



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEODÉZIE**

INSTITUTE OF GEODESY

**KOMBINACE LASEROVÝCH A SNÍMKOVÝCH DAT  
Z MOBILNÍHO MAPOVACÍHO SYSTÉMU**

COMBINATION OF LASER AND IMAGE DATA FROM A MOBILE MAPPING SYSTEM

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petra Stránská**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. TOMÁŠ VOLAŘÍK, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Petra Stránská
Název	Kombinace laserových a snímkových dat z mobilního mapovacího systému
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- Johnson, S. D., Bethel, J. S., Supunychotsakul, C., & Peterson, S. (2016). Laser mobile mapping standards and applications in transportation (Joint Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/JTRP-2016/01). West Lafayette, IN: Purdue University. <http://dx.doi.org/10.5703/1288284316164>
- Otrusínová, Jana. Testování přesnosti mobilní fotogrammetrie. Brno, 2020. 52 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.
- Deutsch, Jiří. Mobilní mapování v architektuře. Brno, 2013. 56 s., 15s. příl., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
- Venený, Petr. Detekce prostorových objektů v mračně bodů. Brno, 2019. 63 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.
- Hoffmannová, Lada. Testování přesnosti mobilního laserového skenování. Brno, 2020. 66 s., 19 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Michal Kuruc, Ph.D.
- Nováčková, Soňa. Testování přesnosti mobilního mapovacího systému MOMAS. Brno, 2011. 47 s., 27 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
- Šafář, Václav. Porovnání přesnosti a efektivity měřických metod určení objemu při povrchovém dobývání v návaznosti na novelizaci vyhlášky Českého báňského úřadu č. 435/92 Sb. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřictví, 2017. Školitel práce doc. Ing. Hana Staňková, Ph.D.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce proveďte rešerši stávajícího stavu problematiky propojení různých technologií mobilního sběru 3D dat. Na vybrané lokalitě proveďte porovnání technologické linky 3D dat z různých zdrojů - pozemní laserové skeny, snímkování z bezpilotního prostředku a mobilního mapovacího systému na vozidle po výsledný produkt, tedy mračno bodů nebo síť mesh. Porovnejte vliv vstupních parametrů pro tvorbu mračna bodů (například vliv kalibrace kamery). Výstupem práce by měly být číselné a vizuální charakteristiky analýzy porovnání výsledků z jednotlivých produktů – mračno bodů/síť mesh, které budou uvedeny v příloze práce.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá kombinací dat různých technologií sběru 3D dat, konkrétně dat pozemní fotogrammetrie, letecké fotogrammetrie za využití RPAS a pozemního laserového skenování. Práce se zabývá především fotogrammetrickým zpracováním v softwaru ContextCapture a poté kombinací dat v tomto softwaru. Práce popisuje také tvorbu kalibračního pole, jehož body byly využity jako vlíčovací a kontrolní při zpracování. Přesnost jednotlivých výstupů byla ověřena statistickým testováním souřadnicových odchylek kontrolních bodů. Výsledkem je 3D model jedné z budov nacházejících se v areálu výzkumného centra AdMaS.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

RPAS, blízka fotogrammetrie, pozemní laserové skenování, kombinace dat

## **ABSTRACT**

The diploma thesis describes the data integration of data from different 3D technologies, specifically data of close range photogrammetry, aerial photogrammetry using RPAS and terrestrial laser scanning. The thesis deals mainly with fotogrammetric processing in ContextCapture software and data integration in this software. The thesis also describes a construction of a calibration field. The points of the field were used as ground control points and check points during processing. The accuracy of the outputs was evaluated by statistical testing of the coordinate deviations of the control points. The result of the thesis is 3D model of one of the buildings located in the AdMaS research center.

## **KEYWORDS**

RPAS, close-range photogrammetry, terrestrial laser scanning, data integration

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Petra Stránská Kombinace laserových a snímkových dat z mobilního mapovacího systému. Brno, 2021. 73 s., 5 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Tomáš Volařík, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Kombinace laserových a snímkových dat z mobilního mapovacího systému* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 5. 2021

---

Bc. Petra Stránská  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Kombinace laserových a snímkových dat z mobilního mapovacího systému* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 5. 2021

---

Bc. Petra Stránská  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu své práce panu Ing. Tomáši Volaříkovi, Ph. D. za ochotu a cenné rady při zpracování této práce. Dále děkuji spoluřešitelům projektu FAST-S-19-5704 za jehož podpory tato práce vznikla. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během celého studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>11</b>
2.1	FOTOGRAMMETRIE .....	11
2.2	LASEROVÉ SKENOVÁNÍ .....	16
<b>3</b>	<b>SOUČASNÝ STAV</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>BUDOVÁNÍ KALIBRAČNÍHO POLE</b>	<b>24</b>
4.1	TVORBA MĚŘICKÉ SÍTĚ A ZAMĚŘENÍ BODŮ KALIBRAČNÍHO POLE .....	25
4.2	ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ A URČENÍ SOUŘADNIC BODŮ MĚŘICKÉ SÍTĚ A KALIBRAČNÍCH BODŮ .....	26
<b>5</b>	<b>TECHNIKA VYUŽITÁ PRO SBĚR DAT</b>	<b>28</b>
5.1	RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED .....	28
5.2	FOTOAPARÁT CANON EOS 6D MARK II .....	29
5.3	LASEROVÝ SKENER FARO FOCUS 3D S120.....	30
<b>6</b>	<b>SBĚR DAT</b>	<b>31</b>
6.1	SNÍMKOVÁNÍ PRO TESTOVACÍ PROJEKT PRO PREKALIBRACI .....	31
6.2	SNÍMKOVÁNÍ RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED.....	32
6.3	SNÍMKOVÁNÍ KAMEROU CANON EOS 6D MARK II.....	32
<b>7</b>	<b>PREKALIBRACE KAMERY</b>	<b>35</b>
7.1	POKYNY PRO PREKALIBRACI KAMERY PRO SW CONTEXTCAPTURE.....	36
7.2	KALIBRACE KAMERY UMÍSTĚNĚ NA RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED .....	37

7.3	TESTOVACÍ PROJEKT .....	39
<b>8</b>	<b>TVORBA 3D MODELU V PROSTŘEDÍ CONTEXTCAPTURE</b>	<b>43</b>
8.1	ORIENTACE SNÍMKŮ .....	43
8.1.1	ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ Z RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED.....	47
8.1.2	ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ Z KAMERY CANON EOS 6D MARK II.....	49
8.2	KOMBINACE DAT Z RŮZNÝCH ZDROJŮ V SW CONTEXTCAPTURE.....	51
<b>9</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>54</b>
9.1	POSOUZENÍ VLIVU PREKALIBRACE KAMERY DJI FC300S .....	54
9.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ POZEMNÍ A LETECKÉ FOTOGRAMMETRIE A JEJICH KOMBINACE A LASEROVÝM SKENOVÁNÍM.....	56
<b>10</b>	<b>VIZUALIZACE MESH MODELŮ</b>	<b>62</b>
10.1	DETAIL KOMÍNU.....	63
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam zdrojů</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>73</b>

# 1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá propojením různých technologií sběru 3D dat, konkrétně dat z pozemního laserového skeneru a pozemní a letecké fotogrammetrie, a následnou tvorbou 3D modelu. Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu specifického výzkumu FAST-S-19-5704. V rámci spolupráce s ostatními řešiteli projektu bylo nejprve vytvořeno kalibrační pole v areálu AdMaS. Tato etapa byla řešena v rámci společné části projektu a její výsledky byly poté převzaty do této diplomové práce. Další společnou částí byla prekalibrace kamery DJI FC300S, která je součástí RPAS DJI Phantom 3 Advanced. Výsledné prvky vnitřní orientace kamery a testovacího projektu byly rovněž převzaty. V úvodu práce je stručně popsána teorie, která se váže k dané problematice. Byla provedena také rešerše stávajícího stavu problematiky propojení různých technologií pro sběr 3D dat.

Původně se diplomová práce měla zabývat zpracováním dat mobilní fotogrammetrie z mobilního mapovacího systému Riegl VMX-450, který je k dispozici ve výzkumném centru AdMaS. V průběhu přípravných prací však došlo k závadě mobilního mapovacího systému a nebylo tak možné jej využít ke sběru dat. Byla proto zvolena alternativa v podobě pozemní fotogrammetrie a pozemního laserového skenování.

V rámci této diplomové práce byla zpracována fotogrammetrická data z pozemní i letecké fotogrammetrie, která byla následně zkombinována s mračnem bodů z laserového skenování a byl vytvořen 3D model vybraného objektu v prostředí softwaru ContextCapture. Jedna z kapitol této diplomové práce se věnuje pracovnímu postupu zpracování v tomto softwaru, včetně doporučení pro kombinaci dat z různých zdrojů. Součástí diplomové práce je také ověření vlivu prekalibrace kamery a následné statistické porovnání.

V závěru práce byla posouzena výsledná přesnost různých kombinací uvedených technologií. Fisherovým testem byla testována statistická hypotéza shodnosti dvou směrodatných odchylek.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

V úvodní kapitole budou popsány teoretické základy problematiky, kterou se zabývá tato diplomová práce. Jedná se o oblast fotogrammetrie a laserového skenování.

### 2.1 FOTOGRAMMETRIE

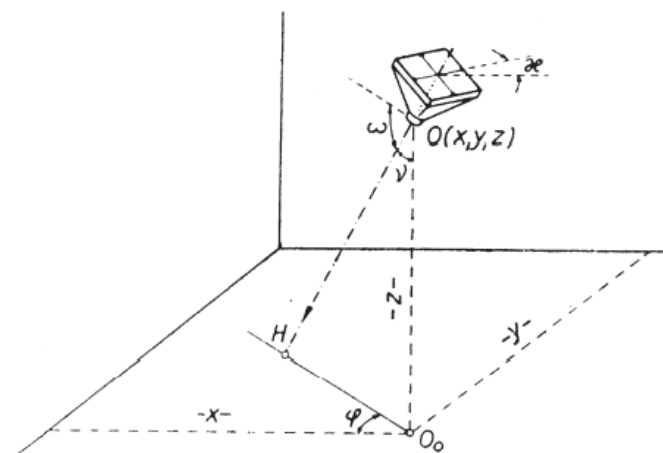
Fotogrammetrie se zabývá digitálním zpracováním fotografických snímků. Jejím cílem je rekonstrukce tvaru a rozměru a určování polohy předmětů na snímcích zachycených. Základním principem fotogrammetrie je středové promítání, kdy snímky můžeme považovat za centrální projekci prostorových objektů. Základním rozdělením fotogrammetrie je dělení podle polohy stanoviska na fotogrammetrii pozemní a leteckou. Fotogrammetrie se kromě geodézie uplatňuje i v řadě dalších oborů, například ve stavebnictví, zemědělství, lesnictví nebo archeologii. [1] v oblasti fotogrammetrie se používá specifická terminologie. Některé ze základních pojmů jsou uvedeny dále.

#### **Prvky vnitřní orientace**

Vnitřní orientace přesně definuje polohu projekčního centra, tj. středu promítání ve snímkovém souřadnicovém systému. [1] Jsou to údaje charakterizující geometrii paprsků uvnitř kamery. Jedná se o konstantu kamery  $f$ , polohu hlavního snímkového bohu  $H'$  a znalost průběhu radiálního a tangenciálního zkreslení objektivu. [2]

#### **Prvky vnější orientace**

Prvky vnější orientace definují polohu a pootočení snímkového systému (kamery) v objektovém souřadnicovém systému. Prvků vnější orientace je celkem šest. Jsou jimi prostorové souřadnice  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  projekčního centra a úhly pootočení kamery  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  [1]. Úhly  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  definují polohu osy záběru vůči souřadnicovým osám (směr osy záběru, sklon osy záběru a pootočení snímku [3], [4]. Prvky vnější orientace jsou vyobrazeny na Obr. 1.



Obr. 1 Prvky vnější orientace [4]

### Distorze objektivu

Distorze objektivu neboli zkreslení, se projevuje posunem obrazu bodu od jeho správné polohy v rovině snímku. Má radiální a tangenciální složku. U *radiálního zkreslení* úhel vystupujícího a vstupujícího paprsku není stejný a poloha zobrazovaného bodu se potom liší od správné polohy. *Tangenciální zkreslení* vzniká nepřesnou centrací optických členů objektivu. Velikost zkreslení udává výrobce nebo ji lze zjistit kalibrací v softwaru pro zpracování fotogrammetrických dat. [2]

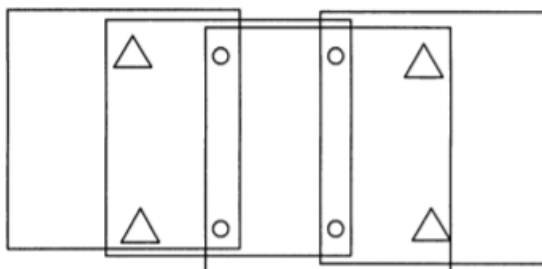
### Absolutní a relativní orientace

Určení prvků vnější orientace se provádí ve dvou krocích, a to v rámci relativní a absolutní orientace. Při *relativní orientaci* dochází ke vzájemné orientaci snímků a vytvoření stereoskopického modelu. Při relativní orientaci se používají navazovací body [2]. *Absolutní orientace* pootočí a posune stereoskopický model do geodetických souřadnic, a to pomocí vlíčovacích bodů [5].

### Aerotriangulace, vyrovnání bloku svazků (bundle block adjustment)

Cílem aerotriangulace je určit prvky vnější orientace snímků tak, aby nebylo nutné měření velkého množství vlíčovacích bodů, případně řeší, jak překlenout území bez vlíčovacích bodů pomocí bodů

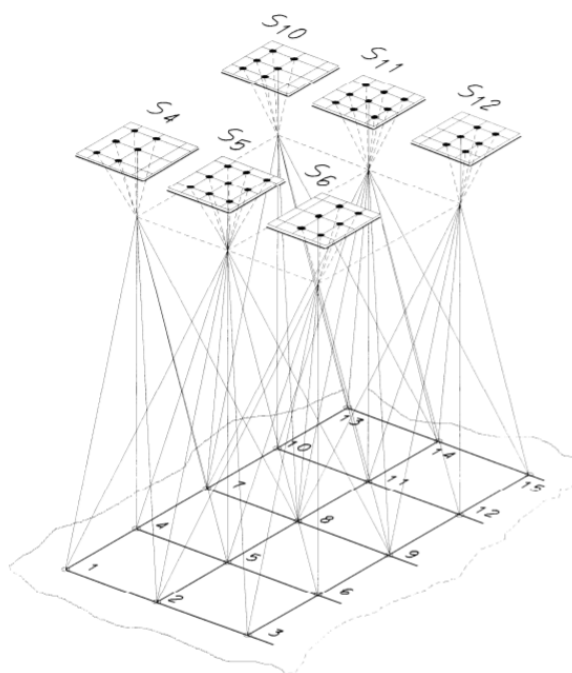
navazovacích. Výsledkem aerotriangulace jsou prvky vnější orientace všech snímků a geodetické souřadnice bodů. Na Obr. 2 je znázorněn princip aerotriangulace. Body označené kolečkem se nazývají navazovací a slouží právě k překlenutí oblasti bez vlíčovacích bodů. Body označené trojúhelníkem jsou body vlíčovací [1].



Obr. 2 Princip aerotriangulace [1]

Existují dva způsoby řešení aerotriangulace. Prvním z nich je metoda nezávislých modelů. Tato metoda je zastaralá, byla využívána hlavně před rozvojem výkonnějších počítačů. Dnes je používána metoda vyrovnání bloku svazků (bundle block adjustment).

Při metodě vyrovnání bloku svazků se vypočítají přímo vztahy mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi. Při vyrovnání jsou vypočteny prvky vnější orientace pro všechny snímky bloku současně. Výpočet probíhá na základě kolineárních rovnic iteračním způsobem. Neznámými v těchto rovnicích jsou prvky vnější orientace a souřadnice nově určovaných bodů. Vstupními hodnotami jsou snímkové souřadnice vlíčovacích, navazovacích a určovaných bodů a objektové souřadnice vlíčovacích bodů. Princip popisuje [1] následovně: „Svazky paprsků jsou umístěny  $(X_0, Y_0, Z_0)$  a pootočeny  $(\omega, \varphi, \kappa)$ , takže svazky paprsků se protínají, jak je nejlépe možné v navazovacích bodech a procházejí vlíčovacími body jak nejlépe je možné.“ Na Obr. 3 je znázorněn geometrický princip metody. [1]



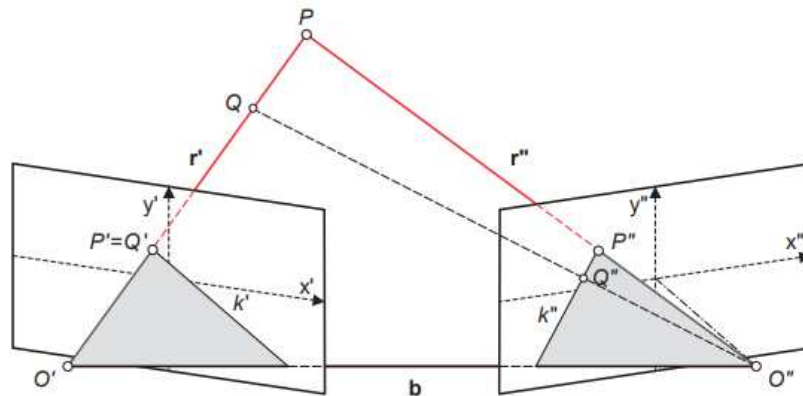
Obr. 3 Geometrický princip metody vyrovnání bloku svazků [1]

### Vlícovací, navazovací a kontrolní body

*Vlícovací bod* (Ground Control Point – GCP) je bod, který je v terénu fotogrammetricky signalizovaný nebo je to přirozený bod, který je identifikovatelný na měřickém snímku. Vlícovací bod je bod o známých souřadnicích, který slouží k určení nebo zpřesnění prvků vnější orientace a georeferencování snímků. Naopak u *navazovacích bodů* (Tie Points) souřadnice nejsou známy. Jsou to body jednoznačně identifikovatelné na snímku. Navazovací body slouží pro propojení snímků do bloku a vylepšení výpočtu prvků vnější orientace. Nachází se vždy na dvou nebo více snímcích. Měly by být na snímku rozmístěny rovnoměrně, především však v překrytových oblastech snímků, kde není dostatek vlícovacích bodů. Posledním typem bodů při fotogrammetrickém zpracování jsou *kontrolní body* (Check points). Kontrolní body mají známé souřadnice. Odchyly na nich slouží pro zjištění přesnosti. [2], [3], [6]

## Epipolární geometrie

Na Obr. 4 můžeme vidět geometrii stereoskopického páru obrazů, zobrazující bod  $P$ . Promítnuté paprsky  $r'$  a  $r''$  z každého středu do bodu objektu definují epipolární rovinu. Tato rovina protíná obrazové roviny podél čar  $k'$  a  $k''$ . Tyto čáry nazýváme epipolární linie. Za předpokladu bezchybného průniku paprsků musí obrazový bod  $P''$  v pravém snímku, který odpovídá bodu  $P'$  v levém snímku, ležet na epipolární linii  $k''$ . Jednoduše řečeno, pomocí epipolární geometrie můžeme nalézt linii, na které se bude nacházet bod z pravého snímku na snímku levém. [6]



Obr. 4 Epipolární geometrie pro konvergentní snímky [6]

## Bezpilotní prostředky

Jedná se o takové letecké prostředky, kde pilot není fyzicky přítomen na palubě stroje. Mohou být zcela automatické (fungují bez zásahu operátora), poloautomatické či manuální (veškerá manipulace je na operátorovi). Pro bezpilotní prostředky existuje několik různých označení.

Nejrozšířenější z nich je UAV (Unmanned Aerial Vehicle) v překladu letecký prostředek bez pilota na palubě. UAV je ovládaný ze vzdáleného stanoviště operátorem. S rozvojem bezpilotních prostředků se pojem UAV rozšířil na UAS (Unmanned Aerial System). Dle Úřadu pro civilní letectví se jedná o celý systém zahrnující kromě bezpilotního letadla také řídicí

stanici a jakýkoliv další prvek nezbytný k umožnění letu (například komunikační spojení nebo zařízení pro vypuštění a návrat).

Novějším pojmem je *RPA* (Remotely Piloted Aircraft) nebo pro celý systém *RPAS* (Remotely Piloted Aircraft System). Tento pojem označuje dálkově pilotovaný i dálkově řízený systém. RPAS zahrnuje kompletní UAV (letoun bez posádky, řídicí stanice, elektronická komunikace), dále sadu technických prostředků pro sběr obrazových dat a programových prostředků pro činnost RPAS. [7]

## 2.2 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

Je to metoda neselektivního získávání přesných prostorových dat, tzn. nelze si vybrat body, které zaměřit chceme a které ne, laserový skener zaměří vše, co je v jeho zorném poli. Výstupem laserového skenování je mračno bodů. V souvislosti s laserovým skenováním se rovněž využívá specifická terminologie, základní pojmy jsou uvedeny dále. [8]

### 3D laserový skener

Jedná se o zařízení, které je schopno po zadání parametrů skenování automaticky určit prostorové souřadnice bodů objektu. Při měření využívá laserové zařízení.

### Parametry skenování

Před skenováním je nutné nastavit parametry skenování. Jedná se o *velikost a polohu skenovaného prostoru, hustotu skenování nebo měření intenzity*. Skenovaný prostor je dán úhlovým rozsahem, ve kterém skener určuje prostorové souřadnice bodů objektu. Hustotou skenování rozumíme vzájemný úhlový rozestup mezi sousedními body ve vertikálním a horizontálním směru.

### Technické parametry skeneru

*Zorné pole* skeneru označuje maximální oblast, kterou skener může zaměřit jedním skenem. *Rychlost skeneru* určuje maximální počet zaměřených bodů za sekundu. *Dosahem skeneru* rozumíme maximální

vzdálenost, na kterou je možné zaměřit body objektu. Dosah skeneru je silně závislý na odrazivosti skenovaného povrchu. *Odrzivost* je veličina charakterizující míru schopnosti tělesa odrážet optické záření.

### **Mračno bodů**

Mračno bodů je soubor zaměřených bodů na povrchu skenovaného objektu. Jednotlivé body jsou měřeny neselektivně. Každý z bodů mračna má prostorové souřadnice. Častým jevem v mračně bodů je tzv. šum, což jsou chybně, nebo nechtěně zaměřené body. Se šumem souvisí i následné čištění dat, kdy se mračno bodů vyčistí od nepotřebných bodů.

3D laserové skenery obecně fungují na principu navádění laserového svazku podle programu na body rastru ve sloupcích či řádcích. Zároveň je měřen horizontální a vertikální úhel a vzdálenost. Prvním stupněm v rozvoji terestrických skenovacích systému se staly měřicí systémy pracující na základě prostorového protínání vpřed. Při této metodě se souřadnice získávají z měřených horizontálních a zenitových úhlů a známé délky základny. Většina moderních přístrojů pracuje na principu prostorové polární metody. K určení souřadnic měřeného bodu je třeba znát měřenou délku a horizontální a zenitový úhel. Úhly jsou určovány na základě polohy zrcadel, která rozmítají laserový paprsek a délka například pulzním dálkoměrem.

Pro určení délky využívají laserové skenery různé metody, záleží na typu přístroje. Elektronické laserové skenery určují vzdálenost na základě pulzní metody nebo měřením fázového rozdílu. Pulzní metoda je založena na principu měření tranzitního času mezi vysláním a přijetím elektromagnetického pulzu. Při fázovém měření vzdálenosti se určuje fázový posun vyslaného a přijatého signálu. Optoelektronické přístroje určují vzdálenost z délky tzv. základny. Úhly přilehlé k základně se měří.

K rozmítání laserového paprsku u moderních přístrojů slouží nejčastěji jedno rotující zrcadlo. Tuto funkci mohou zajišťovat také dvě rotující zrcadla, rotující hranol nebo rotující zdroj záření. [8]

Skenery můžeme dělit podle různých hledisek do několika kategorií. [8]

1. dělení podle principu

- polární skenery
- skenery se základnou

2. dělení podle dosahu

- systémy s velmi krátkým dosahem D<sub>1</sub> (0,1 m až 2,0 m)
- systémy s krátkým dosahem D<sub>2</sub> (2 m až 10 m)
- systémy se středním dosahem D<sub>3</sub> (10 m až 100 m)
- systémy s dlouhým dosahem D<sub>4</sub> (100 m až stovky m)

3. dělení podle přesnosti – v závislosti na dosahu

- skenery D<sub>1</sub> s vysokou přesností P<sub>1</sub> (0,01 mm až 1 mm)
- skenery D<sub>2</sub> s přesností P<sub>2</sub> (0,5 mm až 2 mm)
- skenery D<sub>3</sub> s přesností P<sub>3</sub> (2 mm až 6 mm)
- skenery D<sub>4</sub> s přesností P<sub>4</sub> (10 mm až 100 mm)

4. dělení podle rychlosti skenování

- systémy s velmi vysokou rychlostí R<sub>1</sub> (více než 50 000 bodů za sekundu)
- systémy s vysokou rychlostí R<sub>2</sub> (1000 až 50 000 bodů za sekundu)
- systémy se střední rychlostí R<sub>3</sub> (10 až 1000 bodů za sekundu)
- systémy s nízkou rychlostí R<sub>4</sub> (do 10 bodů za sekundu)

Stejně jako fotogrammetrie, tak i laserové skenování lze využít i v jiných oblastech, než je geodézie, například ve strojírenství, restaurátorství či stavebnictví.

Výhodou laserového skenování vzhledem ke klasickým geodetickým metodám je automatizované měření, vysoká přesnost měření a velké množství dat získané v krátkém čase. Technologie s sebou nese i řadu nevýhod. Mezi hlavní nevýhody se řadí pořizovací cena vybavení i softwarů, potřeba výkonnějšího hardwaru nebo časová náročnost zpracování.

### 3 SOUČASNÝ STAV

V této kapitole je provedena rešerše současného stavu problematiky propojení různých technologií mobilního sběru 3D dat. Většina nalezených článků se zabývá především kombinací dvou technologií – laserové skenování a pozemní fotogrammetrie, pozemní fotogrammetrie a letecká fotogrammetrie za využití bezpilotního leteckého systému (RPAS) nebo RPAS a laserové skenování. Objevuje se ale i několik výzkumů zabývajících se kombinací všech tří uvedených způsobů sběru dat. V této kapitole je stručně popsáno, čím se vybrané studie zabývají.

Článek [9] se zabývá tvorbou 3D modelu klasických čínských zahrad s různorodými a často komplikovanými prvky ve městě Suzhou v Číně. Pro tvorbu modelu využívá několika technik – pozemního laserového skenování, pozemní fotogrammetrie a letecké fotogrammetrie za použití dálkově ovládaného dronu. Každá z technologií sloužila pro zachycení jiné části areálu. Následně byla tato data z více zdrojů kombinována ve dvou krocích. V prvním kroku byla zkombinována mračna z laserového skenování a RPAS a následně k nim bylo přidáno mračno z pozemní fotogrammetrie.

Pro laserové skenování byl využit laserový skener Leica Scanstation C10. Skener byl využit především ve stísněných prostorech. Pro sběr dat letecké fotogrammetrie byl využit RPAS DJI Phantom 4 Pro vybavený palubní kamerou se senzorem CMOS s rozlišením 20 megapixelů. Pomocí UAV byly pořízeny snímky zahrady. Pozemní fotogrammetrická data byla pořízena fotoaparátem Canon EOS 5D Mark II s ohniskovou vzdáleností 24 mm a rozlišením 5616 x 3744 pixelů. Fotoaparátem byly zachyceny dva monolity v zahradách. Pro orientaci modelu bylo zaměřeno celkem 34 vlíčovacích bodů, a to prostřednictvím technologie GPS metodou RTK (Real-Time Kinematic) s maximální chybou v poloze  $\pm 1$  cm.

Data pořízená prostřednictvím RPAS DJI Phantom 4, skeneru a fotoaparátu byla předzpracována nezávisle. Pro zpracování mračna bodů z laserového

skeneru byl využit software Cyclone 8.0 od společnosti Leica. Fotografie z fotoaparátu Canon byly zpracovány prostřednictvím softwaru Agisoft PhotoScan, kde byly automaticky vyrovnány a bylo vygenerováno mračno bodů. Data z RPAS a také souřadnice vlíčovacích bodů byly naimportovány do programu Pix4Dmapper Pro v. 2.0 kde byla automaticky zpracována, včetně automatického výpočtu parametrů kalibrace kamery.

Zkombinování mračen bodů laserového skenování, pozemní fotogrammetrie a mračna z RPAS proběhlo v softwaru Geomatic Studio ve dvou krocích. Nejprve byla spojena mračna laserového skenování a RPAS fotogrammetrie. Ve druhém kroku bylo připojeno mračno pozemní fotogrammetrie, k již spojeným mračnům skenování a RPAS.

Směrodatná odchylka (standard deviation) vyrovnání mračna z laserového skenování na souřadnice určené metodou RTK byla 2,4 mm a střední chyba (mean error) 11,9 mm. Při vyrovnání mračna pozemní fotogrammetrie s kombinovaným mračnem laserového skenování a letecké fotogrammetrie bylo dosaženo střední chyby 26,9 mm a směrodatné odchylky 3,3 mm u monolitu A. V případě monolitu B byla hodnota střední chyby 12,3 mm a směrodatná odchylka 3,9 mm.

Kombinací pozemního laserového skenování, RPAS a pozemní fotogrammetrie se zabývá článek [10]. Cílem výzkumu bylo vytvořit komplexní prostorový model několika kostelů s rozlišením přibližně 1 cm. K dispozici byla data ze dvou měření pozemních laserových skenerů Leica BLK360 a Faro Focus 3D X330, dvou průletů dálkově ovládaného dronu DJI Mavic Pro s kamerou FC220 a dvou sad fotografií pořízených fotoaparátem ze země (fotoaparáty Canon EOS 200D a Canon EOS D6 Mark II).

Fotogrammetrické mračno bodů bylo vypočteno v prostředí softwarů Agisoft PhotoScan a RealityCapture s kontrolními body ze skeneru Faro. Z technických důvodů nebylo možné tachymetricky zaměřit kontrolní body, proto byly využity souřadnice kontrolních bodů z mračna bodů laserového skenování. Souřadnice kontrolních bodů byly určeny tak, že při zpracování mračna bodů z laserového

skeneru byly použity nejprve jako body navazovací, jejichž souřadnice byly v následném zpracování použity jako referenční. V prvním kroku byla zvláště vygenerována mračna bodů z fotogrammetrických snímků a laserového skenování. Při zpracování pozemních fotogrammetrických snímků se ukázalo, že nebylo možné naorientovat všechny snímky. V kombinaci se snímky z RPAS již byly naorientovány všechny snímky bez větších problémů. Následně byla mračna z laserového skenování a fotogrammetrie spojena v jeden model.

Při tomto postupu byl odhad průměrné zbytkové chyby (mean residual errors) 4–12 mm v závislosti na zvoleném softwaru. Nejlepších výsledků bylo dosaženo, když byla data z laserového skenování i fotogrammetrická data zpracovávána současně.

Ukazuje se také, že jakmile je k fotogrammetrickému mračnu připojeno i mračno z laserového skenování, výsledné mračno vzniklé kombinací obou se svou přesností blíží mračnu z laserového skenování (které poskytuje vyšší přesnost). Podrobné analýzy dále také ukazují, že některé části objektu, které se nepovedlo ideálně zkonstruovat z dat z laserového skenování, jsou velmi dobře zkonstruovány pomocí fotogrammetrických dat.

Článek [11] se rovněž zabývá kombinací pozemního laserového skenování, RPAS a blízké fotogrammetrie. V tomto případě nebyly sledovány přínosy zkombinování metod, ale laserová data byla využita pro odhad přesnosti fotogrammetrických dat.

Předmětem výzkumu je monitorování historického objektu, konkrétně věže justičního paláce v polské Varšavě. Výsledky budou také využity pro archeologické práce. Sledovaná budova je přibližně 14 metrů vysoká. Pro sběr dat byl využit dálkově ovládaný dron DJI Phantom 3 Pro, pro pozemní snímky fotoaparáty Canon 5D Mark II, Olympus C-5050Z a mobilní telefon Samsung Galaxy J3. Pro laserové skenování byl využit laserový skener Z+F Imager 5006h.

Souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů byly zaměřeny totální stanicí Leica 1201+ s přesností měření úhlů 1" a přesností měření délek 1 mm + 1,5 ppm.

Body byly zaměřeny ve dvou polohách dalekohledu. Přesnost geodetického zaměření bodů nebyla horší než 3 mm.

Nejprve byla zpracována data z laserového skeneru. Pro zpracování posloužily softwary Z+F LaserControl a LupoScan. Zpracování snímků proběhlo v softwaru Agisoft PhotoScan. Při zpracování byly zohledněny jednotlivé výškové úrovně.

Střední kvadratická odchylka (root mean square error) na vlícovacích a kontrolních bodech u laserového skenování se v jednotlivých souřadnicích pohybuje od 1,5 mm do 4,2 mm. U fotogrammetrických dat je tato hodnota v rozmezí 0,2 – 6,1 mm.

Pro studii byla využita přesná laserová data, která byla považována za referenční a dále digitální snímky s různým rozlišením z různých zařízení. Všechna data byla orientovaná do jednoho referenčního systému. Detailní analýza dat ukázala, že pro účely monitorování kulturního dědictví či archeologické účely lze využít i levnější techniku, např. smartphone nebo levnější RPAS. Předpokladem pro dobré výsledky je zpracování fotografií odpovídajícím způsobem.

Studie [12] se zabývá kombinací blízké fotogrammetrie a letecké fotogrammetrie za využití RPAS. Cílem výzkumu byla tvorba 3D modelu rozsáhlého historického objektu v Palermu v Itálii. Snímky byly pořízeny v různých konfiguracích (pozemní, šikmé, kolmé).

Pro sběr dat byl využit RPAS NT4 Contrás od společnosti Airvision. Systém je vybaven kamerou Nikon Coolpix S3300 s CCD senzorem a rozlišením 16 megapixelů. Pozemní snímky byly pořízeny kamerou Nikon D5000 s 12,3 megapixelovým CMOS senzorem.

V areálu byla zaměřena topografická síť. Měřeno bylo totální stanicí Leica TPS 1105. Zaměřeno bylo celkem 44 jednoznačně identifikovatelných přirozených bodů, které byly rovnoměrně rozloženy po areálu. Tyto body byly při zpracování využity jako vlícovací a kontrolní body.

Zpracování proběhlo v softwaru Agisoft PhotoScan. Pozemní a letecké snímky byly zpracovány současně v rámci jednoho projektu. V rámci výzkumu byl také testován vliv počtu vlíčovacích bodů na přesnost. Ve fázi orientace snímků byly testovány tři varianty – 12, 20 a 28 vlíčovacích bodů rovnoměrně rozložených na objektu. Testování ukázalo, že v případě minimálního počtu vlíčovacích bodů (v tomto případě 12), se střední kvadratická chyba (root mean square error) zhoršila pouze o 1 mm na vlíčovacích a o 1 mm na kontrolních bodech. To potvrdilo hypotézu, že pokud máme snímky pořízené v robustní konfiguraci (snímky pořízeny kolem celého objektu), můžeme dosáhnout vysoké přesnosti i s velmi malým počtem vlíčovacích bodů.

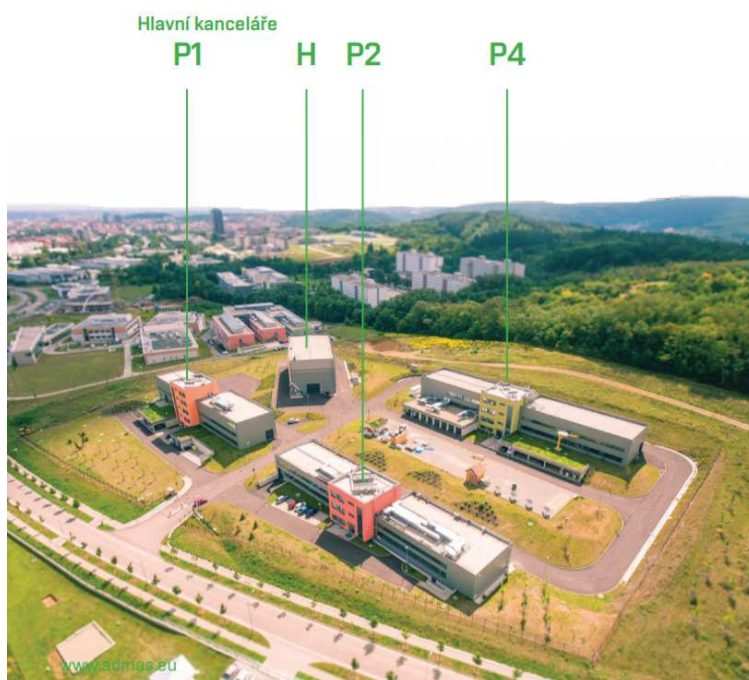
Pro tvorbu 3D modelu byla zvolena varianta s největším počtem vlíčovacích bodů (v tomto případě 28). 3D model byl generován v softwaru Agisoft PhotoScan. Nejprve bylo vygenerováno mračno bodů a následně z něj mesh model.

Pro zhodnocení přesnosti bylo naskenováno mračno bodů laserovým skenerem Faro Focus 3D. Mračna bodů z laserového skeneru a z fotogrammetrie byla porovnána v softwaru CloudCompare s využitím algoritmu C2M. Tento algoritmus umožňuje porovnání Cloud-to-Mesh distance, tedy vypočte vzdálenosti mezi body mesh modelu a mračna bodů. Porovnání ukázalo maximální vzdálenost bodů 4,5 cm. Horší výsledky byly zaznamenány podél dlouhých oken a k nim přilehlých stěn. Celkově však porovnání ukazuje dobrou kvalitu 3D modelu vytvořeného na základě fotogrammetrických dat. Celková střední kvadratická chyba byla pro 80 % dat menší než 2 milimetry.

Z uvedených článků vyplývá, že po zkombinování technologií lze očekávat lepší výsledky než při využití pouze jedné z technologií. Mračno bodů z laserového skenování zajistí lepší geometrii modelu, fotogrammetrie poskytne detailní informace o textuře, přičemž pomocí letecké fotogrammetrie můžeme zkonstruovat i ty části modelovaného objektu, které nebylo možné zachytit pozemními metodami.

## 4 BUDOVÁNÍ KALIBRAČNÍHO POLE

V rámci této diplomové práce bylo využito kalibrační pole zřízené v areálu výzkumného centra AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies). Centrum AdMaS je součástí Fakulty stavební VUT v Brně. Celý areál výzkumného centra je uzavřený a oplocený, což je výhodné jak pro umístování terčů, tak pro další práci. Areál AdMaS byl zvolen především z důvodu snadné dostupnosti, dlouhodobé udržitelnosti signalizačních značek a také využitelnosti značek pro další výzkumy. Areál AdMaS je tvořen čtyřmi samostatnými budovami. Pro účely této diplomové práce byla využita pouze jedna z nich, konkrétně budova s označením H. Rozmístění budov můžeme vidět na Obr. 5.



Obr. 5 Areál AdMaS [13]

Kalibrační pole bylo vybudováno v rámci řešení projektu Specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-19-5704. Výsledkem etapy tvorby kalibračního pole byly souřadnice kalibračních bodů určené vyrovnáním metodou nejmenších čtverců.

## 4.1 TVORBA MĚŘICKÉ SÍTĚ A ZAMĚŘENÍ BODŮ KALIBRAČNÍHO POLE

Prvním krokem při budování kalibračního pole bylo vybudování měřické sítě. Na začátku byly zaměřeny čtyři body měřické sítě statickou metodou pomocí technologie GNSS (konkrétně body číslo 4001, 4002, 4003 a 4005). Tyto body byly stabilizovány měřickými hřeby v asfaltu. Pro zaměření bodů byly použity aparatury GNSS přijímačů Trimble R8S a Trimble R4-3. Měření probíhalo současně na všech čtyřech bodech. Simultánní observace trvala více než 75 minut.

V další fázi následovala stabilizace ostatních bodů měřické sítě a signalizace podrobných bodů kalibračního pole. Podrobné body kalibračního pole byly signalizovány šachovnicovými terči o rozměrech 20 x 20 centimetrů. Celkem bylo zřízeno 214 kalibračních bodů rovnoměrně rozmístěných po celém areálu AdMaS. Terče byly umístěny ve dvou různých polohách – horizontální a vertikální. Horizontálních terčů bylo vyznačeno 119 a terčů ve vertikální poloze 95.

Horizontální terče byly vyznačeny nástřikem bílé barvy pomocí připravené šablony na asfaltové komunikace v areálu výzkumného centra. Uprostřed terče byl vždy umístěn měřický hřeb, který umožňuje obnovení terče v případě poškození. Horizontální terč můžeme vidět na Obr. 6.

Vertikální terče byly vyrobeny z matného černého plechu, který byl doplněn o reflexní fólii tak, aby tvořil šachovnici. Vertikální terče byly umístěny na všech budovách v areálu AdMaS vždy ve dvou výškových úrovních, a to přibližně ve dvou a deseti metrech. Pokud to bylo možné, byly na každé stěně umístěny 4 vertikální terče, vždy na obou okrajích stěny. Vertikální terče byly umístěny také na další vhodná místa v areálu, například betonové sloupy, sloupy veřejného osvětlení nebo na dopravní značky. Podobu vertikálního terče vidíme na Obr. 6.



Obr. 6 Vertikální (nahore) a horizontální (dole) terče

Dalším krokem bylo zaměření bodů měřické sítě a podrobných bodů kalibračního pole. Měření probíhala současně. Měřeno bylo polární metodou totální stanicí Trimble S8 verze HP za využití trojpodstavcové soupravy. Totální stanice Trimble S8 HP měří délky s přesností  $0,8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ , střední chyba směru je pak udávána na  $6''$ . Každý z bodů kalibračního pole byl zaměřen vždy ze dvou různých stanovisek. Měření probíhalo během června 2019, kompletní zaměření trvalo téměř čtyři dny.

#### 4.2 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ A URČENÍ SOUŘADNIC BODŮ MĚŘICKÉ SÍTĚ A KALIBRAČNÍCH BODŮ

Následovalo zpracování naměřených údajů. Nejprve proběhlo zpracování vektorů GNSS a určení přibližných souřadnic pomocí softwaru Trimble Business Center. Prostřednictvím permanentní stanice TUBO byla síť připojena do systému ETRS89, konkrétně realizace ETRF2000.

Souřadnice v systému ETRS89 jsou geocentrickými souřadnicemi. Pro kombinaci měření GNSS soupravami s terestrickými měřeními bylo třeba transformovat přibližné souřadnice do lokální topocentrické soustavy

označované jako NEU (North, East, Up). Topocentrum této soustavy leží v bodě 4001. Kombinaci s terestrickými měřeními umožňuje směr svislé osy systému (Up), který je shodný se směrem normály k elipsoidu. Vliv tížnicové odchylky byl vzhledem k velikosti lokality zanedbán. [14]

V další fázi došlo k vyrovnání sítě a určení finálních souřadnic všech bodů měřické sítě. Pro vyrovnání sítě byl využit software DLL MNČ.

Celá síť měřických bodů byla rozdělena na páteřní síť a síť navazující. Body páteřní sítě jsou ty body, u kterých byly délky měřeny obousměrně. U bodů sítě navazující pouze jednosměrně. Nejprve byla předzpracována samostatně páteřní síť. Byla vyrovnána jako volná síť zprostředkujícím vyrovnáním s podmínkami užitím metody nejmenších čtverců (MNČ). Přesnost měření byla stanovena na základě přesnosti použitého přístroje. Střední chyba délek pro vyrovnání byla stanovena jako  $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  (po zahrnutí vlivu centrace). Střední chyba směru  $6''$ .

Následovalo vyrovnání sítě jako celku, tedy bodů páteřní sítě i bodů navazující sítě. Celá síť byla vyrovnána jako vázaná, kde body páteřní sítě byly stanoveny jako body pevné a body navazující sítě byly určovanými. Síť byla vyrovnána opět v softwaru DLL MNČ prostřednictvím zprostředkujícího vyrovnání užitím MNČ. Výsledkem vyrovnání byly definitivní souřadnice všech bodů měřické sítě v topocentrické soustavě.

Posledním krokem etapy budování kalibračního pole bylo určení souřadnic podrobných bodů kalibračního pole. Souřadnice podrobných bodů byly určeny výpočtem geodetické sítě. Síť byla vyrovnána jako vázaná, kde body měřické sítě byly stanoveny jako pevné a podrobné body jako volné (určované). Souřadnice určené vyrovnáním byly následně transformovány z topocentrické soustavy zpět do systému ETRS89, realizace ETRF2000. [14]

## 5 TECHNIKA VYUŽITÁ PRO SBĚR DAT

Pro účely této diplomové práce byla data sbírána pomocí různých prostředků, aby bylo možné následně zkombinovat data při tvorbě modelu. Celkem byly využity 3 různé přístroje. Prvním z nich byl RPAS DJI Phantom 3 Advanced s kamerou DJI FC30S. Druhým přístrojem byl fotoaparát Canon EOS 6D Mark II. Výstupem z prvních dvou jmenovaných je sada snímků. Posledním způsobem získání dat bylo použití laserového skeneru FARO Focus 3D 120, kde je výstupem pro další zpracování mračno bodů.

### 5.1 RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED

Pro získání fotogrammetrických dat byl využit dálkově pilotovaný letecký systém (RPAS) DJI Phantom 3 Advanced s kamerou FC300S. Je to kvadrokoptéra s vyspělým pozičním systémem kombinujícím data globálních navigačních satelitních systému GPS a GLONASS. Součástí výbavy je také technologie VPS (Vision Positioning System), která umožňuje přesné umístění i bez signálu GPS/GLONASS. Maximální rychlost letu u RPAS Phantom 3 Advanced se uvádí 16 m/s. Při plně nabitě baterii je maximální doba letu 23 minut. [15] RPAS si můžeme prohlédnout na Obr. 7.



Obr. 7 RPAS DJI Phantom 3 Advanced

Phantom 3 Advanced je vybaven neměřickou kamerou DJI FC300S, která je stabilizována tříosým závěsem. V Tab. 1 jsou uvedeny základní parametry kamery DJI FC300S. [16]

Tab. 1 Parametry kamery DJI FC300S

Parametr	Hodnota
Typ snímače	1:2,3“ CMOS
Rozměry snímače	6,16 x 4,62 mm
Rozlišení kamery	4000 x 3000 px
Ohnisková vzdálenost	3,61 mm

## 5.2 FOTOAPARÁT CANON EOS 6D MARK II

Fotoaparát Canon EOS 6D Mark II je digitální jednooká zrcadlovka. Je vybavená plnoformátovým snímačem CMOS poskytujícím rozlišení 26,2 megapixelů. Rozměr snímače výrobce udává přibližně 35,9 x 24,0 mm. Rozsah citlivosti ISO při pořízení snímku je 100–40000. Maximální rychlost snímání je přibližně 6,5 snímků za sekundu. Fotoaparát umožňuje také záznam videa, a to v rozlišení Full HD, dále potom snímání časosběrného záznamu s rozlišením 4K. Fotoaparát je vybaven také funkcemi Wi-Fi/NFC/Bluetooth pro bezdrátovou komunikaci. Pro získávání dat pro tuto diplomovou práci byl využit objektiv s ohniskovou vzdáleností 24 mm. [17] Fotoaparát Canon EOS 6D Mark II je na Obr. 8.



Obr. 8 Kamera Canon EOS 6D Mark II [18]

### 5.3 LASEROVÝ SKENER FARO FOCUS 3D S120

Laserový skener Faro Focus 3D S120 je skener určený pro přesné měření objektů a budov. Vzdálenosti jsou měřeny fázovým dálkoměrem, který k měření vzdáleností využívá technologii měření fázového posunu vyslaného a přijatého infračerveného paprsku. Rozsah zorného pole skeneru je 360° v horizontálním a 305° ve vertikálním směru. Skener dokáže měřit na vzdálenost 0,6 až 60 metrů, kdy chyba vzdálenosti dosahuje hodnot přibližně  $\pm 2$  mm. Skener je vybaven také dvouosým kompenzátorem, který zajišťuje přesné urovnání do svislice. Přístroj dokáže měřit rychlostí až 976 000 bodů za sekundu. Udávaná výdrž baterie je až 5 hodin. Výsledkem měření je mračno bodů. V závislosti na zvoleném rozlišení může mračno bodů obsahovat až miliony bodů. Data se ukládají na SD kartu. Skener je vybaven také dotykovým displejem, dále je součástí vybavení například barometr nebo kompas. [19] Na Obr. 9 si můžeme prohlédnout skener Faro.



Obr. 9 Laserový skener Faro Focus 3D S120 [20]

## 6 SBĚR DAT

Sběr dat pro tuto diplomovou práci probíhal během podzimu 2020. Původně byly letecké a pozemní snímky i laserový sken pořízeny v jeden den. Později se však ukázalo, že pozemní fotografie nebyly pořízeny v dostatečném překrytu a nebylo tak možné je nadále zpracovávat. Z tohoto důvodu došlo začátkem prosince k novému sběru fotogrammetrických dat (pro pozemní i leteckou fotogrammetrii). Pořízení dat v různé dny není ideální volbou, neboť v areálu AdMaS dochází k drobným změnám terénu (např. se objeví palety s materiálem pro jiné výzkumy, auta jsou zaparkovaná na jiných místech apod.). Z časových důvodů však nebylo možné zopakovat i laserové skenování.

Pro sběr kvalitních dat je nutné správné nastavení použitého přístrojového vybavení. Dále je také potřeba vybrat den s vhodnými meteorologickými podmínkami. V následujících podkapitolách je popsáno, jak konkrétně sběr dat probíhal. V této práci se budu zabývat především popisem fotogrammetrických prací, neboť mračno bodů laserového skenování bylo pro účely této diplomové práce převzato od kolegy Tomáše Mrůzka, jehož diplomová práce se zabývá tvorbou 3D modelu za využití dat z laserového skeneru. Objektem jeho práce je rovněž budova H v areálu AdMaS.

### 6.1 SNÍMKOVÁNÍ PRO TESTOVACÍ PROJEKT PRO PREKALIBRACI

V rámci testování vlivu prekalibrace na výsledky fotogrammetrického zpracování se uskutečnilo také testovací snímkování v areálu výzkumného centra AdMaS, konkrétně na budově H.

Snímkování probíhalo 21. 8. 2020 pomocí RPAS DJI Phantom 3 Advanced s kamerou DJI FC300S. Při snímkování byla hodnota parametru ISO nastavena na 100 a expoziční čas byl nastaven na hodnotu 1/80 s. Plánování letu i samotné snímkování probíhalo v prostředí aplikace Pix4Dcapture, která RPAS v průběhu letu řídila. Výška letu byla 30 m. Podélný překryt dosahoval 80 % a příčný překryt 70 %. Celkem bylo pořízeno 163 šikmých snímků za 11 minut.

## 6.2 SNÍMKOVÁNÍ RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED

RPAS DJI Phantom 3 Advanced je vybaven neměřickou kamerou DJI FC300S, která je umístěna na tříosém stabilizátoru ve spodní části RPAS.

Sběr dat proběhl dne 9. 12. 2020. V tento den panovaly příznivé podmínky pro sběr fotogrammetrických dat. Bylo zataženo, takže nehrozilo přílišné oslunění snímků a budova nevrhala stíny. Povětrnostní podmínky byly příznivé pro vzlet dronu. Snímkování provedl Ing. Jakub Nosek.

Při snímkování byly pořízeny snímky budovy ve čtyřech letových hladinách, dále byly pořízeny detailní fotografie komína na čelní straně budovy H. RPAS byl pilotován manuálně tak, aby překryt snímků dosahoval minimálně 75 % v podélném směru. Minimální příčný překryt snímků 60 % doporučený návodem [21] byl také dodržen.

Při snímkování byl parametr ISO nastaven na hodnotu 100 a rychlost závěrky (expozičního času) nastavena na hodnotu 1/60 s. Clonové číslo bylo nastaveno na hodnotu f/2,8. Letový čas byl celkem 39 minut a počet pořízených snímků celkem 301.

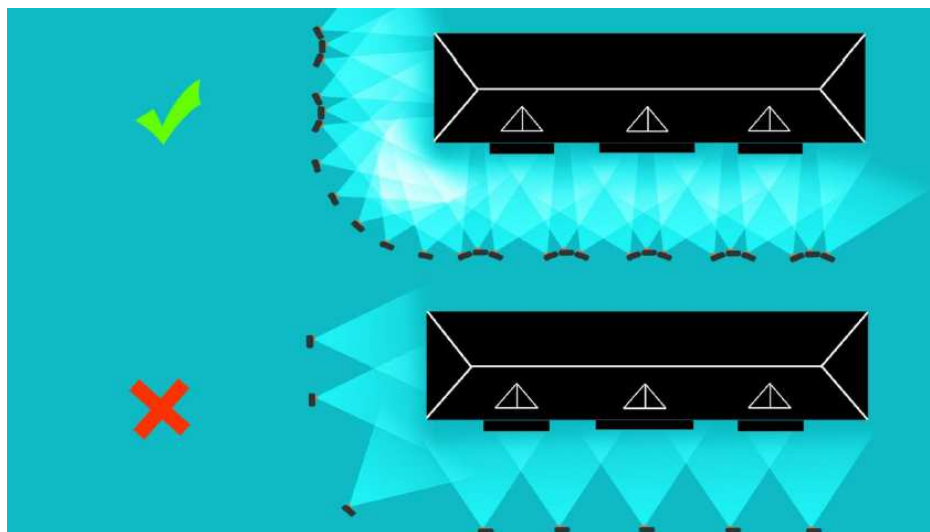
## 6.3 SNÍMKOVÁNÍ KAMEROU CANON EOS 6D MARK II

Kamerou Canon jsem snímkovala ve stejný den jako probíhal sběr dat pomocí RPAS, tedy 9. 12. 2020. Jak již bylo řečeno, v tento den panovaly příznivé podmínky pro sběr fotogrammetrických dat.

Snímkování probíhalo podle obecných doporučení návodu [22]. Základní pravidla, která je třeba dodržet jsou následující

- držet se snímkování v konkrétním pořadí tak, aby byla zajištěna návaznost snímků a zajistili jsme nasnímání celého objektu,
- z jednoho stanoviska pořídit alespoň 3 snímky pod rozdílným úhlem pohledu, kdy tento úhel by měl být maximálně 15° (Obr. 10),
- dodržet podélný překryt snímků alespoň 60 %,
- maximální úhel mezi snímky na rozích budovy by měl být 15° (Obr. 10),

- snímkovat ze stejné vzdálenosti na všech stanovištích.



Obr. 10 Schéma snímkování budovy [22]

Kamera byla nastavena na prvním stanovišti podle aktuálních podmínek prostředí. Pro zachování hloubky ostrosti na snímcích bylo nastaveno clonové číslo na hodnotu  $f/5.6$ . Čas expozice byl nastaven na hodnotu  $1/60$  s. Hodnota parametru ISO byla nastavena na 100. Během snímkování se nastavení neměnilo, což se později ukázalo jako nevhodné. Ačkoliv snímkování celého objektu trvalo pouze 1,5 hodiny, během této doby se změnily světelné podmínky a poslední snímky byly oproti prvním o poznání tmavší. Bylo by tedy vhodnější během snímkování překontrolovat kvalitu snímků a nastavení upravit, případně ponechat automatické nastavení hodnoty ISO pro zajištění stejného osvětlení na všech snímcích. Snímky, které byly příliš tmavé byly následně radiometricky zkorigovány tak, aby celý soubor snímků byl co nejvíce homogenní. Ukázka upraveného a neupraveného snímku je na Obr. 11.

Objekt byl snímkován ze vzdálenosti 10 až 11 metrů. Snímkováno bylo převážně ve vertikální poloze fotoaparátu, detail komínu na čelní straně budovy byl snímkován v horizontální poloze. Vertikální poloha byla zvolena z důvodu rozměrů budovy. Pokud bychom chtěli snímkovat v horizontální poloze, snímkování by muselo probíhat ve dvou výškových úrovních, což je v našem

případě neproveditelné, nebo by snímkování muselo probíhat ze vzdálenosti minimálně 15 metrů. V tomto případě by zorné pole bylo zastíněno vegetací, sloupy veřejného osvětlení a jinými objekty. Z tohoto důvodu byla zvolena vertikální poloha fotoaparátu.



Obr. 11 Porovnání snímku před (vlevo) a po (vpravo) radiometrické korekci

Při snímkování ze vzdálenosti 10 až 11 metrů s kamerou Canon EOS 6D Mark II s fullframe senzorem je velikost snímané oblasti přibližně 16 x 11 metrů. Snímkovací stanoviště byla volena tak, aby byla splněna podmínka podélného překrytí minimálně 60 %. Za uvedených podmínek by to znamenalo stanoviště každé čtyři metry. V tomto případě byla stanoviště přibližně po 2,5 metrech, což zajistilo podélný překrytí snímků až 75 %. Podrobnosti výpočtu geometrie snímkování jsou uvedeny v příloze č. 1. Celkem bylo pořízeno 347 snímků, následně však byla část snímků vymazána, takže do zpracování vstupovalo 227 snímků. Vymazány byly snímky na rozích budovy, kde byly původně na každém stanovišti pořízeny tři snímky pod různým úhlem, což byla drobná odchylka oproti návodu [22]. Software si s tím ale nedokázal poradit, proto byly u těchto stanovišť zachovány pouze čelní snímky, jak doporučuje [22].

## 7 PREKALIBRACE KAMERY

S kvalitou fotogrammetrických snímků úzce souvisí také kvalita určení parametrů kamery (prvků vnitřní orientace). V rámci specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-19-5704 byly určovány parametry kamery, která je součástí RPAS DJI Phantom 3. Podrobnosti jsou uvedeny v této kapitole. Parametry kamery Canon EOS 6D Mark II byly převzaty od kolegy Michala Jiráska, který se ve své diplomové práci zabývá tvorbou 3D modelu z fotogrammetrických dat z této kamery. Postup pro prekalibraci této kamery je stejný jako u kamery DJI FC300S, která je součástí použitého RPAS. Parametry této kamery jsou uvedeny v příloze č. 4.1.

Zpracování probíhalo v prostředí softwaru ContextCapture od vývojáře Bentley. Uživatelské rozhraní softwaru je intuitivní, umožňuje celou řadu uživatelských nastavení a různé formáty finálních produkcí (mesh model, mračno bodů, ortofoto). Pro správnou práci softwaru je nutné spustit dva moduly – ContextCapture Master a ContextCapture Engine. Zatímco modul Master umožňuje prostřednictvím uživatelského rozhraní import dat, volby nastavení nebo prohlížení dílčích výsledků, modul Engine provádí výpočetní úlohy. Do modulu Engine uživatel nezasahuje, úlohy běží na pozadí.

Při zpracování v softwaru ContextCapture je kalibrace kamery součástí procesu aerotriangulace. Software během aerotriangulace sám vypočte parametry kamery a dále s nimi počítá. Sám výrobce softwaru však doporučuje určit prvky vnitřní orientace předem v rámci prekalibrace kamery. [21] Pro prekalibraci kamery je vhodné vybrat jednoduchý projekt. Jakmile jsou určeny parametry kamery, lze tyto využít i pro rozsáhlejší projekty. Pokud jsou parametry kamery určeny v rámci prekalibrace, aerotriangulace u komplexních projektů by měla fungovat efektivněji, než by tomu bylo bez vložení počátečních parametrů.

## 7.1 POKYNY PRO PREKALIBRACI KAMERY PRO SW CONTEXTCAPTURE

Pro prekalibraci je vhodné vybrat jednoduchý projekt, který nezabere velké množství času, ale zajistí robustnost řešení a jednoznačnost přiřazení klíčových bodů. V rámci rozsáhlejšího projektu se poté parametry kamery použijí jako dané. Výslednými hodnotami kalibrace kamery jsou ohnisková vzdálenost, poloha hlavního snímkového bodu a koeficienty matematických modelů popisujících distorzi objektivu.

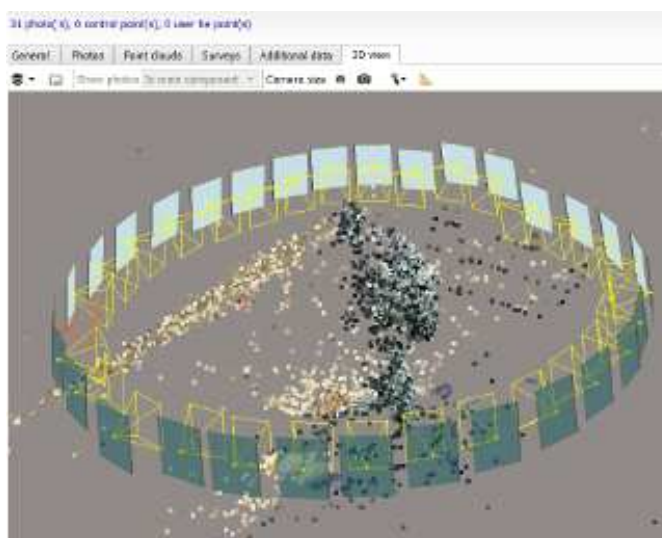
Pro prekalibraci vybereme volně stojící objekt, který je možné vyfotografovat ze všech možných úhlů pro zajištění robustního řešení. Tento objekt by měl být texturovaný, aby byla umožněna snadná automatická detekce spojovacích bodů. Ideálním objektem je například socha na volném prostranství (Obr. 12).



Obr. 12 Ukázka vhodného objektu pro prekalibraci kamery [21]

Vybraný objekt vyfotografujeme kamerou, kterou budeme používat i pro sběr dat u skutečných projektů. Kameru nastavíme stejně, jako bychom sbírali data pro skutečný projekt. Snímky pořídíme kolem celého objektu. Návod [21] uvádí přibližně 30 snímků, které jsou od sebe vzájemně stejně vzdáleny. Doporučenou konfiguraci postavení kamery vidíme na Obr. 13.

Po dokončení sběru dat pro kalibraci, nahrajeme pořízené fotografie do softwaru ContextCapture a spustíme proces aerotriangulace. V tomto kroku nezasahujeme do nastavení kamery a ponecháme výchozí nastavení. Jakmile proběhne aerotriangulace, kalibrace kamery je hotová. Parametry kamery jsou uvedeny v protokolu aerotriangulace, který je automaticky generovaný softwarem. Tyto parametry poté uložíme do databáze kamer a můžeme je využít při dalších projektech.



Obr. 13 Pozice kamery během snímání sběru dat pro kalibraci kamery [21]

## 7.2 KALIBRACE KAMERY UMÍSTĚNĚ NA RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED

RPAS DJI Phantom 3 Advanced je vybaven kamerou DJI FC300S. Je to neměřická kamera jejíž základní parametry jsou uvedeny výše v Tab. 1.

Jako objekt pro kalibrační snímkování byl zvolen sloup v areálu Fakulty stavební VUT v Brně. Sloup je umístěn před budovou a uvnitř areálu. Snímky byly pořízeny kolem celého objektu v tzv. „robustní“ konfiguraci, což zajišťuje kvalitnější propojení snímků při aerotriangulaci. Snímkování sloupu proběhlo z celkem 21 postavení. Z každého postavení byly pořízeny 3 vodorovné a 3 svislé snímky. Různá orientace snímků zajistí lepší určení polohy hlavního snímkového bodu. [16] Na Obr. 14 vidíme pozice kamery při kalibračním snímkování.

U neměřických kamer mohou být prvky vnitřní orientace proměnlivé v čase, jejich stabilita může záviset i na teplotě kamery. Z tohoto důvodu bylo kalibrační snímkování provedeno dvakrát nezávisle za různých teplotních podmínek. První snímkování proběhlo dne 15. 9. 2020, kdy teplota vzduchu dosahovala 28 °C. Druhé snímkování proběhlo 8. 10. 2020, kdy byla teplota vzduchu pouhých 14 °C. Při obou snímkovacích kampaních byla dodržena stejná konfigurace snímkovacích postavení, přičemž vždy bylo pořízeno přibližně 115 fotografií. [16] Snímky byly dále zpracovány v softwaru ContextCapture dle pokynů uvedených v kapitole 7.1.



Obr. 14 Pozice kamery při snímkování pro kalibraci [16]

Výsledky prekalibrace jsou uvedeny v Tab. 2. Z výsledných hodnot prvků vnitřní orientace je patrné, že jsou v čase poměrně stabilní a ani velký rozdíl teplot na ně nemá velký vliv. Pro další zpracování byl využit průměr hodnot z obou snímkovacích kampaní. Výsledné parametry kamery jsou uvedeny také v příloze č. 4.2.

Tab. 2 Vybrané výsledky kalibrace kamery DJI FC300S

Parametr	15. 9. 2020	8. 10. 2020	Průměr
$c$	3,58682 mm	3,58703 mm	3,58693 mm
$x_0$	2013,59 px	2015,58 px	2014,59 px
$y_0$	1475,32 px	1475,99 px	1475,66 px
$k_1$	$-5,603 \cdot 10^{-3}$	$-5,565 \cdot 10^{-3}$	$-5,584 \cdot 10^{-3}$
$k_2$	$-1,398 \cdot 10^{-4}$	$-11,808 \cdot 10^{-4}$	$-6,603 \cdot 10^{-4}$
$k_3$	$1,222 \cdot 10^{-2}$	$1,300 \cdot 10^{-2}$	$1,261 \cdot 10^{-2}$

Písmeno  $c$  v tabulce označuje ohniskovou vzdálenost,  $x_0$  a  $y_0$  jsou souřadnice hlavního snímkového bodu a  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  jsou koeficienty modelu radiální distorze.

### 7.3 TESTOVACÍ PROJEKT

V rámci tohoto projektu bylo využito bodů kalibračního pole nacházejícího se v prostorách areálu. Souřadnice bodů kalibračního pole byly pro další zpracování považovány za referenční.

Pořízené snímky byly zpracovány v prostředí ContextCapture a to ve dvou základních variantách. V první variantě byly parametry kamery vypočteny automaticky v rámci aerotriangulace (self-calibrated). Ve variantě druhé byly použity prvky vnitřní orientace vypočtené při prekalibraci (pre-calibrated). Dále byly tyto varianty rozpracovány s různým počtem vlíčovacích bodů (GCP) a také pro různé výškové úrovně vlíčovacích bodů. Vybrané výsledky testování jsou uvedeny v Tab. 3 a Tab. 4. Pokud probíhá snímkování založené na určení parametrů kamery v průběhu aerotriangulace, musíme brát v potaz, že toto snímkování je náchylné na špatnou geometrii snímků. Z tohoto důvodu byly otestovány také varianty, kde byly k vlíčovacím bodům v úrovni terénu přidány ještě tři vlíčovací body na střeše objektu. Výsledky těchto variant jsou uvedeny v Tab. 5. [16]

Tab. 3 Přesnost variant v úrovni vlíčovacích bodů (terénního reliéfu)

Varianta	SE [m]	SN [m]	SU [m]
<b>6 GCP (pre-calibrated)</b>	0,007	0,009	0,015
<b>9 GCP (pre-calibrated)</b>	0,009	0,015	0,013
<b>6 GCP (self-calibrated)</b>	0,005	0,007	0,011
<b>9 GCP (self-calibrated)</b>	0,005	0,006	0,011

Tab. 4 Přesnost variant ve výšce 16 metrů nad úrovní vlíčování (v úrovni střechy objektu)

Varianta	SE [m]	SN [m]	SU [m]
<b>6 GCP (pre-calibrated)</b>	0,050	0,040	0,037
<b>9 GCP (pre-calibrated)</b>	0,047	0,036	0,033
<b>6 GCP (self-calibrated)</b>	0,053	0,044	0,114
<b>9 GCP (self-calibrated)</b>	0,054	0,042	0,115

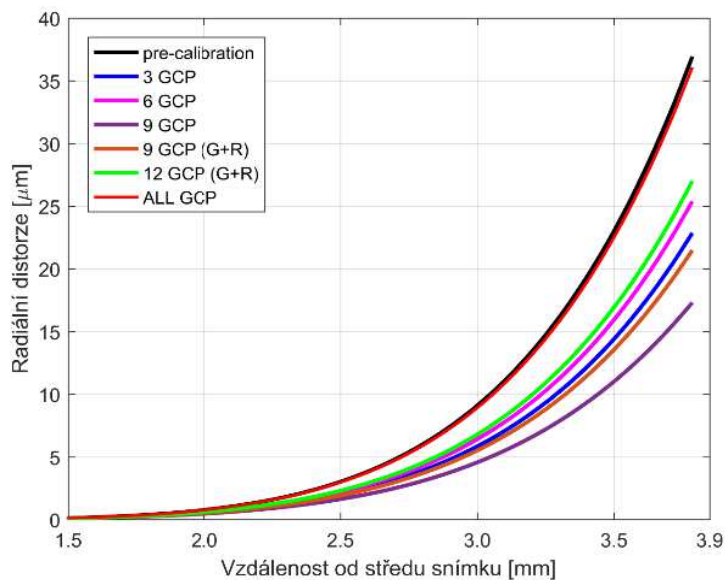
Tab. 5 Přesnost variant v úrovni střechy po přidání vlíčovacích bodů na střechu

Varianta	SE [m]	SN [m]	SU [m]
<b>6+3 GCP (pre-calibrated)</b>	0,065	0,032	0,028
<b>9+3 GCP (pre-calibrated)</b>	0,066	0,034	0,032
<b>6+3 GCP (self-calibrated)</b>	0,069	0,032	0,058
<b>9+3 GCP (self-calibrated)</b>	0,073	0,040	0,060

Z uvedených výsledků vyplývá, že nejlepších přesnosti je možné dosáhnout za využití prekalibrace kamery. Srovnatelné přesnosti výsledků lze dosáhnout pouze v případě, kdy zájmová oblast leží ve stejné výškové úrovni jako použité vlíčovací body. Pokud leží vyhodnocovaná oblast v jiné výškové úrovni (např. v úrovni střechy objektu) je přesnost výsledků výrazně vyšší při využití prekalibrace kamery, v případě výškové složky lze dosáhnout až trojnásobně vyšší přesnosti. Pokud se vlíčovací body nachází v různých výškových úrovních,

lze dosáhnout lepších výsledků. Nicméně i v tomto případě využití prekalibrované kamery poskytuje vyšší přesnost.

Pokud porovnáme prvky vnitřní orientace určené při prekalibraci s prvky vnitřní orientace vypočtenými během aerotriangulace v rámci testovacího projektu, zjistíme, že výsledků srovnatelných s prekalibrací lze dosáhnout pouze za předpokladu, že budeme mít velký počet vlíčovacích bodů. V Tab. 6 jsou uvedeny prvky vnitřní orientace vypočtené v rámci různých variant. Varianta „ALL“ byla vypočtena na základě maximálního počtu vlíčovacích bodů, v tomto projektu to bylo celkem 31 vlíčovacích bodů. Tato varianta se svými hodnotami nejvíce blíží hodnotám určeným v rámci prekalibrace. Tak velké množství vlíčovacích bodů však není při praktických aplikacích efektivní. Jako nejvýhodnější se tak stále jeví využití prekalibrace kamery a následné zpracování s těmito hodnotami. [16] Na Obr. 15 jsou zobrazeny hodnoty radiální distorze pro jednotlivé varianty. Obrázek potvrzuje, že varianta „ALL“ se skutečně svými hodnotami blíží nejvíce hodnotám vypočteným v rámci prekalibrace.



Obr. 15 Porovnání radiální distorze z různých variant určení prvků vnitřní orientace [16]

Tab. 6 Vybrané prvky vnitřní orientace vypočtené z různých variant vřícování a prekalibrace

Varianta	c [mm]	$x_0$ [px]	$y_0$ [px]	$k_1$	$k_2$	$k_3$
6 GCP	3,603	2012,74	1456,49	$-5,910 \cdot 10^{-3}$	$54,208 \cdot 10^{-4}$	$5,421 \cdot 10^{-3}$
9 GCP	3,304	2013,14	1455,58	$-8,366 \cdot 10^{-3}$	$109,124 \cdot 10^{-4}$	$5,160 \cdot 10^{-3}$
6 + 3 GCP	3,595	2013,14	1464,97	$-8,751 \cdot 10^{-3}$	$84,055 \cdot 10^{-4}$	$6,751 \cdot 10^{-3}$
9 + 3 GCP	3,593	2012,35	1465,79	$-7,120 \cdot 10^{-3}$	$49,035 \cdot 10^{-4}$	$8,859 \cdot 10^{-3}$
ALL	3,586	2011,60	1469,31	$-5,868 \cdot 10^{-3}$	$8,622 \cdot 10^{-4}$	$8,859 \cdot 10^{-3}$
prekalibrace	3,587	2014,59	1475,66	$-5,584 \cdot 10^{-3}$	$-6,603 \cdot 10^{-4}$	$1,261 \cdot 10^{-2}$

## 8 TVORBA 3D MODELU V PROSTŘEDÍ CONTEXTCAPTURE

Pro tvorbu výsledného 3D modelu byl zvolen software ContextCapture, stejně jako při testování vlivu prekalibrace kamery.

Velkou výhodou softwaru ContextCapture vidím v tom, že data se v rámci projektu ukládají do jednotlivých bloků. Tyto bloky je možné libovolně kopírovat a upravovat, což je výhodné, pokud se například ukáže, že jsme se v rámci zpracování vydali špatným směrem. Můžeme se pak kdykoliv vrátit k předchozí úrovni zpracování. Bloky je možné také exportovat a importovat. Tuto vlastnost je možné využít, pokud například chceme zpracovat snímky ze stejného projektu ale v jiném formátu.

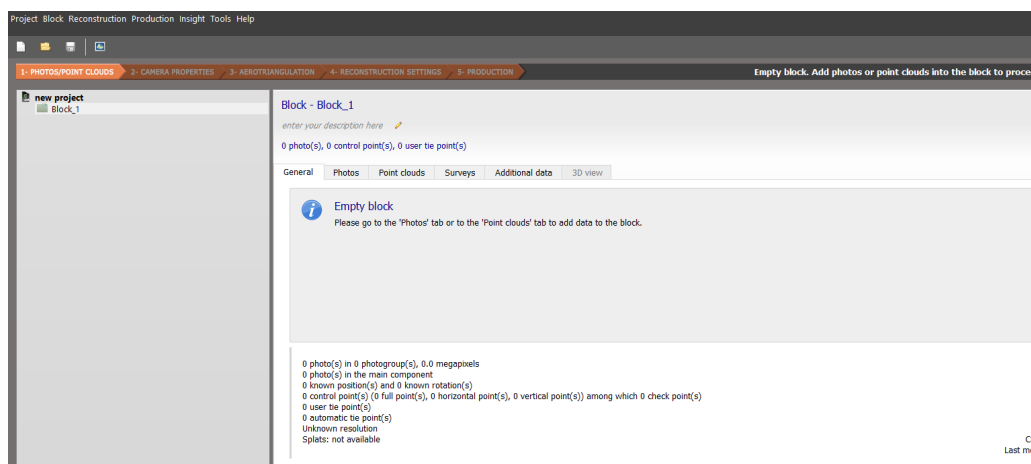
V této kapitole bude podrobně popsán postup zpracování fotogrammetrických dat, spojování bloků s daty z různých zdrojů a následné zpracování 3D modelu. Základním podkladem pro postup během zpracování byla uživatelská příručka k softwaru ContextCapture [23], dále potom okrajově diplomové práce zabývající se podobnou problematikou [3] a [24].

### 8.1 ORIENTACE SNÍMKŮ

Snímky z RPAS a pozemní kamery byly zpracovány v rámci stejného projektu, ale samostatně v různých blocích. Zpracování obou datových sad je v principu shodné, lišilo se však v některých nastaveních. V úvodu této kapitoly bude popsán postup, který je shodný pro obě datové sady, následně popíšu rozdílná nastavení v rámci samostatných podkapitol.

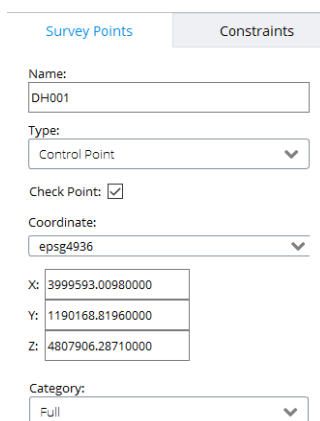
Po založení nového projektu v ContextCapture byl proveden import fotografií do bloku v záložce Photos. Fotografie se importují pro každou kameru do jedné Photogroup, je však možné rozdělit fotografie z jedné kamery do různých Photogroup (např. podle letových hladin). V našem případě byly snímky naimportovány do dvou bloků – zvlášť pro leteckou a zvlášť pro pozemní fotogrammetrii a byly zpracovány samostatně. V záložce Photos, po kliknutí

pravým tlačítkem myši na danou Photogroup, se objeví možnost přidat model kamery (Add camera model to the database). Pokud disponujeme prvky vnitřní orientace například z prekalibrace nebo z jiných projektů, můžeme je zde přidat. Aby se aktivovalo požadované nastavení kamery, musíme opět kliknout pravým tlačítkem myši a zvolit možnost nastavit model kamery (Get camera model from the database), kde si vybereme kameru, která byla použita pro snímkování. Prostředí SW ContextCapture vidíme na Obr. 16.



Obr. 16 Prostředí ContextCapture Master po založení nového projektu

Dalším krokem je import souřadnic vlíčovacích a kontrolních bodů. Import byl proveden přes záložku Surveys. Všechny importované body se automaticky nastaví jako vlíčovací. Pokud chceme některý z nich nastavit jako kontrolní, musíme jej rozkliknout a zatrhnout políčko Check point (Obr. 17). V seznamu bodů nejsou kontrolní a vlíčovací body na první pohled nijak odlišeny, což není úplně praktické.



Survey Points Constraints

Name:  
DH001

Type:  
Control Point

Check Point:

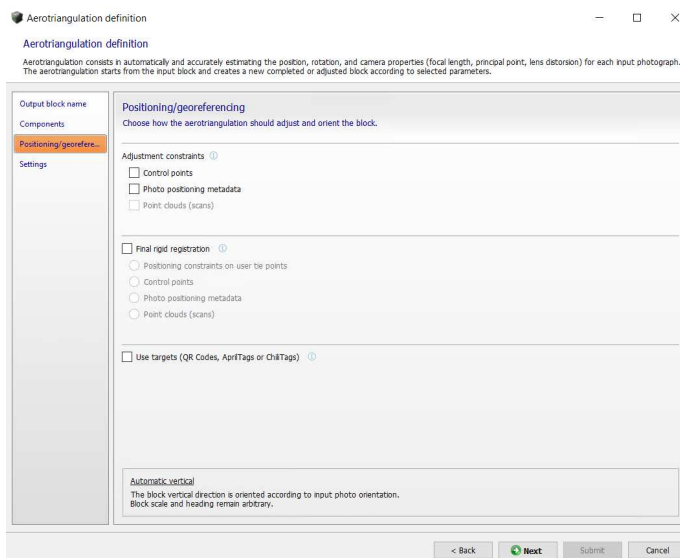
Coordinate:  
epsg4936

X: 3999593.00980000  
Y: 1190168.81960000  
Z: 4807906.28710000

Category:  
Full

Obr. 17 Podrobnosti o bodu v prostředí ContextCapture

Nejprve byla provedena relativní orientace snímků. Ta spočívá ve vytvoření dostatečného počtu přirozených navazovacích bodů, jednoznačně identifikovatelných na snímcích (např. rohy oken, dveří, ventilace). Navazovací body se přidávají na záložce Surveys. Jakmile bylo odměřeno dostatečné množství navazovacích bodů (u snímků z RPAS stačilo 10, u snímků z kamery Canon to bylo 56), spustíme aerotriangulaci. V nastavení aerotriangulace byla ponechána všechna políčka prázdná. Tím jsme docílili relativní orientace snímků (Obr. 18).



Aerotriangulation definition

Aerotriangulation definition

Aerotriangulation consists in automatically and accurately estimating the position, rotation, and camera properties (focal length, principal point, lens distortion) for each input photograph. The aerotriangulation starts from the input block and creates a new completed or adjusted block according to selected parameters.

Output block name

Components

Positioning/georeferencing

Choose how the aerotriangulation should adjust and orient the block.

Adjustment constraints

Control points

Photo positioning metadata

Point clouds (scans)

Final rigid registration

Positioning constraints on user tie points

Control points

Photo positioning metadata

Point clouds (scans)

Use targets (QR Codes, AprITags or ChITags)

Automatic vertical


The block vertical direction is oriented according to input photo orientation. Block scale and heading remain arbitrary.

< Back Next Submit Cancel

Obr. 18 Nastavení aerotriangulace pro relativní orientaci snímků

Výsledky aerotriangulace byly zkontrolovány v automaticky generovaném protokolu (Quality Report). Quality report se skládá celkem z pěti částí. První část *Project Summary* poskytuje základní informace o projektu, jako název, počet snímků, typ kamery nebo počet automaticky generovaných navazovacích bodů. Hned druhá část se věnuje kalibraci kamery. V tabulce jsou uvedené původní hodnoty, hodnoty vypočtené a rozdíl mezi nimi. Pokud máme hodnoty dané z prekalibrace, původní a vypočtené hodnoty jsou totožné. Třetí část protokolu *Photo Positions* se zabývá pozicemi snímků v prostoru. Najdeme zde například schéma rozložení snímků s elipsami chyb. Čtvrtá část *Photo Matching* popisuje automaticky generované navazovací body a jejich přiřazení ke snímkům. Poslední část *Surveys* obsahuje informace o vlíčovacích, kontrolních a uživatelských navazovacích bodech. Najdeme zde jak samostatné statistiky pro každý z bodů, tak i globální statistiky (prostorová směrodatná odchylka, polohová odchylka, výšková odchylka a další). Quality reporty všech variant jsou uvedeny v příloze č. 5.

Jakmile bylo dosaženo toho, že všechny snímky z naší datové sady byly propojené, relativní orientace byla považována za kompletní. Informace o nepropojených snímcích získáme z protokolu vyrovnání (Acquisition Report), který se rovněž generuje automaticky při aerotriangulaci (Obr. 19).

ACQUISITION REPORT	
<b>Project Summary</b>	
Project:	H_phantom
Number of photos:	227
Number of calibrated photos:	227 ( 100% )
Number of lost or disconnected photos:	0 ( 0% )
Positioning:	Adjustment constraints: none Rigid registration: none
 No issue has been identified: all photos are successfully connected.	

Obr. 19 Ukázka protokolu vyrovnání

Dále byly odměřeny snímkové souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů. Před první aerotriangulací je vhodné odměřit snímkové souřadnice na několika málo vlíčovacích bodech a spustit aerotriangulaci. Software během aerotriangulace alespoň přibližně naorientuje snímky a další odměřování snímkových souřadnic je potom o poznání snazší, protože software automaticky nabízí snímky, na kterých se pravděpodobně nachází bod, který odměřujeme. Je také možné seřadit snímky s potenciální shodou podle vzdálenosti od měřeného bodu. Po rozkliknutí snímku se na potenciální pozici měřeného bodu nachází žlutý terč. Ten je zde umístěn na základě výsledků první aerotriangulace. Většinou je nutné pozici terče mírně upravit tak, aby odpovídala skutečné pozici měřeného bodu.

V našem případě proběhla první aerotriangulace po odměření dvou vlíčovacích bodů (u snímků z RPAS i u snímků z kamery Canon). Při nastavování aerotriangulace byla v části Adjustment constraints zvolena možnost Control points. Proces tak počítal s odměřenými vlíčovacími body.

Jakmile proběhla první aerotriangulace, byly odměřeny snímkové souřadnice u všech dalších vlíčovacích a kontrolních bodů. Dále byly přidávány i další uživatelské navazovací body v místech, kde nebyly výsledky aerotriangulace uspokojivé. Celkem byly na snímcích z RPAS odměřeny snímkové souřadnice 7 vlíčovacích bodů, 36 kontrolních bodů a 10 uživatelských navazovacích bodů. Na snímcích z kamery Canon EOS 6D to bylo 5 vlíčovacích bodů, 15 kontrolních bodů a 64 uživatelských navazovacích bodů. Po odměření snímkových souřadnic byla spuštěna další aerotriangulace. Nastavení aerotriangulace bylo odlišné pro snímky z RPAS a kamery Canon a také pro různé varianty zpracování.

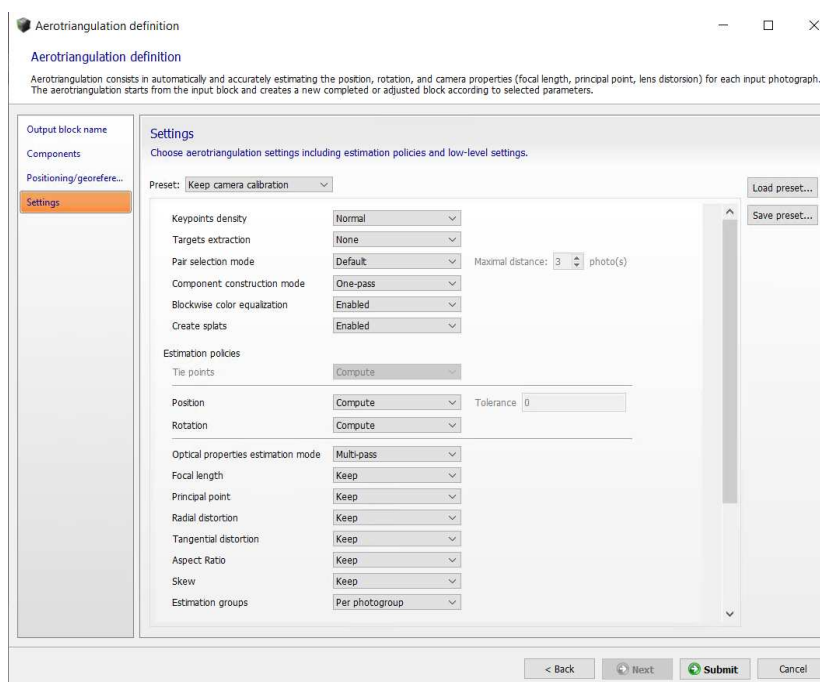
### **8.1.1 ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ Z RPAS DJI PHANTOM 3 ADVANCED**

Při dalším nastavení aerotriangulace záleží na tom, zda máme prvky vnitřní orientace předem vypočtené nebo je chceme vypočítat během aerotriangulace. V rámci ověření vlivu prekalibrace na výsledek, byly u snímků z RPAS provedeny obě varianty.

## Zachování prvků vnitřní orientace z prekalibrace

V první variantě byly zachovány prvky vnitřní orientace z prekalibrace (viz. kapitola 7, Tab. 2). Pro zachování prvků byla v nastavení aerotriangulace zvolena předvolba zachovat kalibraci kamery. Je zde dále možné volit, zda budou zachovány všechny parametry (ohnisková vzdálenost, souřadnice hlavního snímkového bodu a parametry tangenciálního a radiálního zkreslení) nebo budou některé vypočteny automaticky. V našem případě byly zachovány všechny parametry z prekalibrace, proto byla tato varianta označena keep all.

V prostředí ContextCapture byla zvolena možnost Keep camera calibration (Obr. 20). Výběrem této možnosti se ve spodní části tabulky u všech parametrů (focal length, principal point, radial a tangential distortion) objeví možnost Keep. Nastavení v horní části tabulky bylo ponecháno výchozí.



Obr. 20 Nastavení aerotriangulace pro zachování prvků vnitřní orientace z prekalibrace

Po ukončení procesu aerotriangulace byly výsledky ověřeny v protokolu kvality (příloha č. 5.4). 3D chyba na vlíčovacích bodech byla 0,6 cm

a na kontrolních bodech přibližně 2 cm, což bylo považováno za uspokojivé. Následně byl vytvořen rekonstrukční rámec pro tvorbu produkcí.

### **Automatický výpočet prvků vnitřní orientace v rámci aerotriangulace**

Ve druhé variantě byl výpočet prvků vnitřní orientace přenechán softwaru. V nastavení aerotriangulace byla ponechána výchozí předvolba, která zajistí, že jsou prvky vnitřní orientace vypočteny automaticky v rámci procesu aerotriangulace. Opět se dá volit, zda chceme některý z parametrů zachovat, v našem případě byly vypočteny všechny parametry automaticky, varianta dostala označení adjust all.

V prostředí SW byla ponechána předvolba Default. U parametrů kamery se tak objevila možnost Adjust a byly vypočteny automaticky. Podrobné výsledky aerotriangulace byly ověřeny v protokolu kvality (příloha č. 5.3). 3D chyba vlíčovacích bodů byla 0,7 cm a kontrolních bodů 2 cm. Dále byl vytvořen rekonstrukční rámec pro tvorbu produkcí.

### **8.1.2 ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ Z KAMERY CANON EOS 6D MARK II**

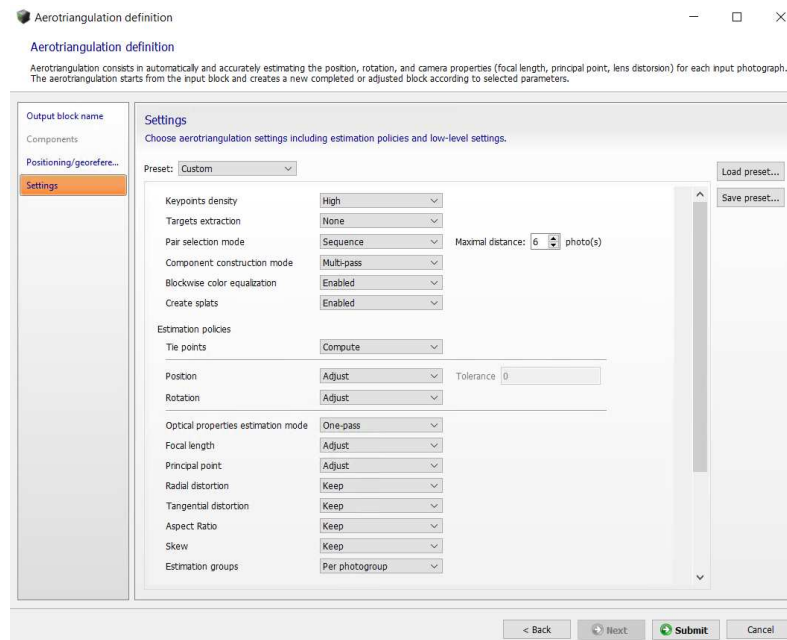
u snímků z kamery Canon byly použity prvky vnitřní orientace předem určené z prekalibrace. Ukázalo se však, že aerotriangulace poskytuje nejlepší výsledky, pokud jsou zachovány pouze hodnoty radiálního a tangenciálního zkreslení a souřadnice hlavního snímkového bodu a ohnisková vzdálenost jsou dopočteny automaticky v rámci aerotriangulace. Proto při nastavování aerotriangulace byla zvolena varianta Keep camera calibration. Ve spodní části tabulky bylo nastavení změněno tak, že u radiálního a tangenciálního zkreslení byla možnost Keep a u ohniskové vzdálenosti a souřadnic hlavního snímkového bodu možnost Adjust.

Jako klíčové se při zpracování pozemních snímků ukázalo nastavení v horní části tabulky, hlavně hustota klíčových bodů a režim výpočtu navazovacích bodů (Obr.21).

Možnost Keypoints density byla změněna na High. Dle uživatelské příručky [23] je toto nastavení vhodné především v případech, kdy objekt má

nedostatečnou strukturu nebo jsou fotografie malé. Náš objekt sice texturovaný je, ale textura se stále opakuje a pro výpočet nemusí být úplně ideální. Proto bylo toto nastavení upraveno.

Další upravené nastavení bylo Pair selection mode. Toto nastavení upravuje způsob výpočtu navazovacích bodů. Zvolen byl algoritmus Sequence, kdy maximální vzdálenost byla upravena na 6 snímků. Toto nastavení se doporučuje pro zpracování snímků jedné sekvence, kdy fotografie musí být nasnímány v pravidelném pořadí. Algoritmus použije pouze sousední dvojice v dané vzdálenosti. Nastavení maximální vzdálenosti na 6 snímků vychází z úvahy, že na každém stanovisku byly nasnímány 3 fotografie pod různým úhlem. Pokud tedy chceme použít pouze sousední dvojice, je tato vzdálenost 6 snímků. Poslední změnou výchozího nastavení byla možnost Component construction mode. Tato byla změněna z One-pass na Multi-pass. Příručka [23] doporučuje toto nastavení v případě, že režim One-pass selhává a nezvládá zahrnout většinu snímků do zpracování, což byl náš případ.



Obr. 21 Nastavení aerotriangulace při zpracování snímků pozemní fotogrammetrie

## 8.2 KOMBINACE DAT Z RŮZNÝCH ZDROJŮ V SW CONTEXTCAPTURE

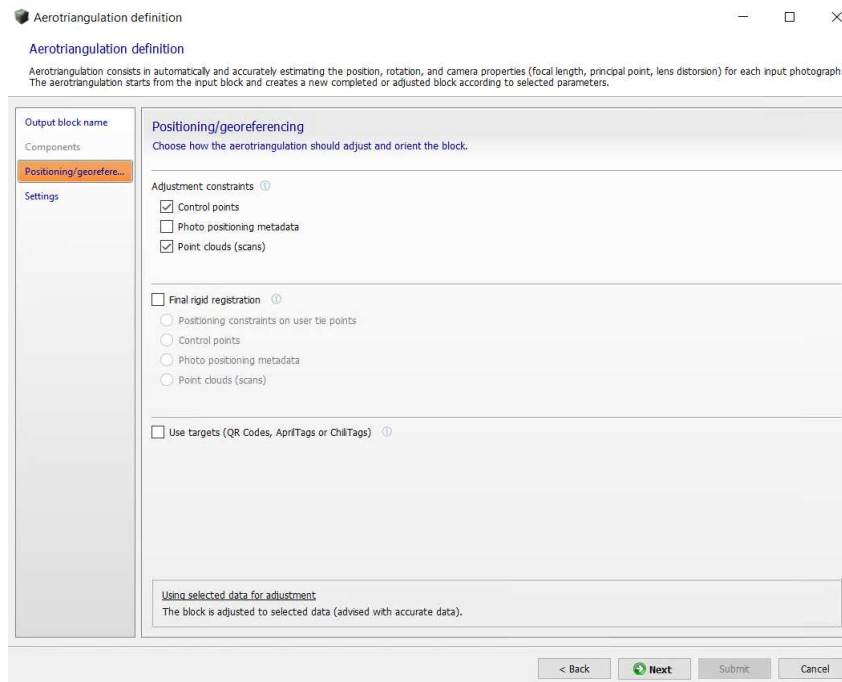
V rámci diplomové práce byly kombinovány snímky z RPAS DJI Phantom 3 Advanced, kamery Canon EOS 6D Mark II a mračno bodů z pozemního laserového skeneru FARO Focus 3D S120. Do zpracování vstupovalo 301 snímků z RPAS, 227 snímků z kamery Canon a mračno bodů s desítkami milionů bodů. V této kapitole je popsán postup spojování dat v SW ContextCapture. Byly vyzkoušeny všechny dvojkombinace uvedených metod a následně kombinace všech tří metod. Jednotlivé kombinace byly následně statisticky zhodnoceny. Výsledky zhodnocení jsou uvedeny v kapitole 9.2.

Při spojování bloků s různými daty v prostředí ContextCapture je vhodné dodržet postup definovaný v [25]. Proces aerotriangulace provedeme zvlášť u bloku se snímky z pozemní a z letecké fotogrammetrie. V našem případě byl jako první zvolen blok obsahující snímky z pozemní fotogrammetrie. V tomto bloku odměříme snímkové souřadnice vlíčovacích a uživatelských navazovacích bodů tak, aby tyto byly viditelné i ve druhém bloku. Spustíme aerotriangulaci a získáme tak i souřadnice uživatelských navazovacích bodů. Provedeme export souřadnic uživatelských navazovacích bodů do textového souboru. Otevřeme druhý blok obsahující v našem případě snímky z RPAS. Naimportujeme souřadnice získané aerotriangulací bloku s pozemními snímky a odměříme jejich snímkové souřadnice na snímcích z RPAS. Při aerotriangulaci budou uživatelské navazovací body z původního bloku sloužit jako vlíčovací. Jakmile je aerotriangulace hotová, máme oba bloky správně georeferencované a můžeme přistoupit k jejich spojení. To provedeme jednoduše tak, že vybereme oba bloky a po kliknutí pravým tlačítkem zvolíme možnost Merge. Po spojení bloků můžeme rovnou vytvořit nový rekonstrukční rámec a spustit produkci modelu ve zvoleném formátu.

Tento postup je nutné dodržet také v případě, že máme snímky různě orientované (na výšku/na šířku). Pokud máme různě orientované snímky v rámci jednoho bloku, ContextCapture si s tím s největší pravděpodobností nedokáže

poradit a aerotriangulace je předčasně ukončena chybovou hláškou. V našem případě byly snímky z pozemní fotogrammetrie pořízeny na výšku a z letecké fotogrammetrie na šířku, stejně tak detailní snímky komína pořízené pozemní kamerou byly orientovány na šířku. Postup spojování bloků uvedený výše byl tedy aplikován i v případě tvorby detailního modelu komína na budově H. Pořízení různě orientovaných snímků se ukázalo jako poněkud nešťastné. Pro příští experimenty bych tak doporučila zachovat jednotnou orientaci snímků. Není to na překážku zpracování, nicméně to celý proces poněkud komplikuje a prodlužuje.

Data z laserového skeneru přidáme v ContextCapture jednoduše na záložce Point Clouds. Georefencované mračno bodů bylo pro účely této diplomové práce převzato od pana Tomáše Mrůzka. Jakmile máme georefencované mračno bodů nahrané v ContextCapture, můžeme rovnou vytvořit rekonstrukční rámec a spustit tvorbu 3D modelu. Další variantou je spustit aerotriangulaci, kde v části Adjustment Constraints zvolíme obě varianty – Control points i Point Clouds (Obr. 22). Software tak během aerotriangulace počítá jak se souřadnicemi vlíčovacích bodů odměřenými na snímcích, tak s údaji z mračna bodů z laserového skeneru. Po aerotriangulaci opět můžeme přistoupit k tvorbě produkci. Tato možnost byla využita pro získání odchylek na kontrolních bodech a následné statistické testování



Obr. 22 Nastavení aerotriangulace pro orientaci snímků na základě vlčcovacích bodů a mračna bodů z laserového skeneru

Byly vytvořeny celkem čtyři varianty kombinací. V první byly zkombinovány snímky z RPAS a z kamery Canon, ve druhé variantě byly zkombinovány snímky z RPAS s mračnem bodů z laserového skenování, ve třetí variantě snímky z kamery Canon s mračnem bodů z laserového skenování a v poslední variantě byla zkombinována všechna data – snímky z RPAS, pozemní kamery Canon a mračno bodů z laserového skenování. Ze všech variant byl vytvořen mesh model, ukázky některých variant mesh modelů jsou v kapitole č. 10.

## 9 VÝSLEDKY

Výsledky diplomové práce byly zhodnoceny na několika oblastech. První z nich je posouzení vlivu prekalibrace kamery DJI FC300S, dále porovnání výsledků pozemní a letecké fotogrammetrie a jejich kombinace s laserovým skenováním.

### 9.1 POSOUZENÍ VLIVU PREKALIBRACE KAMERY DJI FC300S

Zhodnocení vlivu prekalibrace kamery DJI FC300S bylo provedeno Fisherovým testem. Testováno bylo na kontrolních bodech. V Tab. 7 a Tab. 8 jsou uvedeny statistiky na kontrolních bodech. Jsou zde uvedeny odchylky v jednotlivých souřadnicích a celková 3D chyba kontrolních bodů, dále také velikost odchylek a jejich procentuální zastoupení v celém souboru dat. Na Obr. 23 jsou histogramy absolutní četnosti souřadnicových odchylek na kontrolních bodech pro varianty adjust all a keep all, doplněné vždy o Gaussovu křivku.

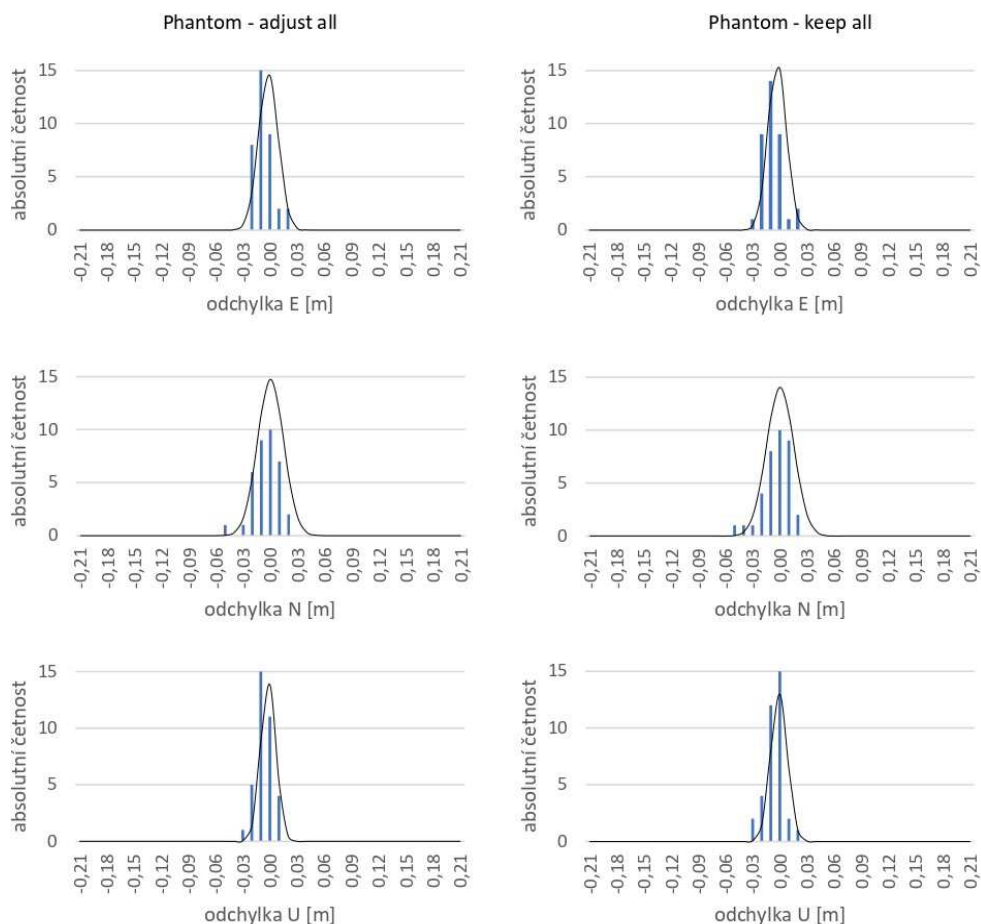
Tab. 7 Statistiky kontrolních bodů pro variantu Phantom – keep all

Phantom – keep all					
počet kontrolních bodů		36			
		3D [m]	E [m]	N [m]	U [m]
<b>maximální absolutní odchylka</b>		0,0499	0,0227	0,0453	0,0242
<b>průměrná absolutní odchylka</b>		0,0178	0,0078	0,0117	0,0070
<b>medián odchylek</b>		0,0153	-0,0022	0,0030	-0,0002
<b>střední chyba</b>		0,0204	0,0101	0,0151	0,0092
<b>do 1 cm</b>		19 %	64 %	50 %	75 %
<b>velikost odchylek</b>	<b>1 - 1,99 cm</b>	47 %	28 %	36 %	17 %
	<b>2 - 2,99 cm</b>	25 %	8 %	8 %	8 %
	<b>3 - ∞ cm</b>	8 %	0 %	6 %	0 %

Tab. 8 Statistiky kontrolních bodů pro variantu Phantom – adjust all

<b>Phantom – adjust all</b>					
<b>počet kontrolních bodů</b>		<b>36</b>			
		<b>3D [m]</b>	<b>E [m]</b>	<b>N [m]</b>	<b>U [m]</b>
<b>maximální absolutní odchylka</b>		0,0506	0,0269	0,0442	0,0234
<b>průměrná absolutní odchylka</b>		0,0178	0,0085	0,0114	0,0069
<b>medián odchylek</b>		0,0175	-0,0032	0,0021	-0,0035
<b>střední chyba</b>		0,0199	0,0108	0,0144	0,0084
	<b>do 1 cm</b>	19 %	67 %	53 %	72 %
<b>velikost</b>	<b>1 - 1,99 cm</b>	47 %	28 %	36 %	25 %
<b>odchylek</b>	<b>2 - 2,99 cm</b>	28 %	6 %	8 %	3 %
	<b>3 - ∞ cm</b>	6 %	0 %	3 %	0 %

Z číselných statistik je patrné, že obě varianty poskytují výsledky podobné přesnosti. Toto tvrzení bylo ověřeno statistickým testováním (F-testem). Testováno bylo na hladině významnosti 5 %. Statistickým testováním nebyla prokázána vyšší přesnost varianty keep all, nelze tedy s jistotou říct, že využití hodnot z prekalibrace poskytuje lepší výsledky. Postup pro prekalibraci uvedený ve [21] pracuje pouze s relativními orientací. Dá se předpokládat, že pokud by prekalibrace kamery byla provedena na kalibračním poli s přesně určenými souřadnicemi vlíčovacích bodů, poskytovala by přesnější výsledky. Podrobnosti ke statistickému testování jsou uvedeny v příloze č. 6 F-testy a příloze č. 7 Histogramy.



Obr. 23 Histogram absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – adjust all a Phantom – keep all

## 9.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ POZEMNÍ A LETECKÉ FOTOGRAMMETRIE A JEJICH KOMBINACE A LASEROVÝM SKENOVÁNÍM

Porovnání přesnosti jednotlivých metod bylo rovněž provedeno F-testem. V Tab. 9 jsou uvedeny statistiky na kontrolních bodech pro pozemní fotogrammetrii. V rámci F-testu byla porovnávána varianta Phantom – keep all (statistiky v Tab. 8) s variantou EOS – keep distortion (Tab. 9). Zkoumání vlivu prekalibrace kamery Canon EOS Mark II nebylo součástí této diplomové práce, byla tak zvolena varianta keep distortion, která poskytovala již na první pohled nejlepší výsledky. V této variantě jsou zachovány pouze parametry zkreslení z prekalibrace a hodnota ohniskové vzdálenosti a polohy hlavního snímkového

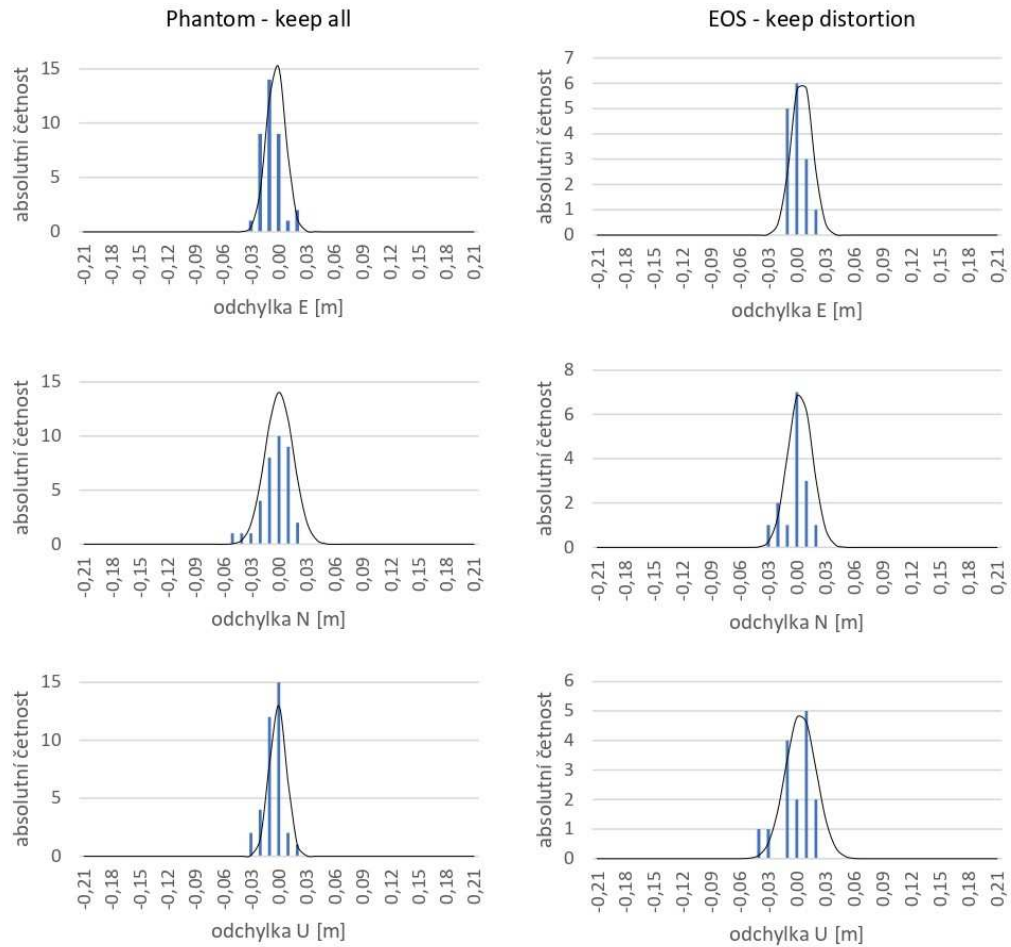
bodu je vypočtena v rámci aerotriangulace. Na Obr. 24 jsou histogramy absolutní četnosti pro testované varianty doplněné o Gaussovu křivku.

Tab. 9 Statistiky kontrolních bodů pro variantu EOS – keep distortion

**EOS – keep distortion**

počet kontrolních bodů		15			
		3D [m]	E [m]	N [m]	U [m]
<b>maximální absolutní odchylka</b>		0,0368	0,0296	0,0234	0,0359
<b>průměrná absolutní odchylka</b>		0,0218	0,0087	0,0107	0,0126
<b>medián odchylek</b>		0,0228	0,0055	0,0044	0,0080
<b>střední chyba</b>		0,0234	0,0109	0,0129	0,0162
<b>do 1 cm</b>		13,33 %	73,33 %	53,33 %	40,00 %
<b>velikost odchylek</b>	<b>1 - 1,99 cm</b>	26,67 %	20,00 %	33,33 %	33,33 %
	<b>2 - 2,99 cm</b>	46,67 %	6,67 %	13,33 %	20,00 %
	<b>3 - ∞ cm</b>	13,33 %	0,00 %	0,00 %	6,67 %

Na základě statistického testování na hladině významnosti 5 % byla prokázána vyšší přesnost letecké fotogrammetrie v souřadnici U, tedy ve výškové složce. Ve dvou zbývajících souřadnicích E a N nebyla vyšší přesnost prokázána. Vyšší přesnost letecké fotogrammetrie se projevuje především u kontrolních bodů umístěných přibližně v deseti metrech nad úrovní terénu, což bylo očekáváno. Detaily k testování jsou v příloze č. 6.



Obr. 24 Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – keep all a EOS – keep distortion

Dále byla porovnána pozemní fotogrammetrie a její kombinace s laserovým skenováním. Totéž bylo provedeno také s leteckou fotogrammetrií. V Tab. 10 jsou uvedeny statistiky na kontrolních bodech pro kombinaci pozemní fotogrammetrie a laserového skenování a v Tab. 11 statistiky pro kombinaci letecké fotogrammetrie a laserového skenování. Na Obr. 25 a Obr. 26 jsou histogramy pro uvedené varianty. Statistickým testem byla otestována hypotéza shodnosti směrodatných odchylek. Na hladině významnosti 5 % bylo potvrzeno, že kombinace pozemní fotogrammetrie a laserového skenování poskytuje významně vyšší přesnost než pozemní fotogrammetrie samotná. Stejná hypotéza byla testována i v případě kombinace letecké fotogrammetrie a pozemního

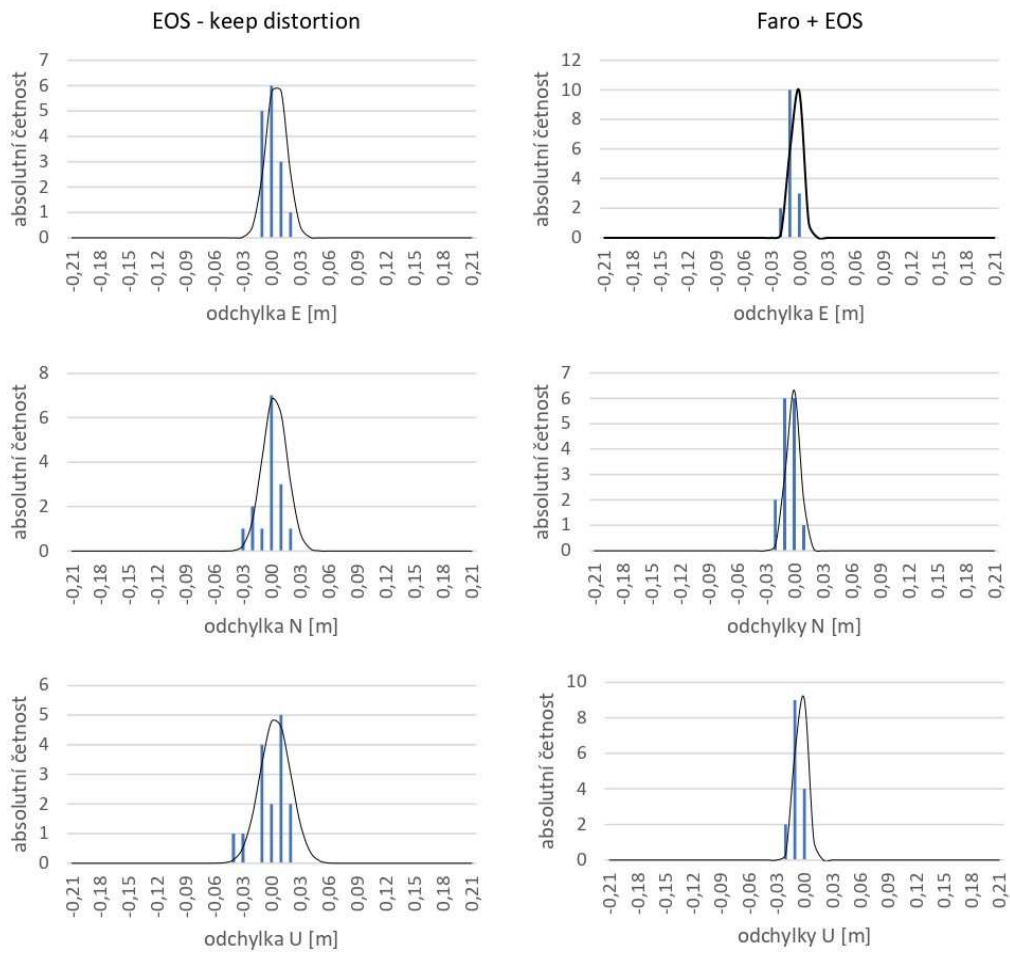
laserového skenování. V tomto případě došlo v kombinaci technologií k výraznému zhoršení přesnosti.

Tab. 10 Statistiky kontrolních bodů pro variantu Faro + EOS

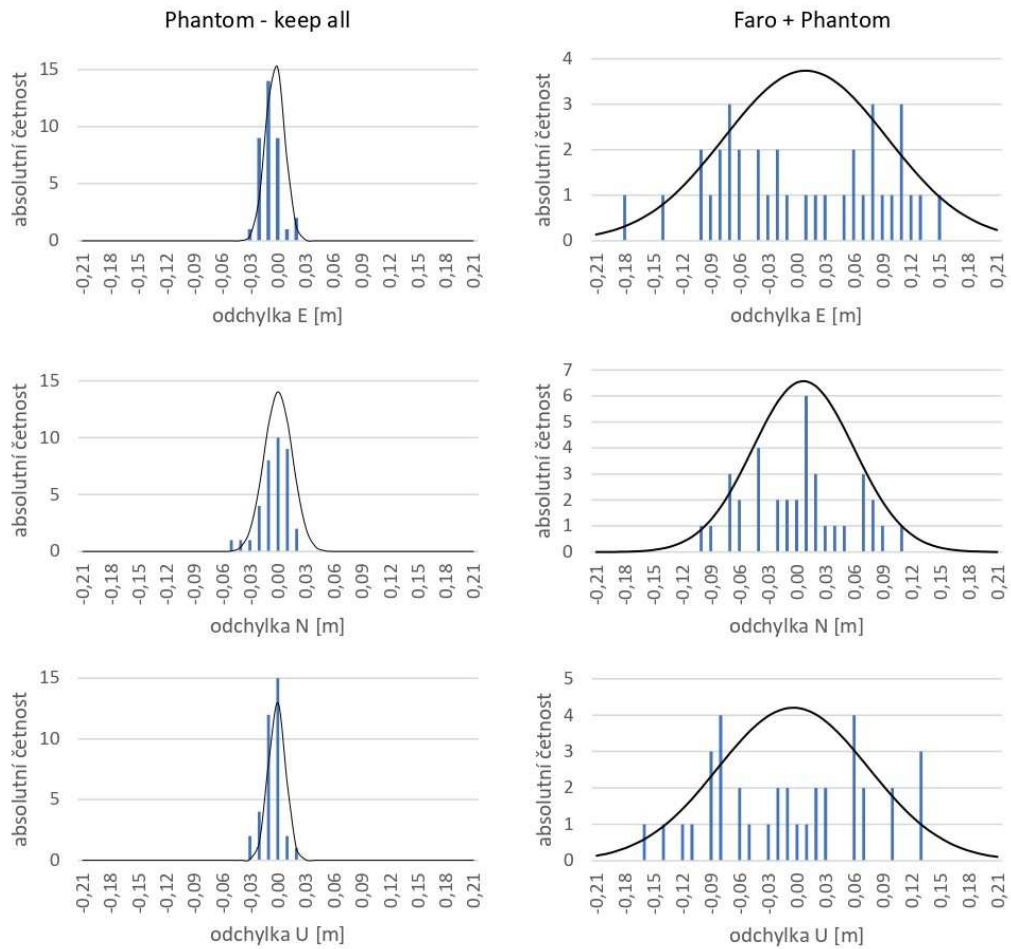
Faro + EOS					
počet kontrolních bodů		15			
		3D [m]	E [m]	N [m]	U [m]
<b>maximální absolutní odchylka</b>		0,0212	0,0131	0,0135	0,0143
<b>průměrná absolutní odchylka</b>		0,0106	0,0044	0,0064	0,0048
<b>medián odchylek</b>		0,0100	-0,0016	-0,0026	-0,0024
<b>střední chyba</b>		0,0114	0,0060	0,0073	0,0063
<b>do 1 cm</b>		47 %	87 %	80 %	87 %
<b>velikost odchylek</b>	<b>1 - 1,99 cm</b>	47 %	13 %	20 %	13 %
	<b>2 - 2,99 cm</b>	7 %	0 %	0 %	0 %
	<b>3 - ∞ cm</b>	0 %	0 %	0 %	0 %

Tab. 11 Statistiky kontrolních bodů pro variantu Faro + Phantom

Faro + Phantom					
počet kontrolních bodů		36			
		3D [m]	E [m]	N [m]	U [m]
<b>maximální absolutní odchylka</b>		0,2059	0,1779	0,1146	0,1535
<b>průměrná absolutní odchylka</b>		0,1205	0,0753	0,0439	0,0674
<b>medián odchylek</b>		0,1202	0,0050	0,0142	-0,0049
<b>střední chyba</b>		0,1279	0,0854	0,0531	0,0790
<b>do 1 cm</b>		0 %	3 %	11 %	8 %
<b>velikost odchylek</b>	<b>1 - 1,99 cm</b>	0 %	8 %	22 %	8 %
	<b>2 - 2,99 cm</b>	0 %	6 %	8 %	8 %
	<b>3 - ∞ cm</b>	100 %	83 %	58 %	75 %



Obr. 25 Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty EOS – keep distortion a Faro + EOS



Obr. 26 Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – keep all a Faro + Phantom

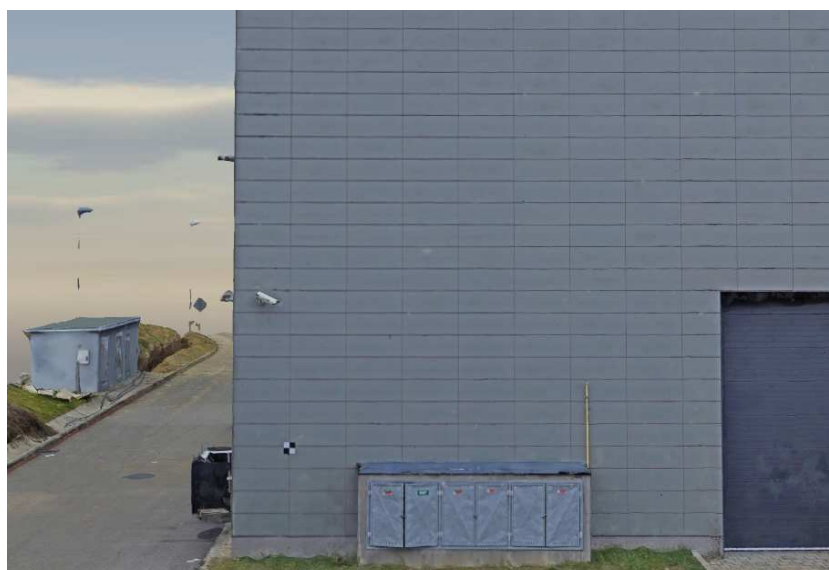
Na našich datech se tak statistickým testováním nepotvrdila hypotéza, že kombinace fotogrammetrie s laserovým skenováním přinese velké zlepšení výsledků. Z histogramů na Obr. 26 je patrné, že při kombinaci snímků z RPAS s laserovým skenováním došlo k velkému zhoršení přesnosti, což může být předmětem dalších výzkumů.

## 10 VIZUALIZACE MESH MODELŮ

V této kapitole jsou některé ukázky pohledů na mesh modely různých variant.



Obr. 27 Varianta EOS + Phantom + FARO, celkový pohled



Obr. 28 Varianta EOS + Phantom + FARO, pohled z jihu

Na Obr. 27 je vidět, že i přes radiometrickou korekci snímků se na modelu projeví rozdílné světelné podmínky začátku a konce snímkování. Na Obr. 28 je výřez jižní stěny budovy. Další pohledy na budovu H jsou v příloze č. 8.

## 10.1 DETAIL KOMÍNU



Obr. 29 Varianta Phantom – keep all



Obr. 30 Varianta EOS – keep distortion



Obr. 31 Varianta EOS + Phantom + FARO

Na detailních snímcích komínu (Obr. 29 – Obr. 31) je vidět jaké zlepšení přináší kombinace metod. Model ze snímků z RPAS přináší poměrně nekvalitní výsledek, ale zajistí data na horních částech komína, kde nedostačují pozemní metody. Laserové skenování zase zajistí lepší geometrii modelu.

## 11 ZÁVĚR

Práce se zabývala kombinací dat z laserového skeneru FARO Focus 3D S120, pozemní kamery Canon EOS 6D Mark II a RPAS DJI Phantom 3 Advanced. Výsledkem je statistické porovnání různých kombinací uvedených metod a 3D model budovy H v areálu AdMaS. Byl testován také vliv prekalibrace kamery na výsledky aerotriangulace.

V rámci statistického testování se nepotvrdilo, že by uvedený způsob prekalibrace kamery přinášel výrazné zlepšení výsledků. Varianta s prvky vnitřní orientace z prekalibrace a varianta s automatickým výpočtem prvků vnitřní orientace vykazovaly podobnou přesnost.

V kombinaci pozemní fotogrammetrie a pozemního laserového skenování došlo k výraznému zvýšení přesnosti na kontrolních bodech. V případě kombinace letecké fotogrammetrie a laserového skenování došlo naopak k výraznému zhoršení přesnosti. Na našich datech se tak nepotvrdil očekávaný předpoklad.

Kombinace pozemní a letecké fotogrammetrie potvrdila vyšší přesnost letecké fotogrammetrie u souřadnice u (výšková složka).

Na základě našich výsledků nebylo prokázáno, že kombinace všech tří metod přináší výrazně lepší výsledky než zkombinování letecké a pozemní fotogrammetrie, kdy snímky z letecké fotogrammetrie zajistí nasnímání oblastí nepřístupných pozemními metodami a snímky z pozemní fotogrammetrie poskytnou přesnější údaje o detailech objektu.

## Seznam zdrojů

- [1] HANZL, Vlastimil. FOTOGRAMMETRIE: MODUL 01, TEORETICKÉ ZÁKLADY FOTOGRAMMETRIE. Brno: Fakulta stavební VUT, 2006.
- [2] VÚGTK: odborný slovník [online], 2021 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/index.php>
- [3] OTRUSINOVÁ, Jana. Testování přesnosti mobilní fotogrammetrie. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [4] BÖHM, Jozef. Fotogrammetrie, učební texty. Ostrava: Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Ostrava 2002 [online]. [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: [https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galleriesouboru/skript a/Fotogrammetrie.pdf](https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galleriesouboru/skript_a/Fotogrammetrie.pdf)
- [5] Snímkové orientace a vztahy mezi souřadnicovými soustavami [online]. , 9 [cit.2021-01-12].Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Z8101/um/Fotogrammetrie\\_5.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Z8101/um/Fotogrammetrie_5.pdf)
- [6] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON, Stephen KYLE a Ian HARLEY. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. 1. Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-1870325-50-9.
- [7] ŠÍMA, Jiří. Dron = letoun nebo letadlo? aneb pořádek do české odborné terminologie. Praha, 2016. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/6267783-Dron-letoun-nebo-letadlo-aneb-poradek-do-ceske-odborne-terminologie.html>
- [8] ŠTRONER, Martin a Jiří POSPÍŠIL. *Terestrické skenovací systémy*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, 185 s. ISBN 978-80-01-04141-3
- [9] LIANG, Huilin, Weizheng LI, Siqi LAI, Lingxi ZHU, Wenli JIANG a Qingping ZHANG. The integration of terrestrial laser scanning and terrestrial and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry for the documentation of Chinese classical gardens – a case study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou,

- China. *Journal of Cultural Heritage* [online]. 2018, 33, 222-230 [cit. 2021-01-19]. ISSN 1296-2074. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.004>
- [10] LUHMANN, T., M. CHIZHOVA, D. GORKOVCHUK, H. HASTEDT, N. CHACHAVA a N. LEKVEISHVILI. Combination of terrestrial laserscanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex churches in Georgia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2019, XLII-2/W11, 753-761 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019>
- [11] MARKIEWICZ, J., D. ZAWIESKA, A. BOCHEŃSKA, A. TOBIASZ a S. LAPIŃSKI. The multitemporal photogrammetric data in archaeological and architectural research in the Royal Castle in Warsaw – first results. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* [online]. 2018, XLII-2, 675-681 [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-675-2018>
- [12] LO BRUTTO, M., D. EBOLESE a G. DARDANELLI. 3D modelling of a historical building using close-range photogrammetry and remotely piloted aircraft system (RPAS). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2018, XLII-2, 8 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-599-2018>
- [13] AdMaS [online]. 2018 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://admas.eu/>
- [14] STRÁNSKÁ, P.; KALVODA, P.; KURUC, M.; VOLAŘÍK, T.; HOFFMANNOVÁ, L.; NOSEK, J.; OTRUSINOVÁ, J. Vytvoření kalibračního pole pro testování mobilních mapovacích systémů. *JUNIORSTAV 2020*. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2020. s. 798-802. ISBN: 978-80-86433-73-8. [online]. [cit. 18.4.2021]. Dostupné z: [http://www.juniorstav.cz/wp-content/uploads/2020/02/Sbornik\\_Komplet\\_FINAL-uprava.pdf](http://www.juniorstav.cz/wp-content/uploads/2020/02/Sbornik_Komplet_FINAL-uprava.pdf)

- [15] DJI - Phantom 3 Advanced. Domanský Profimodel.cz [online]. Praha: COFIS CZ, 2016 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [https://profimodel.cz/cs/phantom/18465-dji-phantom-3-advanced-6958265117206.html?gclid=CjoKCQiA9P\\_\\_BRCoARIsAEZ6irj\\_fSQtWXlrQukzwnYBz-WssxJrdwwu\\_O5i58ako\\_vHYuQ8ehiyD8kaAlD2EALw\\_wcB](https://profimodel.cz/cs/phantom/18465-dji-phantom-3-advanced-6958265117206.html?gclid=CjoKCQiA9P__BRCoARIsAEZ6irj_fSQtWXlrQukzwnYBz-WssxJrdwwu_O5i58ako_vHYuQ8ehiyD8kaAlD2EALw_wcB)
- [16] NOSEK, Jakub, Petr KALVODA, Michal KURUC, Tomáš VOLAŘÍK a Petra STRÁNSKÁ. Vliv prekalibrace kamery DJI FC300S na přesnost fotogrammetrických výsledků. JUNIORSTAV 2021 [online]. Brno: ECON publishing, s.r.o, 2021, 707 - 712 [cit. 2021-5-8]. ISBN 978-80-86433-75-2. Dostupné z: <https://juniorstav.fce.vutbr.cz/wp-content/uploads/sites/22/2021/01/JUNIORSTAV-2021.pdf>
- [17] Canon EOS 6D Mark II: Návod k použití [online]. Amstelveen, Nizozemsko: CANON, 2017 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [https://www.canon.cz/support/consumer\\_products/products/cameras/digital\\_slr/eos-6d-mark-ii.html?type=manuals&manualid=tcm:126-1594160](https://www.canon.cz/support/consumer_products/products/cameras/digital_slr/eos-6d-mark-ii.html?type=manuals&manualid=tcm:126-1594160)
- [18] MEGAPIXEL [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: [https://www.megapixel.cz/canon-eos-6d-mark-ii-telo?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudByxflGIwItcPRpq2eU-scfmCXXBJzdYwLtoGDuZvmPXoVNaL12j7RFxoCP4wQAvD\\_BwE](https://www.megapixel.cz/canon-eos-6d-mark-ii-telo?gclid=CjwKCAjwjbCDBhAwEiwAiudByxflGIwItcPRpq2eU-scfmCXXBJzdYwLtoGDuZvmPXoVNaL12j7RFxoCP4wQAvD_BwE)
- [19] ANON., 2013. FARO Laser Scanner Focus 3D Manual [online] [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://faro.app.box.com/s/kfpwjofogeegocr7mf2s866s2qalnaqw>
- [20] FARO Focus 3D S120 Laser Scanner. One Surveying [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://onesurveying.com/3d-laser-scanner/faro-focus-3d-s120-laser-scanner>
- [21] Reality Modeling Drone Capture Guide. Bentley Advancing Infrastructure. 2018.
- [22] Guide for photo acquisition. Bentley Advancing Infrastructure. 2017.

- [23] ContextCapture: User Guide. Bentley, 2020 [cit. 2021-04-13].
- [24] RACLAVSKÝ, David. 3D MODEL VYBRANÉHO OBJEKTU. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [25] JAMES, Felix. Merging Models [online]. , 3 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: [https://communities.bentley.com/products/3d\\_imaging\\_and\\_point\\_cloud\\_software/w/wiki/26852/merging-models](https://communities.bentley.com/products/3d_imaging_and_point_cloud_software/w/wiki/26852/merging-models)

## Seznam obrázků

Obr. 1	Prvky vnější orientace	12
Obr. 2	Princip aerotriangulace	13
Obr. 3	Geometrický princip metody vyrovnání bloku svazků	14
Obr. 4	Epipolární geometrie pro konvergentní snímky	15
Obr. 5	Areál AdMaS	24
Obr. 6	Vertikální (nahore) a horizontální (dole) terče	26
Obr. 7	RPAS DJI Phantom 3 Advanced	28
Obr. 8	Kamera Canon EOS 6D Mark II	29
Obr. 9	Laserový skener Faro Focus 3D S120	30
Obr. 10	Schéma snímkování budovy	33
Obr. 11	Porovnání snímku před (vlevo) a po (vpravo) radiometrické korekci	34
Obr. 12	Ukázka vhodného objektu pro prekalibraci kamery	36
Obr. 13	Pozice kamery během snímání sběru dat pro kalibraci kamery	37
Obr. 14	Pozice kamery při snímkování pro kalibraci	38
Obr. 15	Porovnání radiální distorze z různých variant určení prvků vnitřní orientace	41
Obr. 16	Prostředí ContextCapture Master po založení nového projektu	44
Obr. 17	Podrobnosti o bodu v prostředí ContextCapture	45
Obr. 18	Nastavení aerotriangulace pro relativní orientaci snímků	45
Obr. 19	Ukázka protokolu vyrovnání	46
Obr. 20	Nastavení aerotriangulace pro zachování prvků vnitřní orientace z prekalibrace	48
		70

Obr. 21	Nastavení aerotriangulace při zpracování snímků pozemní fotogrammetrie	50
Obr. 22	Nastavení aerotriangulace pro orientaci snímků na základě vlčovicích bodů a mračna bodů z laserového skeneru	53
Obr. 23	Histogram absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – adjust all a Phantom – keep all	56
Obr. 24	Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – keep all a EOS – keep distortion	58
Obr. 25	Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty EOS – keep distortion a Faro + EOS	60
Obr. 26	Histogramy absolutní četnosti směrodatných odchylek pro varianty Phantom – keep all a Faro + Phantom	61
Obr. 27	Varianta EOS + Phantom + FARO, celkový pohled	62
Obr. 28	Varianta EOS + Phantom + FARO, pohled z jihu	62
Obr. 29	Varianta Phantom – keep all	63
Obr. 30	Varianta EOS – keep distortion	63
Obr. 31	Varianta EOS + Phantom + FARO	63

## Seznam tabulek

Tab. 1	Parametry kamery DJI FC300S	29
Tab. 2	Vybrané výsledky kalibrace kamery DJI FC300S	39
Tab. 3	Přesnost variant v úrovni vlíčovacích bodů (terénního reliéfu)	40
Tab. 4	Přesnost variant ve výšce 16 metrů nad úrovní vlícování (v úrovni střechy objektu)	40
Tab. 5	Přesnost variant v úrovni střechy po přidání vlíčovacích bodů na střechu	40
Tab. 6	Vybrané prvky vnitřní orientace vypočtené z různých variant vlícování a prekalibrace	42
Tab. 7	Statistiky kontrolních bodů pro variantu Phantom – keep all	54
Tab. 8	Statistiky kontrolních bodů pro variantu Phantom – adjust all	55
Tab. 9	Statistiky kontrolních bodů pro variantu EOS – keep distortion	57
Tab. 10	Statistiky kontrolních bodů pro variantu Faro + EOS	59
Tab. 11	Statistiky kontrolních bodů pro variantu Faro + Phantom	59

## Seznam příloh

01\_Návrh geometrie snímkování kamerou Canon EOS 6D Mark II

02\_Seznam souřadnic bodu kalibračního pole (digitálně)

03\_Přehledný náčrt bodů kalibračního pole

04\_Parametry kamer určené při prekalibraci

04.1\_Parametry kamery Canon EOS 6D Mark II

04.2\_Parametry kamery DJI FC300S

05\_Quality reporty ze softwaru ContextCapture (digitálně)

05.1\_Varianta EOS – adjustall

05.2\_Varianta EOS – keepdistortion

05.3\_Varianta Phantom – adjustall

05.4\_Varianta Phantom – keepall

05.5\_Varianta Faro + EOS

05.6\_Varianta Faro + Phantom

06\_F-testy

07\_Histogramy (digitálně)

08\_Vizualizace (digitálně)