



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

3D MODEL OBJEKTU HVĚZDÁRNY V BRNĚ

3D MODEL OF THE OBSERVATORY IN BRNO

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alexander Fodor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geodézie
Student: **Bc. Alexander Fodor**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0532A260001 Geodézie a kartografie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

3D model objektu hvězdárny v Brně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte rešerši metod fotogrammetrické tvorby 3D modelů objektů včetně softwarů pro vyhodnocení. Pořídte fotogrammetrické snímky severozápadního objektu hvězdárny v Brně digitální zrcadlovkou a low-cost kamerou tak, aby bylo umožněno automatizované zpracování a objekt naskenujte terestrickým laserovým skenerem. Vyhotoďte georeferencované 3D modely. Analyzujte dosaženou přesnost pomocí kontrolních bodů a referenčního mračka TLS včetně posouzení relativní četnosti vybočujících a odlehlých měření. Porovnejte a komentujte dosažené výsledky obou typů kamer. Vyhotoďte vhodné prezentace výsledných modelů. Spolupracujte se studentkou Bc. Máriou Ondrekovou. Výsledné modely a meziprodukty vzniklé při řešení zadání odevzdejte v míře a formě, která umožní posoudit geometrickou a polohovou správnost a kvalitu výsledků práce.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Rešerše aktuálních metod a software ve fotogrammetrii
3D texturovaný model
Testování přesnosti

Seznam doporučené literatury a podklady:

LUHMANN, T. et al., 2019. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging [online]. 3rd edition. ISBN 9783110607253. Dostupné z: doi:10.1515/9783110607253

ONIGA, V.-E. et al., 2018. 3D Calibration Test-Field for Digital Cameras Mounted on Unmanned Aerial Systems (UAS). Remote Sensing [online]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10122017

YILMAZTURK, F. and GURBAK, A. E., 2019. Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Information. International Journal of Optics [online]. Dostupné z: doi:10.1155/2019/8561380

COSTANZO, A. et al., 2018. A Smartphone Application for Supporting the Data Collection and Analysis of the Cultural Heritage Damaged during Natural Disasters. Dostupné z: doi:10.3390/ecsa-4-04930

BARBERO-GARCÍA, I. et al., 2017. Low-Cost Smartphone-Based Photogrammetry for the Analysis of Cranial Deformation in Infants. World Neurosurgery [online]. Dostupné z: doi:10.1016/j.wneu.2017.03.015

PAVELKA, Karel, 2009. Fotogrammetrie 1. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04249-6.

PAVELKA, Karel, 2011. Fotogrammetrie 2. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04719-4.

PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ, 2008. Fotogrammetrie 3: digitální metody a laserové skenování. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-03978-6.

ISO 5725-2, 2019. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2. 2nd edition.

Dokumentace k použitému software, Odborné články v národních i zahraničních časopisech.

Citační manažer Citace PRO dostupný z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FODOR, Alexander. 3D model objektu hvězdárny v Brně [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/143483>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Petr Kalvoda.

ABSTRAKT

Hlavnou náplňou tejto diplomovej práce bola tvorba georeferencovaných a textúrovaných 3D modelov. Pri obstaraní fotogrametrických snímok bola použitá digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II, mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro a dron DJI Phantom 3 Advanced. Na spracovanie snímok a tvorbu 3D modelov bol použitý softvér Agisoft Metashape Professional. Jednotlivé modely boli pripojené do súradnicového systému S-JTSK a výškového systému Bpv pomocou meračskej siete, v ktorej boli približné súradnice stanovísk určené metódou GNSS. Meračská sieť bola vyrovnaná ako voľná sieť. Na vyrovanie siete bol použitý softvér Groma. Záver práce obsahuje testovanie geometrickej presnosti modelov pomocou kontrolných bodov a referenčného mračna. Na analýzu odchýlok bola použitá norma ISO-5725-2.

Ďalším cieľom tejto práce bolo spracovanie rešerše o aktuálnych fotogrametrických metódach a o používaných softvéroch vo fotogrametrii.

Výsledný model bol publikovaný na webových stránkach sketchfab.com a bol vytlačený pomocou 3D tlačiarne.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

3D model, referenčné mračno bodov, fotogrametrické snímky, fotogrametrický softvér, blízka fotogrametria

ABSTRACT

The main focus of the diploma thesis was on the creation of georeferenced and textured 3D models. A Canon EOS 6D Mark II, Xiaomi Mi 10T Pro mobile phone, and DJI Phantom 3 Advanced drone were used to acquire photogrammetric images. Agisoft Metashape Professional software was used to process the images and create the 3D models. The individual models were connected to the S-JTSK coordinate system and the Bpv elevation system using a survey grid in which the approximate coordinates of the sites were determined by the GNSS method. The measurement network was aligned as a free network. Groma software was used to align the network. The final part of the work includes testing the geometric accuracy of the models using control points and a reference cloud. The ISO-5725-2 standard was used for the analysis of deviations.

Another objective of this work was to elaborate a research on current photogrammetric methods and the software used in photogrammetry.

The resulting model was published on the sketchfab.com website and printed using a 3D printer.

KEYWORDS

3D model, reference point cloud, photogrammetric images, photogrammetry software, close range photogrammetry

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem 3D model objektu hvězdárny v Brně zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2023

Bc. Alexander Fodor

autor

Pod'akovanie

Chcel by som sa pod'akovať vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Petrovi Kalvodovi, PhD. za odborné konzultácie a rady pri písaní tejto práce.

V Brne dňa 24.5.2023

Bc. Alexander Fodor
Autor

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Modelovaný objekt	11
2.1	Informácie o objekte	11
3	Fotogrametria.....	12
3.1	Definícia.....	12
3.2	Úvod do fotogrametrie	12
3.3	Blízka fotogrametria.....	13
3.3.1	Kamery pre blízku fotogrametriu	13
3.4	Letecká fotogrametria	13
3.5	Snímková orientácia.....	14
3.5.1	Vnútoraná orientácia.....	14
3.5.2	Vonkajšia orientácia	14
3.6	Distorzia objektívu	14
3.6.1	Vplyv distorzie.....	15
3.6.2	Radiálna distorzia	15
3.6.3	Tangenciálna distorzia	15
3.6.4	Model skreslenia rybieho oka	15
4	Fotografické snímače	17
4.1	Fotografický snímač.....	17
4.2	Veľkosti snímača.....	17
4.3	Druhy fotografických čipov	18
4.4	Crop faktor	19
5	Fotogrametrické programy	21
5.1	Platené fotogrametrické programy	21
5.2	Bezplatné programy	23
5.3	Prehľad základných parametrov fotogrametrických softvérov	24
6	Testovanie presnosti	26
6.1	Metodika hodnotenia presnosti	26
6.2	Určenie minimálnej veľkosti výberu.....	27

6.3	F-test.....	27
7	Terénne práce.....	29
7.1	Zameranie vlicovacích a kontrolných bodov	29
7.2	Skenovanie objektu	29
7.3	Fotenie objektu.....	29
7.4	Použité vybavenie	30
8	Spracovanie nameraných dát	37
8.1	Spracovanie merania z totálnej stanice	37
8.2	Spracovanie skenov.....	38
8.3	Spracovanie fotografií.....	43
8.3.1	Spracovanie fotografií z fotoaparátu Canon	44
8.3.2	Spracovanie fotografií z mobilného telefónu Xiaomi.....	51
8.3.3	Spracovanie fotografií z dronu	54
8.4	Zhodnotenie práce s rôznymi typmi zariadení	56
9	Testovanie modelov	60
9.1	Testovanie geometrie modelov pomocou kontrolných bodov	60
9.2	Testovanie geometrie modelov pomocou referenčného mračna.....	61
10	Záver	64
11	Zoznam obrázkov	66
12	Zoznam tabuliek	68
13	Zoznam použitých skratiek.....	69
14	Zoznam použitých zdrojov	70
	Zoznam digitálnych príloh.....	73
	Zoznam príloh.....	73

1 Úvod

V tejto diplomovej práci sa budem zaoberať spracovaním fotogrametrických snímok a tvorbou 3D modelov. Predlohou pre 3D model mi bude malé severozápadné observatórium hvezdární na Kravej hore. Jedná sa o severozápadné observatórium, ktoré bolo v prevádzke od roku 1953. Na fotenie tohto objektu bude použitá digitálna zrkadlovka, mobilný telefón a dron. Pre spracovanie fotogrametrických snímok bude použitý program Agisoft Metashape Professional, pretože mám s týmto programom predošlé skúsenosti a mám možnosť využiť jeho plnú verziu. Výsledné modely budú otestované pomocou referenčného mračna bodov, na ktorého zber bude použitý skener FARO FOCUS 3D X130. Ďalším tipom testovania bude testovanie pomocou súradnicových odchýlok na kontrolných bodoch. Výsledný 3D model bude pre ukážku vytlačený na 3D tlačiarni. V prípade potreby bude môcť hvezdáreň použiť tento model ako reklamu na svojich stránkach poprípade si ho môžu dať vytlačiť ako propagačný materiál.

Ďalším cieľom tejto práce je spracovanie rešerše o fotogrametrických programoch a ich využití. Tvorba 3D modelov pomocou týchto programov má široké uplatnenie na trhu. Jedným z možných využití 3D modelu je aj uplatnenie v hernom priemysle.

2 Modelovaný objekt

2.1 Informácie o objekte

Hvezdáreň a planetárium sa nachádza v Brne neďaleko centra mesta, v katastrálnom území Věvěří. Stavba hvezdárne je umiestená v parku „Kráví hora“. Od roku 1949 boli budované v najvyššom bode „Kráví hory“ dve pozorovateľne. Na prelome roku 1953 boli observatóriá schopné prevádzky. Situačný výkres stavby zhotovil Jindřich Kumpošt. Autorom návrhu a projektovej dokumentácie bol staviteľ František Šotola, ktorý sa podieľal na výstavbe prvej pozorovateľni. Prvé vzniklo južnejšie observatórium s kopulou o priemere sedem metrov. Dodnes slúži verejnosti. Druhé observatórium bolo totožných rozmerov. Okolie stavieb bolo parkovo upravené. (Hvezdárna a planetárium, 2015)



Obrázok 1: Severozápadné observatórium

3 Fotogrametria

3.1 Definícia

Fotogrametria je vedný a technický obor o získavaní spoľahlivých informácií o fyzických objektoch a prostredí, zaznamenávaním, meraním a interpretáciou snímok. (Slovník VÚGTK, 2005-2020)

3.2 Úvod do fotogrametrie

Tradičná fotogrametria vychádza z fotografického záznamu. Fotografický záznam je možné uskutočniť klasicky formou analógovej svetlocitlivej vrstvy (bežná fotografia) alebo digitálne. Na získanie obrazu je možné použiť zariadenia s rôznou výstupnou presnosťou – od bežných fotoaparátov až po špeciálne fotogrametrické komory. Z polohy bodov na meračských snímkach je možné odvodiť tvar, veľkosť a umiestnenie predmetu merania v priestore, určiť vzájomnú priestorovú polohu jednotlivých bodov, vyhodnotiť polohopis a výškopis a pod..

Novodobým metódam fotogrametrie už nepostačujú len poznatky z deskriptívnej geometrie. Spracovanie snímok je podstatne zložitejšie, založené na prepracovaných matematických princípoch a rieši sa buď analyticky s využitím výkonnej výpočtovej techniky alebo digitálnou technológiou na počítačoch. Fotogrametria všeobecne znižuje čas pre zber informácií aj pre ich spracovanie. Najme pri mapovaní v stredných a malých mierkach je možné získať veľmi výraznú finančnú a časovú úsporu oproti mapovaniu klasickými metódami merania. Vo veľa prípadoch nejde ani inú metódu ako fotogrametriu použiť – napr. mapovanie neprístupných alebo odľahlých miest či rozsiahlych oblastí.

Fotogrametria našla svoje uplatnenie nie len v obore geodézie a kartografie, ale aj v rôznych iných oblastiach ľudskej činnosti. Medzi najužívanejšie patria:

- a) stavebníctvo
- b) starostlivosť o pamiatky
- c) sledovanie postupu výstavby alebo ťažby surovín
- d) poľnohospodárstvo, lesníctvo, vodné hospodárstvo
- e) strojárstvo

- f) medicína
- g) antropológia
- h) polícia, dokumentácia ťažkých dopravných nehôd
- i) ekológia, urbanizmus, design

(Pavelka, 2009)

3.3 Blízka fotogrametria

Blízka fotogrametria je časť fotogrametrie zaoberajúca sa špeciálnymi aplikáciami v stavebníctve (dokumentácia fasád, meranie deformácií stavebných konštrukcií, v strojárstve, v starostlivosti o pamiatky, v archeológii pri mapovaní nálezov, medicíne, kriminalistike ...). Snímkovaný objekt sa nachádza obvykle vo vzdialenosti od 1 do 100m. (Hanzl, 2006)

3.3.1 Kamery pre blízku fotogrametriu

V minulosti sa používali kamery s analógovým záznamom obrazu na film alebo sklenenú dosku. Delili sa na meračské, čiastočne meračské a nemeračské. Meračská kamera je kamera projektovaná pre meračské účely. Prvky vnútornej orientácie u týchto kamier sú stabilné a známe s vysokou presnosťou. Skreslenie objektívu je veľmi malé a často je zanedbateľné. V súčasnosti sa už nevyrábajú. V súčasnej dobe sa najviac používajú nemeračské digitálne kamery. Pre účely blízkej fotogrametrie sú vhodnejšie digitálne zrkadlovky s objektívom s konštantnou nominálnou ohniskovou vzdialenosťou. Objektív so „zoomom“ je menej vhodný. (Hanzl, 2006)

3.4 Letecká fotogrametria

Pri leteckej fotogrametrii je stanovisko pre obstaranie snímok umiestnené v lietadle alebo v inom pohybujúcom sa dopravnom prostriedku. Na snímke sa zobrazí značne väčšia plocha než pri pozemnej fotogrametrii. Nevýhodou je, že spravidla nie je možné dostatočne presne určiť priestorovú polohu snímok v okamžiku ich obstarania a tak aj spôsoby spracovania budú zložitejšie než pri použití pozemnej fotogrametrii. Vzhľadom k tomu, že sa obstarávajú predovšetkým približne kolmé snímky, je vzdialenosť od miesta fotografovania k objektom približne rovnaká a teda je približne rovnaká aj presnosť vyhodnotenia. V tejto oblasti nastal pokrok daný zavedením zariadení GPS/INS, ktoré

umožňujú určovať prvky vonkajšej orientácie jednotlivých snímok priamo pri lete. (Pavelka, 2009)

3.5 Snímková orientácia

Pre kvalitnú snímkovú orientáciu je dobré poznať s dostatočnou presnosťou prvky vnútornej a vonkajšej orientácie.

3.5.1 Vnútorná orientácia

Pre kvalitné vyhodnotenie fotografických meračských snímok je nutné poznať a obnoviť prvky vnútornej orientácie meračskej komory (konštanta kamery c , ohnisková vzdialenosť f , poloha hlavného snímkového bodu x_0 a y_0 , veľkosť pixelov). Tieto veličiny sú obyčajne dopredu známe (častokrát sú udávané výrobcom pre každú meračskú kameru alebo sa dajú určiť laboratórnym meraním). Snímky, pre ktoré sú známe prvky vnútornej orientácie, sa označujú ako meračské. (Pavelka, 2009) (Geometric Camera Parameters, n.d.)

3.5.2 Vonkajšia orientácia

Prvky vonkajšej orientácie $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ nám definujú polohu a pootočenie kamery (snímkového systému) v objektovom súradnicovom systéme. Pomocou snímkových súradníc a prvkov vnútornej orientácie sme schopný rekonštruovať trs lúčov vychádzajúcich z projekčného centra a tento trs pomocou prvkov vonkajšej orientácie orientujeme v objektovom systéme. (Hanzl, 2006)

3.6 Distorzia objektívu

Vady, ktoré pôsobia na geometriu zobrazenia a ktoré majú teda rozhodujúci vplyv na presnosť merania, označujeme ako distorziu objektívu. Medzi základné druhy distorzie patrí:

- a) Radiálna
- b) Tangenciálna

(Pavelka, 2009)

3.6.1 Vplyv distorzie

Opravy z distorzie objektívu sa zavádzajú pre širokouhlé a hlavne pre obzvlášť širokouhlé komory, podľa ich známeho priebehu, prípadne pre nemeračské komory ako neznáme parametre, ktoré sa dajú zistiť pri vyrovnaní. U meračských komôr sú hodnoty distorzie maximálne do 10 μ m u zvlášť širokouhlých komôr, nemeračských alebo semimeračských komôr ale na okrajoch snímok dosahuje distorzia často hodnoty až 200 μ m a bez vhodnej opravy sú merané výsledky zaťažené veľkou chybou. Tu je nutné si uvedomiť, že aj značná distorzia nespôsobí v pozemnej fotogrametrii na krátke vzdialenosti u bežných prác tak závažné chyby, ako je to u leteckej fotogrametrie, kde je výška letu a teda aj vzdialenosť k meranému objektu mnohonásobne väčšia. (Pavelka, 2011)

3.6.2 Radiálna distorzia

Posun bodu o radiálnu vzdialenosť r' na snímke o hodnotu $\Delta r'$ označujeme ako radiálnu distorziu (skreslenie). Jej priebeh obyčajne nie je úplne presne rotačne symetrický, ale pri jej kompenzácii túto symetriu predpokladáme. U moderných meračských objektívov dosahuje hodnôt 5-10 μ m. Vzhľadom k rotačnej symetrii stačí určiť priebeh distorzie v jednom radiálnom smere. Distorzia býva spravidla vyjadrená charakteristickou krivkou pre každý oktant alebo sa konštruujú krivky rovnakej distorzie – izolínie. (Pavelka, 2009)

3.6.3 Tangenciálna distorzia

Druhým typom distorzie objektívu je skreslenie tangenciálne, ktoré je vyvolané nepresnou centráciou jednotlivých šošoviek. Pôsobí kolmo na radiálny smer a spôsobuje nepravidelné zle definovateľné lokálne posuny. Toto skreslenie sa prakticky nedá jednoducho kompenzovať a bežne sa neuvažuje (problém je v tom, že by sme museli poznať hodnoty distorzie v celej ploche a pri odstraňovaní distorzie by sme museli pre každý bod interpolovať opravu v plošnej tabuľke). U moderných objektívov sa oprávnené predpokladá, že vplyv tangenciálnej distorzie je zanedbateľný. (Pavelka, 2009)

3.6.4 Model skreslenia rybieho oka

Objektív Fisheye je extrémne širokouhlý objektív, ktorý vytvára silné súdkovité skreslenie. Využíva sa na vytváranie širokých panorám. Model skreslenia rybieho oka zahŕňa iba radiálne skreslenie rybieho oka. Pri porovnaní s modelom priamočiarej

šošovky je polynóm popisujúci radiálne skreslenie funkciou uhlovej vzdialenosti od stredu perspektívy, a nie lineárnej vzdialenosti v obraze:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \frac{\theta}{r} [1 + k_1\theta^2 + k_2\theta^4 + k_3\theta^6 + k_4\theta^8] \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Kde je $r = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ a $\theta = \arctan(r)$.

θ označuje vo vzorcoch uhol dopadajúceho svetla vzhľadom na optickú os kamery. (Lens Distortion Correction, 2023), (Camera Calibration Theory, 2022)

4 Fotografické snímачe

V tejto kapitole sa stručne zaoberám fotografickými snímачmi. Nachádza sa v nej tabuľka s rôznymi veľkosťami snímачov, a tak tiež popis rôznych typov snímачov.

4.1 Fotografický snímач

Fotografický snímач je najdôležitejšou súčasťou fotoaparátu. Je umiestnený za objektívom. Medzi najdôležitejšie vlastnosti snímачa patrí jeho veľkosť a rozlíšenie (počet pixelov). Keby sme to mali zjednodušiť, tak s väčším snímачom by sme mali získať kvalitnejší výsledný obraz. Kvalita výsledného obrazu však závisí aj na veľkosti pixelov. Veľkosť pixelov vychádza z rozlíšenia snímачa. Predpoklad je taký, že väčší pixel by mal kvalitnejšie preniesť obrazovú informáciu. Väčšina zariadení je však limitovaná svojimi rozmermi a to sa odrazí aj na veľkosti fotografického snímачa. (Chroust, 1996-2023)

4.2 Veľkosti snímачa

Veľkosť snímачa sa udáva v palcoch alebo lepšie povedané v ich zlomkoch. Jeden palec je 2,54 cm. Najmenšiu plochu snímачov majú mobilné telefóny. Každý výrobca fotoaparátov si svoje snímачe označuje po svojom. Univerzálne označenie je len u Full Frame snímачov. Veľkosť tohto snímачa je 32 x 24 mm. Veľkosť je rovnaká ako u bežného kinofilmového políčka. (Chroust, 1996-2023)

Sensor Name	Medium Format	Full Frame	APS-H	APS-C	4/3	1"	1/1.63"	1/2.3"	1/3.2"
Sensor Size	53.7 x 40.2mm	36 x 23.9mm	27.9x18.6mm	23.6x15.8mm	17.3x13mm	13.2x8.8mm	8.38x5.59mm	6.16x4.62mm	4.54x3.42mm
Sensor Area	21.59 cm ²	8.6 cm ²	5.19 cm ²	3.73 cm ²	2.25 cm ²	1.16 cm ²	0.47 cm ²	0.28 cm ²	0.15 cm ²
Crop Factor	0.64	1.0	1.29	1.52	2.0	2.7	4.3	5.62	7.61
Image									
Example									

Tabuľka 1: Veľkosti niektorých fotografických snímačov (Veľkosť snímača, 2001-2023)

4.3 Druhy fotografických čipov

V oblasti digitálnych fotografií sa používa hneď niekoľko základných fotografických čipov. Jednotlivé čipy sa označujú podľa princípu využívaného k ukladaniu obrazovej informácie.

CCD

CCD (Charged Coupled Device) táto technológia vznikla už v roku 1969. Je založená na princípe fotoefektu, signál sa posúva až na okraj snímača k takzvanému posuvnému registru a ten jednotlivé signáli prevádza do zosilňovača a analógovo-digitálneho prevodníku. Táto technológia je u mobilných telefónov nepoužiteľná, pretože je náročné integrovať do CCD snímačov doplnkové časti, ktoré musia byť umiestnené mimo dosku snímača. U mobilných telefónov záleží na každom milimetre priestoru. CCD snímače majú pri malom zosilnení nízky šum, ale so zvyšujúcim ISO narastá geometrickou radou. Pri CCD snímačoch je problém aj dĺžka spracovania fotiek. Ak by sa jednalo o nejaké sériové fotografovanie tak je nutné počítať s časovým oneskorením a to je nepraktické. (Chroust, 1996-2023)

CMOS

Fotografické čipy typu CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor) boli vyvinuté aby eliminovali chyby CCD snímačov. Vo väčšine prípadov sa to podarilo. Výrobný proces je rovnaký ako u integrovaných obvodov, výroba je lacnejšia

a fotografický čip je menej náročný na spotrebu energie. Na snímač je možné dať väčší počet pixelov alebo doňho integrovať samostatný zosilňovač pre každú obrazovú bunku. Fotodiódy sú ale menšie a tak potrebujú vyššie zosilnenie signálu a to zapríčiňuje výraznejší obrazový šum. CMOS snímače sú oveľa rýchlejšie pri sériovom fotografovaní. Negatívom je vyššia úroveň šumu aj v prípade nízkeho zosilnenia. Pri fotení za horších ideálnych podmienok budú fotky viditeľne horšie než za slnečného počasia. (Chroust, 1996-2023)

BSI CMOS

Technológia BSI (Back Side Illuminated) CMOS nadväzuje na technológiu CMOS. Fotocitlivá vrstva je u tohto snímača umiestená až za tranzistory a obvody. To znamená, že na fotocitlivú vrstvu dopadá menej svetla. BSI posúva tranzistory a obvody až za fotocitlivú vrstvu a to zlepšuje citlivosť snímača. Prvý prototyp sa datuje do roku 2007. Následne sa dostal do digitálnych fotoaparátov a mobilných zariadení. Prvý ho použil Apple v iPhone 4. Najväčšie výhody tohto snímača sú väčšia rýchlosť fotografického čipu, vysoká citlivosť, nízka spotreba energie a malé rozmery. Tieto parametre sú výhodné pre mobilné telefóny. Vďaka svojej jednoduchšej a lacnejšej výrobe prakticky vytlačil základné CCD snímače z trhu. Fotografické čipy ISOCELL od Samsungu, ktoré sú používané do smartphoney sú variantnou na BSI snímače. Je tam rozdiel v tom, že susedné pixely sú oddelené bariérou. (Chroust, 1996-2023)

4.4 Crop faktor

Slovo crop by sme v tomto prípade mohli z angličtiny preložiť ako orez. Crop faktor udáva koľkokrát je snímač konkrétneho fotoaparátu menší než snímač Full Frame. Snímač Full Frame má formát 24x36mm a vychádza z veľkosti políčka kinofilmu. Jedná sa o dlhodobý štandard. Táto skutočnosť nám umožňuje porovnávať objektívy bez ohľadu na veľkosť snímača. Pre príklad si môžeme porovnať dva fotoaparáty so snímačom Full Frame (crop faktor 1) a APS-C (crop faktor 1,5). Ak si predstavíme objektív s ohniskovou vzdialenosťou 50mm, ktorý je kompatibilný s Full Frame aj s APS-C fotoaparátom. Pri použití s oboma fotoaparátmi sa fyzicky ohnisková vzdialenosť nemení, zostane stále 50 mm. Rozdiel je vlastne v tom aký uhol záberu tento objektív poskytne s jednotlivými fotoaparátmi. Objektív s ohniskovou vzdialenosťou 50 mm vykreslí kruhový obraz určitého priemeru a do tohto kruhu sa umiestni snímač

veľkosti Full Frame. Ak by sme tento snímač vymenili za menší, v našom prípade za APS-C, tak zachytí menšiu časť kruhového obrazu vykresleného objektívom. Proste ten obraz sa oreže. Pri použití 50 mm objektívu na fotoaparáte s APS-C snímačom by sme zabrali fotografovanú scénu, ktorá zodpovedá takému uhlu záberu aký by sme dosiahli pri foteaní z rovnakej vzdialenosti s Full Frame snímačom ale s 75 mm objektívom (ohnisková vzdialenosť 50 mm x crop faktor 1,5 = 75 mm). Ohnisková vzdialenosť x crop faktor = ekvivalentná ohnisková vzdialenosť (Horký, 2017).

Typ snímača	Crop faktor
1/2,7"	6,44
1/2,5"	6,02
1/2,3"	5,58
1/2"	5,41
1/1,8"	4,84
2/3"	3,93
1"	2,7
4/3"	2
APS-C Canon	1,6
APS-C	1,5
Full frame	1

Tabuľka 2: Veľkosti snímačov a ich crop faktory (Horký, 2017)

5 Fotogrametrické programy

V tejto kapitole sa zaoberám platenými a neplatenými fotogrametrickými programami. V dnešnej dobe moderných technológií je na trhu s geodetickými softvérmi množstvo rôznych programov. V tejto kapitole sa vás pokúsim oboznámiť s niektorými z nich. Kapitola obsahuje stručný popis programu od výrobcu či predajcu a tabuľky, pomocou ktorých boli zrovnávané fotogrametrické programy na základe určitých vlastností či možností programov.

Fotogrametria je technika k získavaniu spoľahlivých dát o reálnom svete cez vytváranie 3D modelom z fotografií. Fotogrametrické softvéry k nám prichádzajú v rôznych tvaroch a formách. Samozrejme existujú komerčné riešenia, ktoré sú ideálne pre priemyselné a strojárské aplikácie. Internetová stránka www.all3dp.com zostavila zoznam najlepších softvérov na fotogrametriu. (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022)

5.1 Platené fotogrametrické programy

Medzi platené fotogrametrické programy patria: Agisoft Metashape Professional, Bentley ContextCapture, Photomodeler, Autodesk ReCap, 3DF Zephyr, atď.. (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022)

Agisoft Metashape profesional

Agisoft Metashape je samostatný softvérový produkt, ktorý vykonáva fotogrametrické digitálne spracovanie (letecké a blízke fotografie, satelitné snímky) a generuje 3D priestorové údaje, ktoré sa dajú použiť v GIS aplikáciách, v dokumentácii kultúrneho dedičstva a produkcii vizuálnych efektov, ako aj pre nepriame meranie predmetov rôznych mierok. Softvér umožňuje spracovať snímky z RGB, termálnych alebo multispektrálnych kamier, vrátane multikamerových systémov, do priestorových informácií vo forme hustých mračien bodov, textúrovaných polygonálnych modelov, georeferencované skutočné ortomozaiky a DSM/DTM. (Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8, 2022)

Agisoft Metashape Standart Edition jeho cena sa pohybuje od \$179. Agisoft Metashape Professional Edition cena sa pohybuje od \$3499. (Agisoft, 2023)

Bentley ContextCapture

ContextCapture je softvér, ktorý umožňuje spoľahlivo a rýchlo vytvárať modely akejkoľvek mierky, od objektov s rozmermi niekoľkých centimetrov až po celé mestá. Presnosť výsledného 3D modelu je obmedzená iba použitým rozlíšením obrazu. ContextCapture je ideálny pre projekty infraštruktúry počas celého dizajnu, prevádzky a výstavby. Jeho výkon, flexibilita a škálovateľnosť menia jednoduché fotografie a mračná bodov do realistického, vysoko detailného 3D modelu. (ContextCapture, 2021)

Cena programu Bentley ContextCapture sa pohybuje od \$3647. (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022)

PhotoModeler

PhotoModeler je softvérový Windows balík na meranie a modelovanie objektov a scén reálneho sveta pomocou fotografií. PhotoModeler vyvinutý spoločnosťou Eos Systems Inc, je svetovým lídrom vo svojej triede. Tento produkt je program pre fotogrametriu alebo technicky povedané, softvérový analytický konvergentný fotogrametrický systém. Na používanie PhotoModeler nemusíte byť fotogrametrom. PhotoModeler prináša výkonné možnosti fotogrametrie v jednoduchom a ľahko použiteľnom prostredí Windows. (PHOTOMODELER TECHNOLOGIES, n.d.)

PhotoModeler Standard trvalá licencia \$995. PhotoModeler Premium trvalá licencia \$2995. (PhotoModeler Pricing and License, 1998-2023)

Autodesk ReCap Pro

Autodesk ReCap Pro je softvér, ktorý pomáha projektantom a inžinierom zachytávať vysoko kvalitné a detailné modely prvkov reálneho sveta. Pomocou laserových skenov a fotografií môžete vytvárať presné modely, ktoré majú široké možnosti využitia v architektúre, projektovaní a stavebníctve. Pomocou služby ReCap Photo v aplikácii ReCap Pro môžete z dát zachytených dronmi alebo bezpilotnými lietadlami generovať textúrované geografické siete, mračná bodov a ortografické fotografie existujúcich podmienok. Autodesk ReCap Pro je možné získať za 1356Kč mesačne. (AUTODESK, 2023)

RealityCapture

RealityCapture je softvér, ktorý je známy pre svoju rýchlosť, presnosť a nízke nároky na hardvér. V praxi ho využívajú profesionáli v rôznych odvetviach priemyslu. Je to prvý fotogrametrický softvér, ktorý umožňuje bezproblémovú kombináciu fotografií a laserových skenov. Patrí medzi najrýchlejšie fotogrametrické softvéry na trhu. Umožňuje napríklad automatickú rekonštrukciu 3D modelov pomocou trojuholníkovej siete, využíva pokročilé algoritmy pre zafarbenie a textúrovanie modelu, umožňuje georeferencovanie do takmer všetkých svetových súradnicových systémov. Medzi jeho ďalšie funkcie patrí meranie objemov, plôch a vzdialeností. Modely je možné exportovať do štandardných formátov ako ply, obj a xyz. Ďalej je možné spracovanie pomocou príkazového riadka. Toto je iba malá časť jeho funkcií. Trvalá licencia pre RealityCapture ENTERPRISE stojí 83 000 Kč bez DPH. (RealityCapture, n.d.)

Pix4Dmapper

Pix4Dmapper je program, ktorý umožňuje generovanie mračien bodov, 3D sietí alebo výškových máp zo snímkov. Spoločnosť Pix4D vyvinula bezplatnú mobilnú aplikáciu, ktorá umožňuje používať dron ako nástroj na mapovanie a umožní riadiť dráhu letu, aby sa zabezpečilo prekrytie medzi snímkami. V súčasnosti sú podporované drony Parrot a DJI. Snímky je možné spracovávať na vlastnom počítači alebo v cloude. Tu je možné generovať mračná bodov, ortomozaiky, výškové modely a ďalšie. Softvér navyše obsahuje analytické nástroje, ktoré sa zameriavajú na poľnohospodárstvo, geodetické práce, architektúru a ďalšie aplikácie. (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022)

5.2 Bezplatné programy

MeshRoom

MeshRoom je bezplatný open-source softvér s veľmi jednoduchou ovládateľnosťou a intuitívnym prostredím. Spracovanie fotografií prebieha s využitím fotogrametrického frameworku pre počítačové videnie AliceVision. Tento framework je produktom spolupráce niekoľkých univerzít, laboratórií a postprodukčnej francúzskej spoločnosti Mikros Images. Medzi partnerov pomáhajúcich s AliceVision patrí aj České vysoké učení technické v Prahe. Generovanie modelov v MeshRoom je jednoduché spočíva v označení zdrojových fotografií a ich pretiahnutí do okna softvéru. Následne kliknete na štart

a niekoľko hodín si počkáte na prepočet fotografií do kvalitného 3D digitálneho modelu. Tento softvér je dostupný pre operačný systém Windows aj OSX/Linux a pre svoje fungovanie potrebuje podporu knižnice CUDA. (Nepor, 2020)

MicMac

MicMac je bezplatný softvér na fotogrametriu. Jeho sofistikovaný súbor funkcií je vhodný najmä pre profesionálnych alebo akademických užívateľov, ale je prístupný aj pre bežných užívateľov. MicMac sa používa v kartografii, ochrane životného prostredia, lesníctve, ochrane kultúrneho dedičstva a súkromnom priemysle. (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022)

Regard3D

Regard3D je bezplatný softvér pre fotogrametriu. Založený na štruktúre z pohybu, to znamená, že dokáže vytvárať 3D modely z objektov pomocou série fotografií tohto objektu z rôznych uhlov pohľadu. (REGARD3D, n.d.)

Ceny uvedené pri softvéroch som dohľadal na stránkach výrobcov alebo predajcov. V niektorých prípadoch nie je však jasné o aký typ licencie ide. Zoznam jednotlivých programov nie je konečný. V tejto práci sa zaoberám iba niektorými.

5.3 Prehľad základných parametrov fotogrametrických softvérov

V dnešnej dobe sa na trhu s fotogrametrickým softvérom nachádza veľké množstvo rôznych softvérov. Každý z nich má trochu iné funkcie a iné parametre, preto je veľmi zložité si pre svoju prácu vybrať ten najvhodnejší. Ľudia sa často snažia vybrať si čo najlepšiu voľbu v pomere ceny a kvality. Tabuľka 3 obsahuje ceny pre niektoré fotogrametrické programy, a taktiež výpis základných výstupných formátov. Taktiež sú v nej uvedené druhy fotogrametrie pre ktoré sú dané programy vhodné. Porovnanie kvality, rýchlosti spracovania a užívateľskej prívetivosti je možné vidieť pre niektoré programy v Tabuľka 4.

Názov programu	Typ fotogrametrie	Cena	Výstupný formát
Agisoft Metashape	letecká, blízka, UAS, satelitná	od 179 \$	obj, 3ds, wrl, dae, ply, x3d, stl, abc, fbx, dxf, osgb, glb, u3d, pdf, knz, png, jpg, tiff, txt, cal, cam, xml
Bentley ContextCapture	letecká, blízka	od 3 647 \$	3ms, 3sm, kml, dae, fbx, obj, stl
PhotoModeler	letecká, blízka, UAS	995 \$/permanentná licencia	3ds, 3dm, dxf, igs, kml, knz, las, ma, ms, obj, pts, byu, facet, iv, ply, stl, txt, wrl
Autodesk ReCap	letecká, blízka	od 45\$/mesiac	asc, cl3, clr, e57, fls, fws, isproj, las, pcg, ptg, pts, ptx, rds, txt, xvb, zfs, zfpri
MeshRoom	letecká, blízka	voľne dostupný	abc, obj
MicMac	letecká, blízka	voľne dostupný	geotiff, ply, xml
Regard3D	letecká, blízka	voľne dostupný	obj, ply
Pix4Dmapper	letecká,blízka, UAS	od 260 \$/mesiac	obj, fix, dxf, las, kml, tif, osgb, slpk, shp
RealityCapture	letecká, blízka, UAS	3 750 \$/bez limitný prístup	jpg,png, XYZ, XYZRGB, tiff, bmp, dib, rle, jpeg, jpe, jif, exif, tif, wdp,jxr, dds, KML, KMZ, obj, ply,dxf

Tabuľka 3: Stručný prehľad základných informácií o fotogrametrických programoch (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022), (PhotoModeler Pricing and License, 1998-2023), (Agisoft Metashape User Manual, 2022), (Comparison of photogrammetry software, 2022)

Názov programu	Kvalita	Rýchlosť	Užívateľská prívetivosť
Agisoft Metashape	★★★★☆	★★☆☆☆	★★★★☆
Autodesk ReCap	★★★★★	★★★★☆	★★★★★
MeshRoom	★★★★☆	★★☆☆☆	★★★★☆
Regard3D	★★★☆☆	★★☆☆☆	★★★★☆
RealityCapture	★★★★★	★★★★★	★★★★★

★★★★★

najlepšie hodnotenie

★★☆☆☆

najhoršie hodnotenie

Tabuľka 4: Zhodnotenie niektorých fotogrametrických programov (Photogrammetry: Step-by-Step Guide and Software Comparison, 2023)

6 Testovanie presnosti

V tejto kapitole je stručne popísaný jeden z možných spôsobov testovania výsledných fotogrametrických modelov. Pracuje sa v súradnicovom systéme S-JTSK a výškovom systéme Bpv. Porovnávajú sa súradnice získané terestrickým meraním a súradnice získané odmeraním z jednotlivých fotogrametrických modelov. Súradnice získané terestrickým meraním boli získané s vyššou presnosťou. V spodnej časti vysvetlený F-test, ktorý je možné využiť na testovanie stredných chýb.

6.1 Metodika hodnotenia presnosti

V prípade, že sú súradnice bodov určené terestrickým meraním výrazne presnejšie než súradnice určené zmeraním z fotogrametrických modelov, je ďalej možné hodnoty terestricky určených súradníc (X,Y,Z) považovať za skutočné (pravé) hodnoty. Preto sa aj môže z rozdielmi (δX , δY , δZ) na kontrolných bodoch zaobchádzať, ako so skutočnými chybami:

$$\delta X_i = X_i - \tilde{X}_i, \delta Y_i = Y_i - \tilde{Y}_i, \delta Z_i = Z_i - \tilde{Z}_i \quad (6.1)$$

$\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i$ označujú súradnice získané odmeraním z fotogrametrického modelu. Pokiaľ by sa porovnávali dvojice z rovnakou presnosťou, muselo by sa pracovať s polovičnými hodnotami rozdielov. Rozdiely v 3D sa počítajú ako :

$$\delta_{3Di} = \sqrt{\delta X_i^2 + \delta Y_i^2 + \delta Z_i^2} \quad (6.2)$$

Smerodajné odchýlky sa odhadujú ako:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta X_i^2}{n}}, S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta Y_i^2}{n}}, S_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta Z_i^2}{n}} \quad (6.3)$$

n je počet rozdielov (počet kontrolných bodov). Dôležitým ukazovateľom presnosti je výskyt hrubých chýb (odľahlých hodnôt). (Kalvoda, 2020)

Pre testovanie výsledkov je možné použiť štatistické analýzy, ktoré sú písané v norme ISO 5725 – 2.

- a) Ak je testovaná štatistika menšia alebo je rovná 5% kritickej hodnote, v takomto prípade sa považuje testovaná entita za správnu.

- b) Ak je testovaná štatistika väčšia než 5% kritická hodnota a menšia než 1% kritická hodnota alebo je tejto hodnote rovná, nazve sa táto testovaná entita vybočujúcou hodnotou
- c) Ak je testovaná štatistika väčšia než 1% kritická hodnota, nazve sa testovaná entita odľahlou hodnotou
(ISO - 5725 - 2, 2019)

6.2 Určenie minimálnej veľkosti výberu

Rozsah výberu n ovplyvňuje presnosť odhadov parametrov polohy a rozptýlenia. U malých výberov sa stáva, že šírka konfidenčného intervalu a testy hypotéz sú ovplyvnené viac hodnotou veľkosti výberu n než variabilitou dát. Určenie dostatočnej veľkosti výberu je možné urobiť niekoľkými spôsobmi, vždy sa ale začína určením odhadu výberového rozptylu $S_0^2(x)$ z n_1 predbežných hodnôt. Ak sa jedná o výber z normálneho rozdelenia, určí sa minimálna veľkosť n_{min} napríklad tak, aby s pravdepodobnosťou $(1-\alpha)$ platilo, že $\mu - d \leq \bar{x} \leq \mu + d$, d je v tomto prípade zvolené číslo. Pre minimálnu veľkosť výberu potom platí vzťah

$$n_{min} = \left[\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1-1)}{d} \right]^2 S_0^2(x) \quad (6.4)$$

kde $t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1)$ je kvantil Studentovho rozdelenia s $(n_1 - 1)$ stupňami voľnosti. Pri výpočte minimálnej veľkosti výberu pre normálne rozdelenie vychádza hodnota $n_{min} \approx 50$. Z toho vyplýva, že bežne používaný rozsah meraní $n = 5, 10, 15$ je zo štatistického hľadiska príliš malý. (Meloun, n.d.)

6.3 F-test

Testom sa overuje, či sa od seba vzájomne nelíšia stredné chyby dvoch súborov meraní. Zisťujeme či obidva súbory boli získané s rovnakou presnosťou. Postup je nasledujúci:

- 1) z jedného súboru sa vypočíta odhad strednej chyby m_1 a z druhého súboru odhad strednej chyby m_2
- 2) vypočíta sa testovacie kritérium

$$F = \frac{m_1^2}{m_2^2} \quad (6.5)$$

tak, aby $F > 1$

- 3) v tabuľkách Fischer-Snedecorového rozdelenia si podľa zvolenej hladiny významnosti α a pre dané hodnoty $k_1 = n_1 - 1$, $k_2 = n_2 - 1$ (stupne voľnosti) vyhľadáme kritickú hodnotu F_K (n_1, n_2 sú rozsahy prvého a druhého súboru meraní),
- 4) pri $F > F_K$ sa zamietá domnienka o rovnakej presnosti oboch súborov meraní (na hladine významnosti α), v opačnom prípade nie je dôvod domnienku zamietnuť. (Švábenský, 2006)

7 Terénne práce

V tejto kapitole je stručne popísaný pracovný postup pri jednotlivých terénnych prácach. V druhej časti je uvedená špecifikácia jednotlivých použitých prístrojov. Táto kapitola obsahuje tiež fotografie použitého vybavenia.

7.1 Zameranie vlicovacích a kontrolných bodov

Na zameranie vlicovacích a kontrolných bodov bola vybudovaná sieť, z ktorej boli následne zamerané jednotlivé body. Pred samotným meraním sme skontrolovali konštantu systému TS – hranol. V sieti boli uhly aj dĺžky merané v dvoch polohách. Meračská sieť bola vybudovaná v spolupráci s mojou spolužiačkou a bola použitá pre naše oba objekty. Na vybudovanie siete bola použitá trojpodstavcová sústava. Dĺžky a uhly boli merané na hranol. Takmer všetky vlicovacie a kontrolné body boli merané na minihranol. Niektoré body, jednalo sa najmä o body kde sa nebolo možné dostať, boli merané v bez hranolovom režime. V bez hranolovom režime boli merané najmä body na streche. Na meranie bola použitá totálna stanica Trimble S8 HP. Na určenie približných súradníc a výšok stanovísk bola použitá GNSS aparátúra Trimble R8s.

7.2 Skenovanie objektu

Kvôli získaniu referenčného mračna bodov bolo celé observatórium naskenované. Skenovanie bolo urobené v troch výškových úrovniach, aby bol celý objekt dostatočne pokrytý mračnom bodov. Skener bol umiestnený na tri rôzne statívy. Najprv bol použitý statív, ktorý bol ku skeneru a skener bol umiestnený asi vo výške 1,5-1,8m. Následne bol celý objekt naskenovaný so skenerom umiestneným na ministatíve asi vo výške 0,15m. Na skenovanie strechy bol použitý výsuvný statív, ktorý nám umožnil skenovať vo výške asi 5m, to však aj tak nestačilo na zachytenie úplne celej strechy. Pri skenovaní bol použitý skener Faro Focus 3D X130.

7.3 Fotenie objektu

Objekt bol nafotený tromi rôznymi zariadeniami. Na nafotenie bol použitý mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro, digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II a dron DJI

Phantom 3 Advanced. Fotenie prebiehalo v troch výškových úrovniach. Strecha bola odfotená dronom. Objekt bol nafotený mobilným telefónom a digitálnou zrkadlovkou vo vzdialenosti asi 3-5m. Na nafotenie jednotlivých detailov bol použitý taktiež mobilný telefón a digitálna zrkadlovka. Detaily boli fotené vo vzdialenosti cca od 0,8 – 1,5 m.

7.4 Použité vybavenie

Skener FARO FOCUS 3D X130



Obrázok 2: Skener Faro Focus 3D X130 na ministatíve



Obrázok 3: Skener Faro Focus 3D X130 na výsuvnom statíve

Zariadenie	Parameter	Hodnota parametra
Faro Focus 3D X130	Typ zariadenia	Laserový skener
	Presnosť merania dĺžok	2 mm
	Maximálna rýchlosť skenovania	976 000 bodov/s
	Dosah merania	0,6 - 130 m

Tabuľka 5: Špecifikácia zariadenia Faro Focus 3D X130 (Prokop, 2021)

Totálna stanica Trimble S8 HP



Obrázok 4: Totálna stanica Trimble S8 HP

Zariadenie	Parameter	Hodnota parametra
	Typ zariadenia	Totálna stanica
	Presnosť smeru meraného v dvoch polohách ďalekohľadu	0,3 mgon
Trimble S8 HP	Presnosť merania dĺžok (na odrazný hranol)	1 mm + 1 ppm
	Presnosť merania dĺžok (bezhranový režim)	3 mm + 2 ppm
	Hmotnosť	5,2 kg
	Obstarávacia cena	220 000 Kč

Tabuľka 6: Špecifikácia totálnej stanice Trimble S8 HP (Prokop, 2021)

Mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro a digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II



Obrázok 5: Mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro a digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II

Parameter	Xiaomi Mi 10T Pro	Canon EOS 6D Mark II
Typ zariadenia	Mobilný telefón	digitálna zrkadlová kamera
Rozlíšenie fotografií	12032 x 9024 px	6240 x 4160 px
Rozlíšenie fotoaparátu	108 Mpx	26,2 Mpx
Veľkosť pixelu	0,8 μm	5,75 μm
Clona	1,7	1,4
Ekvivalentná ohnisková vzdialenosť	26mm	24mm
Obstarávacia cena	14 990 Kč	33 990 Kč + 44 190 Kč
Hmotnosť	218g	765 g + 650 g

Tabuľka 7: Špecifikácia mobilného telefónu a digitálnej zrkadlovky (Prokop, 2021)

Dron DJI Phantom 3 Advanced



Obrázok 6: Dron DJI Phantom 3 Advanced

Zariadenie	Parameter	Hodnota parametra
Phantom 3 Advanced	Typ zariadenia	dron
	Maximálna rýchlosť stúpania	5 m/s
	Maximálna rýchlosť klesania	3 m/s
	Maximálna uhlová rýchlosť	150°/s
	Maximálna dĺžka letu	23 min
	Hmotnosť	1280 g
	Cena	21 490 Kč
	Prevádzková teplota	0° - 40°C
	Satelitné polohové systémy	GPS/GLONASS
	Rozlíšenie fotografií	4000 x 3000 px
	Ekvivalentná ohnisková vzdialenosť	20 mm
	Rýchlosť elektronickej uzávierky	8-1/8000 s
Rozlíšenie fotografií	12,4 Mpx	

Tabuľka 8: Špecifikácia dronu DJI Phnatom 3 Advanced (PHANTOM 3 ADVANCED, 2023), (Dron DJI Phantom 3 Advanced, 2016 - 2023)

GNSS aparátúra Trimble R8s



Obrázok 7: GNSS aparátúra Trimble R8s

VÝKONNOSTNÍ SPECIFIKACE¹

Měření

- Pokročilý Trimble Maxwell 6 Custom Survey GNSS čip se 440 kanály
- Zajištění Vaší investice do budoucna s technologií Trimble 360
- Vysoce přesný vícenásobný korelátor měření GNSS pseudovzdáleností
- Nefiltrované a nevyhlazené pseudovzdálenosti pro nízký šum, nízkou chybu z multipath, rychlou korelaci a dynamickou odezvu
- Měření GNSS nosné vlny s velmi nízkým šumem a přesností <1 mm v pásmu 1 Hz
- Sledování poměrů signál – šum v dB – Hz
- Osvědčená Trimble technologie sledování družic s nízkou elevací
- Družicové signály sledované současně:
 - GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5
 - GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
 - SBAS: L1C/A, L5 (pro SBAS satelity podporující L5)
 - Galileo: E1, E5A, E5B
 - BeiDou (COMPASS): B1, B2
- SBAS: QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN
- Frekvence určování polohy: 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz a 20 Hz

POLOHOVÁ PŘESNOST²

Diferenční kódové měření GNSS

Poloha	0,25 m + 1 ppm RMS
Výška	0,50 m + 1 ppm RMS
Přesnost SBAS korekcí ³	typicky <5 m 3DRMS

Statické měření GNSS

Vysoce přesná statická metoda

Poloha	3 mm + 0,1 ppm RMS
Výška	3,5 mm + 0,4 ppm RMS

Statická a Rychlá statická metoda

Poloha	3 mm + 0,5 ppm RMS
Výška	5 mm + 0,5 ppm RMS

Post-procesní kinematická metoda GNSS

Poloha	8 mm + 1 ppm RMS
Výška	15 mm + 1 ppm RMS

RTK měření

Jedna délka základny <30 km

Poloha	8 mm + 1 ppm RMS
Výška	15 mm + 1 ppm RMS

Síťové RTK⁴

Poloha	8 mm + 0,5 ppm RMS
Výška	15 mm + 0,5 ppm RMS
Doba trvání inicializace ⁵	typicky <8 sekund
Spolehlivost inicializace ⁵	typicky >99.9%

Obrázok 8: Špecifikácia GNSS aparatury Trimble R8S (Trimble R8s GNSS prijímač, 2015)

Minihranol použitý pri meraní kontrolných a vlicovacích bodov



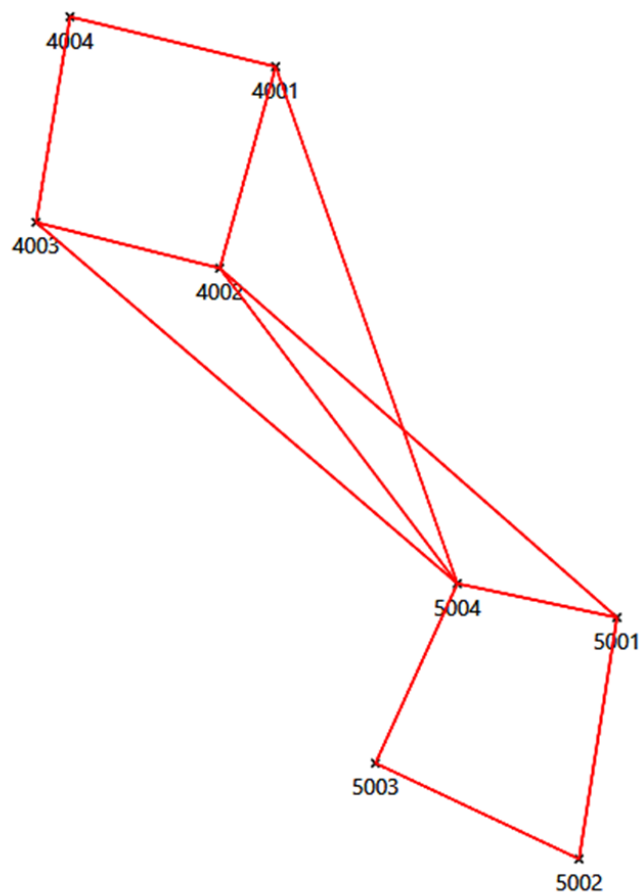
Obrázok 9: Minihranol

8 Spracovanie nameraných dát

Táto kapitola obsahuje stručný popis spracovania jednotlivých dát získaných buďto terestrickým meraním, skenovaním alebo fotením.

8.1 Spracovanie merania z totálnej stanice

Totálnou stanicou Trimble, ktorá je bližšie špecifikovaná v kapitole 7.4 bola zmeraná sieť, z ktorej sa následne zmerali všetky kontrolné a vlicovacie body. Na vyrovnanie siete a výpočet kontrolných a vlicovacích bodov bol použitý softvér Groma. Sieť bola vyrovnaná ako voľná sieť a následne sa z nej spočítali vlicovacie a kontrolné body pomocou polárnej metódy dávkou.



Obrázok 10: Grafická ukážka siete z programu Groma

Po vyrovnaní sme na bodoch siete dosiahli stredné chyby vid' Obrázok 11 a Obrázok 12. Celý protokol z vyrovnania a výpočtu vličovacích a kontrolných bodov je priložený k tejto práci ako príloha č.2.

INFORMACE O STŘEDNÍCH CHYBÁCH:

Bod	my [mm]	mx [mm]	mye [mm]	mxe [mm]	mxy [mm]	Stoč. [g]
4001	0.41	0.54	0.38	0.56	0.48	176.34
4002	0.39	0.41	0.38	0.42	0.40	158.03
4003	0.47	0.49	0.37	0.58	0.48	153.62
4004	0.48	0.58	0.44	0.61	0.53	169.14
5001	0.46	0.47	0.38	0.54	0.47	151.74
5002	0.59	0.63	0.51	0.70	0.61	157.40
5003	0.38	0.72	0.38	0.72	0.57	194.00
5004	0.56	0.39	0.37	0.57	0.48	82.99

Střední souřadnicová chyba mxy [mm]: 0.51

Obrázok 11: Ukážka stredných chýb z polohového vyrovnania

VYROVNANÉ VÝŠKY:

Bod	Z přibl. [m]	Oprava [mm]	Z vyr. [m]	mz [mm]
4001	305.78200	5.27	305.78727	0.09
4002	305.69100	-21.90	305.66910	0.08
4003	305.61000	-10.39	305.59961	0.09
4004	305.61400	12.69	305.62669	0.10
5001	305.69900	13.83	305.71283	0.09
5002	305.55900	12.86	305.57186	0.11
5003	305.56900	4.77	305.57377	0.10
5004	305.64200	-17.12	305.62488	0.07

Váhy měření jsou určeny jako reciproké hodnoty délek.

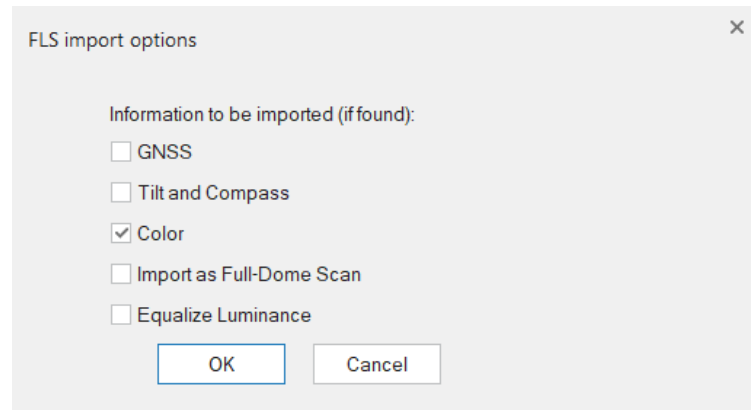
Obrázok 12: Ukážka z protokolu výškového vyrovnania

8.2 Spracovanie skenov

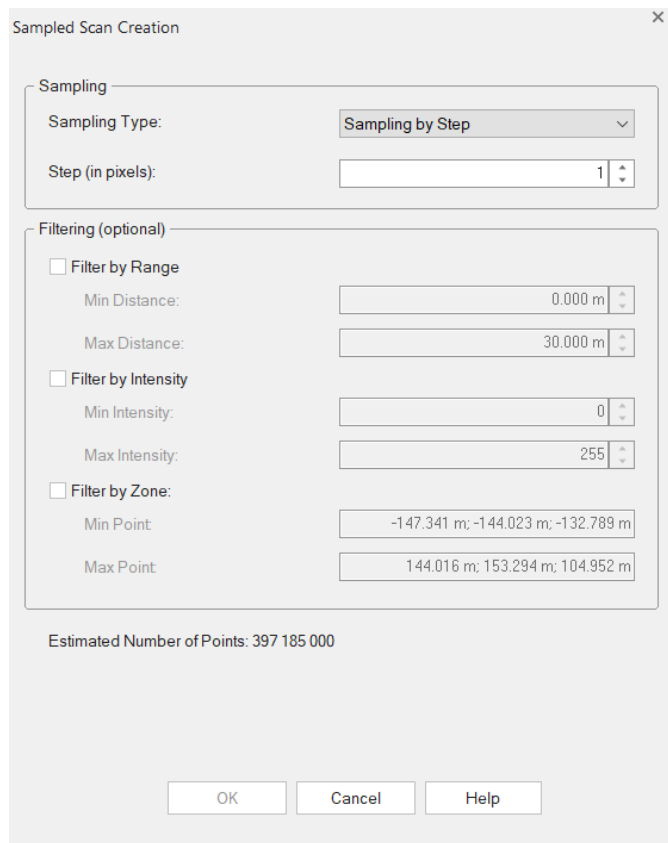
Na spracovanie skenov bol v tejto práci využitý program Trimble RealWorks. Pomocou tohto programu boli spojené jednotlivé mračná bodov získaných pomocou skeneru Faro Focus 3D X130. Z jednotlivých mračen bolo vytvorené jedno, ktoré ďalej v práci využívam ako referenčné mračno bodov pri testovaní fotogrametrických modelov.

Stručný pracovný postup:

Do projektu boli importované skeny, ktoré boli vo formáte .fls. Pri importe neboli použité informácie GNSS. Bolo použité nastavenie uvedené na Obrázok 13. Informácie GNSS neboli použité preto, aby sa zabránilo ovplyvneniu výsledkov. V ďalšom kroku po importe boli vytvorené komprimované skeny pomocou funkcie „Create Sampled Scans“. Pre tvorbu komprimovaných skenov bolo použité nastavenie uvedené na Obrázok 14. Krok bol nastavený na hodnotu 1 aby sa mračná bodov neriedili.

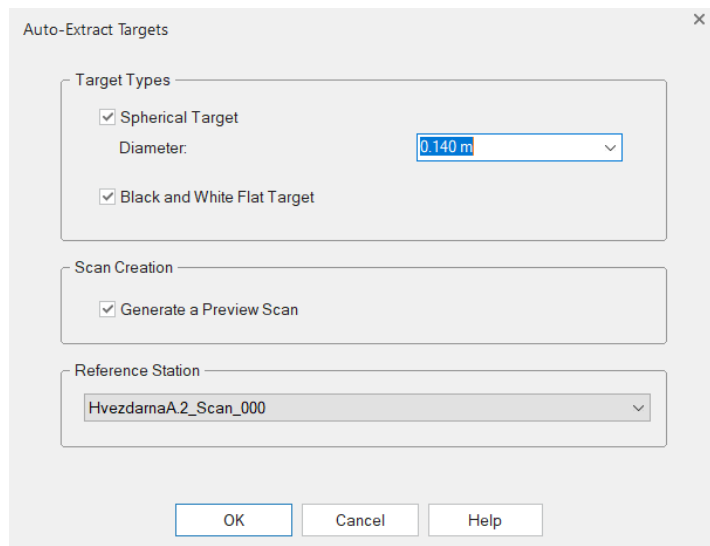


Obrázok 13: Nastavenie pri importe jednotlivých mračien



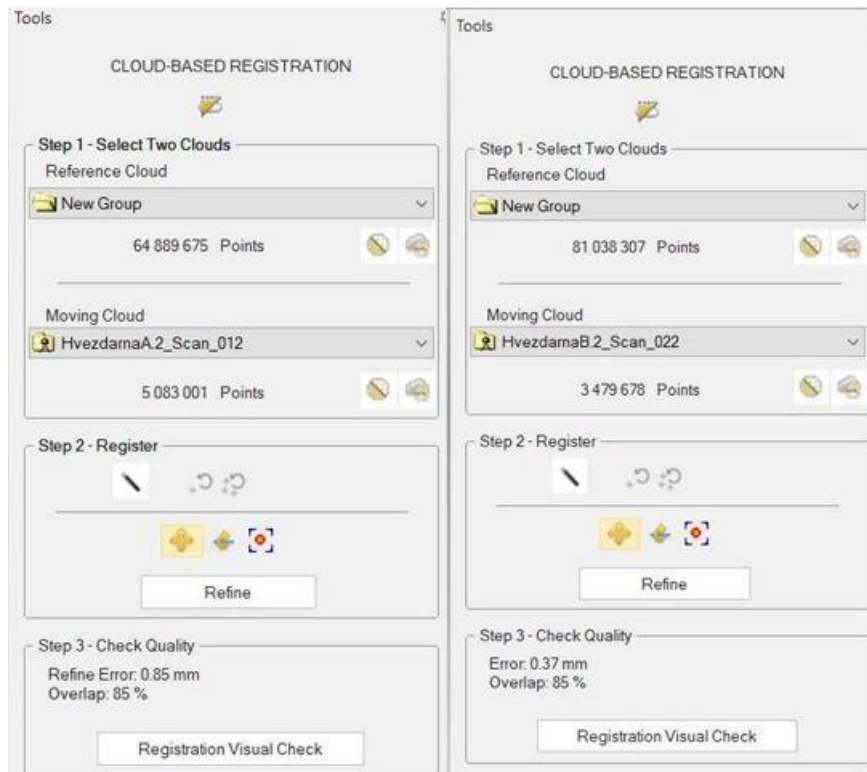
Obrázok 14: Nastavenie pri tvorbe komprimovaných skenov

Na registráciu jednotlivých skenov boli použité gule a terče, ktoré boli pri skenovaní rozmiestnené v okolí objektu. Na vyhľadanie týchto bodov bola použitá funkcia „Auto-Extract Targets“. Gule a terče boli na viacerých skenoch a po ich automatickom vyhľadaní táto funkcia takmer všetky skeny spojila do jedného. Pri spustení tejto funkcie bolo použité nastavenie ako na Obrázok 15.



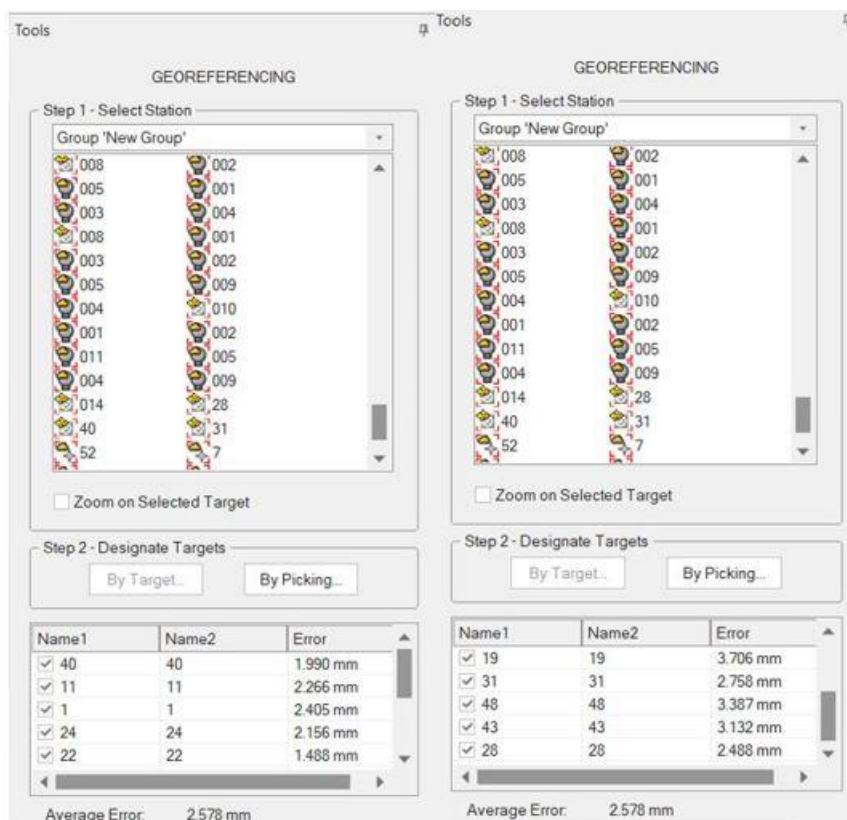
Obrázok 15: Nastavenie funkcie Auto-Extract Targets

Po automatizovanom vyhľadani terčov boli vybrané tie najvhodnejšie a to preto aby bola výsledná presnosť napojenia čo najlepšia. Táto funkcia však našla aj terče, ktoré v skutočnosti neboli terče. Jednalo sa o obrázky na vzdelávacích tabuliach v okolí hvezdárne. Tieto terče boli manuálne zmazané. Po dosiahnutí priaznivých odchýlok bola registrácia potvrdená a následne bol exportovaný protokol. Tejto automatickej registrácii sa podarilo spojiť všetky mračná bodov až na dve na ktorých nebol dostatočný počet terčov. Na napojenie týchto dvoch mračien bodov bolo nutné použiť funkciu „Cloud - Based Registration“. Čo sa týka kvality spojenia dosiahol som pri oboch metódach takmer rovnaké výsledky. Jediný rozdiel som si všimol vtom, že automatická registrácia je rýchlejšia a nevyžadovala žiadne manuálne natočenie mračien ako je to pri funkcii „Cloud - Based Registration“. Dosiahnuté presnosti a rozsah prekrytu pri manuálnom napojení zvyšných mračien bodov sú zobrazené na Obrázok 16.



Obrázok 16: Výsledky z CLOUD-BASED REGISTRATION

V poslednom kroku bolo výsledné mračno pripojené do súradnicového systému S-JTSK a výškového systému Bpv. Pomocou funkcie „Target Analyzer“ boli vytvorené v mračne bodov body, ktorým sa potom pomocou funkcie „Georeferencing“ priradili súradnice v S-JTSK a výškovom systéme Bpv. Na pripojenie mračna do S-JTSK a Bpv bolo použitých 10 vhodne rozmiestnených bodov. Priemerná chyba napojenia sa pohybuje na hodnote 2,58 mm. Odchýlky na jednotlivých vlicovacích bodoch sú viditeľné na Obrázok 17.



Obrázok 17: Výsledné odchýlky na vlicovacích bodoch

Kompletný protokol zo spracovania mračien bodov v programe Trimble RealWorks je priložený k práci ako príloha č.3.

8.3 Spracovanie fotografií

Na spracovanie získaných fotiek bol použitý program Agisoft Metshape Professional. V tomto programe bolo nutné spracovať fotky z troch rôznych prístrojov. Spracované boli fotky z fotoaparátu Canon, dronu Phantom a mobilného telefónu Xaomi, tieto prístroje sú bližšie špecifikované v kapitole 7.4.

Základné etapy spracovania:

- Úprava a výber fotografií
- Prekalibrácia
- Výpočet riedkeho mračna bodov
- Georeferencovanie
- Výpočet hustého mračna bodov
- Úprava mračna (čistenie, doplnenie..)

- Tvorba mesh modelu
- Úprava mesh modelu
- Tvorba textúr (tvorba masiek, výber vhodných fotografií..)

Tento postup bol použitý pri spracovaní fotiek zo všetkých troch zariadení.

8.3.1 Spracovanie fotografií z fotoaparátu Canon

Pre toto spracovanie boli určené prvky vnútornej a vonkajšej orientácie pomocou self-calibration. Bolo nutné vybrať vhodné a kvalitné fotografie na výpočet týchto prvkov.

Vypočítané prvky, ktoré boli použité neskôr pre ďalšie výpočty sú uvedené v Tabuľka 9.

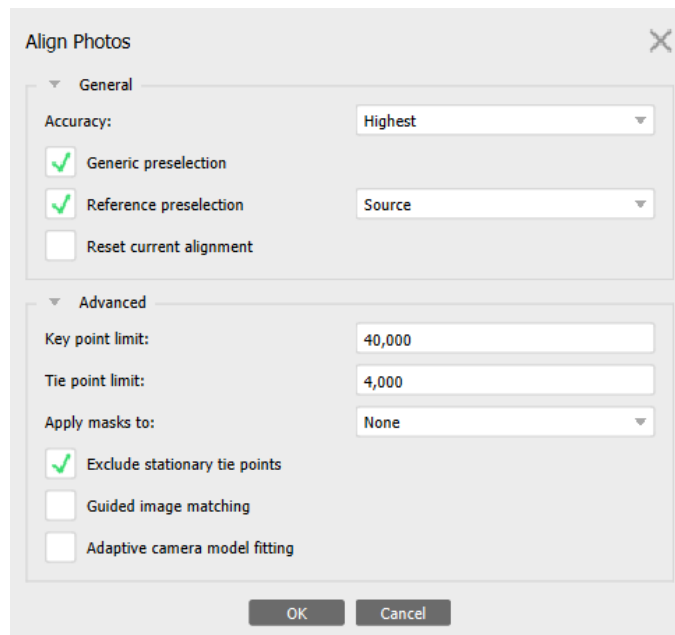
	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	P1	P2
F	4266.97	0.027	1.00	-0.01	0.19	-0.59	-0.05	0.12	0.17	0.01	0.24
Cx	-40.6924	0.038		1.00	-0.01	0.02	0.02	-0.06	0.06	0.94	-0.01
Cy	-35.4329	0.049			1.00	-0.06	0.01	-0.14	0.24	-0.01	0.95
B1	-1.09124	0.026				1.00	0.03	-0.15	0.09	-0.00	-0.10
B2	-0.138546	0.019					1.00	-0.02	0.02	0.06	-0.02
K1	-0.0903249	6.4e-06						1.00	-0.86	-0.06	-0.18
K2	0.0686091	9.1e-06							1.00	0.05	0.24
P1	0.000426353	1.9e-06								1.00	0.00
P2	-0.000677179	2.2e-06									1.00

Tabuľka 9: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (Canon)

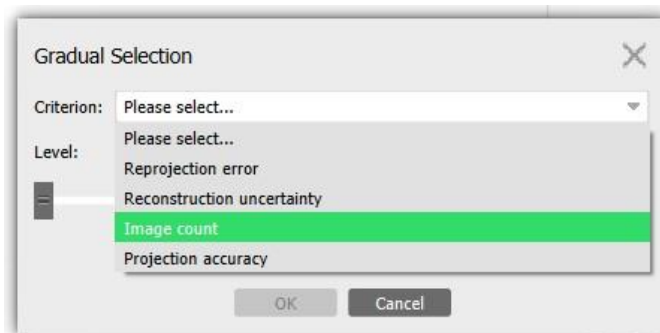
Pri fotografovaní bolo predpokladané GSD zhruba okolo 1mm/pix. Z kalibrácie nám vyšlo, že sme dosiahli 0,953mm/pix. Takže sa pohybujeme v predpokladaných hodnotách. Pre samotnú tvorbu modelu bolo však použitých viac fotiek. Do výpočtu boli zahrnuté aj fotky detailov. Z tohto výpočtu vyšla hodnota GSD 0,591mm/pix. Pri odhadovaní kvality fotografií pomocou funkcie „Estimate Image Quality“ sa kvalita jednotlivých fotografií pohybovala v intervale od 1 do 0,37 pričom tie s nižšou kvalitou boli práve fotografie detailov. Kvalita fotografií budovy, ktoré boli použité aj pri kalibrácii sa pohybujú v intervale od 1 do 0,8.

Pri výpočte riedkeho mračna bolo pri práci s fotografiami z fotoaparátu Canon použité nastavenie uvedené na Obrázok 18: Nastavenie pri výpočte riedkeho mračna. Pri výpočte boli skúšané rôzne druhy nastavení za účelom získania čo najpriaznivejších výsledkov. Pre odstránenie nevhodných bodov a za účelom zlepšenia reprojekčnej chyby bolo riedke mračno filtrované. Na to bola použitá funkcia „Gradual selection“. V tejto

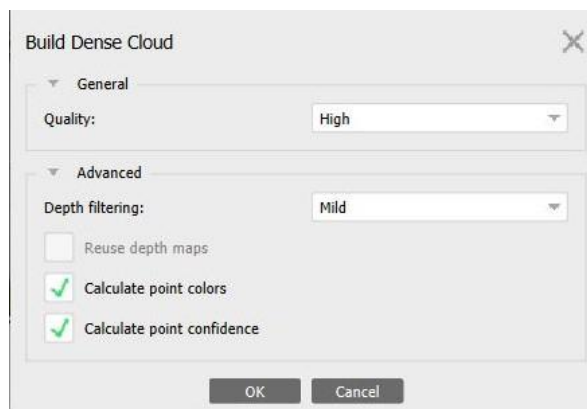
práci boli použité pri spracovaní fotiek z rôznych zariadení najmä filtrácie podľa „Projection accuracy“ a „Reprojection error“. Podľa „Projection accuracy“ bolo filtrované mračno vo viacerých krokoch až po hodnotu 5 a pri „Reprojection error“ sa obvykle filtrovalo po hodnotu v rozmedzí od 0,5 do 0,3. Po pregenerovaní riedkeho mračna bolo toto mračno filtrované podľa „Reconstruction uncertainty“ a tu sa nastavovala hodnota v rozmedzí 100 až 80. Jednotlivé možnosti filtrácie sú zobrazené na Obrázok 19.



Obrázok 18: Nastavenie pri výpočte riedkeho mračna



Obrázok 19: Ukážka možných druhov filtrácie



Obrázok 20: Nastavenie používané pri generovaní hustého mračna

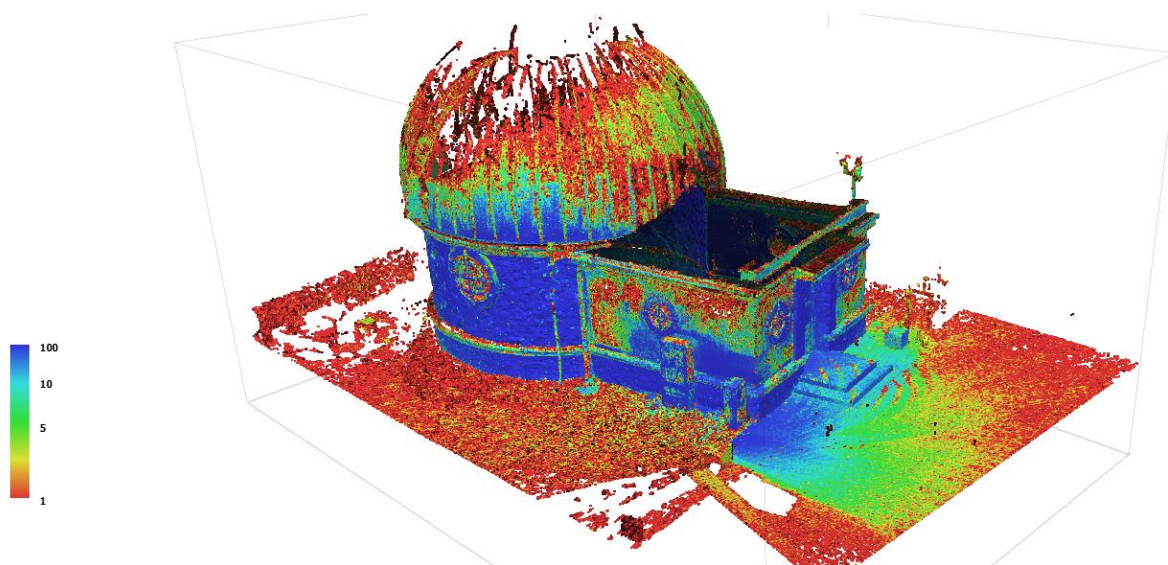
Pri tvorbe hustého mračna bodov pomocou funkcie „Build Dense Cloud“ bolo používané nastavenie uvedené na Obrázok 20. Jednotlivé diery na neočistenom hustom mračne bodov bolo nutné doplniť. Neočistené mračno bodov je zobrazené na Obrázok 21. Na opravy strechy bolo použité husté mračno bodov získané spracovaním fotiek z dronu vid' Obrázok 22. Pred doplnením hustého mračna bodov bolo možné časť šumu odstrániť pomocou filtrovania podľa konfidencie vid' Obrázok 23 a Obrázok 24.



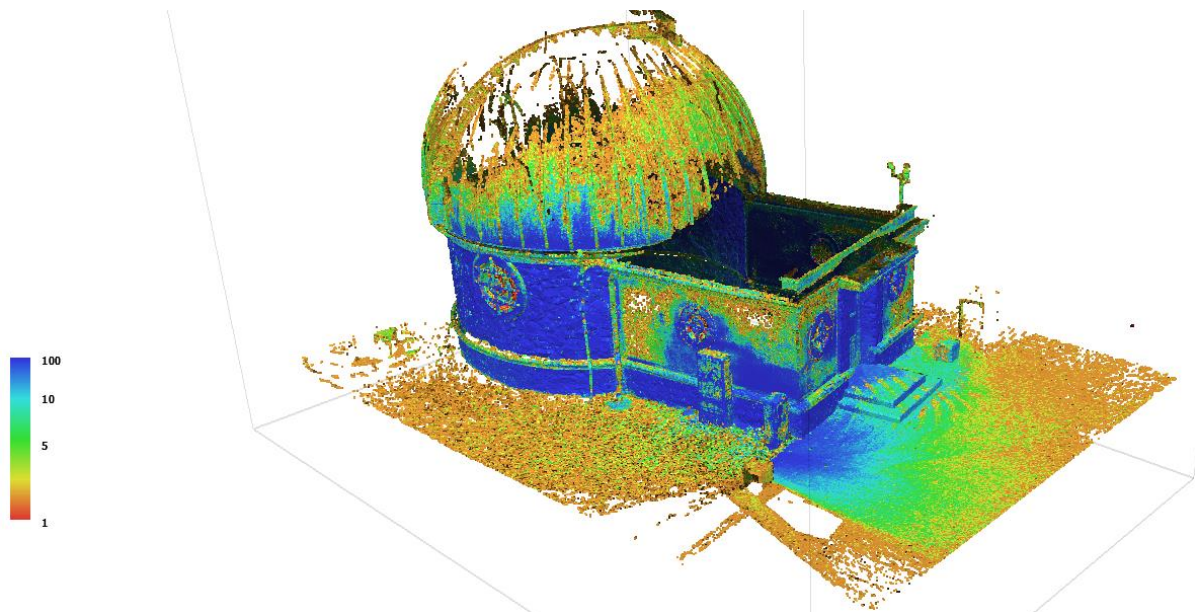
Obrázok 21: Husté mračno s dierami a neočistené



Obrázok 22: Husté mračno doplnené hustým mračnom z dronu



Obrázok 23: Mračno pred filtráciou pomocou konfidencie



Obrázok 24: Mračno po filtrácii pomocou konfidencie

Časovo náročným bolo najmä ručné začisťovanie. Najviac času zabralo vyčistenie okien a najmä mreží, ktoré sú na každom jednom okne. Neočistené a očistené okno je zobrazené na Obrázok 25 a Obrázok 26.

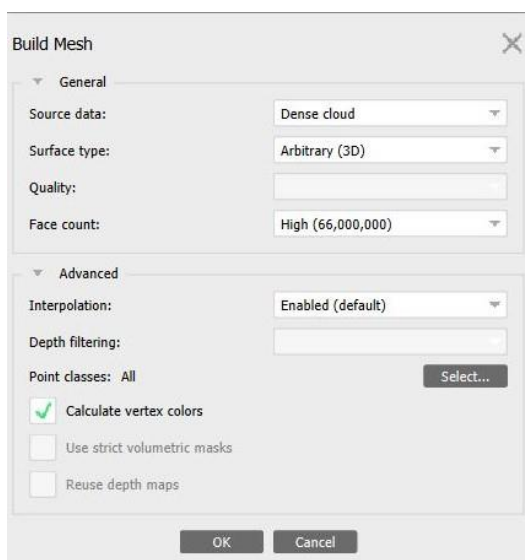


Obrázok 25: Okno pred ručným očistením



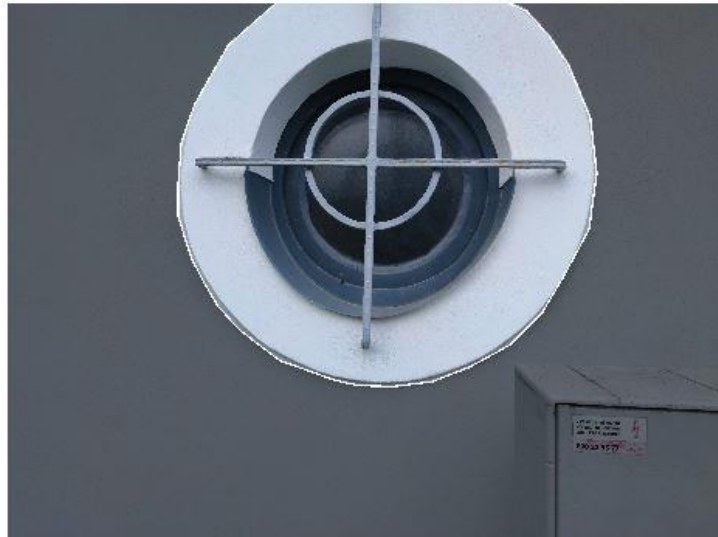
Obrázok 26: Očistené okno

Na opravy hustého mračna bodov a popríklad aj mesh modelu boli využité pri malých opravách funkcie programu Agisoft Metashape Professional a v prípade veľkých opráv bol použitý softvér Trimble RealWorks a Microstation V8. Pri tvorbe mesh modelu boli odskúšané taktiež rôzne nastavenia. Pre túto skupinu fotiek sa mi osvedčilo nastavenie zobrazené na Obrázok 27.



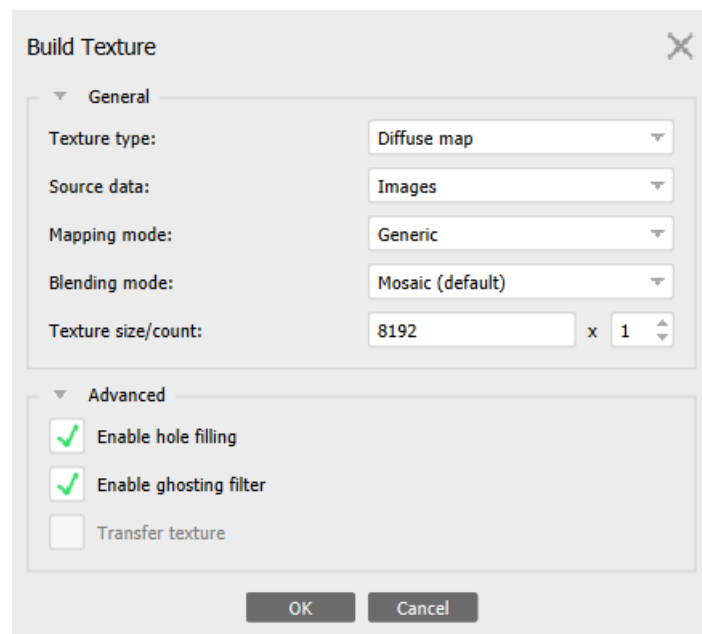
Obrázok 27: Nastavenie použité pri tvorbe mesh modelu

Po vytvorení mesh modelu boli ďalej vytvorené textúry pomocou vybraných fotiek. Napriek snahe upraviť farebnosť jednotlivých fotografií neboli jednotlivé skupiny fotografií úplne rovnaké a muselo sa pristúpiť k tvorbe masiek. Príčinou bolo to, že niektoré detaily boli dofotené v iný deň a pri iných svetelných podmienkach. Ukážka zamaskovaného okna je na Obrázok 28.



Obrázok 28: Okno po zamaskovaní

Pri tvorbe textúr bolo použité nastavenie uvedené na Obrázok 29.



Obrázok 29: Nastavenie používané pri tvorbe textúr

8.3.2 Spracovanie fotografií z mobilného telefónu Xiaomi

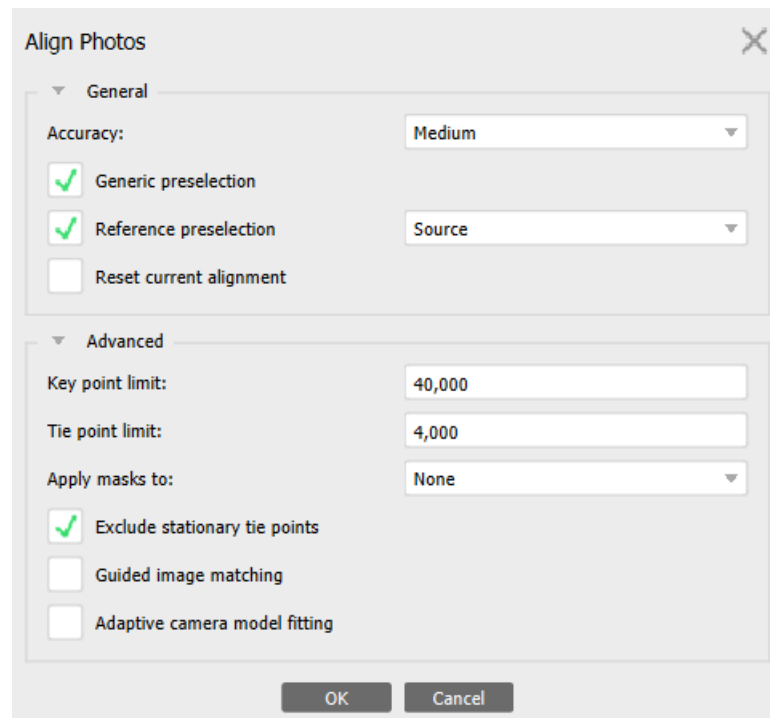
Pri spracovaní fotografií z mobilného telefónu sa viac menej postupovalo rovnako ako pri fotografiách z fotoaparátu Canon. Rozdiel bol iba v použitých nastaveniach. Pred podrobným spracovaním boli fotografie roztriedené a bol spravený výber fotografií na ktorých boli určené prvky vnútornej a vonkajšej orientácie v self-calibration. V tomto prípade bolo použité pri kalibrácii nastavenie vid' Obrázok 18. Určené prvky boli použité pri ďalších výpočtoch. Prvky získané zo self-calibration sú uvedené v Tabuľka 10: Kalibračné koeficienty a korelačná matica

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	P1	P2
F	8460.02	0.82	1.00	-0.02	0.05	0.12	0.01	-0.05	-0.02
Cx	-37.8159	2.2		1.00	0.08	0.01	-0.01	0.97	0.06
Cy	8.03221	1.6			1.00	0.06	-0.11	0.08	0.97
K1	0.080605	0.00018				1.00	-0.91	0.01	0.01
K2	-0.082508	0.00032					1.00	-0.00	-0.08
P1	0.000448088	7.3e-05						1.00	0.06
P2	5.31621e-05	5.5e-05							1.00

Tabuľka 10: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (Xiaomi)

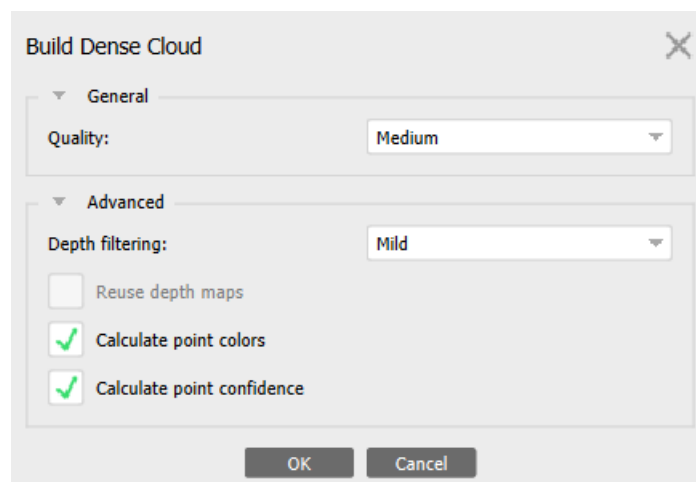
Predpokladaná hodnota GSD sa pohybuje okolo 0,5mm/pix. Z protokolu kalibrácie nám vyšla hodnota 0,549mm/pix a z výpočtu, ktorý zahŕňal aj fotky detailov fotených z oveľa menšej vzdialenosti vyšla hodnota GSD 0,179mm/pix. Takže sme sa pohybovali v okolí predpokladanej hodnoty, očividne program Agisoft Metashape Professional udáva v protokole asi vždy tú najmenšiu hodnotu GSD.

Kvalita fotografií sa v tomto prípade pohybovala zhruba v rozsahu od 0,8 do 0,4. V hodnotách okolo 0,4 sa pohybovali najme fotky detailov. Výpočet riedkeho mračna bodov bol v tomto prípade nastavený ako na Obrázok 30. Filtrovanie riedkeho aj hustého mračna bodov bolo takmer totožné ako pri práci s fotkami z fotoaparátu Canon viac v kapitole 8.3.1.



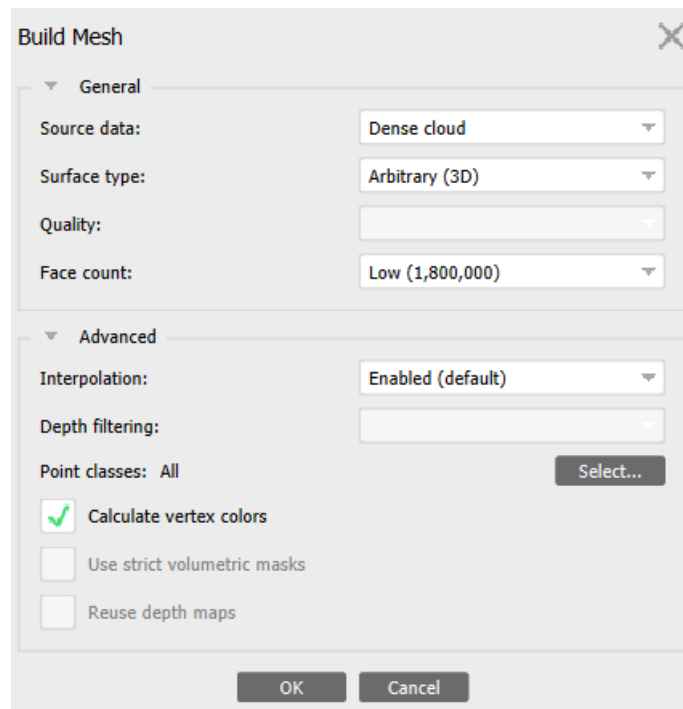
Obrázok 30: Výpočet riedkeho mračna pri použití mobilného telefónu

Výpočet hustého mračna bodov bol nastavený pri použití fotografií z mobilného telefónu ako na Obrázok 31.



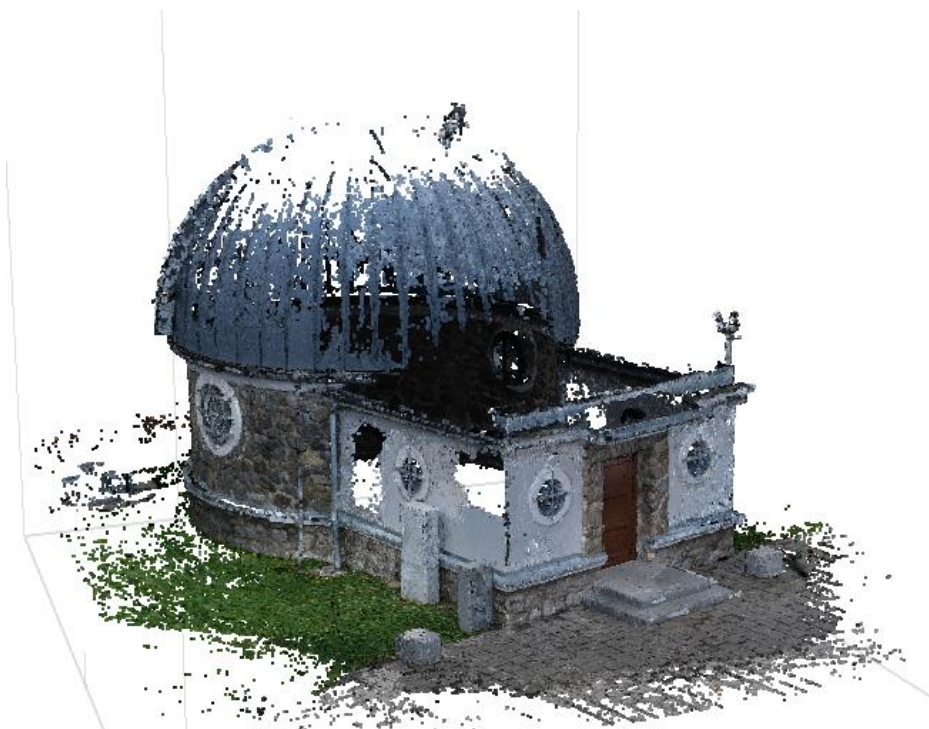
Obrázok 31: Výpočet hustého mračna pri použití mobilného telefónu

Pri výpočte mesh modelu bolo taktiež použité iné nastavenie ako pri práci s fotkami z fotoaparátu Canon. V tomto prípade bolo použité nastavenie zobrazené na Obrázok 32.



Obrázok 32: Nastavenie pri tvorbe mesh modelu z fotiek z mobilného telefónu

Pre jednotlivé opravy či už hustého mračna bodov alebo mesh modelu boli použité rovnaké softvéry ako pri opravách mesh modelu a hustého mračna bodov, ktoré bolo z fotiek fotoaparátu Canon. Neupravené a upravené mračno bodov je viditeľné na Obrázok 33 a Obrázok 34.



Obrázok 33: Husté mračno z mobilného telefónu pred úpravou



Obrázok 34: Husté mračno z mobilného telefónu po úprave

8.3.3 Spracovanie fotografií z dronu

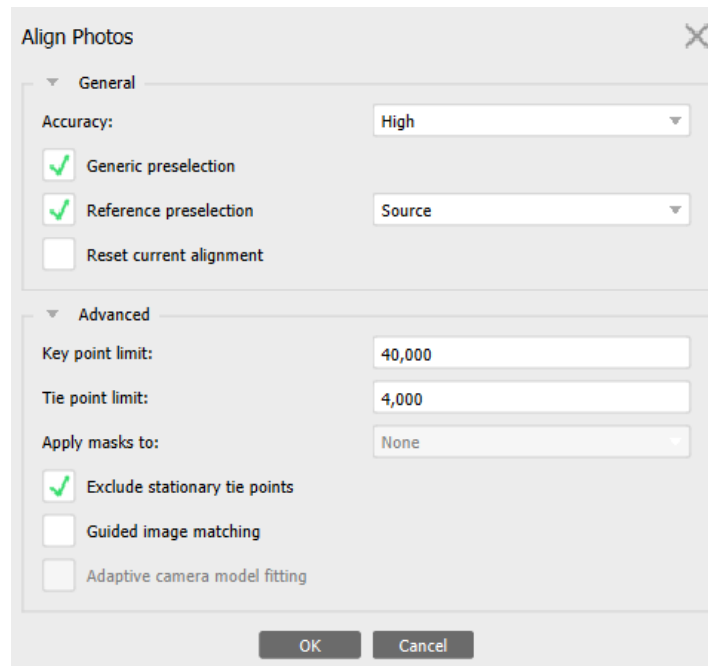
Spracovanie fotografií získaných pomocou dronu bolo z veľkej časti podobné ako spracovanie fotografií z fotoaparátu. Pred samotným spracovaním bola taktiež urobená self-calibration a určili sa tak potrebné prvky a koeficienty uvedené v Tabuľka 11.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	P1	P2
F	2333.38	0.19	1.00	0.09	-0.46	-0.31	0.07	0.19	0.10	0.04	-0.49
Cx	16.387	0.24		1.00	0.02	-0.07	-0.10	0.07	-0.01	0.88	0.00
Cy	-27.4712	0.31			1.00	-0.13	-0.08	-0.11	0.05	0.04	0.79
B1	-0.663289	0.092				1.00	-0.03	-0.17	0.05	-0.07	0.33
B2	-0.00943921	0.078					1.00	-0.03	0.06	-0.38	-0.11
K1	-0.0118443	9.9e-05						1.00	-0.79	0.07	-0.32
K2	0.017764	7.3e-05							1.00	-0.05	0.15
P1	0.00035993	3.4e-05								1.00	0.03
P2	-0.000958453	3.7e-05									1.00

Tabuľka 11: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (dron)

Predpokladaná hodnota GSD 3mm/pix. Z výpočtu v programe Agisoft Metashape Professional nám vyšla hodnota 3,48mm/pix. Opäť sa pohybujeme v okolí predpokladanej hodnoty. Kvalita fotografií sa pohybuje v intervale od 0,9 do 0,7.

Fotografie dronu boli použité hlavne kvôli úplnosti modelov, pretože zo zeme nebolo možné strechu dostatočne nafotiť. Pri výpočte riedkeho mračna bolo použité nastavenie zobrazené na Obrázok 35.



Obrázok 35: Nastavenie pri výpočte riedkeho mračna

Filtrovanie či už hustého alebo riedkeho mračna bolo urobené tak ako pri spracovaní fotografií z fotoaparátu viac v kapitole 8.3.1. Pri výpočte hustého mračna bodov bolo použité nastavenie zobrazené na Obrázok 20: Nastavenie používané pri generovaní hustého mračna. Hlavným účelom použitia dronu bolo doplnenie hustého mračna bodov z fotoaparátu a z mobilného telefónu. Vždy bola doplnená kvôli úplnosti modelu strecha. Model z hustého mračna bodov, ktoré vzniklo iba z fotiek z dronu, bol vytvorený iba pre zaujímavosť. Mračno bodov z týchto fotiek bolo možné použiť iba na doplnenie strechy zvyšok bol príliš deravý, pretože fotenie bolo cieleňé práve na strechu vid' Obrázok 36.



Obrázok 36: Husté mračno z fotiek z dronu

Pre zaujímavosť sme však model z fotiek dronu vytvorili, bol však deformovaný a to hlavne kvôli dieram v hustom mračne bodov vid' Obrázok 37. Ďalšie spracovanie mračna bodov z dronu sa robilo v rámci spracovania fotiek z fotoaparátu a mobilného telefónu.



Obrázok 37: Model z hustého mračna vygenerovaného z fotografií dronu

8.4 Zhodnotenie práce s rôznymi typmi zariadení

Na nafotenie objektu bola použitá digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II a mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro. Pri práci s týmito zariadeniami som zaznamenal, že každé jedno zariadenie má svoje výhody aj nevýhody. Výhodou mobilného telefónu bola

jeho hmotnosť, rozmer a rýchlosť zberu dát. Rozmer mobilného fotoaparátu umožňuje lepšiu dostupnosť do stiesnených miest. Ako nevýhodu mobilu vidím to, že v porovnaní s fotoaparátom bola dátová veľkosť jednotlivých fotografií väčšia. V tomto prípade, to znamená to, že je nutné mať väčšiu pamäťovú kartu v mobilnom telefóne a taktiež dostatok pamäti v počítači. Pri spracovaní fotografií bola výhodou fotoaparátu kratšia doba výpočtov v programe Agisoft Metashape Professional. Pri práci s fotografiami sa jednoduchšie pracovalo s fotografiami z fotoaparátu Canon, pretože na rozdiel od mobilného telefónu bolo možné zafixovať všetky prvky vnútornej orientácie. To sa pri mobilnom telefóne nedalo, pretože pri fotení nebolo možné zaostriť na nekonečno a muselo byť použité automatické zaostrovanie. Pri fotení s dronom bol automaticky zaostrý na nekonečno a preto pri fixovaní prvkov z kalibrácie nebol žiadny problém. Celkovo môžem povedať, že pri tvorbe modelov mi viac času zabralo vytvoriť mesh model z fotografií získaných z mobilného telefónu. Ako časovo najefektívnejšie mi pripadá na tvorbu mesh modelov kombinovať laserové skenovanie s fotogrametriou, ale pri použití zrkadlovky. Z ekonomického hľadiska by bolo asi lacnejšie použiť kvalitný mobilný telefón. Osobne si myslím, že záleží či chce niekto tvoriť modely pre zábavu alebo chce vytvárať profesionálne modely. V takom prípade by som osobne asi investoval do kvalitnejšieho vybavenia. V konečnom dôsledku pri vizuálnom porovnaní mojich fotogrametrických modelov nie je na prvý pohľad vidieť v modeloch extrémne rozdiely. Model z fotoaparátu Canon je zobrazený na Obrázok 38 a Obrázok 39 a model z mobilného telefónu je zobrazený na Obrázok 40 a Obrázok 41. Pri textúrach modelov bol menší problém pri ich nastavovaní a pri výbere vhodných fotografií u mobilného telefónu. V tomto prípade mal mobilný telefón tú výhodu, že všetky fotografie či už detailov alebo celej stavby boli nafotené v jeden deň. Nebol teda extrémny rozdiel vo farebnosti týchto fotiek.



Obrázok 38: Textúrovaný model z fotiek z fotoaparátu pohľad sprava



Obrázok 39: Textúrovaný model z fotiek z fotoaparátu pohľad zľava



Obrázok 40: Textúrovaný model z fotiek z mobilu pohľad sprava



Obrázok 41: Textúrovaný model z fotiek z mobilu pohľad zľava

9 Testovanie modelov

V tejto diplomovej práci boli vytvorené dva modely, ktoré boli podrobené testovaniu. Jednalo sa o fotogrametrické modely, na ktorých vytvorenie boli použité fotografie získané pomocou mobilného telefónu, dronu a digitálnej zrkadlovky. Cieľom tohto testovania bolo hlavne si overiť správnosť geometrie a odhaliť prípadné deformácie modelov.

9.1 Testovanie geometrie modelov pomocou kontrolných bodov

V tejto etape sa porovnávali súradnice kontrolných bodov získaných terestrickým meraním so súradnicami odmeranými priamo na textúrovanom modeli v programe Agisoft Metashape Professional. Pre testovanie bolo použitých na oboch modeloch 27 bodov. Jednotlivé výpočty a spôsob hodnotenia odchýlok bližšie popisuje kapitola 6. Pri posudzovaní či sa u odchýlok jednalo o vybočujúcu, odľahlú alebo hodnotu, ktorá bola v poriadku som sa riadil normou ISO 5725-2. Model, ktorý vznikol kombináciou hustého mračna získaného z fotoaparátu Canon a z dronu Phantom je ďalej označovaný iba ako model Canon. Model vytvorený pomocou mobilného telefónu Xiaomi a dronu Phantom je ďalej označovaný ako model Xiaomi. Pri testovaní modelu Canon boli zistené dve odľahlé a jedno vybočujúce meranie a u modelu Xiaomi bolo odhalených šesť odľahlých a jedna vybočujúca hodnota. Percentuálne zastúpenie odľahlých a vybočujúcich meraní je uvedené pre Canon v Tabuľka 12 a pre Xiaomi v Tabuľka 13.

Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Canon				
Počet kontrolných bodov:	27			
Parameter	X	Y	Z	P
Vybočujúce merania [%]	3,7	0	0	0
Odľahlé merania [%]	0	0	7,4	0

Tabuľka 12: Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Canon

Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Xiaomi				
Počet kontrolných bodov:	27			
Parameter	X	Y	Z	P
Vybočujúce merania [%]	0	0	0	3,7
Odľahlé merania [%]	3,7	7,4	7,4	3,7

Tabuľka 13: Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Xiaomi

Smerodajné odchýlky dosiahnuté u jednotlivých súradníc a v polohe sú uvedené v Tabuľka 14.

Dosiahnuté smerodajné odchýlky				
Parametre:	X	Y	Z	P
Smerodajná odchýlka [m] Canon	0,0014	0,0013	0,0059	0,0019
Smerodajná odchýlka [m] Xiaomi	0,0071	0,0065	0,0046	0,0096

Tabuľka 14: Dosiahnuté smerodajné odchýlky

Po posúdení odchýlok som pomocou F – testu na základe smerodajných odchýlok zisťoval, ktorý zo súborov meraní je presnejší. Výsledok tohto testovania je uvedený v Tabuľka 15.

F - testy pri analýze súradnicových a polohových rozdielov na kontrolných bodoch				
F - test [Canon+Phantom vs. Xiaomi+Phantom]				
Parametre:	X	Y	Z	P
Smerodajná odchýlka [m] Canon	0,0014	0,0013	0,0059	0,0019
Počet kontrolných bodov [m] Canon	27	27	27	27
Smerodajná odchýlka [m] Xiaomi	0,0071	0,0065	0,0046	0,0096
Počet kontrolných bodov [m] Xiaomi	27	27	27	27
Kritické hodnoty F _k	2,554	2,554	2,554	2,554
Hodnota testovacieho kritéria F	26,70148312	24,72511	1,679625	25,7620135
Vyhodnotenie F- testu :	Canon	Canon	Rovnako	Canon

Tabuľka 15: F - testy pri analýze súradnicových a polohových rozdielov

Z výsledkov vyplýva, že vo výške sú tieto dva súbory rovnako presné a v súradniciach X a Y lepšie obstál súbor meraní získaný pomocou digitálnej zrkadlovky Canon. V polohe je presnejší model Canon.

9.2 Testovanie geometrie modelov pomocou referenčného mračna

V tejto etape testovania boli porovnávané mesh modeli s referenčným mračnom bodov. Na toto porovnanie bol použitý program CloudCompare. Z tohto programu bol exportovaný histogram.csv a na ďalšiu analýzu bol použitý naprogramovaný skript v programe Matlab. Pomocou tohto skriptu bolo určené percentuálne zastúpenie odľahlých a vybočujúcich meraní a taktiež celková stredná chyba. Tieto hodnoty sú zobrazené v Tabuľka 16 a Tabuľka 17. Smerodajné odchýlky získané v programe Matlab som podrobil F – testu a jeho výsledky sú uvedené v Tabuľka 18. V tomto teste si lepšie viedol model získaný pomocou fotoaparátu Canon aj keď ten rozdiel je veľmi malý.

Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Canon	
Celkový počet spracovaných vzdialeností	60666986
Smerodajná odchýlka [m]	0,0091
Počet vybočujúcich hodnôt	990755
Percentuálny počet vybočujúcich hodnôt	1,63
Počet odľahlých hodnôt	1553412
Percentuálny počet odľahlých hodnôt	2,56

Tabuľka 16: Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Canon

Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Xiaomi	
Celkový počet spracovaných vzdialeností	60666986
Smerodajná odchýlka [m]	0,0121
Počet vybočujúcich hodnôt	829028
Percentuálny počet vybočujúcich hodnôt	1,37
Počet odľahlých hodnôt	1607190
Percentuálny počet odľahlých hodnôt	2,65

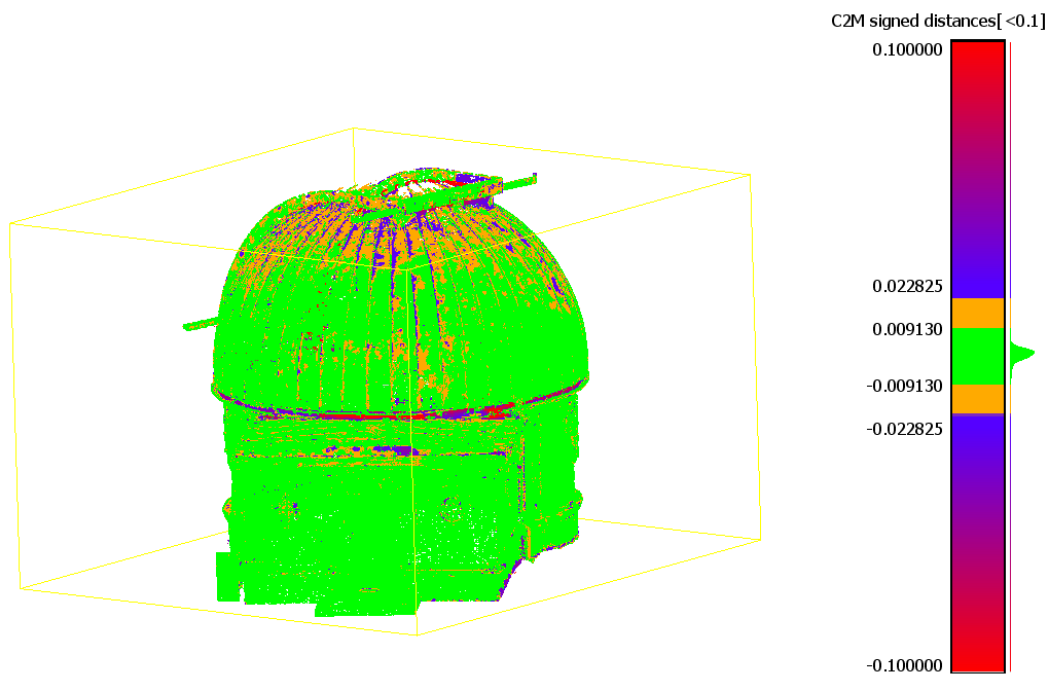
Tabuľka 17: Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Xiaomi

F - test pri analýze vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna	
Celkový počet spracovaných vzdialeností (Canon)	60666986
Smerodajná odchýlka [m] (Canon)	0,0091
Celkový počet spracovaných vzdialeností (Xiaomi)	60666986
Smerodajná odchýlka [m] (Xiaomi)	0,0121
Kritické hodnoty F_k	1,000597528
Hodnota testovacieho kritéria F	1,761995594
Vyhodnotenie F - testu	Canon

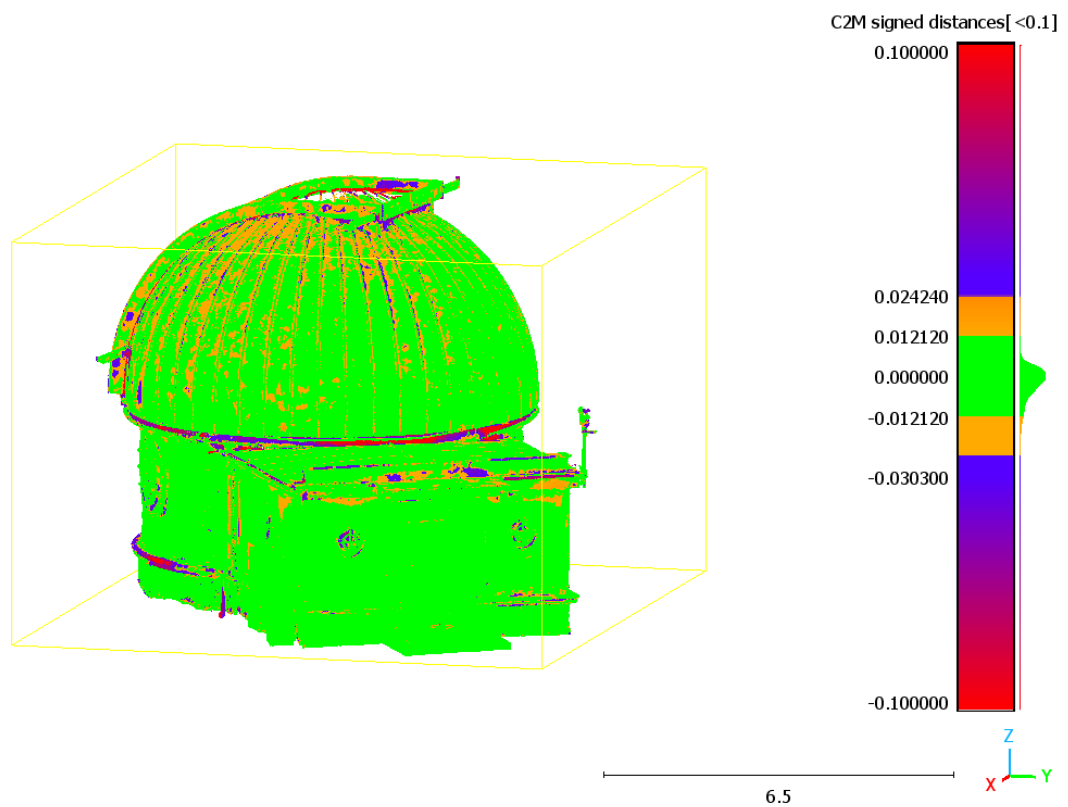
Tabuľka 18: F - test pri analýze vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna

Z výsledkov testovania vyplýva, že presnosť geometrie obidvoch modelov je na približne rovnakej úrovni.

Ukážky z programu CloudCompare sú zobrazené pre Canon na Obrázok 42 a pre Xiaomi na Obrázok 43. Z ukážok je vidno, že miesta výskytu nejakých chýb a deformácií sú takmer totožne, až na určité lokálne deformácie, ktoré má každý model iné. Mám zato, že som v tejto práci preukázal, že čo sa týka geometrie modelov je možné získať výsledky takmer rovnakej kvality pri použití kvalitného mobilného telefónu tak aj pri použití digitálnej zrkadlovky. Celé testovanie je súčasťou tejto práce ako príloha.



Obrázok 42: Farebné znázornenie chýb a deformácií Canon



Obrázok 43: Farebné znázornenie chýb a deformácií Xiaomi

10 Záver

V tejto diplomovej práci som sa zaoberal tvorbou georeferencovaných a textúrovaných 3D modelov. Celkovo boli vytvorené štyri modely dva boli čisto fotogrametrické a dva boli vytvorené s využitím referenčného mračna bodov. Modely, ktoré vznikli s použitím referenčného mračna bodov boli vytvorené viac menej ako pokus, či by táto možnosť nebola v praxi efektívnejšia.

Na vytvorenie fotogrametrických modelov boli použité fotografie, na ktorých obstaranie sa využili tri rôzne zariadenia. Na nafotenie bola použitá digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II, mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro a dron DJI Phantom 3 Advanced. Fotogrametrický model, ktorý vznikol s využitím digitálnej zrkadlovky Canon a dronu Phantom je ďalej označovaný iba ako model Canon a model, ktorý vznikol s využitím mobilného telefónu Xiaomi a dronu Phantom je ďalej uvádzaný ako model Xiaomi. Na spracovanie fotografií bol využitý program Agisoft Metashape Professional a pre prácu s referenčným mračnom bodov bol použitý program Trimble RealWorks.

Práca obsahuje testovanie fotogrametrických modelov, ktoré bolo zamerané na kontrolu geometrie modelov. Fotogrametrické modely boli testované dvomi spôsobmi. V prvej etape boli modely testované pomocou kontrolných bodov a v druhej etape boli testované s využitím referenčného mračna bodov. Pri testovaní pomocou kontrolných bodov boli u modelu Canon, zistené dve odľahlé hodnoty pri súradnici Z a jedna vybočujúca hodnota pri súradnici X. U modelu Xiaomi bola pri súradnici X odhalená jedna odľahlá hodnota, pri súradnici Y a Z boli pri každej odhalené dve odľahlé hodnoty a v polohe bola odhalená jedna odľahlá a jedna vybočujúca hodnota. Celkovo bolo pre každý model použitých 27 kontrolných bodov. Ďalej boli jednotlivé smerodajné odchýlky posudzované pomocou F – testu. S využitím tohto testu som sa snažil určiť, ktorý zo súborov meraní je presnejší. Celkovo v tomto teste obstála lepšie digitálna zrkadlovka Canon. Pri porovnaní smerodajných odchýlok si pri súradniciach X,Y a pri polohe viedla lepšie práve digitálna zrkadlovka, ale u súradnice Z to vyšlo nerozhodne. Pri druhom testovaní sa porovnávali textúrované mesh modely s referenčným mračnom v programe CloudCompare. Z vizuálneho hľadiska sa na fotogrametrických modeloch nachádza minimálne množstvo malých deformácií a to aj výpočtom potvrdil program CloudCompare. Z tohto programu bol exportovaný histogram, ktorý bol ďalej spracovaný

pomocou skriptu v programe Matlab. Celkovo bolo na toto testovanie použitých 60 666 986 bodov. Pri testovaní mesh modelu Canon bolo zistené, že z celkového počtu bodov je 1,6% vybočujúcich a 2,6% odľahlých hodnôt. U modelu Xiaomi to vyšlo veľmi podobne a to tak, že z celkového počtu je 1,4% vybočujúcich a 2,7% odľahlých hodnôt. Taktiež boli posudzované smerodajné odchýlky týchto dvoch súborov pomocou F-testu a opäť tesne vyhrala digitálna zrkadlovka Canon.

Na základe osobnej skúsenosti musím povedať, že som spočiatku mobilnému telefónu moc neveril, ale nakoniec som bol z výsledkov sám prekvapený. Na druhej strane som menej času strávil pri spracovaní fotografií z digitálnej zrkadlovky a aj keď je z testovania jasné, že geometria oboch modelov sa od seba nijak extrémne nelíši, aj tak by som si pre ďalšie projekty vybral práve digitálnu zrkadlovku. Digitálnu zrkadlovku by som si zvolil najme preto, že pri fotení umožňovala zaostrenie na nekonečno a to zjednodušilo spracovanie fotografií. Fotografie z digitálnej zrkadlovky neboli tak dátovo objemné ako z mobilného telefónu, a tým pádom softvérové spracovanie prebiehalo rýchlejšie.

Táto diplomová práca ďalej obsahuje rešerš o fotogrametrických programoch, na ktorej konci je uvedené krátke zhrnutie niektorých vlastností. Pri tvorbe modelov v programe Agisoft Metashape Professional som si potvrdil kvalitu tohto programu. Osobne by som prijal, ak by do tohto programu tvorcovia pridali viac možností ako upravovať husté mračno bodov a mesh modely.

Záverečným výsledkom tejto práce je 3D textúrovaný a georeferencovaný mesh model. Hvezdáreň môže ďalej tento 3D model použiť, ako reklamu na svojich webových stránkach a poprípade by po vytlačení na 3D tlačiarňi mohli predávať jeho miniatúry v rámci propagačných predmetov. Tento model je publikovaný na stránkach sketchfab.com. Pre publikáciu sme však museli textúrovaný model trochu upraviť, pretože tento súbor bol príliš veľký na publikáciu na tejto stránke. Model je publikovaný aj na stránkach Ústavu geodézie Fakulty stavebnej Vysokého učení technického v Brne. Presný odkaz na tento model je <https://geodesy.fce.vutbr.cz/hvezdarna-brno-sz/>.

11 Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Severozápadné observatórium	11
Obrázok 2: Skener Faro Focus 3D X130 na ministatíve	30
Obrázok 3: Skener Faro Focus 3D X130 na výsuvnom statíve	31
Obrázok 4: Totálna stanica Trimble S8 HP	32
Obrázok 5: Mobilný telefón Xiaomi Mi 10T Pro a digitálna zrkadlovka Canon EOS 6D Mark II	33
Obrázok 6: Dron DJI Phantom 3 Advanced	34
Obrázok 7: GNSS aparatura Trimble R8s	35
Obrázok 8: Špecifikácia GNSS aparatury Trimble R8S (Trimble R8s GNSS prijímač, 2015)	36
Obrázok 9: Minihranol.....	36
Obrázok 10: Grafická ukážka siete z programu Groma	37
Obrázok 11: Ukážka stredných chýb z polohového vyrovnania	38
Obrázok 12: Ukážka z protokolu výškového vyrovnania.....	38
Obrázok 13: Nastavenie pri importe jednotlivých mračien	39
Obrázok 14: Nastavenie pri tvorbe komprimovaných skenov.....	40
Obrázok 15: Nastavenie funkcie Auto-Extract Targets	41
Obrázok 16: Výsledky z CLOUD-BASED REGISTRATION	42
Obrázok 17: Výsledné odchýlky na vlicovacích bodoch.....	43
Obrázok 18: Nastavenie pri výpočte riedkeho mračna	45
Obrázok 19: Ukážka možných druhov filtrácie	45
Obrázok 20: Nastavenie používané pri generovaní hustého mračna	46
Obrázok 21: Husté mračno s dierami a neočistené.....	46
Obrázok 22: Husté mračno doplnené hustým mračnom z dronu.....	47
Obrázok 23: Mračno pred filtráciou pomocou konfidencie.....	47
Obrázok 24: Mračno po filtrácii pomocou konfidencie.....	48
Obrázok 25: Okno pred ručným očistením.....	48
Obrázok 26: Očistené okno.....	49
Obrázok 27: Nastavenie použité pri tvorbe mesh modelu	49
Obrázok 28: Okno po zamaskovaní.....	50

Obrázok 29: Nastavenie používané pri tvorbe textúr	50
Obrázok 30: Výpočet riedkeho mračna pri použití mobilného telefónu	52
Obrázok 31: Výpočet hustého mračna pri použití mobilného telefónu	52
Obrázok 32: Nastavenie pri tvorbe mesh modelu z fotiek z mobilného telefónu.....	53
Obrázok 33: Husté mračno z mobilného telefónu pred úpravou	53
Obrázok 34: Husté mračno z mobilného telefónu po úprave	54
Obrázok 35: Nastavenie pri výpočte riedkeho mračna	55
Obrázok 36: Husté mračno z fotiek z dronu	56
Obrázok 37: Model z hustého mračna vygenerovaného z fotografií dronu	56
Obrázok 38: Textúrovaný model z fotiek z fotoaparátu pohľad sprava	58
Obrázok 39: Textúrovaný model z fotiek z fotoaparátu pohľad zľava.....	58
Obrázok 40: Textúrovaný model z fotiek z mobilu pohľad sprava	59
Obrázok 41: Textúrovaný model z fotiek z mobilu pohľad zľava.....	59
Obrázok 42: Farebné znázornenie chýb a deformácií Canon	63
Obrázok 43: Farebné znázornenie chýb a deformácií Xiaomi	63

12 Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Veľkosti niektorých fotografických snímačov (Veľkosť snímače, 2001-2023)	18
Tabuľka 2: Veľkosti snímačov a ich crop faktory (Horký, 2017)	20
Tabuľka 3: Stručný prehľad základných informácií o fotogrametrických programoch (The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022), (PhotoModeler Pricing and License, 1998-2023), (Agisoft Metashape User Manual, 2022), (Comparison of photogrammetry software, 2022)	25
Tabuľka 4: Zhodnotenie niektorých fotogrametrických programov (Photogrammetry: Step-by-Step Guide and Software Comparison, 2023).....	25
Tabuľka 5: Špecifikácia zariadenia Faro Focus 3D X130 (Prokop, 2021).....	31
Tabuľka 6: Špecifikácia totálnej stanice Trimble S8 HP (Prokop, 2021)	32
Tabuľka 7: Špecifikácia mobilného telefónu a digitálnej zrkadlovky (Prokop, 2021)...	33
Tabuľka 8: Špecifikácia dronu DJI Phnatom 3 Advanced (PHANTOM 3 ADVANCED, 2023), (Dron DJI Phantom 3 Advanced, 2016 - 2023).....	34
Tabuľka 9: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (Canon)	44
Tabuľka 10: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (Xiaomi).....	51
Tabuľka 11: Kalibračné koeficienty a korelačná matica (dron)	54
Tabuľka 12: Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Canon	60
Tabuľka 13: Percentuálny počet odľahlých a vybočujúcich meraní Xiaomi	60
Tabuľka 14: Dosiahnuté smerodajné odchýlky	61
Tabuľka 15: F - testy pri analýze súradnicových a polohových rozdielov	61
Tabuľka 16: Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Canon.....	62
Tabuľka 17: Analýza vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna Xiaomi	62
Tabuľka 18: F - test pri analýze vzdialeností mesh modelu od referenčného mračna....	62

13 Zoznam použitých skratiek

GSD	Ground sample distance
ISO	International Organization for Standardization
S-JTSK	System jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej
Bpv	Baltsky po vyrovnání

14 Zoznam použitých zdrojov

Hvězdárna a planetárium [online], 2015. [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://pamatkovykatalog.cz/hvezdarna-a-planetarium-20617224>

Slovník VÚGTK [online], 2005-2020. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <http://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=3867&l=fotogrametria>

PAVELKA, Karel, 2009. Fotogrammetrie 1. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04249-6.

HANZL, Vlastimil, 2006. FOTOGRAMMETRIE: MODUL 01 TEORETICKÉ ZÁKLADY FOTOGRAMMETRIE. Brno: Vysoké učení technické v Brně.

Geometric Camera Parameters [online], n.d.. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E/Notes/CameraParameters.pdf>

PAVELKA, Karel, 2011. Fotogrammetrie 2. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04719-4.

Lens Distortion Correction [online], 2023. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: https://docs.nvidia.com/vpi/algo_ldc.html

Camera Calibration Theory: Fisheye Lens Distortion Model [online], 2022. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: https://euratom-software.github.io/calcam/html/intro_theory.html

CHROUST, Martin, 1996-2023. Jaké existují fotočipy a proč u mobilů zvítězila technologie CMOS?. Zboží [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/magazin/c/fotocipy-pruvodce-senzory-fotoaparatu/>

Velikost snímáče, 2001-2023. Megapixel [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/velikost-snimace?comments-comments-showAllComments=1>

HORKÝ, Karel, 2017. Crop faktor: Omyly a skutečnost. FOTOLAB [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.fotolab.cz/blog/crop-faktor-omyly-a-skutecnost/>

The Best Photogrammetry Software of 2022 (Many are Free), 2022. All3dp [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-photogrammetry-software/#section-commercial-photogrammetry-software>

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8 [online], 2022. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf

Agisoft, 2023. Agisoft [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.agisoft.com/buy/online-store/>

ContextCapture: Automatically Create Digital Context for Digital Twins [online], 2021. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/wp-content/uploads/PDS-ContextCapture-LTR-EN-LR.pdf>

PHOTOMODELER TECHNOLOGIES: What is PhotoModeler? [online], n.d.. PhotoModeler Technologies [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.photomodeler.com/kb/what_is_photomodeler/

PhotoModeler Pricing and License [online], 1998-2023. XLsoft Corporation [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.xlsoft.com/en/products/photomodeler/price.html>

AUTODESK: ReCap Pro: digitalizujte fyzické prostředí [online], 2023. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RECAP>

RealityCapture: RealityCapture promění vaše fotografie a nebo laserové skeny v realistické 3D modely [online], n.d.. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://capturingreality.cz/>

NEPOR, Vladimír, 2020. VR APPS: Meshroom - jednoduchý 3D scan objektu pomocí fotogrammetrie [online]. 26.6.2020 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.vrapps.cz/blog/meshroom-3d-scan-objektu-pomoci-fotogrammetrie#proc-meshroom>

REGARD3D: Introduction [online], n.d.. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <http://www.regard3d.org/index.php/documentation/introduction>

Comparison of photogrammetry software, 2022. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software

Photogrammetry: Step-by-Step Guide and Software Comparison [online], c2023. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/photogrammetry-guide-and-software-comparison/>

KALVODA, Petr, Jakub NOSEK, Michal KURUC, Tomas VOLARIK a Petra KALVODOVA, 2020. Accuracy Evaluation and Comparison of Mobile Laser Scanning and Mobile Photogrammetry Data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [online]. 609(1) [cit. 2023-02-27]. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/609/1/012091

ISO - 5725 - 2, 2019. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results: Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard . measurement method.

MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ, n.d. Základní metrologické pojmy k analýze dat při vyhodnocení laboratorních měření.

ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ, c2006. INŽENÝRSKÁ GEODÉZIE I: GE16 MODUL 03 NÁVODY KE CVIČENÍ. Brno: Vysoké učení technické v Brně.

PROKOP, Jaromír, Jakub NOSEK, Petr KALVODA a Milan VESELÝ, 2021. Posouzení přesnosti fotogrammetrických výsledků z nízkonákladové a profesionální kamery. In: Juniorstav 2022 – sborník příspěvků [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, s. 597-602 [cit. 2023-03-14]. ISBN 978-80-86433-76-9. Dostupné z: doi:10.13164/juniorstav.2022.597

PHANTOM 3 ADVANCED: Specs, 2023. DJI [online]. 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/phantom-3-adv>

Dron DJI Phantom 3 Advanced, 2016 - 2023. DRON PRO [online]. 2016 - 2023 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/dji-phantom-3-advanced>

Trimble R8s GNSS přijímač [online], 2015. Praha: GEOTRONICS Praha. Dostupné také z: https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2016/05/022516-130-CZE_TrimbleR8s_DS_A4_0415_LR_Geotronics.pdf

Zoznam digitálnych príloh

Príloha č.1 - Protokol z GNSS merania (vo formáte PDF)

Príloha č.2 - Protokol z výpočtu siete a podrobných bodov (vo formáte TXT)

Príloha č.3 - Protokol z programu Trimble RealWorks (vo formáte PDF)

Príloha č.4 - Testovanie fotogrametrických modelov (vo formáte XLSX)

Príloha č.5 - Protokol z kalibrácie Canon (vo formáte PDF)

Príloha č.6 - Protokol z tvorby modelu Canon+Phantom (vo formáte PDF)

Príloha č.7 - Protokol z kalibrácie Xiaomi (vo formáte PDF)

Príloha č.8 - Protokol z tvorby modelu Xiaomi+Phantom (vo formáte PDF)

Príloha č.9 - Protokol z kalibrácie Phantom (vo formáte PDF)

Príloha č.10 - Protokol z tvorby modelu Phantom (vo formáte PDF)

Príloha č.11 - Mesh model observatória Canon (iba na priloženom DVD)

Príloha č.12 - Mesh model observatória Xiaomi (iba na priloženom DVD)

Príloha č.13 - Odkazy na 3D model (vo formáte TXT)

Zoznam príloh

Príloha č.14 - Model observatória vyhotovený pomocou 3D tlačiarne