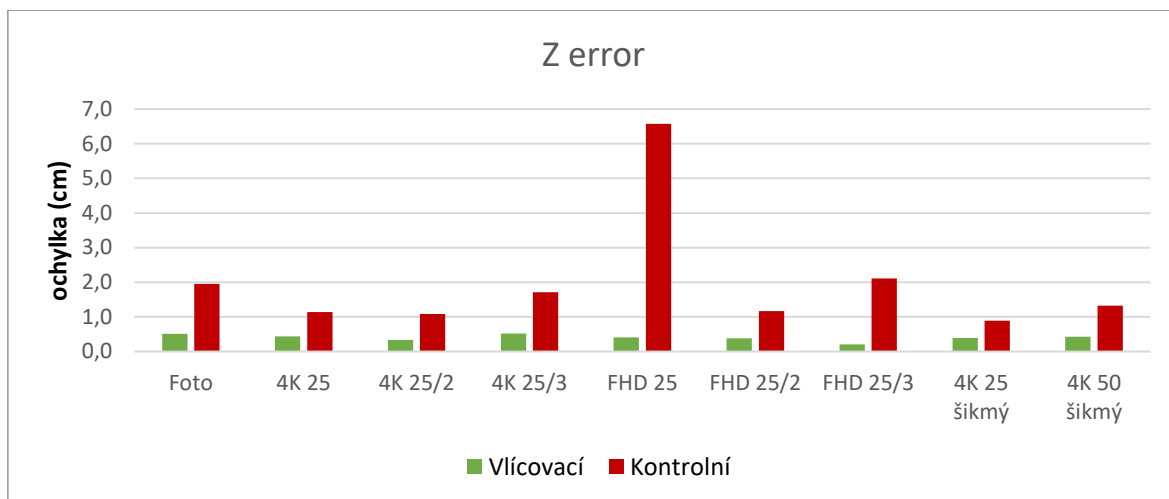
Obr. 4.13 Graf porovnání odchylky v ose X.

V ose Y byly největší odchylky na vlčovacích bodech naměřeny při nastaveném rozlišení 4K a fotogrammetri, při stejném nastavení byly však odchylky kontrolních bodů velice malé. Hodnoty odchylek při nastaveném FHD rozlišení jsou podobné, jako v ose X. stejně tak i u letu se šikmou kamerou.



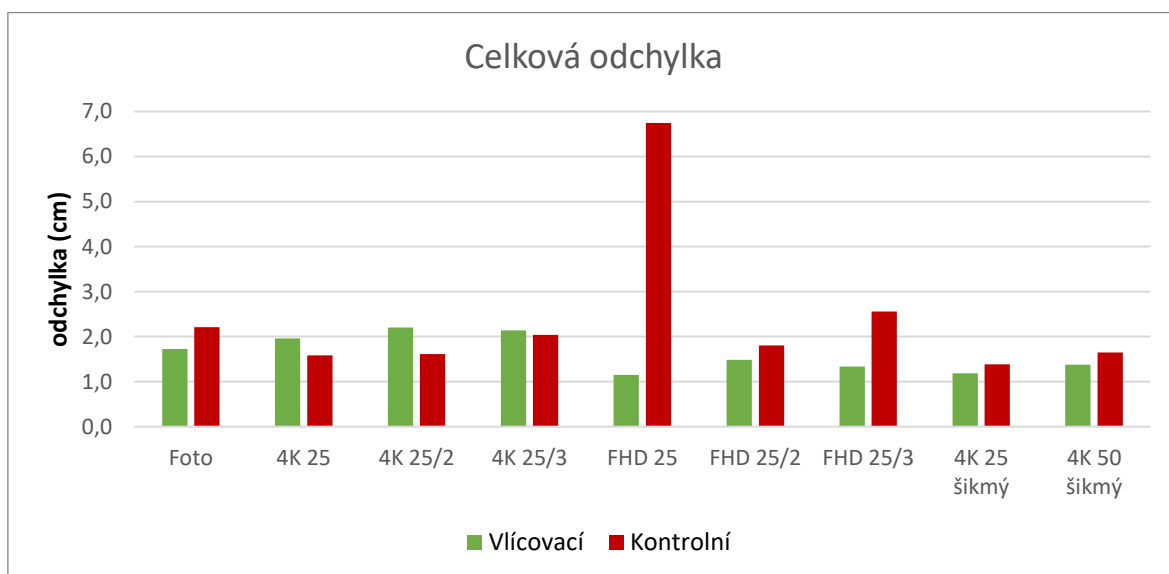
Obr. 4.14 Graf porovnání odchylky v ose Y.

V ose Z je na první pohled zřejmé, že největší odchylka 6,58 cm na kontrolních bodech byla zjištěna při nastavení FHD a 25 FPS. Při bližším prozkoumání této chyby bylo zjištěno, že na kontrolním bodě číslo sedm vznikla odchylka -12 cm, bohužel však konkrétní důvod vzniku chyby nebyl zjištěn. V ostatních případech je odchylka na kontrolních bodech vyšší než na bodech vlčovacích.



Obr. 4.15 Graf porovnání odchylky v ose Z.

Celková odchylka ve všech směrech byla nejvyšší na kontrolních bodech při nastavení FHD 25 FPS právě kvůli vysoké odchylce v ose Z. O to více je zajímavé, že právě při tomto nastavení byla odchylka na vlícovacích bodech nejnižší. Z grafu je také patrné, že celkově nejnižší odchylky byly zjištěny při letu se šikmou kamerou. Odchylky jsou nižší i v porovnání s fotogrammetrií.



Obr. 4.16 Graf porovnání celkové odchylky.

Dalším předmětem zkoumání vzdálenosti mezi středy pixelů měřené na zemi – GSD (Ground Sampling Distance), která bylo zjištěna dvěma způsoby. Jedním přístupem bylo číslo změřené pomocí programu Agisoft Metashape a druhým bylo vypočtení podle nastaveného rozlišení snímku a dalších parametrů viz kapitola 5. Výpočty při letu se šikmou kamerou nebyly provedeny, protože jejich zpracování má příliš mnoho proměnných. V tomto aspektu byly nejlepší výsledky dosaženy fotogrammetrií. Je to z toho důvodu, že samotné fotografie mají nejvyšší možné rozlišení a snímky z videa jsou oříznuty. Avšak ve všech případech videogrammetrie bylo dosaženo lepších výsledků GSD, než bylo vypočteno podle parametrů kamery a rozlišení snímku. Při letu se šikmou kamerou a rozlišením 4K je hodnota GSD srovnatelná se svislým letem a rozlišením FHD.






Tab. 4.6 Porovnání hodnot rozlišení na zemi GSD

| Nastavení | GSD změřeno (mm/pix) | GSD vypočteno (mm/pix) |
|-------------|----------------------|------------------------|
| Foto | 6,00 | 6,85 |
| 4K 25 | 7,44 | 9,16 |
| 4K 25/2 | 7,55 | 9,16 |
| 4K 25/3 | 7,49 | 9,16 |
| FHD 25 | 16,10 | 19,53 |
| FHD 25/2 | 17,10 | 19,53 |
| FHD 25/3 | 17,30 | 19,53 |
| 4K 25 šikmý | 14,40 | |
| 4K 50 šikmý | 15,50 | |

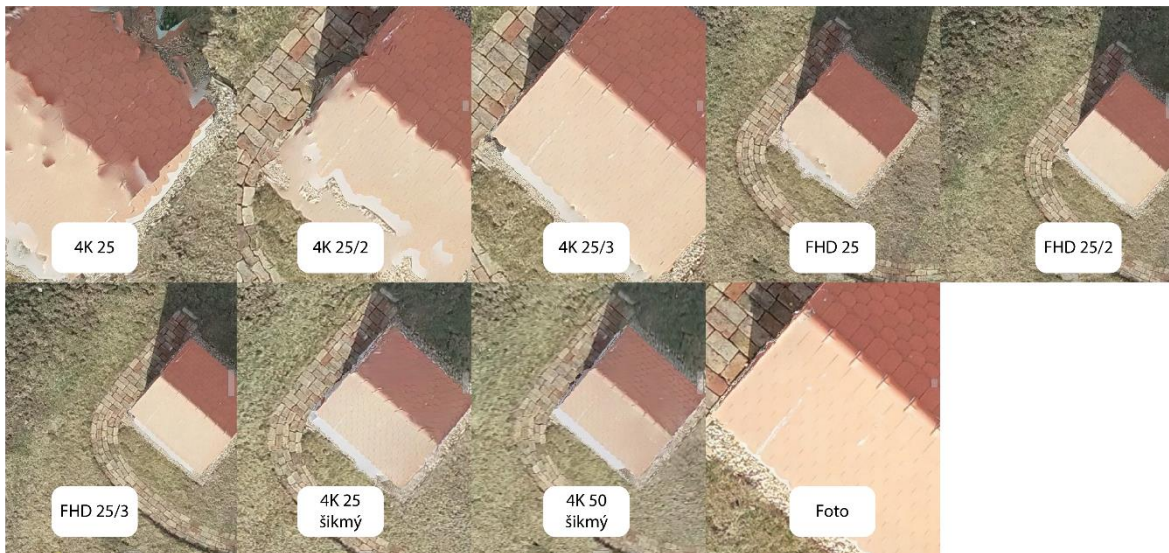
Avšak nízké GSD nezaručuje automaticky kvalitu výsledné ortomozaiky. Je třeba mít na paměti, že proces vytváření ortomozaiky ze šikmých snímků není běžnou praxí. Záměrně jsou zde zobrazeny celé ortomozaiky bez ořezu, aby byla vidět celá vytvořená ortomozaika včetně vzniklý děr. Objekt zájmu – výklenková kaple sv. Marka je na všech vytvořených mozaikách.

Tab. 4.7 Výsledné ortomozaiky

| Nastavení | Ortomozaika | Nastavení | Ortomozaika |
|-----------|---|-----------|--|
| Foto |  | 4K 25 |  |
| 4K 25/2 |  | 4K 25/3 |  |

| | | | |
|----------------|---|----------------|--|
| FHD 25 |  | FHD 25/2 |  |
| FHD 25/3 |  | | |
| 4K 25 šikmý |  | 4K 50 šikmý |  |

Při přiblížení na 100 % a srovnání detailů je patrné, že vysoká snímková frekvence způsobila příliš velké překryvy, což mělo za následek vznik nedokonalých oblastí. Při rozlišení FHD a 4K se šikmou kamerou je 100% výřez v odlišném měřítku, než v ostatní případech, to je způsobeno právě vysokými hodnotami GSD. Celkově by se dalo říci, že nejlepších výsledků ortomozaiky bylo dosaženo, mimo fotogrammetrii, při nastavení 4K 25/3 FPS, dále pak při rozlišení FHD 25/3 FPS a 4K 25 FPS se šikmou kamerou. Avšak v tomto případě je nutné zdůraznit, že vzhled výsledné ortomozaiky je odlišný v různých místech kvůli směru letu viz Obr. 4.18.



Obr. 4.17 Porovnání výsledné ortomozaiky při 100% přiblížení.



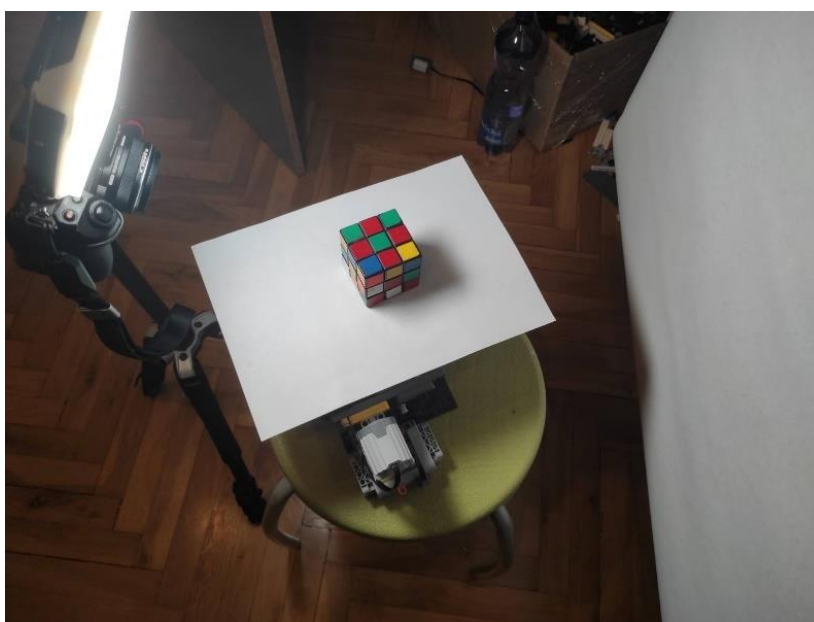
Obr. 4.18 Detail ortomozaiky pořízené z letu se šikmou kamerou.

4.2 Druhá případová studie – Kostka

Druhá případová studie spočívala v otestování videogrammetrie na malém modelu, například pro následné zpracování ve 3D programu a 3D tisku. Jako objekt zájmu byla vybrána Rubikova kostka o rozměrech 5,5 cm, která byla umístěna v místnosti s neměnnými světelnými podmínkami. Fotoaparát byl umístěn na zařízení, které umožňovalo pohyb po stejné dráze a s konstantní rychlostí.

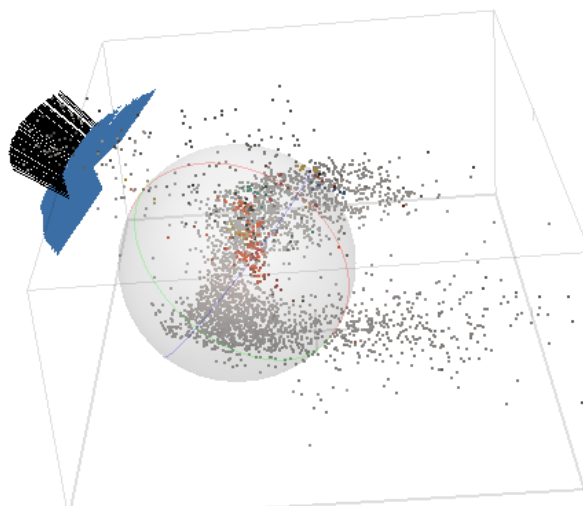
4.2.1 Prvotní testování

Při předběžném testování druhé případové studie, byl model Rubikovy kostky umístěn na otočný podstavec vyrobený ze stavebnice LEGO. Tento podstavec se otáčel konstantní rychlostí a model byl umístěn v jeho středu před kamerou na pevném stativu. Za modelem bylo bílé pozadí a v testovací místnosti byly neměnné světelné podmínky. Bylo natočeno video, při kterém se kostka otočila o jednu otáčku.



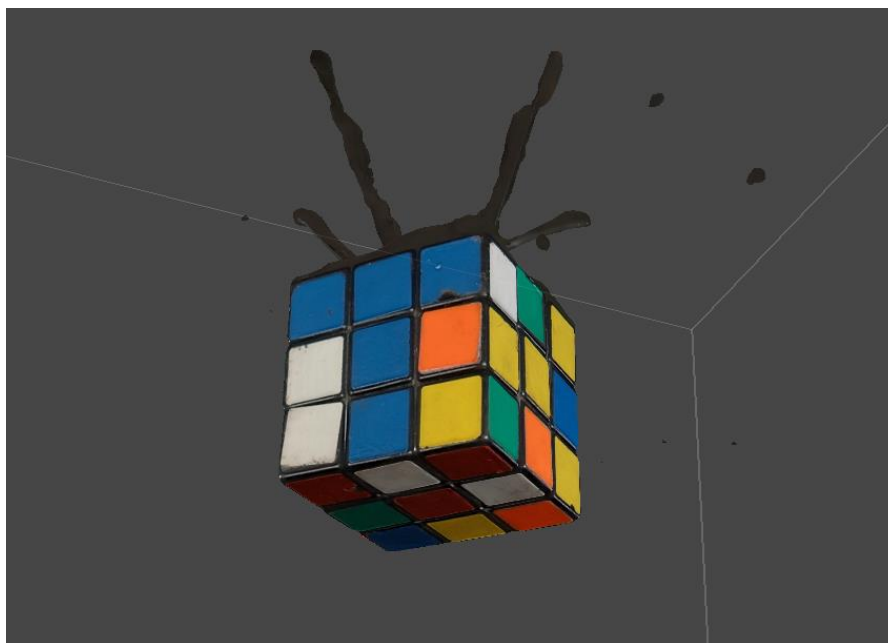
Obr. 4.19. Prvotní testování se statickou kamerou.

V programu Agisoft Metashape je možnost nastavit pořízení snímků ze stejného místa. Tato možnost je nazývána *Exclude stationary points* a při zapnutí této funkce program vyloučí spojovací body, které zůstávají na místě na více snímcích. Při zpracování s tímto nastavením však nebylo dosaženo dostačujících výsledků, protože program nedokázal správně snímky zarovnat a vytvořit z nich model.



Obr. 4.20 Prvotní testování se statickou kamerou – výsledek zarovnání.

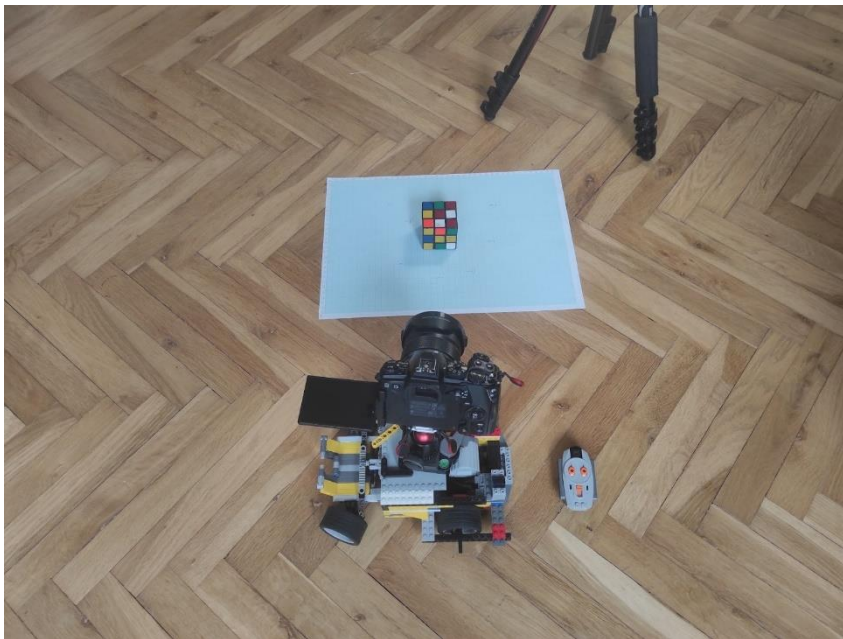
Z tohoto důvodu bylo vytvořeno jiné pomocné zařízení, díky kterému se otáčela kamera konstantní rychlostí po stejné dráze. Byla použita dřevěná otočná deska, na kterou byl umístěn fotoaparát s trvalým světlem. Deska obsahovala gumové kolo s elektrickým motorem a dálkovým ovládním, které umožňovalo otáčet celou plotnou. Nad tuto konstrukci byl umístěn stativ, ze kterého byl spuštěn vlasec, na kterém byl umístěn model Rubikovy kostky. Objektiv kamery směřoval vzhůru pod úhlem přibližně 40° . Výsledky z tohoto testování se ukázaly jako lepší než z testování prvního. Program dokázal snímky správně zarovnat a vytvořit z nich model. V některých případech však nebylo nasvícení modelu zcela ideální, a proto muselo být upraveno nastavení zarovnání snímků. Použitý software využívá kromě modelu samotného i objekty v pozadí, podle kterých zarovnáva jednotlivé snímky, a protože bylo v pozadí šero, nebylo zarovnání snímků v některých případech zcela korektní. Další problém bylo samotné umístění modelu a zkonstruování celé scény. Model byl ve vzduchu a kamera pod ním. Z těchto důvodů byl tento přístup zavrhnut a scéna přepracována.



Obr. 4.21 Výsledný model prvotního testování se statickým modelem.

4.2.2 Laboratorní výzkum a sběr dat

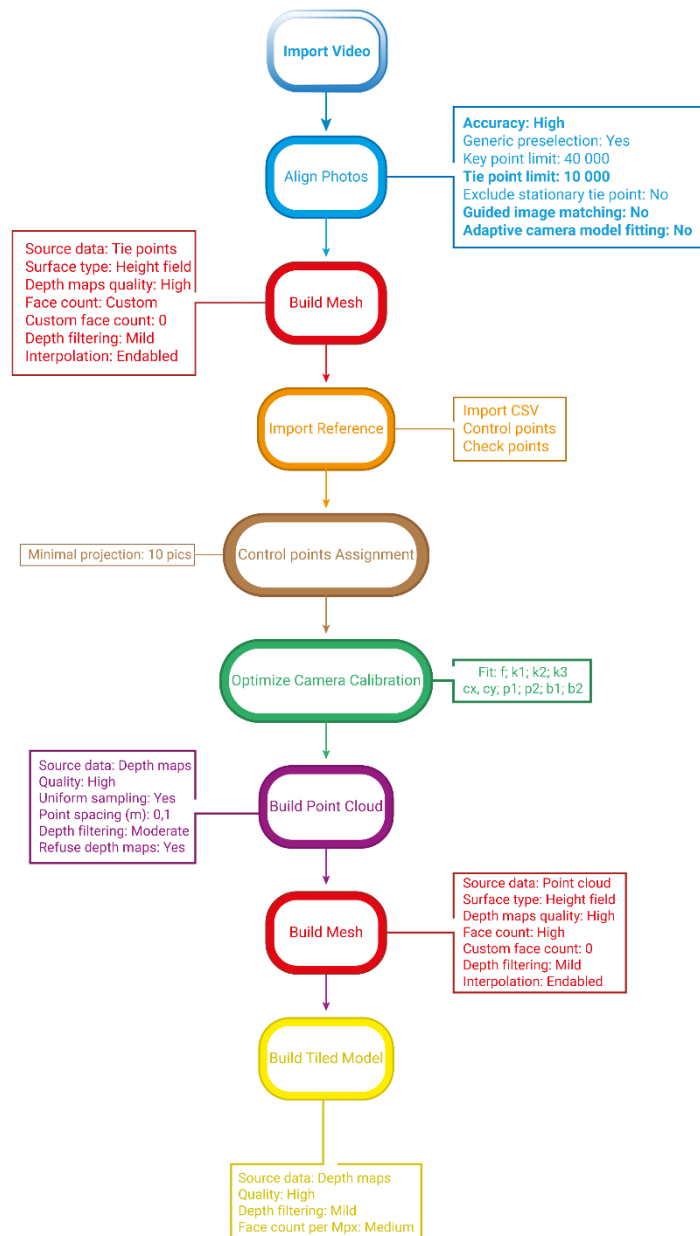
Ze stavebnice LEGO bylo vytvořeno autonomní robotické vozidlo, na které byl umístěn fotoaparát Olympus M-EM1 Mark II. Vozidlo bylo poháněno elektromotorem a ovládáno dálkovým ovladačem, díky čemuž byla zajištěna jednotná dráha a konstantní rychlost pohybu při natáčení jednotlivých videozáznamů s rozdílným nastavením viz Obr. 4.22. Na fotoaparátu byl nastaven manuální režim videa čas expozice byl nastaven na hodnotu 1/500 s, clonové číslo na f/5 a ISO 200. Kamera byla mírně sklopena, aby zabírala jak všechny čtyři obvodové stěny kostky, tak i její horní stěnu.



Obr. 4.22 Testování s pomocí autonomního robotického vozidla.

Bylo otestováno nastavení videa s rozlišením 4K a snímkovou frekvencí 25 a 30 FPS a rozlišení FHD se snímkovou frekvencí 25, 30 a 50 FPS. Délka jednoho videa byla v průměru 19 sekund. Pod Rubikovu kostku byl umístěn papír s nakreslenými vřícovacími a kontrolními body, ale z důvodu průběhu experimentu ve vnitřním prostředí nemohly být body geodeticky zaměřeny. Později bylo zjištěno, že program Agisoft Metashape, ve kterém probíhalo zpracování, nedokáže správně určit vzdálenosti bez souřadnic zaměřených bodů. Proto byl tento experiment později zopakován s Rubikovou kostkou umístěnou na milimetrovém papíře a se souřadnicemi bodů mezi sebou v lokálním souřadnicovém systému. Tímto způsobem bylo zaznačeno 6 vřícovacích a 2 kontrolní body.

Natočená videa byla naimportována do programu Agisoft Metashape a převedena na jednotlivé snímky. Zarovnání fotek proběhlo s odlišným nastavením oproti první případové studii s videi natočenými z dronu. V tomto případě mohla být zvolena přesnost zarovnání na *High*. *Tie point limit* byl nastaven na 10 000. *Guided image matching* a *Adaptive camera model fitting* byly nastaveny na *No*. Další kroky byly obdobné jako při zpracování první případové studie s tím rozdílem, že posledním krokem nebylo vytvoření DEM a Ortomozaiky, ale pomocí nástroje *Build Tiled Model* byl vytvořen 3D model kostky. Vstupními daty do tohoto nástroje jsou *Depth maps*.



Obr. 4.23 Postup zpracování videogrammetrie na malém modelu.

4.2.3 Vyhodnocení

Při této případové studii bylo natočeno celkem sedm videozáznamů. Jak již bylo řečeno, případová studie byla zpracována dvakrát, z důvodu nevhodného prvotního definování vličovacích a kontrolních bodů. Výstupem byl 3D model, který by se dal využít k dalšímu zpracování, například 3D tisku. Bylo otestováno rozlišení 4K a FHD na fotoaparátu Olympus. Počet pixelů fotoaparátu a dronu, který byl součástí první případové studie, je odlišný. U fotoaparátu je počet pixelů 3840×2160 , zatímco dron disponoval pixely 4096×2160 . To je způsobeno odlišnou velikostí snímačů. Snímkové frekvence byly nastaveny na 25, 30 a 50 FPS. Při první zpracování byla délka videa v průměru 18 sekund, při druhém zpracování přibližně 10 sekund. Tento rozdíl vznikl z důvodu odlišných drah, fotoaparát se

V prvním případě pohyboval po kružnici s průměrem asi 180 cm, v případě druhém měla kružnice průměr přibližně 70 cm. Z důvodu kratších videozáznamů byly zarovnané všechny vyexportované snímky při všech nastaveních FPS.

Tab. 4.8 Porovnání počtu vytvořených snímků

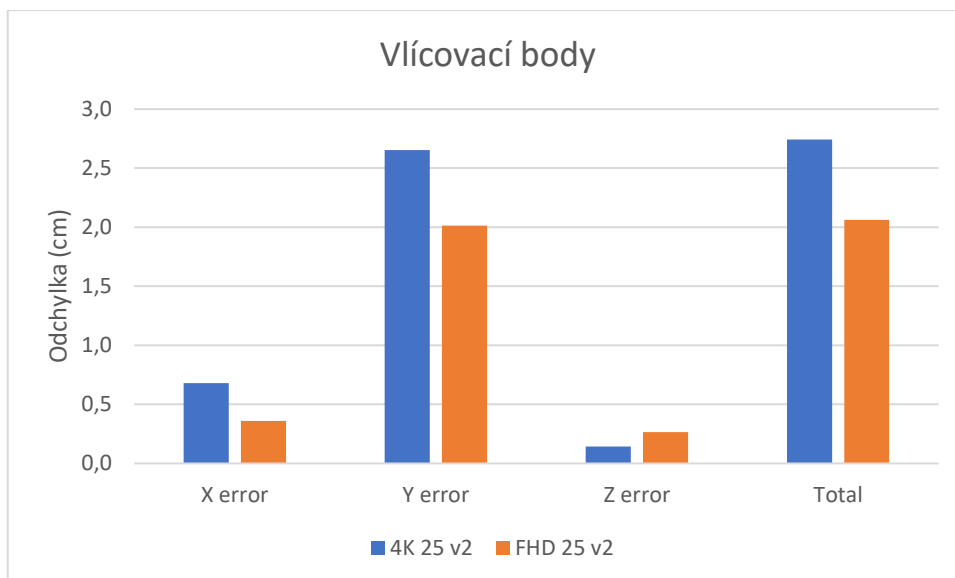
| Nastavení | Rozlišení | FPS | Snímků celkem | Snímků zarovnaných |
|------------------|------------------|------------|----------------------|---------------------------|
| 4K 25 | 3840 x 2160 | 25 | 437 | 437 |
| 4K 30 | 3840 x 2160 | 30 | 494 | 494 |
| FHD 25 | 1920 x 1080 | 25 | 487 | 487 |
| FHD 30 | 1920 x 1080 | 30 | 565 | 565 |
| FHD 50 | 1920 x 1080 | 50 | 844 | 844 |
| 4K 25 v2 | 3840 x 2160 | 25 | 263 | 263 |
| FHD 25 v2 | 1920 x 1080 | 25 | 293 | 293 |

Nejvíce vázacích bodů bylo nalezeno při nastavení videa FHD 50 FPS, což bylo způsobeno právě vysokou snímkovou frekvencí. Naopak nejméně vázacích bodů bylo nalezeno při druhém snímání s rozlišením 4K a 25 FPS. Co se týče bodového mračna, tak právě tam, kde bylo nejméně vázacích bodů, je nejvíce bodů Point Cloud. Největší počet bodů bodového mračna byl vytvořen při nastaveném rozlišení 4K.

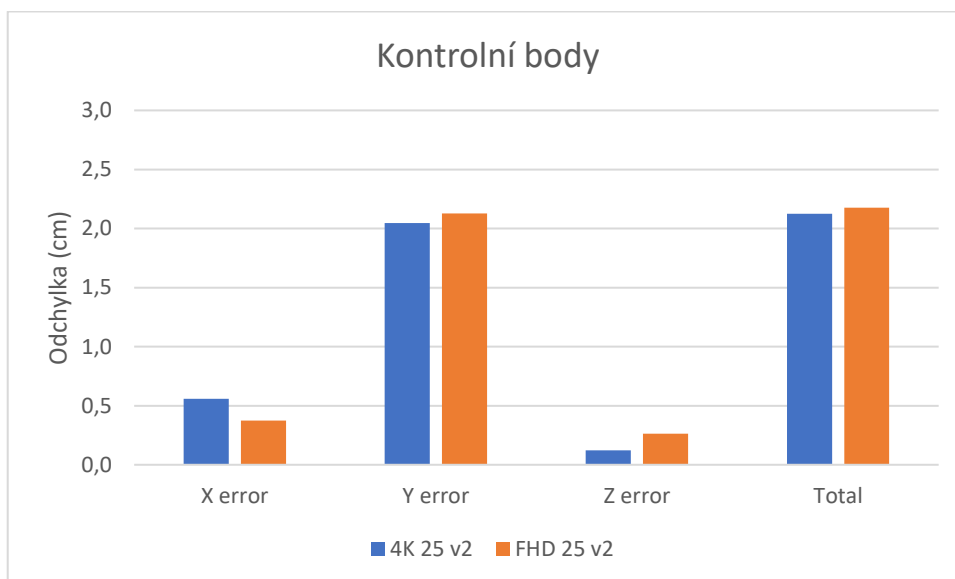
Tab. 4.9 Porovnání vázacích bodů a bodového mračna

| Nastavení | Tie points | Point cloud |
|------------------|-------------------|--------------------|
| 4K 25 | 169 145 | 8 436 478 |
| 4K 30 | 111 301 | 12 297 515 |
| FHD 25 | 125 916 | 2 709 185 |
| FHD 30 | 140 299 | 3 155 199 |
| FHD 50 | 209 507 | 3 124 745 |
| 4K 25 v2 | 74 781 | 18 000 650 |
| FHD 25 v2 | 98 985 | 5 902 546 |

V případě vřícovacích a kontrolních bodů bylo možné porovnat pouze testování při druhém snímání, z důvodu absence souřadnicového systému u prvního snímání. Hodnoty odchylek u obou nastavení jsou srovnatelné. V obou případech je odchylka v ose Z zanedbatelná. Všechny body byly zaznamenány na papíře velikosti A3 položeném na podlaze, a proto hodnoty odchylek dosahují maximálně 0,3 cm. V případě vřícovacích bodů jsou ostatní odchylky vyšší přibližně o 0,5 cm při rozlišení 4K. U kontrolních bodů jsou hodnoty téměř úplně totožné. Dosahují maximálně 2 cm v ose Y.



Obr. 4.24 Porovnání odchylek na vlícovacích bodech.

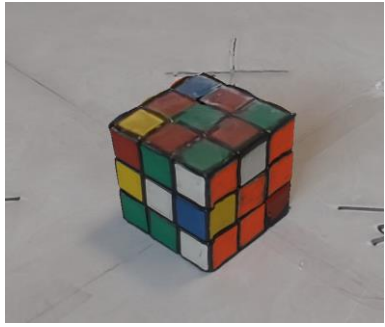
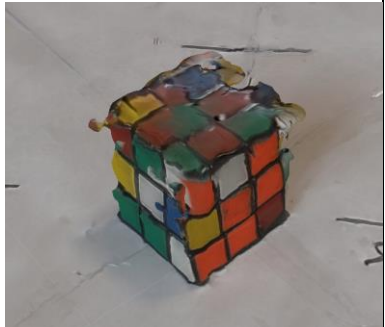


Obr. 4.25 Porovnání odchylek na kontrolních bodech.

Poslední parametr, který lze porovnat u druhého zpracování, je rozlišení na zemi GSD, kde bylo změřeno 85,5 $\mu\text{m}/\text{pix}$ při 4K a 164,3 $\mu\text{m}/\text{pix}$ u FHD. Rozdíl je tedy dvojnásobný.

Poslední tabulka ukazuje vzhled jednotlivých modelů. Z výsledků je patrné, že zvyšující se snímková frekvence vytváří na výsledném modelu chybně vzniklé fragmenty. Z rovných stěn vznikají nerovné, někdy i propadlé plochy. Dále je vidět, že z videozáznamu vytvořeného z větší vzdálenosti vznikly modely s lepším vzhledem, než z videozáznamu pořízeného z mnohem menší vzdálenosti (verze v2).

Tab. 4.10 Vzhled modelu dle nastaveného rozlišení a FPS

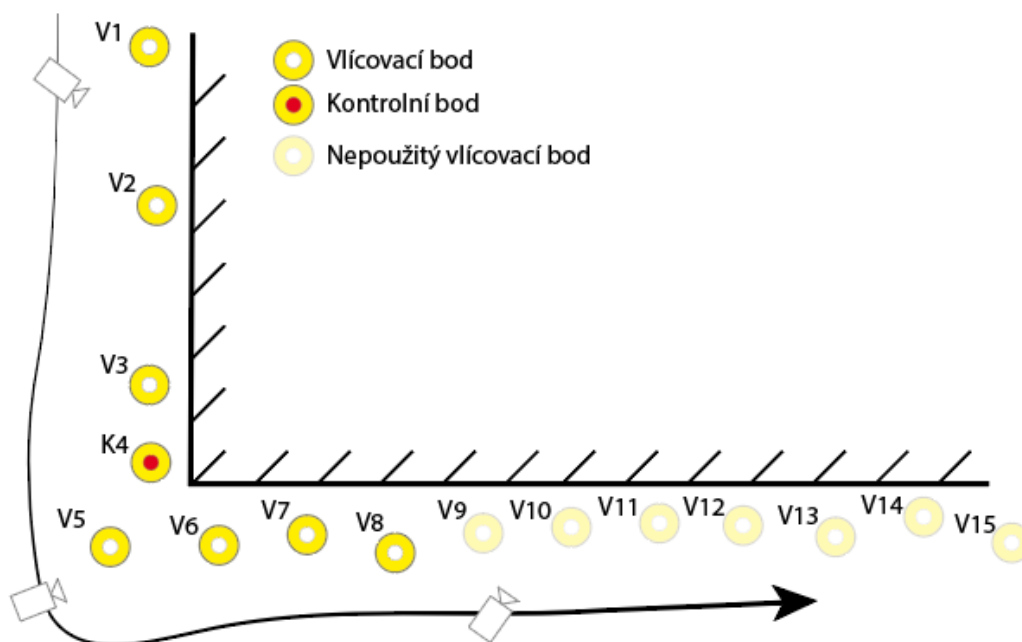
| Nastavení | Vzhled modelu | Nastavení | Vzhled modelu |
|-----------|---|-----------|---|
| 4K 25 |  | 4K 30 |  |
| FHD 25 |  | FHD 30 |  |
| FHD 50 |  | | |
| 4K 25 v2 |  | FHD 25 v2 |  |

4.3 Třetí případová studie – Budova

Třetí případová studie byla zpracována opět ve venkovním prostředí. Na jeden úchyt viz Obr. 4.26. byly umístěny dva fotoaparáty značky Olympus. Takto umístěné fotoaparáty měly podobné objektivy, tedy i úhel záběru, a stejné nastavením expozice. Následně bylo podél budovy rozmístěno 15 bodů označených žlutým CD s nakresleným symbolem X z důvodu větší přesnosti. Body byly zaměřeny geodetickou GPS s přesností 0,05m. Trasa snímání zájmového území měřila přibližně 68 m. Podél těchto bodů bylo natočeno video na oba fotoaparáty v jeden moment s nastavením videa při rozlišení 4K 25 FPS a FHD 25 FPS. Následně bylo dotočeno další video s nastavením FHD 50 FPS. Směr pohybu byl podél budovy, rychlost pohybu byla chůze, přibližně čtyři km/h. Fotoaparáty směřovaly na stěnu budovy pod úhlem asi 30°.



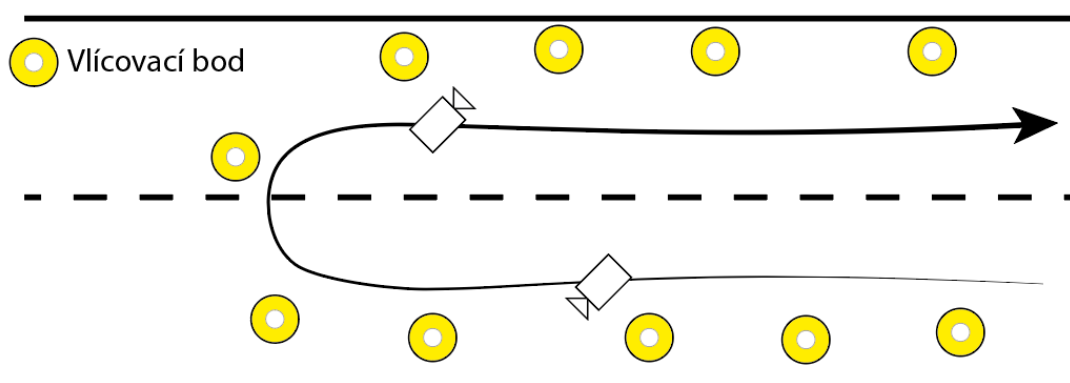
Obr. 4.26 Umístění kamer na úchytu.



Obr. 4.27 Rozmístění VB a KB a směr pohybu kamery.

Takto natočené videozáznamy byly nahrány do programu Agisoft Metashape a zpracovány s totožným nastavením, jako v případové studii číslo dva – kostka viz Obr. 4.23.

Vzhledem k tomu, že výsledky z této případové studie nebyly vyhodnoceny jako uspokojivé, bylo rozhodnuto vypracovat tuto případovou studii znovu s odlišným přístupem. Bylo vybráno nové místo – ulice v obytné části města, kde bylo následně zaměřeno 12 vlíčovacích bodů. Ty byly rozmístěny na oba kraje silnice do poloviny ulice a podél nich bylo natočeno video opět s fotoaparáty umístěnými na úchyty viz Obr 4.26. Bohužel se při následném zpracování ukázalo, že výsledky z takto pořízených videozáznamů jsou zcela nepoužitelné a bylo přistoupeno k vyhodnocení prvního zpracování.



Obr. 4.28 Rozmístění VB a KB a směr pohybu kamery – nevyhovující.

4.3.1 Vyhodnocení dat

Z důvodu neúplného zarovnání snímků v zájmové oblasti nelze objektivně vyhodnotit naměřené hodnoty této případové studie. Z celkového počtu 15 zaměřených bodů bylo vybráno prvních osm, které byly na alespoň 10 snímcích přiřazeny k souřadnicím. Zbylé souřadnice bodů byly smazány, aby neměly vliv na naměřené odchylky.

Jednotlivé videozáznamy měly dobu trvání přibližně jednu minutu, z čehož bylo vyexportováno 1560 snímků při nastavené frekvenci 25 FPS a 3 323 snímků při frekvenci 50 FPS. Bylo otestováno rozlišení 4K a FHD. Nejvyšší úspěšnost zarovnání byla u snímků z videa s rozlišením 4K 25 FPS, konkrétně 67,35 %, v ostatních případech byla úspěšnost méně než 50%.

Tab. 4.11 Porovnání úspěšnosti zarovnání snímků

| Nastavení | Rozlišení | Snímková frekvence | Snímků celkem | Snímků zarovnaných | Úspěšnost zarovnání |
|-----------|-------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------------|
| 4K 25 | 3840 x 2160 | 25 | 1 562 | 1 052 | 67,35 % |
| FHD 25 | 1920 x 1080 | 25 | 1 560 | 708 | 45,38 % |
| FHD 50 | 1920 x 1080 | 50 | 3 323 | 1 058 | 31,84 % |

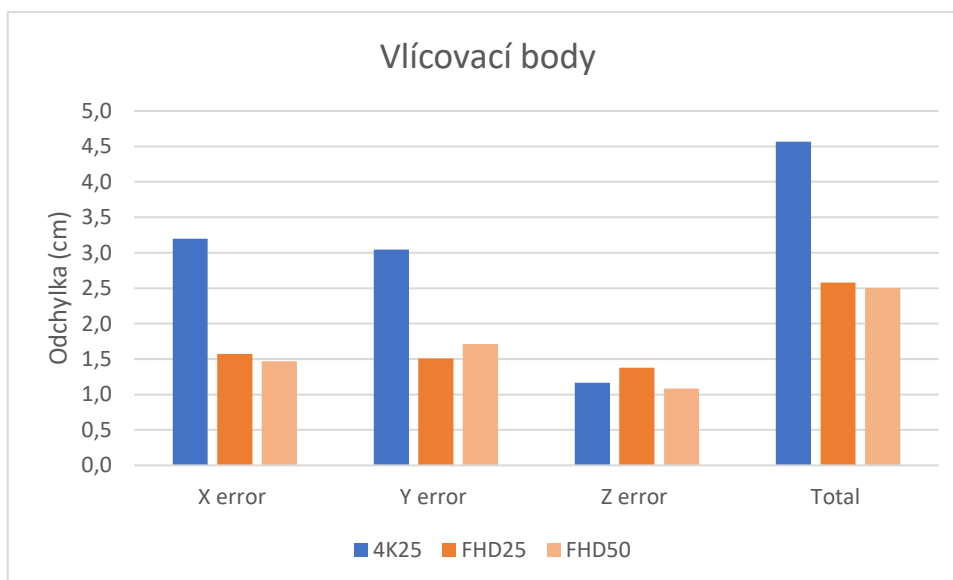
V případě vázacích bodů bylo největší množství bodů zjištěno při nastavení videa FHD 50 FPS. V tomto případě byla oblast se zarovnanými snímky nejmenší, ale díky vysoké snímkové frekvenci bylo nalezeno téměř trojnásobné množství bodů oproti snímkové frekvenci 25 FPS. Nejvíce bodů bodového mračna vzniklo při nastavení videa 4K 25 FPS z důvodu, že úspěšnost zarovnání byla 67 %.

Tab. 4.12 Porovnání počtu vázacích bodů a bodového mračka

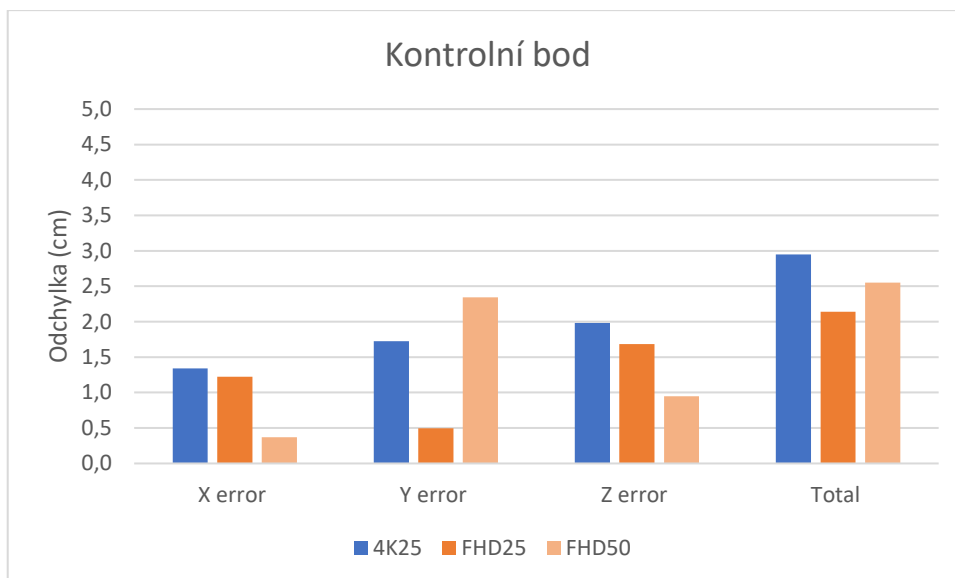
| Nastavení | Tie points | Point cloud |
|-----------|------------|-------------|
| 4K 25 | 92 883 | 47 409 518 |
| FHD 25 | 85 611 | 9 602 410 |
| FHD 50 | 257 202 | 8 869 899 |

Největší odchylky na vlíčovacích bodech byly naměřeny při nastavení rozlišení 4K a 25 FPS. Konkrétně byla největší odchylka v ose X minus pět cm a pět cm na bodech jedna a tři. V ose Y tři cm a minus pět cm na bodech pět a osm. Kvůli těmto důvodům byla celková odchylka 4,5 cm. U videozáznamů s nastavením rozlišení FHD byly odchylky srovnatelné.

Odchylky na kontrolním bodě nedosahují tak vysokých hodnot, jako u vlíčovacích bodů. Celková největší odchylka byla opět při nastavení 4K 25 FPS, dosahovala necelých třech centimetrů. Dále 2,55 cm bylo naměřeno při nastavení FHD 50 FPS a 2,13 bylo při nastavení FHD 25 FPS.



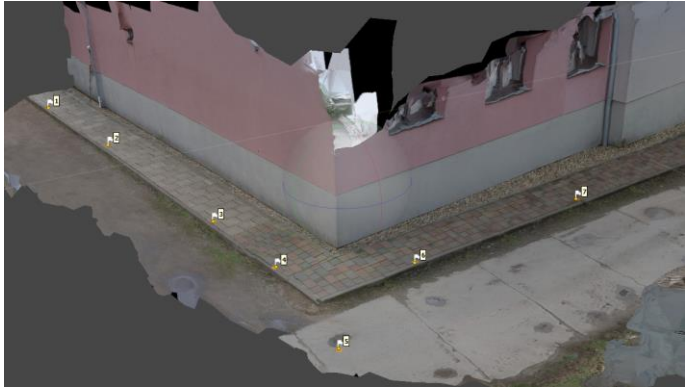
Obr. 4.29 Porovnání odchylek na vlíčovacích bodech.



Obr. 4.30 Porovnání odchylek na kontrolním bodě.

Model vypadá vzhledem nejlépe při nastavení 4K 25 FPS. Plochy stěn jsou rovné, roh budovy má pravý úhel, pouze textura chodníku je poblíž rohu lehce zdeformovaná. Při nastaveném rozlišení FHD a 50 FPS vypadá model vzhledově také velmi dobře, avšak stěny nejsou zcela rovné, v některých místech se na nich objevují chybné fragmenty. Při nastavení FHD 25 FPS vzniklo spoustu nerovností na plochách, které by měly být rovné. V případě dalšího zpracování by bylo potřeba model zhladit. Důvodem, proč toto nastavení videa dopadlo vzhledově hůř, než s 50 snímkovou frekvencí, může být v odlišném fotoaparátu při záznamu videa, přesto, že nastavení a úhel záběru byly totožné. V ostatních případech byl použit fotoaparát Olympus E-M1 Mark II, v tomto případě však Olympus E-M10 Mark II, který je generačně starší a nemá například tak rychlé přeastřování.

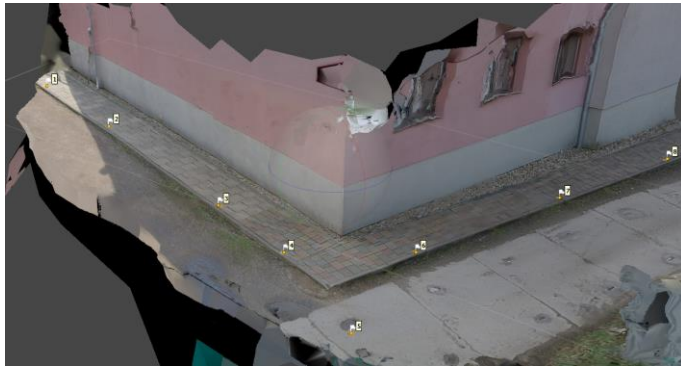
Tab. 4.13 Porovnání vzhledu modelu dle nastaveného rozlišení a FPS

| Nastavení | Vzhled modelu |
|-----------|--|
| 4K 25 |  |

FHD 25



FHD 50



5 VÝSLEDKY

Při zpracování jednotlivých případových studií byla otestována různá nastavení a přístupy. Na zařízeních byly nastaveny stejné hodnoty expozice a při zpracování byly použity stejná nastavení, aby mohly být výstupy porovnávány mezi sebou. Při testování bylo měněno rozlišení videa a snímková frekvence. Z důvodu složitosti nastavení programu Agisoft Metashape Professional, ve kterém probíhalo zpracování případových studií, byly vytvořeny dva skupinové procesy uložené do souboru XML, které lze importovat do programu při dalším testování. Tyto soubory jsou součástí výstupů a dostupné ke stažení z webu práce.

První případová studie – Kaplička

V případě první případové studie, která byla zpracovávána s pomocí UAV, bylo prokázáno, že snímková frekvence 25 FPS při rychlosti pohybu dronu 1,8 m/s má za následek vytvoření příliš velkého množství snímků a také příliš velký překryv, což vede k neúspěšnému zarovnání velkého množství snímků a časově náročnému zpracování. Pro výpočet překryvů snímkového letu se svislou kamerou byla vytvořena tabulka se vzorci v programu Microsoft Excel. Hlavním zdrojem byla podobně vytvořená tabulka na webových stránkách pix-pro.com. Vzorce pro výpočet parametrů byly čerpány právě z tohoto webu a také z webu calculatorsoup.com

$$ms = \frac{\frac{Ws+Hs}{10} \times 0,393700787}{\frac{Wp+Hp}{10}} \times 2,54 \quad (1)$$

kde:

Ws – šířka snímáče v milimetrech

Hs – výška snímáče v milimetrech

Wp – počet pixelů delší strany

Hp – počet pixelů kratší strany

$$ms = \frac{Hg}{f} \quad (2)$$

kde:

ms – měřítko snímkování

f – ohnisková vzdálenost v milimetrech

Hg – průměrná výška letu nad terénem v metrech

$$GSD = \frac{Ws \times Hg \times 1000}{f \times Vw} \quad (3)$$

kde:

GSD – rozlišení na zemi v milimetrech na pixel

Ws – šířka snímáče v milimetrech

Hg – Průměrná výška letu nad terénem v metrech

f – ohnisková vzdálenost v milimetrech

Vw – délka delší strany snímku v pixelech

$$B = \frac{v \times 100}{FPS} \quad (4)$$

kde:

B – vzdálenost mezi středy snímků v centimetrech

v – rychlost letu v metrech za sekundu

FPS – snímková frekvence

$$Hsg = \frac{ms \times Hs}{10} \quad (5)$$

kde:

Hsg – výška snímače promítnutá na zemi v centimetrech

ms – měřítko snímkování

Hs – výška snímače v milimetrech

$$Dpe = Hsg - B \quad (6)$$

kde:

Dpe – délka překryvu v centimetrech

Hsg – výška snímače promítnutá na zemi v centimetrech

B – vzdálenost mezi středy snímků v centimetrech

$$PE = \frac{Dpe}{Hsg} \times 100 \quad (7)$$

kde:

PE – procentuální překryv

Dpe – délka překryvu v centimetrech

Hsg – výška snímače promítnutá na zemi v centimetrech

Tab. 4.14 Vzhled vytvořené kalkulačky v programu Microsoft Excel

| DJI Phantom 4 Pro, Phantom 4 Adv, Phantom RTK | | | |
|---|---|----------|----------|
| | Název | Hodnota | Jednotky |
| Zadané parametry | Ohnisková vzdálenost objektivu, mm | 8,8 | mm |
| | Šířka sensoru, mm | 13,2 | mm |
| | Výška sensoru, mm | 8,8 | mm |
| | Počet pixelů delší strany, pix | 5 472 | px |
| | Počet pixelů kratší strany, pix | 3 648 | px |
| | Výška letu, m | 25 | m |
| | Rychlost letu, m/s | 1,8 | m/s |
| | Snímková frekvence, FPS | 8,3 | FPS |
| | Rozlišení videa (délka delší strany), pix | 4 096 | pix |
| Výsledky | Velikost pixelu | 0,002412 | mm |
| | Měřítkové číslo snímkování | 2 840,91 | |
| | Maximální rychlost závěrky | 196,61 | /s |
| | Rozlišení na zemi (GSD) | 9,16 | mm/pix |
| | Vzdálenost mezi středy snímků | 21,69 | cm |
| | Výška snímače promítnutá na zemi | 2 500,00 | cm |
| | Délka překryvu | 2 478,31 | cm |
| | Podélný překryv | 99,13 | % |

Dle výpočtů a testování je maximální vhodný překryv 99,13 %, tedy 8,33 FPS při rychlosti 1,8 m/s ve výšce 25 metrů nad zemí. Snímková frekvence 50 FPS nemohla být zpracována, což ovšem neznamená, že ji v žádných případech není možné využít. V případě, že by dron letěl rychlostí 10 m/s ve výšce 20 m nad zemí s odpovídající rychlostí závěrky, byly by podélné překryvy 99 %.

Dále bylo zjištěno, že let se šikmou kamerou okolo objektu zájmu s rozlišením 4K má výsledné rozlišení na zemi srovnatelné se snímkováním se svislou kamerou a rozlišením FHD. Další výhodou letu se šikmou kamerou je, že v tomto případě trvalo snímání pouze 30 sekund, zatímco při snímání podle plánu letu trvalo pět minut a také, že dalším výstupem může být 3D model, protože jsou nasnímány i svislé stěny. Hlavní nevýhodou tohoto zpracování je, že výsledná ortomozaika nedosahuje takové kvality, jako při snímání se svislou kamerou. Co se týče vličovacích a kontrolních bodů jsou výsledky videogrammetrie srovnatelné s fotogrammetrií ve všech případech, kromě nastavení FHD 25 FPS, kdy byla naměřena odchylka trojnásobná, oproti ostatním nastavením. Důvod vzniku této odchylky nebyl nalezen.

Druhá případová studie – Kostka

Ve druhé případové studii bylo otestována metoda videogrammetrie na modelu malého rozměru. Testování probíhalo s pomocí fotoaparátu umístěném na autonomním robotickém vozidle, aby bylo zajištěna konstantní dráha a rychlost pohybu. Z naměřených hodnot lze porovnat nastavené rozlišení 4K a FHD při snímkové frekvenci 25 FPS. V tomto případě byly odchylky na vličovacích a kontrolních bodech velmi podobné. Největší hodnoty byly naměřeny v ose Y. Při nastaveném rozlišení FHD je výsledná hodnota dvojnásobná než u rozlišení 4K, což má za následek horší rozlišení GSD. Při prvním testování byla vzdálenost mezi kamerou a objektem zájmu větší, díky čemuž měl výsledný model rovné plochy a neobsahoval chybně vzniklé fragmenty.

Třetí případová studie – Budova

Třetí případová studie se setkala s významnými problémy během zpracování, což vedlo k obtížím při vyhodnocování a výsledná analýza nedopadla uspokojivě. Byl pořízen videozáznam zájmové oblasti, ze kterého byly následně zarovnané snímky s maximální úspěšností 66 % při nastaveném rozlišení 4K a 25 FPS. V ostatních případech bylo množství správně zarovnaných snímků mnohem nižší. Důvodem neúspěšného zarovnání je pravděpodobně směr pohybu při natáčení videa. V tomto případě byl směr pohybu přímý, namísto směru okolo objektu zájmu po kružnici. Následkem toho byly překryvy nedostatečné, a to i při snímkové frekvenci 50 FPS.

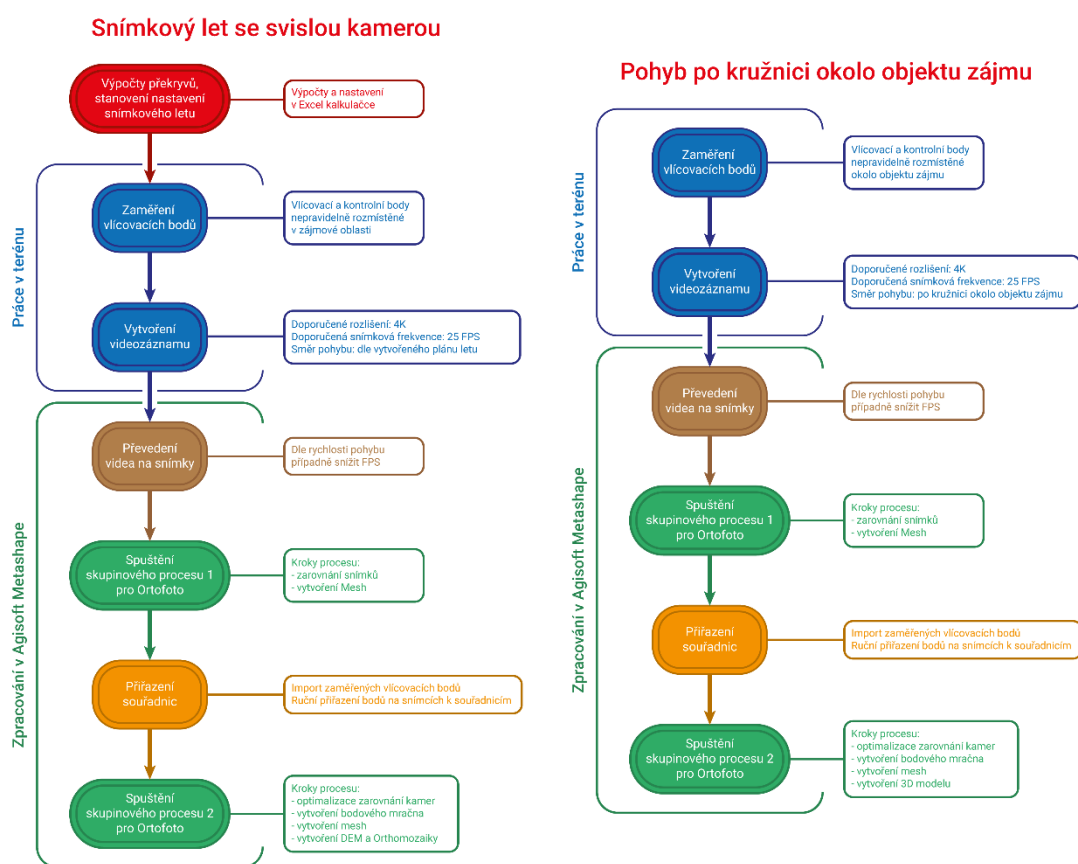
Stanovení optimálního postupu

Optimální postup zpracování pro použití videa jako zdroje dat pro fotogrammetrii je nutné rozdělit dle způsobu snímání objektu, je-li pohyb kamery dle plánu letu a směr kamery svislý, postup, nastavení zpracování a výstupy jsou odlišné od snímání objektu se šikmou kamerou a pohybem okolo objektu zájmu. Dle zpracování třech případových studií je optimální rozlišení videa 4K a snímková frekvence 25 FPS. Kamery, se kterými byly vytvořeny videozáznamy neumožňovaly nastavení vyššího rozlišení a snímková frekvence 25 FPS byla optimální z důvodu

Se svislou kamerou je nutné nejprve provést výpočty překryvů dle vytvořené kalkulačky a případně upravit nastavení letu a snímkové frekvence. Následuje rozmístění a zaměření vličovacích a kontrolních bodů, samotný snímkový let se záznamem videa. Po těchto pracích v terénu je nutné další zpracování v programu Agisoft Metashape. V programu proběhne převedení videa na jednotlivé snímky a spustí se skupinový proces číslo jedna pro Ortofoto, ve kterém jsou přednastaveny kroky k zarovnání snímků a tvorbě mesh.

Následuje ruční přiřazení vličovacích a kontrolních bodů na snímcích k zaměřeným souřadnicím na minimálně desíti odlišných snímcích pro každý bod. Poté se spustí Skupinový proces číslo dva pro Ortofoto, ve kterém je přednastavena optimalizace zarovnání kamer, tvorba mesh a bodového mračna a následně vytvoření DEM a Ortomosaiky.

V případě snímání se šikmou kamerou je vhodné rozmístit vličovací a kontrolní body okolo objektu zájmu, a to i v případě, že by snímání probíhalo v podmínkách bez možnosti zaměření bodů pomocí GPS. V takovém případě se umístí model na milimetrový papír a body jsou zaznačeny v mřížce. Následuje pořízení videozáznamu, pokud možno při konstantní rychlosti po kružnici okolo objektu zájmu se šikmou kamerou. Poté následuje zpracování v programu Agisoft Metashape, kde je video převedeno na jednotlivé snímky. Následně se spustí Skupinový proces jedna pro model, při kterém dojde k zarovnání snímků a vytvoření mesh. Dále je nutné přiřadit vličovací a kontrolní body na snímcích k zaměřeným souřadnicím. Následuje spuštění Skupinového procesu dva pro model, který optimalizuje zarovnání kamer, vytvoří bodové mračno, mesh a následně 3D model.



Obr. 5.1 Optimální postup zpracování.

6 DISKUZE

Byly zpracovány tři případové studie, během kterých se autor práce potýkal s řadou problému. Všechny případové studie byly zpracovány několikrát, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků.

Při zpracování první případové studie mohly být výsledky zkresleny vlivem větru. Při letu s ručním ovládáním mohla vzniknout odchylka z důvodu odlišné dráhy a nekonstantní rychlosti letu. Zpracování pořízených videozáznamů z této případové studie bylo velmi náročné jednak časově, ale také na výkon počítačů. Z důvodu nedostatečného výkonu počítače autora práce byl využit počítač na katedře geoinformatiky, který byl spravován pomocí vzdálené plochy. I přesto byla doba zpracování několik hodin a často skončila chybou z důvodu nedostatku paměti v zařízení.

U druhé případové studie byly prvotní potíže spojené se způsobem snímání modelu. Autor musel přehodnotit původní záměr otáčet modelem okolo jeho osy a přistoupit k pohybu kamery okolo modelu, čemuž předcházela literární rešerše a seznámení se s metodou SfM. Výsledky mohly být mírně zkresleny i z důvodu rozdílné dráhy pohybu.

Ve třetí případové studii nemohla být použita metoda SfM z důvodu snímání velkého objektu. Proto bylo přistoupeno k pohybu po přímce. Pravděpodobně z těchto důvodů nebylo správně zarovnáno dostatečné množství snímků a nemohl tak vzniknout model celého zájmového území. Tato případová studie byla opět vypracována několikrát se snahou dosáhnout co nejlepších výsledků.

Celá práce byla zpracovávána pouze v programu Agisoft Metashape Professional, k němuž byla školou poskytnutá licence. I přes počáteční problémy se software ukázal jako plně dostačující. Z uvedené literární rešerše je také zřejmé, že výše zmíněný program je využíván pro fotogrammetrické účely na profesionální úrovni velmi často.

Během zpracování byly zjištěny zásadní mezi snímkem pořízeným vyfotografováním a snímkem vyexportovaným z videa. Vyfotografovaný snímek obsahuje velké množství metadat – EXIF, s informacemi jako je hodnota ISO, čas závěrky, nebo clonové číslo. V případě snímku pořízeného z dronu je zde i přibližná poloha v podobě souřadnic. U snímku vytvořeného z videa se takovéto informace nikam neukládají. Jediné dostupné informace jsou rozlišení videa a snímková frekvence. Dále také bylo zjištěno, že při zpracování fotografií dokáže program Agisoft Metashape sám vypočítat velikost pixelu. Při zpracování videa nikoliv. Avšak EXIF informace je možné si zaznačit při snímkování v terénu a velikost pixelu a další parametry lze ve většině případů vypočítat. Zásadní nevýhoda je spíše ta, že při natáčení videa je v zařízení předdefinovaný poměr stran, obvykle 16:9, přitom snímač má poměr stran jiný (2:3, 4:3). Z čehož plyne, že nelze využít celý snímač a vždy dojde k ořezu snímků. Také je potřeba zmínit, že fotografie lze pořídit i ve formátu RAW, který obsahuje více informací a umožňuje větší možnosti následného zpracování, což ze snímku pořízeného z videa není možné. Dále také že snímek pořízený fotograficky lze vytvořit s mechanickou závěrkou, ale u videa lze použít pouze elektronickou závěrku.

Nespornou výhodou videa ale je to, že generuje velké množství jednotlivých snímků, obzvlášť při vysoké snímkové frekvenci. Problém nastává, má-li zdrojové video dobu trvání pět minut, snímková frekvence je příliš vysoká a rozlišení je nastaveno například na 4K. V takovém případě má videozáznam velikost na disku přibližně 3,5 GB. Bylo zjištěno, že jeden vyexportovaný snímek z videa pořízeného dronem DJI Phantom 4 Pro má průměrně velikost 17,5 MB. V případě pěti minutového videa při snímkové frekvenci 50 FPS by tedy vzniklo 15 000 snímků o celkové velikosti 262 GB. Což vyžaduje dostatek místa na disku, ale především je nesmírně náročné na zpracování. Větší potenciál využití vysoké snímkové

frekvence by mělo zvýšení rychlosti pohybu kamery. V takovém případě by například dron nasnímal celou oblast za kratší čas a překryvy by byly přesto dostatečné. Tento způsob byl otestován pouze částečně, protože aplikace, ve které byl nastaven plán letu omezila maximální rychlost pohybu a v případě ručního ovládání nebylo možné letět dostatečně rychle a systematicky nad snímanou oblastí.

Pokračováním této diplomové práce by mohlo být využití stereopáru kamer a porovnání s natočením záznamu pouze jednou kamerou v případě přímého pohybu. Nebo otestování videogrammetrie s dronem a vysokou rychlostí pohybu, například z letadla. V takovém případě by pravděpodobně mělo smysl využití vysoké snímkové frekvence 50 FPS.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat základní požadavky na použití videa jako zdroje dat pro fotogrammetrii. Byly vypracovány tři případové studie formou experimentu, kde předmětem zkoumání bylo rozlišení videa, respektive snímků z něj, a snímková frekvence videa.

První případová studie byla zpracována v oblasti fyzickogeografické. Byl proveden snímkový let s UAV, při kterém byl pořízeny snímky metodou fotogrammetrie, následně při stejném nastavení expozice byly pořízeny videozáznamy s nastavením rozlišení videa 4K a FHD a snímkovou frekvencí 25 FPS a 50 FPS. Dále byl proveden let se šikmou kamerou okolo objektu zájmu po kružnici s rozlišením 4K při snímkové frekvenci 25 FPS a 50 FPS. Takto vytvořená videa a fotografie byla zpracována v programu Agisoft Metashape Professional a výsledky porovnány mezi sebou. Během zpracování bylo zjištěno, že snímková frekvence 50 FPS při rychlosti pohybu dronu 1,8 m/s je příliš vysoká a generuje velké množství fotografií, které nelze následně zpracovat. Dle výsledků bylo zjištěno, že při této rychlosti ve výšce letu 25 metrů nad zemí je optimální snímková frekvence 8,3 FPS. Dále bylo potvrzeno, že vyšší rozlišení má za následek větší rozlišení na zemi. Z videa pořízeného se šikmou kamerou při rozlišení 4K je možné dosáhnout stejného rozlišení na zemi, jako při snímkovém letu se svislou kamerou při rozlišení FHD, a to za mnohem kratší čas. Pro zjednodušení následného zpracování byla vytvořena kalkulačka v programu Microsoft Excel, která je k dispozici na webových stránkách diplomové práce.

Předmětem druhé případové studie bylo otestování pořízení videa na modelu malého rozměru za účelem vytvoření 3D modelu. Experiment byl zpracován několikrát. Testování probíhalo v laboratorních podmínkách při zachování konstantních světelných podmínek, stejné rychlosti a dráhy pohybu kamery. Bylo zjištěno, že pro správné zarovnání snímků je nezbytné mít model i jeho okolí dostatečně nasvícené, a také že při pořízení videa z větší vzdálenosti vznikne na modelu menší množství chybných fragmentů. Byla otestována rozlišení 4K a FHD na fotoaparátu s výměnným objektivem. Byly otestovány snímkové frekvence 25, 30 a 60 FPS při rozlišení 4K a FHD. Dle výsledků je vhodnější nižší snímková frekvence, tedy 25 FPS, při které má výsledný model menší množství zdeformovaných ploch.

Třetí případová studie byla vypracována v oblasti městské zástavby. Terénní šetření proběhlo dvakrát a ani v jednom případě nepřineslo uspokojivé výsledky. Směr pohybu kamery byl přímý, místo pohybu po kružnici, což bylo pravděpodobně hlavním důvodem chybného zarovnání pořízených snímků z videa. Přesto proběhlo zpracování prvního terénního šetření této případové studie s následným porovnáním výsledků napříč odlišným nastavením videa. Bylo zjištěno, že i v tomto případě přináší lepší výsledky nastavení videa s rozlišením 4K a snímkovou frekvencí 25 FPS.

Po zpracování třech případových studií lze konstatovat, že rozlišení videa má zásadní vliv na vzhled finálního obrazu. Při vyšším rozlišení má výsledný model i ortomozaika vyšší rozlišení na zemi, které se však ani při vysoké snímkové frekvenci nevyrovná snímkům pořízeným metodou fotogrammetrie. Dále bylo potvrzeno, že vysoká snímková frekvence má ve většině případů negativní vliv na výsledný obraz. Použití nízké rychlosti pohybu a vysoké snímkové frekvence způsobuje nadměrné množství snímků, které vede k větším nárokům na úložiště a tím i vysoké náročnosti na zpracování. Vzhledem k tomu, že se nepodařilo zaznamenat nežádoucí efekt „rolling shutter“ na žádném z pořízených snímků, nemohla být tato vada dále zkoumána a testována. Důvodem byla pravděpodobně nízká rychlost pohybu a směr otáčení kamery.

Jako hlavní výstup je vytvořený postup zpracování pro použití videa za účelem fotogrammetrie znázorněný na vývojovém diagramu. Dalším výstupem je vytvořená kalkulačka v programu Microsoft Excel, díky které je snazší výběr vhodného zařízení, nastavení videa, výšky letu a dalších důležitých parametrů pro stanovení podélných překryvů. Dále byly vytvořeny XML soubory, které obsahují skupinové procesy s přednastavenými parametry pro jednodušší zpracování v programu Agisoft Metashape. Všechny výstupy jsou dostupné na vytvořeném webu diplomové práce.

Metoda videogrammetrie se ukázala jako rychlou a do značné míry automatizovanou metodou za účelem vytvoření 3D modelů. Nejvhodnější směr pohybu kamery je po kružnici okolo objektu zájmu. Snímkový let se svislou kamerou je také možný, ale přináší řadu nevýhod v porovnání s fotogrammetrií. Při nízké rychlosti pohybu kamery a dlouhé době snímání vznikne velké množství snímků, které je následně náročné zpracovat. Tento způsob snímání by byl vhodný v případě, že by byla vysoká rychlost pohybu kamery a interval pořízení fotografií pro fotogrammetrii by nemohl být zvýšen z důvodu rychlosti ukládání fotografií.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

3DPRESSO.AI, 2024. 3dpresso.ai. <https://3dpresso.ai/>.

ADOBE, 2024. Adobe Substance 3D. <https://www.adobe.com/cz/creativecloud/3d-ar.html> [online] [vid. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/creativecloud/3d-ar.html>

AGISOFT, 2022. Agisoft [online]. Dostupné z: <https://www.agisoft.com/>

AGISOFT, LLC, 2019. Agisoft Metashape User Manual [online]. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf

AGLUCK, 2018. Key Points Meaning [online] [vid. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=9241.0>

AHMAD, N, S AZRI, U UJANG, M G CUÉTARA, G M RETORTILLO a Mohd SALLEH, 2019. COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS CAMERA INPUT FOR VIDEOGRAMMETRY [online]. [vid. 2024-04-29]. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-63-2019

BRILAKIS, Ioannis, Habib FATHI a Abbas RASHIDI, 2011. Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry. Automation in Construction [online]. 20(7). ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2011.03.005

BRUNO, Nazarena a Gianfranco FORLANI, 2023. Experimental Tests and Simulations on Correction Models for the Rolling Shutter Effect in UAV Photogrammetry. Remote Sensing 2023, Vol. 15, Page 2391 [online]. 15(9), 2391 [vid. 2024-05-06]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/RS15092391

GRUEN, Armin, 1997. Fundamentals of videogrammetry - A review. Human Movement Science [online]. 16(2-3). ISSN 01679457. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-9457(96)00048-6

HEDBORG, Johan, Erik RINGABY, Per Erik FORSSÉN a Michael FELSBURG, 2011. Structure and motion estimation from rolling shutter video. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision [online]. 17-23 [vid. 2024-04-27]. Dostupné z: doi:10.1109/ICCVW.2011.6130217

HERRÁEZ, José, José Carlos MARTÍNEZ, Eloina COLL, María Teresa MARTÍN a Jaime RODRÍGUEZ, 2016. 3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation [online]. 87. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.03.005

LI, Ying a Xiang FU, 2018. Video. Encyclopedia of Database Systems [online]. 4374-4381 [vid. 2024-04-23]. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-8265-9_1017

LUMA AI, Inc, 2024. Luma Ai.

OUJEZDSKÝ, Aleš, 2011. Digitální video [online]. [vid. 2024-01-06]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/cz/kurzy/Digitalni%20video.pdf>

PAVELKA, Karel, 2003. Fotogrammetrie 10. B.m.: Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN ISBN 80-01-02649-3.

PAVELKA, Karel, Jaroslav ŠEDINA, Eva MATOUŠKOVÁ, Martina FALTÝNOVÁ a Jan ŘEZNÍČEK, 2015. Ověřená technologie nízkonákladové 3D fotogrammetrické dokumentace památkových objektů [online] [vid. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/23740954-Overena-technologie-nizkonakladove-3d-fotogrammetricke-dokumentace-pamatkovych-objektu.html>

PIX4D SA, 2024. Pix4D. <https://www.pix4d.com/> [online] [vid. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.pix4d.com/>

RASHIDI, Abbas, 2014. Improved monocular videogrammetry for generating 3D dense point clouds of built infrastructure. [online]. B.m. [vid. 2024-02-06]. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA. Dostupné z: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=cs&user=u_ble2QAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=u_ble2QAAAAJ:7PzIFSSx8tAC

RAZI, Pakhrur, Josaphat Tetuko Sri SUMANTYO, Daniele PERISSIN, Hiroaki KUZE, Ming Yam CHUA a Good Fried PANGGABEAN, 2018. 3D Land Mapping and Land Deformation Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) ALOS PALSAR: Validated by Geodetic GPS and UAV. IEEE Access [online]. 6, 12395–12404 [vid. 2024-05-07]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2804899

ŠINDELÁŘ, Jiří a František KREJČA, 2019. Nová metoda mapování trvale zatopených prostor v NPP Chýnovská jeskyně. Časopis ochrana přírody [online]. [vid. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/a831-jiri-sindelar/>

TORRESANI, A. a F. REMONDINO, 2019. VIDEOGRAMMETRY VS PHOTOGRAMMETRY for HERITAGE 3D RECONSTRUCTION. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives [online]. ISSN 16821750. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1157-2019

WESTOBY, M. J., J. BRASINGTON, N. F. GLASSER, M. J. HAMBREY a J. M. REYNOLDS, 2012. „Structure-from-Motion“ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology [online]. 179. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Ukázka reportu z testování První případové studie, letu se svislou kamerou
- Příloha 2 Ukázka reportu z testování První případové studie, letu se šikmou kamerou
- Příloha 3 Ukázka reportu z testování Druhé případové studie
- Příloha 4 Ukázka reportu z testování Třetí případové studie

Volné přílohy

- Příloha 5 Poster
- Příloha 6 WEB
- Příloha 7 Kalkulacka.zip
- Kalkulacka.xlsx
 - Skupinovy_proces_1_Model.xml
 - Skupinovy_proces_2_Model.xml
 - Skupinovy_proces_1_Ortofoto.xml
 - Skupinovy_proces_2_Ortofoto.xml
 - Postup_zpracovani.txt

Popis struktury odevzdávaných digitálních dat na datové úložiště katedry

Povinná struktura adresářů:

- Text_Prace (text formát MS Word a PDF)
- Vystupni_Data
- Vstupni_Data
- WEB
- Poster

Příloha 1 Ukázka reportu z testování První případové studie, letu se svislou kamerou

Agisoft Metashape

Processing Report

02 April 2024



Survey Data

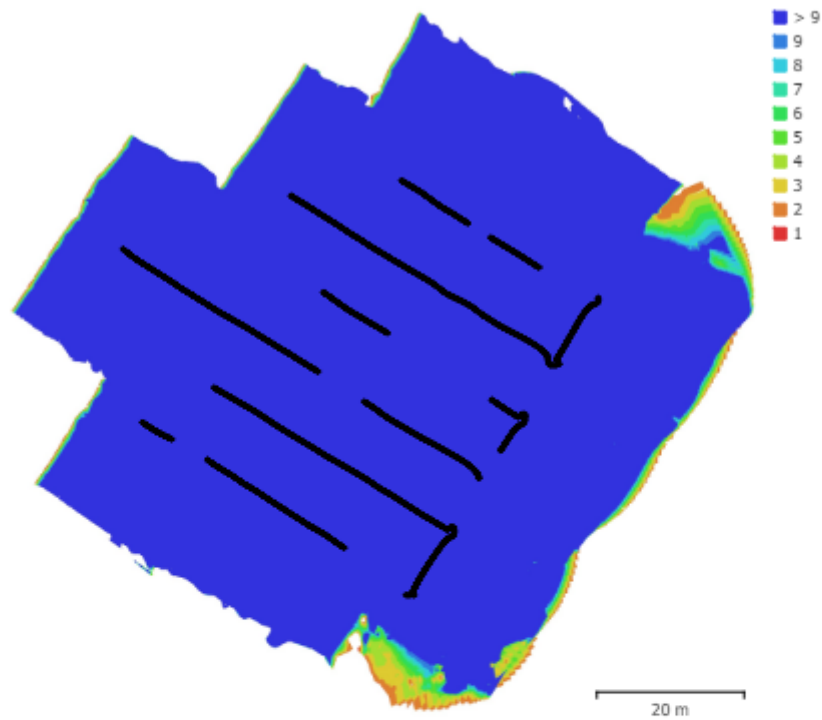


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

| | | | |
|--------------------|-------------------------|---------------------|-----------|
| Number of images: | 7,403 | Camera stations: | 3,591 |
| Flying altitude: | 21.7 m | Tie points: | 1,024,268 |
| Ground resolution: | 7.44 mm/pix | Projections: | 5,807,051 |
| Coverage area: | 5.89e+03 m ² | Reprojection error: | 0.776 pix |

| Camera Model | Resolution | Focal Length | Pixel Size | Precalibrated |
|--------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| unknown | 4096 x 2160 | unknown | unknown | No |

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

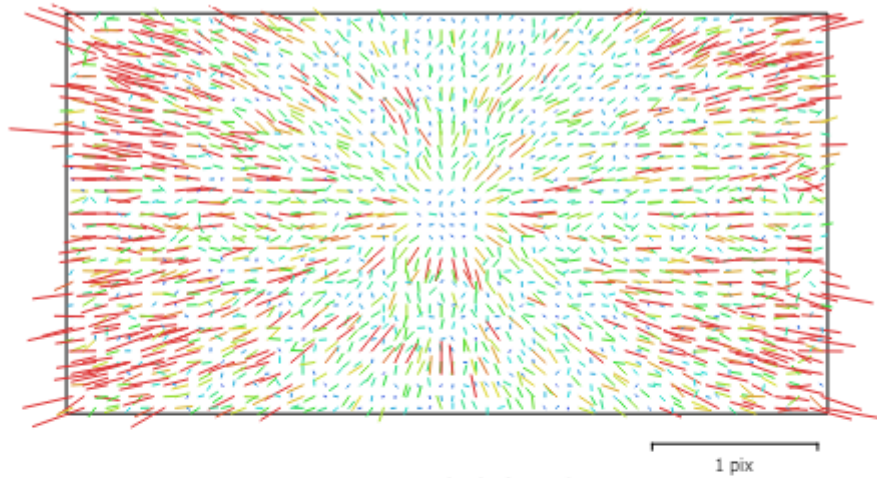


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown

7403 images

| | | | |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|
| Type | Resolution | Focal Length | Pixel Size |
| Frame | 4096 x 2160 | unknown | unknown |

| | Value | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 2917.47 | 1.4 | 1.00 | -0.90 | 0.15 | -0.12 | 0.27 | 0.04 | -0.37 | 0.50 | 0.32 | -0.14 |
| Cx | 17.0456 | 0.098 | | 1.00 | -0.12 | 0.05 | -0.15 | -0.03 | 0.33 | -0.45 | -0.12 | 0.10 |
| Cy | 2.89435 | 0.035 | | | 1.00 | -0.24 | -0.02 | -0.02 | -0.05 | 0.07 | 0.10 | 0.25 |
| B1 | -3.49119 | 0.029 | | | | 1.00 | -0.12 | 0.00 | 0.04 | -0.05 | -0.10 | 0.02 |
| B2 | 0.671017 | 0.026 | | | | | 1.00 | 0.01 | -0.10 | 0.14 | 0.09 | -0.11 |
| K1 | 0.00815558 | 6e-05 | | | | | | 1.00 | -0.48 | 0.42 | -0.37 | 0.04 |
| K2 | -0.0208487 | 0.00012 | | | | | | | 1.00 | -0.97 | -0.11 | 0.05 |
| K3 | 0.0212379 | 0.00013 | | | | | | | | 1.00 | 0.16 | -0.07 |
| P1 | 0.00290574 | 3.3e-06 | | | | | | | | | 1.00 | -0.06 |
| P2 | -0.000652914 | 1.8e-06 | | | | | | | | | | 1.00 |

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

| Count | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 8 | 1.36138 | 1.34435 | 0.440622 | 1.91328 | 1.96336 |

Table 3. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Count | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 4 | 1.01175 | 0.435575 | 1.14173 | 1.10153 | 1.58648 |

Table 4. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Label | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) | Image (pix) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 01 | -0.0957238 | 1.14139 | -0.207709 | 1.16408 | 0.347 (11) |
| 02 | -3.01432 | 0.432335 | 0.122194 | 3.04762 | 0.372 (10) |
| 03 | -0.832702 | -1.56174 | 0.127548 | 1.77446 | 0.228 (10) |
| 06 | 0.899246 | -0.475233 | 0.451978 | 1.113 | 0.407 (10) |
| 08 | 1.12218 | -0.612915 | -0.0769259 | 1.28096 | 0.365 (10) |
| 10 | 0.316595 | 2.24932 | 0.0557398 | 2.27218 | 0.448 (10) |
| 11 | -0.0871545 | 0.859178 | -0.995935 | 1.31821 | 0.433 (10) |
| 12 | 1.69189 | -2.03234 | 0.523111 | 2.69565 | 0.359 (10) |
| Total | 1.36138 | 1.34435 | 0.440622 | 1.96336 | 0.375 |

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Label | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) | Image (pix) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 04 | 0.442153 | -0.155587 | 2.10055 | 2.15221 | 0.393 (10) |
| 05 | -0.00760819 | -0.186361 | 0.632395 | 0.659326 | 0.189 (10) |
| 07 | 1.21057 | 0.818779 | 0.466779 | 1.5342 | 0.351 (10) |
| 09 | 1.55997 | 0.171944 | -0.429056 | 1.62701 | 0.254 (11) |
| Total | 1.01175 | 0.435575 | 1.14173 | 1.58648 | 0.306 |

Table 6. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

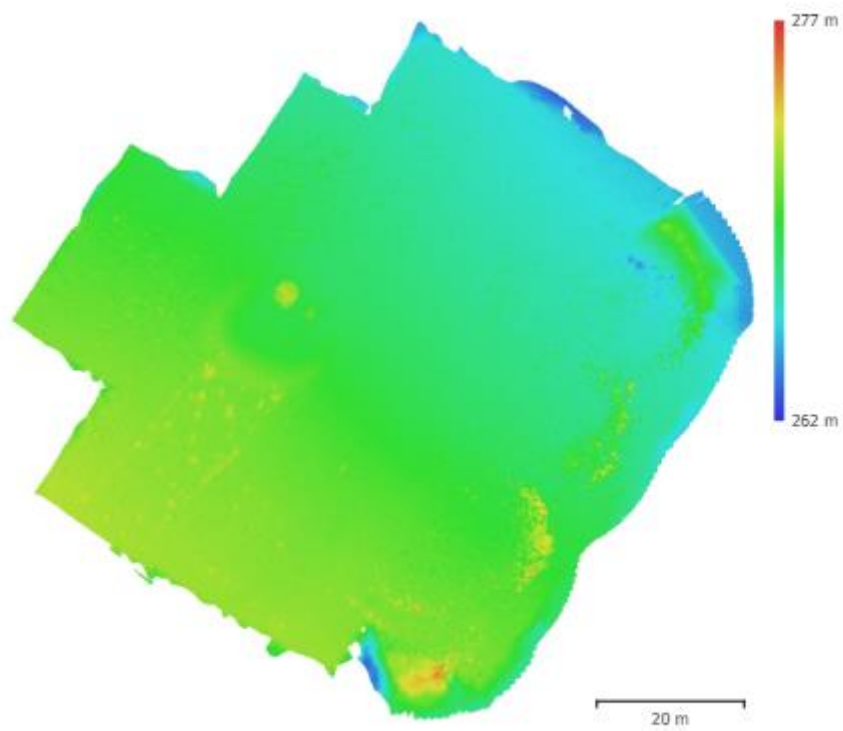


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.55 cm/pix
Point density: 233 points/m²

Processing Parameters

General

| | |
|-------------------|---|
| Cameras | 7403 |
| Aligned cameras | 3591 |
| Markers | 12 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Rotation angles | Yaw, Pitch, Roll |

Tie Points

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Points | 1,024,268 of 2,638,862 |
| RMS reprojection error | 0.102205 (0.776445 pix) |
| Max reprojection error | 0.706477 (36.0681 pix) |
| Mean key point size | 6.44875 pix |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| Key points | No |
| Average tie point multiplicity | 13.1342 |

Alignment parameters

| | |
|-------------------------------|---------------------|
| Accuracy | Medium |
| Generic preselection | Yes |
| Reference preselection | Source |
| Key point limit | 40,000 |
| Key point limit per Mpx | 1,000 |
| Tie point limit | 10,000 |
| Exclude stationary tie points | No |
| Guided image matching | Yes |
| Adaptive camera model fitting | Yes |
| Matching time | 7 hours 59 minutes |
| Matching memory usage | 8.78 GB |
| Alignment time | 16 hours 57 minutes |
| Alignment memory usage | 16.94 GB |

Optimization parameters

| | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Parameters | f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Optimization time | 19 minutes 35 seconds |
| Date created | 2024:03:02 18:10:37 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 560.82 MB |

Model

| | |
|---------------|----------------|
| Faces | 207,589 |
| Vertices | 104,731 |
| Vertex colors | 3 bands, uint8 |

Reconstruction parameters

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Surface type | Height field |
| Source data | Tie points |
| Interpolation | Enabled |
| Strict volumetric masks | No |
| Processing time | 38 seconds |
| Memory usage | 113.44 MB |
| Date created | 2024:03:05 14:49:45 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 4.77 MB |

Orthomosaic

| | |
|-------------------|---|
| Size | 13,567 x 12,800 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Colors | 3 bands, uint8 |

Reconstruction parameters

| | |
|------------------------|---------------------|
| Blending mode | Mosaic |
| Surface | Mesh |
| Enable hole filling | Yes |
| Enable ghosting filter | No |
| Processing time | 1 hours 51 minutes |
| Memory usage | 1.65 GB |
| Date created | 2024:03:07 03:48:53 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 54.14 GB |

System

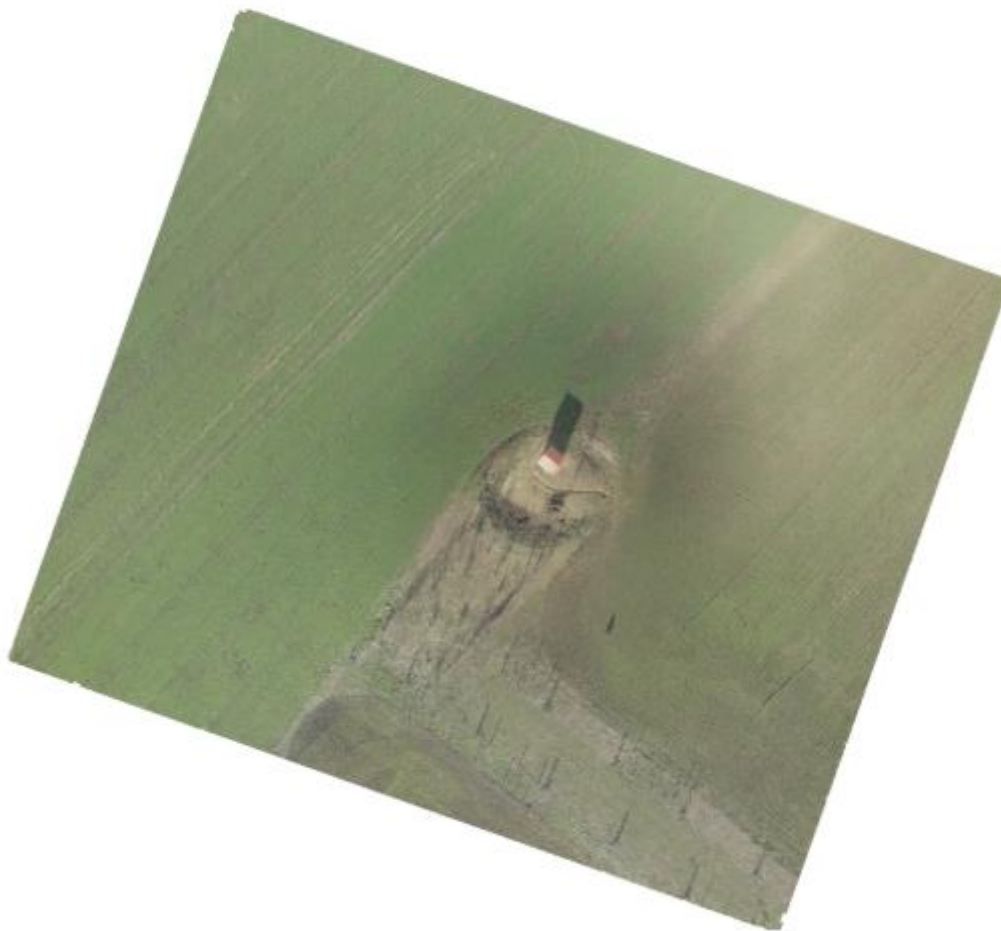
| | |
|------------------|--|
| Software name | Agisoft Metashape Professional |
| Software version | 2.0.3 build 16960 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 15.79 GB |
| CPU | Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz |
| GPU(s) | NVIDIA GeForce GTX 1650 |

Příloha 2 Ukázka reportu z testování První případové studie, letu se šikmou kamerou

Agisoft Metashape

Processing Report

02 April 2024



Survey Data

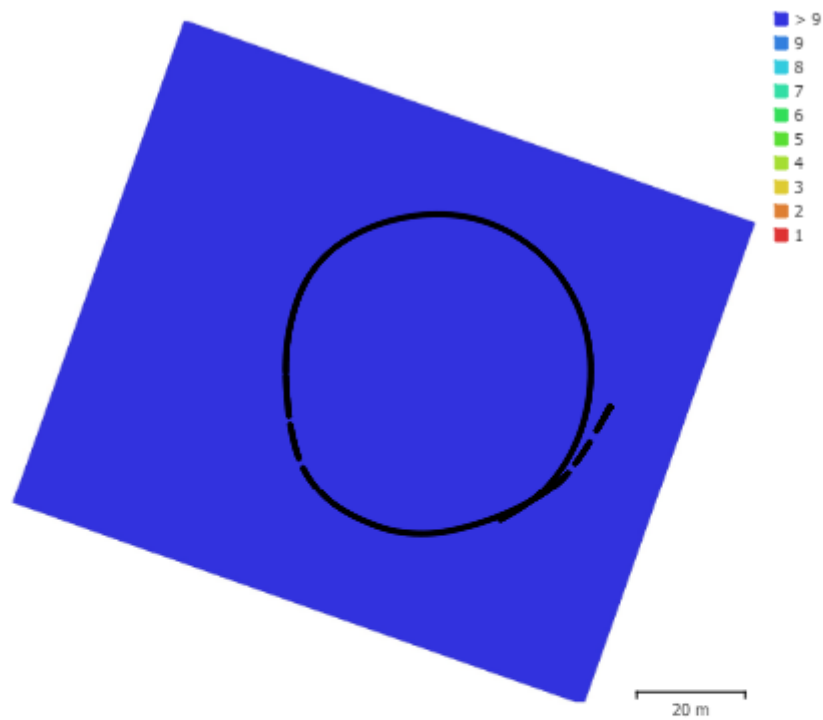


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

| | | | |
|--------------------|------------------------|---------------------|-----------|
| Number of images: | 920 | Camera stations: | 920 |
| Flying altitude: | 33 m | Tie points: | 277,824 |
| Ground resolution: | 1.44 cm/pix | Projections: | 1,293,940 |
| Coverage area: | 0.0106 km ² | Reprojection error: | 1.02 pix |

| Camera Model | Resolution | Focal Length | Pixel Size | Precalibrated |
|--------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| unknown | 4096 x 2160 | unknown | unknown | No |

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

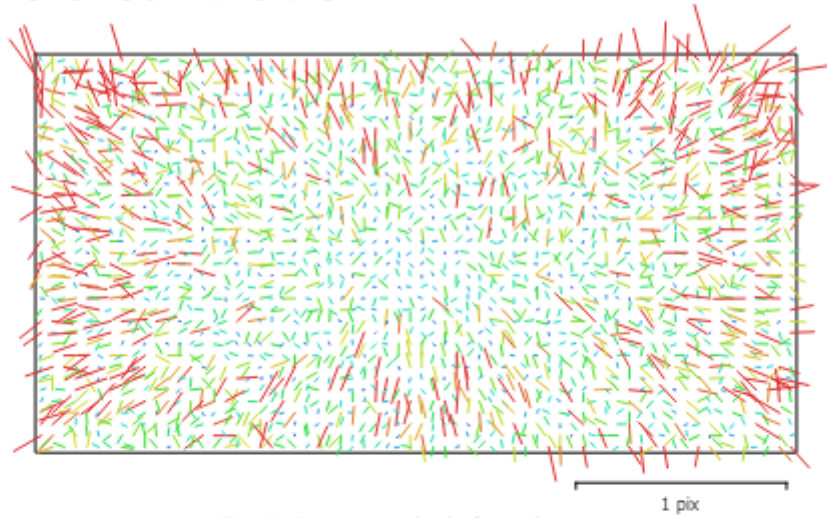


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown

920 images

| | | | |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|
| Type | Resolution | Focal Length | Pixel Size |
| Frame | 4096 x 2160 | unknown | unknown |

| | Value | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 2826.4 | 0.77 | 1.00 | -0.09 | 0.40 | -0.73 | -0.02 | 0.07 | 0.03 | -0.02 | 0.08 | -0.07 |
| Cx | 54.3807 | 0.28 | | 1.00 | -0.11 | 0.14 | 0.77 | -0.18 | 0.19 | -0.18 | 0.59 | 0.06 |
| Cy | 14.2488 | 1.8 | | | 1.00 | -0.92 | 0.05 | -0.11 | 0.04 | -0.03 | -0.08 | 0.08 |
| B1 | 26.2732 | 1.1 | | | | 1.00 | -0.02 | 0.03 | -0.03 | 0.01 | 0.03 | -0.02 |
| B2 | -12.2011 | 0.3 | | | | | 1.00 | -0.12 | 0.10 | -0.08 | 0.03 | 0.11 |
| K1 | 0.00550252 | 0.00018 | | | | | | 1.00 | -0.92 | 0.86 | -0.03 | -0.20 |
| K2 | -0.0099862 | 0.00049 | | | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.12 | 0.08 |
| K3 | 0.0102198 | 0.00046 | | | | | | | | 1.00 | -0.13 | -0.07 |
| P1 | 0.00780754 | 2e-05 | | | | | | | | | 1.00 | -0.03 |
| P2 | -0.00112348 | 2.2e-05 | | | | | | | | | | 1.00 |

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

| Count | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 8 | 0.815844 | 0.764851 | 0.387319 | 1.1183 | 1.18348 |

Table 3. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Count | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 4 | 0.778507 | 0.730002 | 0.886763 | 1.06723 | 1.38756 |

Table 4. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Label | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) | Image (pix) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 01 | 0.315695 | 0.320452 | -0.316881 | 0.550242 | 0.515 (12) |
| 02 | -1.20922 | 0.0273597 | -0.133476 | 1.21687 | 0.565 (11) |
| 03 | -0.646349 | -0.275551 | 0.534801 | 0.883011 | 0.635 (10) |
| 06 | 0.736025 | -0.864874 | 0.209692 | 1.15486 | 0.524 (11) |
| 08 | 0.563102 | 0.0971376 | -0.15471 | 0.591992 | 0.591 (14) |
| 10 | -0.560365 | 1.63224 | 0.592054 | 1.82449 | 0.402 (10) |
| 11 | -0.561596 | 0.0973783 | -0.600178 | 0.8277 | 0.401 (11) |
| 12 | 1.36271 | -1.03415 | -0.131302 | 1.71571 | 0.465 (11) |
| Total | 0.815844 | 0.764851 | 0.387319 | 1.18348 | 0.521 |

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Label | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) | Image (pix) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 04 | 0.515181 | -1.08831 | 0.895252 | 1.50044 | 0.443 (10) |
| 05 | 0.298092 | 0.565261 | 0.983116 | 1.17256 | 0.476 (10) |
| 07 | 1.30797 | 0.0309698 | 1.16986 | 1.75508 | 0.377 (11) |
| 09 | 0.599375 | 0.791649 | 0.0940103 | 0.997395 | 0.426 (10) |
| Total | 0.778507 | 0.730002 | 0.886763 | 1.38756 | 0.431 |

Table 6. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

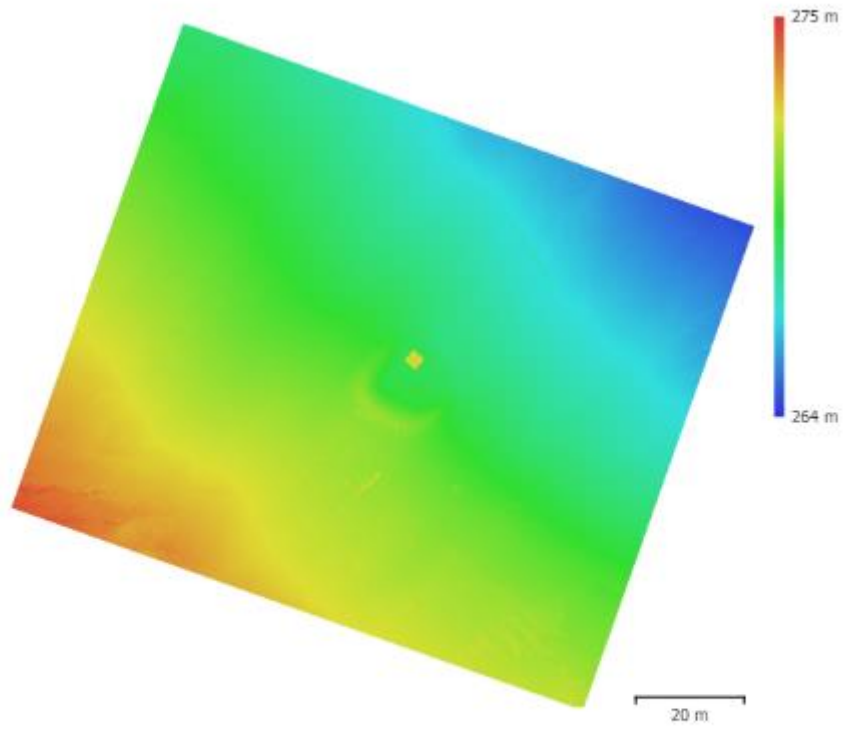


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.87 cm/pix
Point density: 0.121 points/cm²

Processing Parameters

General

| | |
|-------------------|---|
| Cameras | 920 |
| Aligned cameras | 920 |
| Markers | 12 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Rotation angles | Yaw, Pitch, Roll |

Tie Points

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Points | 277,824 of 348,335 |
| RMS reprojection error | 0.124183 (1.01573 pix) |
| Max reprojection error | 0.505662 (35.366 pix) |
| Mean key point size | 6.72784 pix |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| Key points | No |
| Average tie point multiplicity | 7.24072 |

Alignment parameters

| | |
|-------------------------------|-----------------------|
| Accuracy | Medium |
| Generic preselection | Yes |
| Reference preselection | Source |
| Key point limit | 40,000 |
| Key point limit per Mpx | 1,000 |
| Tie point limit | 10,000 |
| Exclude stationary tie points | No |
| Guided image matching | Yes |
| Adaptive camera model fitting | Yes |
| Matching time | 13 minutes 15 seconds |
| Matching memory usage | 452.45 MB |
| Alignment time | 36 minutes 26 seconds |
| Alignment memory usage | 1.08 GB |

Optimization parameters

| | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Parameters | f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Optimization time | 33 seconds |
| Date created | 2024:03:12 08:56:09 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 45.96 MB |

Point Cloud

| | |
|--------|------------|
| Points | 24,154,559 |
|--------|------------|

Point attributes

| | |
|--------|----------------|
| Color | 3 bands, uint8 |
| Normal | |

Point classes

| | |
|----------------------------|------------|
| Created (never classified) | 24,154,559 |
|----------------------------|------------|

Depth maps generation parameters

| | |
|-----------------|--------------------|
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 1 hours 18 minutes |
| Memory usage | 3.55 GB |

Point cloud generation parameters

| | |
|-----------------|---------------------|
| Processing time | 11 hours 29 minutes |
|-----------------|---------------------|

| | |
|--|--|
| Memory usage | 10.98 GB |
| Date created | 2024:03:13 20:20:40 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 330.26 MB |
| Model | |
| Faces | 4,827,758 |
| Vertices | 2,415,425 |
| Vertex colors | 3 bands, uint8 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 1 hours 18 minutes |
| Memory usage | 3.55 GB |
| Point cloud generation parameters | |
| Processing time | 11 hours 29 minutes |
| Memory usage | 10.98 GB |
| Reconstruction parameters | |
| Surface type | Height field |
| Source data | Point cloud |
| Interpolation | Enabled |
| Strict volumetric masks | No |
| Processing time | 1 minutes 0 seconds |
| Memory usage | 637.36 MB |
| Date created | 2024:03:13 20:20:41 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 110.52 MB |
| Tiled Model | |
| Texture | 3 bands, uint8 |
| Reconstruction parameters | |
| Source data | Mesh |
| Tile size | 256 |
| Face count | Medium |
| Enable ghosting filter | Yes |
| Processing time | 55 minutes 21 seconds |
| Memory usage | 1.80 GB |
| Date created | 2024:03:13 22:37:31 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 102.30 MB |
| DEM | |
| Size | 4,767 x 4,395 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Reconstruction parameters | |
| Source data | Point cloud |
| Interpolation | Enabled |
| Processing time | 40 seconds |
| Memory usage | 305.58 MB |
| Date created | 2024:03:13 20:22:24 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 42.44 MB |
| Orthomosaic | |
| Size | 9,534 x 8,838 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Colors | 3 bands, uint8 |
| Reconstruction parameters | |
| Blending mode | Mosaic |
| Surface | |
| Surface | Mesh |
| Enable hole filling | Yes |
| Enable ghosting filter | No |
| Processing time | 51 minutes 1 seconds |
| Memory usage | 2.14 GB |
| Date created | 2024:03:13 20:49:49 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 23.73 GB |
| System | |
| Software name | Agisoft Metashape Professional |
| Software version | 2.0.3 build 16960 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 15.79 GB |
| CPU | Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz |
| GPU(s) | NVIDIA GeForce GTX 1650 |

Surface
Enable hole filling
Enable ghosting filter
Processing time
Memory usage
Date created
Software version
File size

System

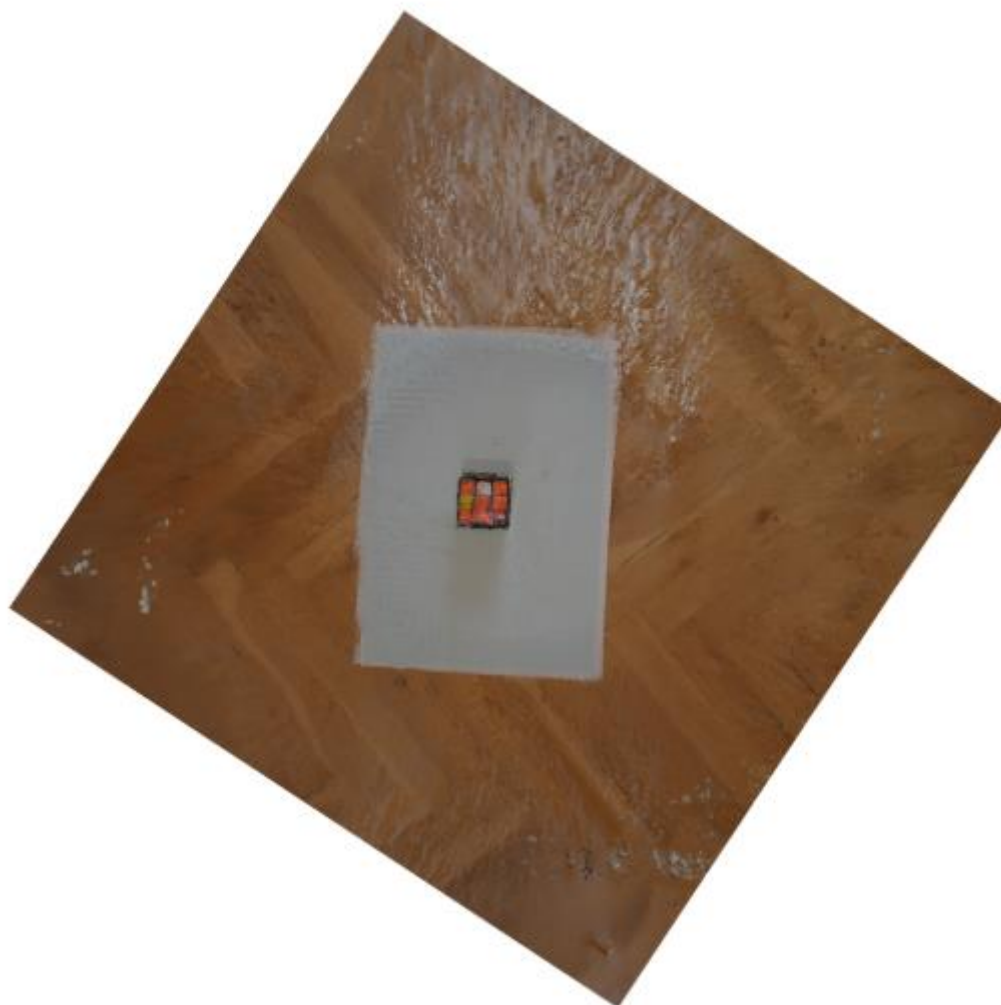
Software name
Software version
OS
RAM
CPU
GPU(s)

Mesh
Yes
No
51 minutes 1 seconds
2.14 GB
2024:03:13 20:49:49
2.0.3.16960
23.73 GB
Agisoft Metashape Professional
2.0.3 build 16960
Windows 64 bit
15.79 GB
Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz
NVIDIA GeForce GTX 1650

Agisoft Metashape

Processing Report

23 April 2024



Survey Data

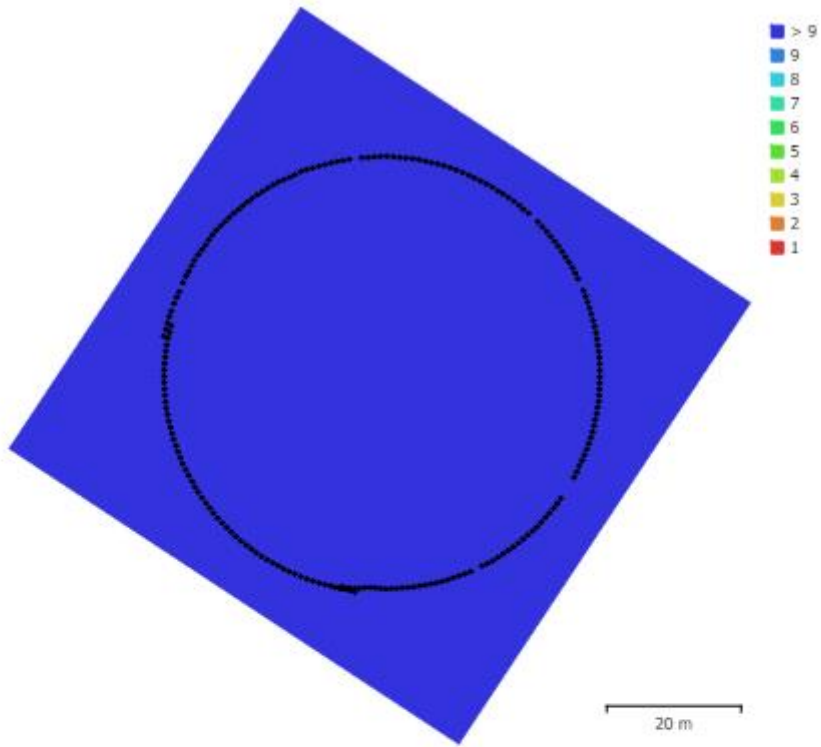


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

| | | | |
|--------------------|-------------------------|---------------------|----------|
| Number of images: | 293 | Camera stations: | 293 |
| Flying altitude: | 31.4 m | Tie points: | 98,985 |
| Ground resolution: | 1.64 cm/pix | Projections: | 314,678 |
| Coverage area: | 6.35e+03 m ² | Reprojection error: | 1.84 pix |

| Camera Model | Resolution | Focal Length | Pixel Size | Precalibrated |
|--------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| unknown | 1920 x 1080 | unknown | unknown | No |

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

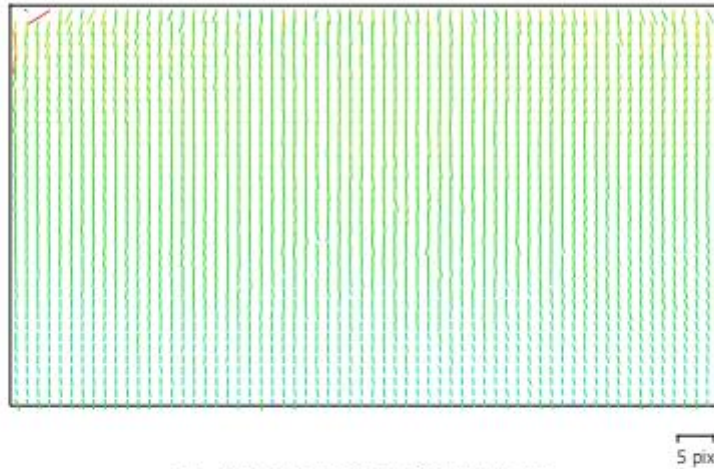


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown

293 images

Type

Resolution

Focal Length

Pixel Size

Frame

1920 x 1080

unknown

unknown

| | Value | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|---------------------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 1898.61 | 40 | 1.00 | -0.13 | -0.03 | -0.98 | 0.15 | -0.01 | 0.09 | -0.14 | -0.06 | 0.03 |
| Cx | -31.7839 | 6 | | 1.00 | 0.25 | 0.07 | 0.10 | -0.02 | 0.06 | -0.13 | 0.87 | -0.11 |
| Cy | -213.025 | 29 | | | 1.00 | -0.16 | 0.22 | 0.08 | 0.06 | -0.13 | 0.02 | -0.63 |
| B1 | -345.328 | 37 | | | | 1.00 | -0.18 | -0.04 | -0.08 | 0.14 | 0.05 | 0.05 |
| B2 | 6.47728 | 5.5 | | | | | 1.00 | -0.03 | 0.07 | -0.08 | -0.24 | -0.19 |
| K1 | -0.115443 | 0.011 | | | | | | 1.00 | -0.94 | 0.86 | -0.05 | -0.04 |
| K2 | 0.246382 | 0.04 | | | | | | | 1.00 | -0.97 | 0.04 | -0.08 |
| K3 | -0.245148 | 0.047 | | | | | | | | 1.00 | -0.11 | 0.11 |
| P1 | -0.00316479 | 0.0012 | | | | | | | | | 1.00 | 0.06 |
| P2 | -0.000611028 | 0.0009 | | | | | | | | | | 1.00 |

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

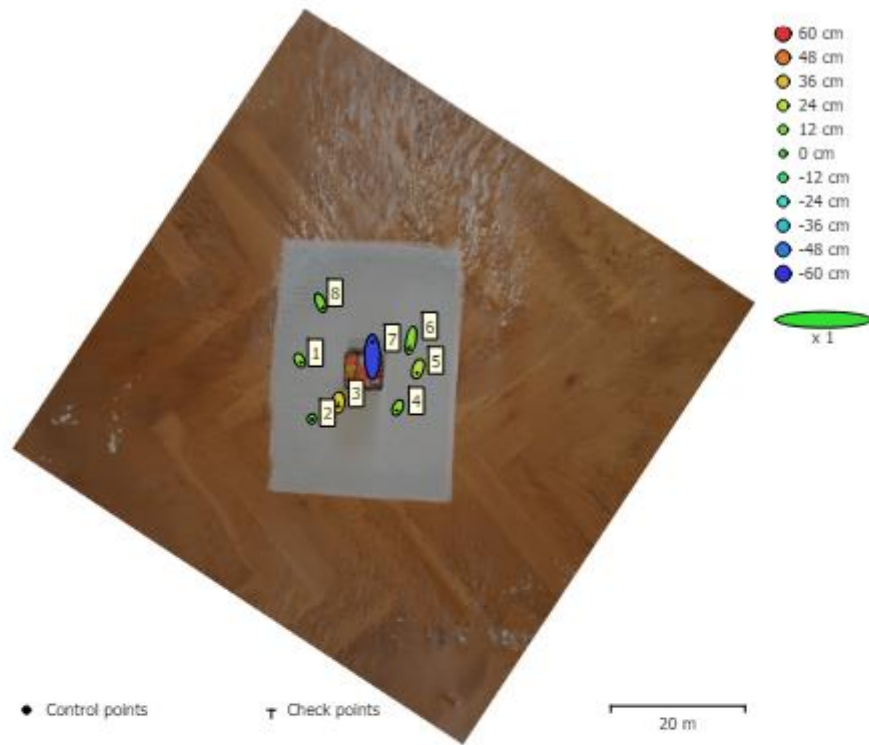


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

| Count | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | XY error (m) | Total (m) |
|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| 6 | 0.360149 | 2.01322 | 0.266377 | 2.04518 | 2.06245 |

Table 3. Control points RMSE.

| Count | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | XY error (m) | Total (m) |
|-------|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------|
| 2 | 0.374512 | 2.12712 | 0.263093 | 2.15984 | 2.1758 |

Table 4. Check points RMSE.

| Label | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | Total (m) | Image (pix) |
|--------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| 1 | 0.318361 | -0.671814 | 0.14018 | 0.756531 | 23.963 (10) |
| 2 | -0.0415823 | -0.16673 | 0.0587705 | 0.181609 | 15.808 (11) |
| 4 | -0.421705 | -0.836022 | 0.145511 | 0.947598 | 27.257 (10) |
| 5 | -0.426266 | -1.23291 | 0.226631 | 1.32406 | 37.720 (10) |
| 7 | -0.0195564 | 4.40251 | -0.565898 | 4.43878 | 110.586 (10) |
| 8 | 0.561461 | -1.49601 | 0.0992975 | 1.60098 | 33.964 (11) |
| Total | 0.360149 | 2.01322 | 0.266377 | 2.06245 | 51.608 |

Table 5. Control points.

| Label | X error (m) | Y error (m) | Z error (m) | Total (m) | Image (pix) |
|--------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|
| 3 | -0.122295 | -1.2945 | 0.341493 | 1.34436 | 7.846 (10) |
| 6 | -0.515328 | -2.71543 | 0.147712 | 2.76784 | 3.435 (10) |
| Total | 0.374512 | 2.12712 | 0.263093 | 2.1758 | 6.056 |

Table 6. Check points.

Digital Elevation Model

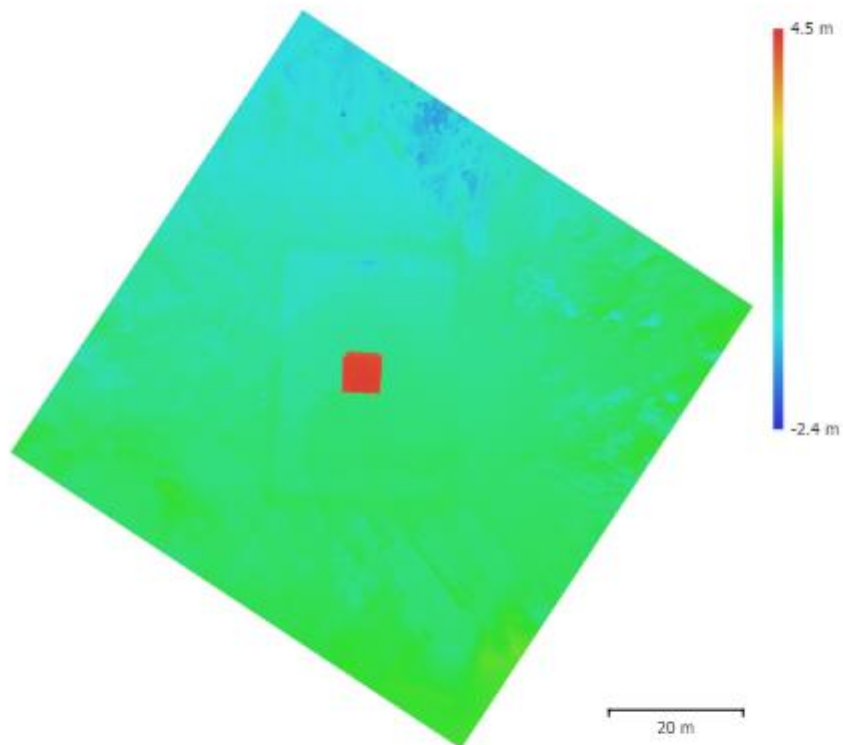


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.29 cm/pix
 Point density: 927 points/m²

Processing Parameters

General

| | |
|-------------------|-----------------------|
| Cameras | 293 |
| Aligned cameras | 293 |
| Markers | 8 |
| Coordinate system | Local Coordinates (m) |
| Rotation angles | Yaw, Pitch, Roll |

Tie Points

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Points | 98,985 of 205,594 |
| RMS reprojection error | 0.602323 (1.84179 pix) |
| Max reprojection error | 4.66428 (27.8976 pix) |
| Mean key point size | 3.71609 pix |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| Key points | No |
| Average tie point multiplicity | 4.32368 |

Alignment parameters

| | |
|-------------------------------|----------------------|
| Accuracy | High |
| Generic preselection | Yes |
| Reference preselection | Source |
| Key point limit | 40,000 |
| Key point limit per Mpx | 1,000 |
| Tie point limit | 10,000 |
| Exclude stationary tie points | No |
| Guided image matching | No |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Matching time | 1 minutes 48 seconds |
| Matching memory usage | 795.50 MB |
| Alignment time | 5 minutes 31 seconds |
| Alignment memory usage | 299.13 MB |

Optimization parameters

| | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Parameters | f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Optimization time | 30 seconds |
| Date created | 2024:04:23 15:41:05 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 16.46 MB |

Depth Maps

| | |
|---|----------------------|
| Count | 293 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 4 minutes 29 seconds |
| File size | 135.25 MB |

Point Cloud

| | |
|----------------------|-----------|
| Points | 5,902,546 |
| Coordinate precision | 8.21 mm |

Point attributes

| | |
|--------|----------------|
| Color | 3 bands, uint8 |
| Normal | |

Point classes

| | |
|--|--|
| Created (never classified) | 5,902,546 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 4 minutes 29 seconds |
| Point cloud generation parameters | |
| Processing time | 28 minutes 46 seconds |
| Date created | 2024:04:23 16:43:00 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 80.32 MB |
| Model | |
| Faces | 1,180,117 |
| Vertices | 590,251 |
| Vertex colors | 3 bands, uint8 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 4 minutes 29 seconds |
| Point cloud generation parameters | |
| Processing time | 28 minutes 46 seconds |
| Reconstruction parameters | |
| Surface type | Height field |
| Source data | Point cloud |
| Interpolation | Enabled |
| Strict volumetric masks | No |
| Processing time | 21 seconds |
| Memory usage | 202.00 MB |
| Date created | 2024:04:23 16:43:00 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 27.01 MB |
| Tiled Model | |
| Texture | 3 bands, uint8 |
| Reconstruction parameters | |
| Source data | Mesh |
| Tile size | 256 |
| Face count | Medium |
| Enable ghosting filter | No |
| Processing time | 7 minutes 33 seconds |
| Memory usage | 955.61 MB |
| Date created | 2024:04:23 17:12:19 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 36.35 MB |
| System | |
| Software name | Agisoft Metashape Professional |
| Software version | 2.0.3 build 16960 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 15.79 GB |
| CPU | Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz |
| GPU(s) | NVIDIA GeForce GTX 1650 |

Příloha 3 Ukázka reportu z testování Třetí případové studie

Agisoft Metashape

Processing Report

09 April 2024



Survey Data

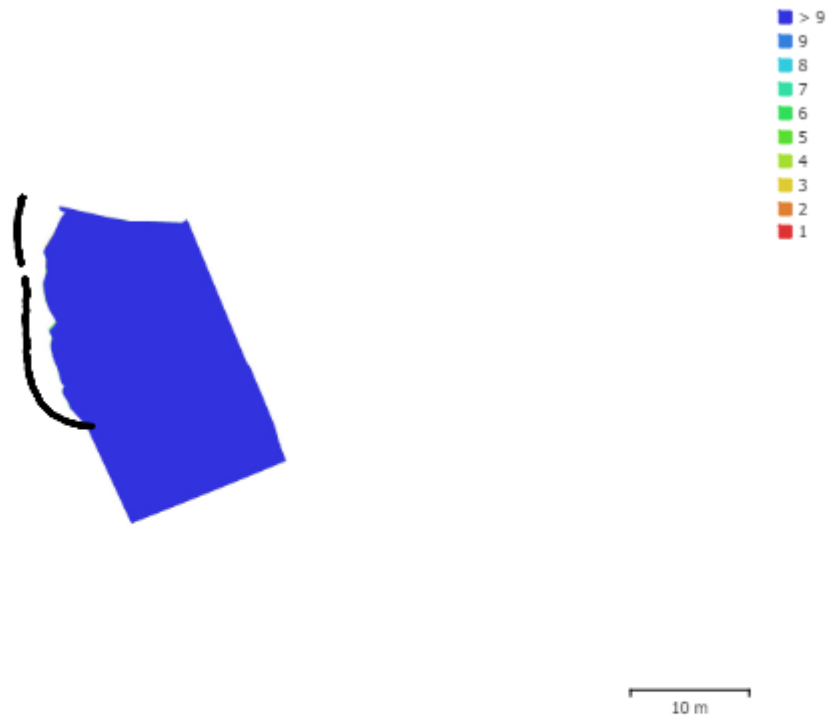


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

| | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| Number of images: | 3,323 | Camera stations: | 1,058 |
| Flying altitude: | 5.21 m | Tie points: | 257,202 |
| Ground resolution: | 3.03 mm/pix | Projections: | 1,290,288 |
| Coverage area: | 350 m ² | Reprojection error: | 0.885 pix |

| Camera Model | Resolution | Focal Length | Pixel Size | Precalibrated |
|--------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| unknown | 1920 x 1080 | unknown | unknown | No |

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

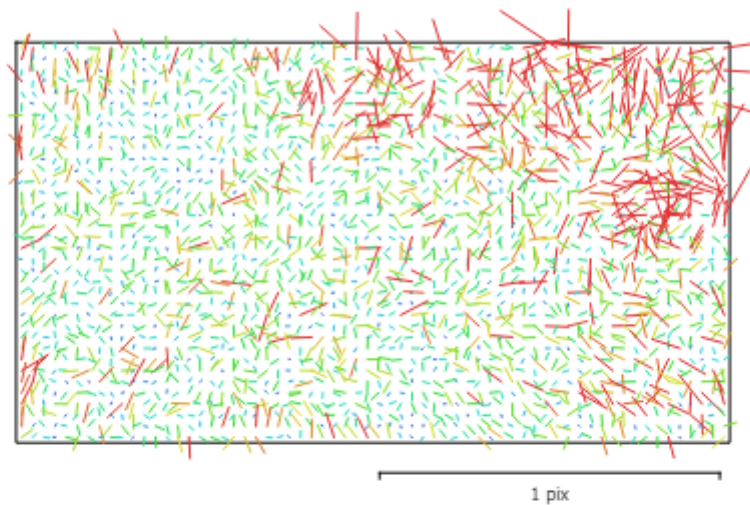


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown

3323 images

| | | | |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|
| Type | Resolution | Focal Length | Pixel Size |
| Frame | 1920 x 1080 | unknown | unknown |

| | Value | Error | F | Cx | Cy | B1 | B2 | K1 | K2 | K3 | P1 | P2 |
|-----------|--------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| F | 2013.99 | 1.2 | 1.00 | -0.05 | 0.16 | -0.96 | -0.19 | 0.05 | 0.00 | -0.01 | -0.04 | -0.00 |
| Cx | -41.0977 | 0.59 | | 1.00 | -0.06 | 0.04 | 0.26 | -0.10 | 0.03 | -0.01 | 0.92 | -0.42 |
| Cy | -61.916 | 0.67 | | | 1.00 | -0.23 | -0.14 | -0.01 | -0.03 | 0.02 | -0.00 | 0.37 |
| B1 | -51.1831 | 1.2 | | | | 1.00 | 0.16 | -0.03 | 0.01 | -0.01 | 0.02 | -0.06 |
| B2 | -15.3479 | 0.63 | | | | | 1.00 | -0.06 | 0.02 | -0.01 | 0.19 | -0.14 |
| K1 | -0.0165472 | 0.00041 | | | | | | 1.00 | -0.92 | 0.85 | -0.16 | 0.02 |
| K2 | 0.0563646 | 0.0026 | | | | | | | 1.00 | -0.98 | 0.06 | -0.07 |
| K3 | -0.0701399 | 0.0056 | | | | | | | | 1.00 | -0.05 | 0.05 |
| P1 | -0.00212507 | 0.00011 | | | | | | | | | 1.00 | -0.35 |
| P2 | -0.00286327 | 3.7e-05 | | | | | | | | | | 1.00 |

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

| Count | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 9 | 1.62642 | 1.70203 | 1.49046 | 2.35418 | 2.78633 |

Table 3. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

| Label | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | Total (cm) | Image (pix) |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | -1.56837 | 2.10466 | 1.19654 | 2.88463 | 1.009 (10) |
| 2 | -0.946972 | -3.2009 | -2.13145 | 3.9605 | 1.402 (14) |
| 3 | 3.9283 | 0.710693 | 0.0463172 | 3.99234 | 1.240 (10) |
| 4 | -1.13572 | 1.2246 | 1.02616 | 1.96023 | 2.113 (18) |
| 5 | -0.69058 | 0.687565 | -1.82227 | 2.06647 | 1.039 (10) |
| 6 | -0.251524 | 0.199759 | 0.604113 | 0.684193 | 1.703 (13) |
| 7 | 1.62337 | 0.162785 | 1.02192 | 1.92514 | 3.620 (10) |
| 8 | -0.262199 | -2.82455 | 2.05808 | 3.50464 | 1.908 (10) |
| 9 | -0.69632 | 0.935386 | -1.99942 | 2.31462 | 1.547 (10) |
| 10 | | | | | |
| 11 | | | | | |
| 12 | | | | | |
| 13 | | | | | |
| 14 | | | | | |
| 15 | | | | | |
| Total | 1.62642 | 1.70203 | 1.49046 | 2.78633 | 1.885 |

Table 4. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

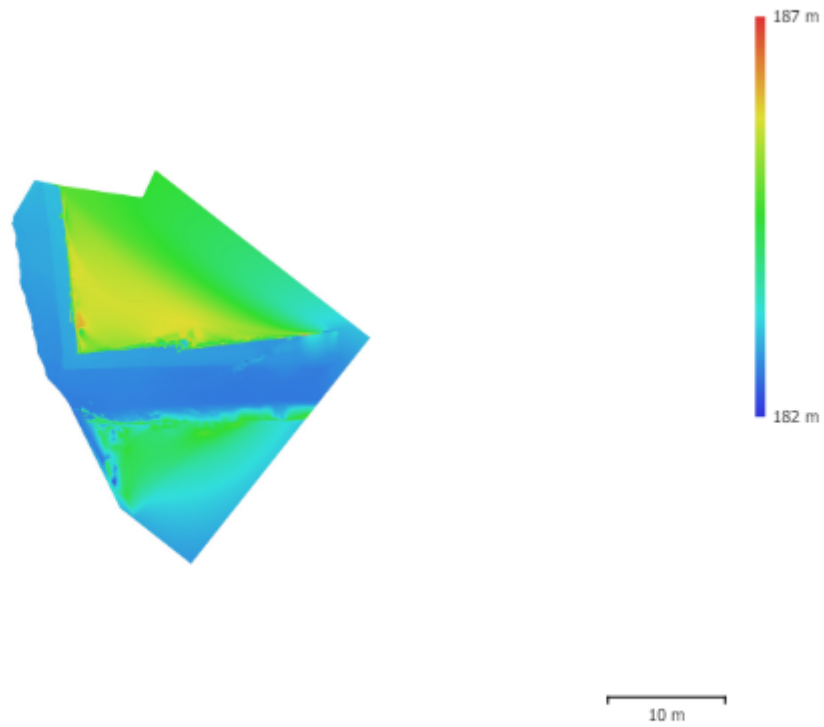


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.13 mm/pix
Point density: 2.66 points/cm²

Processing Parameters

General

| | |
|-------------------|---|
| Cameras | 1560 |
| Aligned cameras | 708 |
| Markers | 15 |
| Coordinate system | S-JTSK / Krovak East North (EPSG::5514) |
| Rotation angles | Yaw, Pitch, Roll |

Tie Points

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Points | 223,882 of 788,430 |
| RMS reprojection error | 0.254633 (1.00466 pix) |
| Max reprojection error | 1.12239 (34.3103 pix) |
| Mean key point size | 3.60508 pix |
| Point colors | 3 bands, uint8 |
| Key points | No |
| Average tie point multiplicity | 6.2259 |

Alignment parameters

| | |
|-------------------------------|-----------------------|
| Accuracy | High |
| Generic preselection | Yes |
| Reference preselection | Source |
| Key point limit | 40,000 |
| Key point limit per Mpx | 1,000 |
| Tie point limit | 4,000 |
| Exclude stationary tie points | No |
| Guided image matching | No |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Matching time | 23 minutes 15 seconds |
| Matching memory usage | 577.14 MB |
| Alignment time | 42 minutes 32 seconds |
| Alignment memory usage | 781.76 MB |

Optimization parameters

| | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Parameters | f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting | No |
| Optimization time | 1 minutes 4 seconds |
| Date created | 2024:04:08 21:06:22 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 85.40 MB |

Point Cloud

| | |
|-------------------------|----------------|
| Points | 9,993,006 |
| Point attributes | |
| Color | 3 bands, uint8 |
| Normal | |

Point classes

| | |
|----------------------------|-----------|
| Created (never classified) | 9,993,006 |
|----------------------------|-----------|

Depth maps generation parameters

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 13 minutes 22 seconds |
| Memory usage | 1.13 GB |

Point cloud generation parameters

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Processing time | 38 minutes 39 seconds |
|-----------------|-----------------------|

| | |
|--|--|
| Memory usage | 4.46 GB |
| Date created | 2024:04:09 05:26:38 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 129.68 MB |
| Model | |
| Faces | 1,957,213 |
| Vertices | 980,219 |
| Vertex colors | 3 bands, uint8 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 13 minutes 22 seconds |
| Memory usage | 1.13 GB |
| Point cloud generation parameters | |
| Processing time | 38 minutes 39 seconds |
| Memory usage | 4.46 GB |
| Reconstruction parameters | |
| Surface type | Height field |
| Source data | Point cloud |
| Interpolation | Enabled |
| Strict volumetric masks | No |
| Processing time | 54 seconds |
| Memory usage | 408.18 MB |
| Date created | 2024:04:09 05:26:39 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 44.82 MB |
| Tiled Model | |
| Texture | 3 bands, uint8 |
| Depth maps generation parameters | |
| Quality | High |
| Filtering mode | Moderate |
| Max neighbors | 16 |
| Processing time | 13 minutes 22 seconds |
| Memory usage | 1.13 GB |
| Reconstruction parameters | |
| Source data | Depth maps |
| Tile size | 256 |
| Face count | Medium |
| Enable ghosting filter | No |
| Processing time | 13 minutes 58 seconds |
| Memory usage | 2.12 GB |
| Date created | 2024:04:09 05:41:34 |
| Software version | 2.0.3.16960 |
| File size | 26.49 MB |
| System | |
| Software name | Agisoft Metashape Professional |
| Software version | 2.0.3 build 16960 |
| OS | Windows 64 bit |
| RAM | 15.79 GB |
| CPU | Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz |
| GPU(s) | NVIDIA GeForce GTX 1650 |