



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

3D MODEL KAPLE SVATÉ BARBORY

3D MODEL OF THE CHAPEL OF SAINT BARBARA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavla Komoňová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geodézie
Studentka: **Pavla Komoňová**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: B0532A260001 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 bakalářské práce:

3D model Kaple svaté Barbory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracujte rešerši metod fotogrammetrické tvorby 3D modelů objektů včetně softwarů pro vyhodnocení. Vyhotovejte georeferencovaný 3D model. Analyzujte dosaženou přesnost pomocí kontrolních bodů a referenčního mračna TLS včetně posouzení relativní četnosti vybočujících a odlehlých měření. Interpretujte dosažené výsledky. Vyhotovejte vhodné prezentace výsledného modelu. Výsledný model 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 bakalářské práce:

Rešerše aktuálních metod a software
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.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2023

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je tvorba dvou 3D texturovaných modelů Kaple svaté Barbory v Rudicích. Modely byly vytvořeny ze snímků pořízených zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II a mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro v softwaru Agisoft Metashape Professional. Dosažená přesnost byla testována pomocí kontrolních bodů a referenčního mráčka bodů z laserového skenování. 3D model byl zveřejněn na internetových stránkách pomocí Sketchfab.

Klíčová slova

photogrammetrie, 3D model, Agisoft Metashape Professional, mesh model, kaple

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create two 3D textured models of the chapel of St. Barbara in Rudice. The models were created from images taken with a CanonEOS 6D MarkII SLR camera and a Xiaomi 10T Pro mobile phone using Agisoft Metashape Professional software. The achieved accuracywas tested using control points and a reference point cloud from laser scanning. The 3D model was published on the website using Sketchfab.

Keywords

Photogrammetry, 3D model, Agisoft Metashape Professional, mesh model, chapel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOMOŇOVÁ, Pavla. 3D model Kaple svaté Barbory [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152908>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Petr Kalvoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *3D model Kaple svaté Barbory* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2024

Pavla Komoňová
autor

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Klvodovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Teoretický základ	10
1.1 Fotogrammetrie	10
1.2 Rozdělení fotogrammetrie	11
1.3 Blízká fotogrammetrie a její využití	11
1.4 Fotogrammetrické softwary	12
1.4.1 Studie Comparison of photogrammetry tools considering rebar progress recognition	12
1.4.2 Studie Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage	13
1.4.3 Studie Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage	14
1.4.4 Studie 3D cultural heritage documentation: a comparison between different photogrammetric software and their products	14
1.4.5 Porovnání vybraných softwarů	15
2 Zájmový objekt	17
3 Použité vybavení	18
4 Zpracovatelské práce	22
4.1 Tvorba modelů	22
4.1.1 Kalibrace kamery	22
4.1.2 Tvorba mesh modelu	26
4.1.3 Úprava problematických částí	30
4.1.4 Texturování modelu	33
4.2 Testování přesnosti výsledných modelů	35
4.3 Prezentace výsledného modelu	38
ZÁVĚR	39

ÚVOD

Fotogrammetrie je společně s laserovým skenováním rychle se rozvíjející technologie hromadného sběru prostorových dat. Tato technologie zkracuje měřické práce v terénu a přesouvá měření do prostor kanceláří. Fotogrammetrie nachází svoje uplatnění v mnoha oborech díky rozvoji fotoaparátů na mobilních telefonech. Vzhledem k dostupnosti i bezplatných fotogrammetrických softwarů se stává dostupnou i pro laického uživatele.

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou 3D texturovaných modelů. V první části práce bude zpracována rešerše dostupných fotogrammetrických softwarů. Jejich porovnání bude provedeno na základě vybraných studií. Bude zde také zahrnut teoretický základ fotogrammetrie. Zájmovým objektem je Kaple svaté Barbory v Rudicích. Pro tvorbu modelu byly pořízeny snímky zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II, mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro a pro zpracování střechy také kamerou UAV DJI Phantom 3 Advance. V práci budou popsány jednotlivé kroky zpracování od kalibrace po tvorbu textury výsledného mesh modelu. Na závěr bude testována přesnost výsledných modelů pomocí porovnání s referenčním mračnem z laserového skenování. Bude provedena také analýzy pomocí kontrolních bodů. Na základě analýz budou posouzena vybočující a odlehlá měření.

1 TEORETICKÝ ZÁKLAD

V této kapitole budou popsány vybrané pojmy týkající se fotogrammetrie, které jsou dále v práci používány. Dále bude uvedeno možné rozdělení fotogrammetrie a využití blízké fotogrammetrie. Bude také popsáno několik studií o fotogrammetrických softwarech a jejich porovnání.

1.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda získávání geometrických informací o objektu z jedné nebo více fotografií daného objektu. Tuto metodu lze využít v situaci, kdy lze zájmový objekt fotograficky zachytit. Cílem fotogrammetrického měření je 3D rekonstrukce objektu v digitální nebo grafické podobě. [1]

Výhodou fotogrammetrie je poměrně krátká doba měření v terénu, jelikož samotné proměřování se následně provádí až na snímcích v laboratořích. Nevýhodou je ale závislost na příznivém počasí pro snímkování. [2]

V rámci této metody je potřeba znát několik pojmů týkajících se procesu zpracování. V dalším textu jsou popsány pojmy používané dále v této práci v postupu zpracování.

Prvky vnitřní orientace – popisují vnitřní geometrický model kamery a určují se kalibrací kamery. Vnitřní orientace definuje pozici perspektivního centra vzhledem k referenčnímu systému kamery. Za prvky vnitřní orientace se označuje: [1]

- ohnisková vzdálenost c (vzdálenost mezi rovinou obrazu a perspektivním centrem),
- souřadnice hlavního snímkového bodu c_x, c_y (souřadnicový systém obrazu),
- zkreslení obrazu – radiální a tangenciální zkreslení, afinita a zkosení (odchylky od ideální centrální projekce).

Prvky vnější orientace – určují 3D polohu a orientaci kamery v souřadnicovém systému. Vnější orientace je popsána souřadnicemi perspektivního centra v geodetickém systému a třemi vhodně definovanými úhly, které vyjadřují otočení souřadnicového systému kamery vůči geodetickému systému. Tyto prvky se počítají nepřímo po zaměření snímkových souřadnic dobře identifikovatelných bodů na objektu. Vnější orientaci lze řešit více způsoby, např. komplexní řešení vyrovnáním paprskových svazků, nebo etapové pomocí relativní a absolutní orientace. [1, 3]

Relativní orientace – vzájemná orientace snímků, vytvoření libovolně prostorově orientovaného modelu [3]

Absolutní orientace – měřítková změna, pootočení a posunutí modelu do referenčního geodetického systému [3]

Kalibrace kamery – určení prvků vnitřní orientace, dělí se na pre-kalibraci a self-kalibraci. Pre-kalibrace se provádí na kalibračním objektu před snímkováním zájmového objektu. Je potřeba, aby prvky zůstaly neměnné. Self-kalibrace se provádí přímo při snímkování sledovaného objektu. Je při ní potřeba, aby měl objekt dobrou texturu. [1]

Reprojekční chyba – vzdálenost mezi původní projekcí bodu na snímku a jeho opětovnou projekcí již rekonstruovaného bodu. [4]

1.2 Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrii lze dělit například podle: [1, 3]

- 1) polohy stanoviška
 - pozemní (terestrická, blízká, vzdálenost snímkování $d < 200$ m),
 - UAV (fotoaparát umístěn na dronu, výška snímkování $h < 100$ m),
 - letecká (stanoviško je umístěno v letadle, výška snímkování $h > 300$ m),
 - družicová (zpracování dálkového průzkumu Země, výška snímkování $h > 200$ km),
- 2) počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků
 - jednosnímková (jen rovinné souřadnice),
 - stereofotogrammetrie (snímky s rovnoběžnými osami záběru, stereoskopický vjem),
 - vícesnímková (konvergentní osy záběru, průseková fotogrammetrie),
- 3) způsobu zpracování snímků
 - metody analogové (analogové snímky, opto-mechanické zpracování, dnes již nepoužíváno),
 - metody analytické (analogové snímky, analytické vyhodnocení obsahu snímků, analytické vyhodnocovací stroje),
 - metody digitální (digitální snímky, zpracování na počítači).

1.3 Blízká fotogrammetrie a její využití

Za blízkou fotogrammetrii je označována pozemní fotogrammetrie, kdy je stanoviško umístěno na Zemi a je nepohyblivé. Z hlediska vzdálenosti snímkování sem lze ale zařadit také UAV (Unmanned Aerial Vehicle) fotogrammetrii. Zde je uváděna vzdálenost snímkování do 100 m, přičemž u blízké se uvádí do 200 m a v extrémních případech dokonce dosah až 500 m. [1, 3]

Blízká fotogrammetrie má širokou škálu využití, zejména ve stavebnictví, kde se využívá pro kontrolní měření stavebních dílů, měření deformací staveb, výkresy fasád, stanovení kubatur skládek, digitální modely terénu a povrchu, rekonstrukce výkresové dokumentace poškozených objektů z archivních snímků a další. Svoje místo si našla fotogrammetrie i v medicíně (sledování rehabilitačních výsledků, plastická chirurgie, zubní aplikace). Příkladem je využití pro analýzu deformace lebky u kojenců, kde se ukázala fotogrammetrie jako levná a velmi užitečná metoda a přesnost byla srovnatelná s manuálním měřením. [2, 3, 5]

Dále nachází fotogrammetrie uplatnění například v následujících oborech: [3]

- památková péče (dokumentace objektů),
- strojírenství (proměřování výrobků přesného strojírenství),
- policie (kriminalistika, dokumentace dopravních nehod).

1.4 Fotogrammetrické softwary

Zpracovatel si může vybírat z velkého množství fotogrammetrických softwarů, a to placených i bezplatných. Placené softwary většinou poskytují větší rozsah parametrů zpracování, pro nekomerční zpracování jsou ale ty bezplatné dostačující. Tato kapitola popisuje čtyři vybrané studie porovnávající fotogrammetrické softwary. První se zabývá monitorováním stavebních konstrukcí, další tři dokumentací historických budov. Jelikož se neustále vyvíjí, byly vybrány studie co nejaktuálnější.

1.4.1 Studie Comparison of photogrammetry tools considering rebar progress recognition

Studie hledala nejvhodnější software pro zpracování fotogrammetrie v oblasti monitorování stavebního projektu. Výběr programů byl založen na třech kritériích, aby umožňoval zpracování blízké fotogrammetrie, aby byl co nejvíce přijímán výzkumnou komunitou a aby byl jednoduše dostupný na internetu. Z 37 nalezených softwarů bylo pro studii vybráno devět a to VisualSFM, Meshroom, COLMAP, 3DF Zephyr, Regard 3D, RealityCapture, Autodesk ReCap Pro, Agisoft Metashape a PhotoModeler. Testování bylo provedeno vyhodnocením mračna bodů, které bylo vytvořeno ze sady 50 snímků výztužné mřížky. Mračna bodů byla hodnocena podle následujících pěti parametrů: [6]

- výpočetního času
- počtu bodů v modelu
- tvorby mesh modelu
- procentuálního dokončení prvků modelu
- procent šumu.

Nejkratší výpočetní čas byl zaznamenán pro VisualSFM, který ale jako jediný neumožňuje tvorbu mesh modelu, následovaly RealityCapture, Photomodeler a Mushroom. Nejvyšší počet bodů byl vygenerován v Agisoft Metashape, RealityCapture a 3DF Zephyr. Stejně pořadí bylo pozorováno i pro hodnocení podle šumu, kdy Agisoft Metashape měl nejnižší procento. Modely z programů Agisoft Metashape, 3DF Zephyr a Photomodeler měly nejkompletněji vygenerované prvky výztuže. Podrobné výsledky studie ukazuje Tab. 1. Ze srovnání ale plyne, že Agisoft Metashape a 3DF Zephyr jsou lepší volbou pro tento typ využití fotogrammetrie. [6]

Tab. 1 Výsledky hodnocení parametrů. [6]

Software	Výpočetní čas	Počet bodů v mračnu	Tvorba mesh modelu	% dokončení modelu	% šumu
VisualSFM	3 min	370 149	Ne	72 %	1,081 %
Meshroom	9 min	211 551	Ano	63 %	0,567 %
COLMAP	35 min	880 116	Ano	33 %	20,465 %
3DF Zephyr	26 min	1 201 034	Ano	97 %	0,042 %
Regard 3D	26 min	72 098	Ano	51 %	0,694 %
ReCap Pro	27 min	271 516	Ano	84 %	7,366 %
PhotoModeler	9 min	145 491	Ano	88 %	0,069 %
Agisoft Metashape	14 min	10 138 227	Ano	99 %	0,003 %
RealityCapture	7 min	4 894 717	Ano	81 %	0,005 %

1.4.2 Studie Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage

Cílem této studie bylo zjistit, jestli mezi softwary s otevřeným zdrojovým kódem existuje adekvátní alternativa ke komerčním softwarům. Na základě požadavků na zpracování byl vybrán software AliceVision Meshroom, který byl porovnán s běžně používaným programem Agisoft Metashape. Programy byly porovnány na dvou příkladech objektů kulturního dědictví podle následujících kritérií: [7]

- přesnost výsledné 3D rekonstrukce
- úroveň zaznamenaných detailů tvaru objektu
- úroveň záznamu reálného materiálu a barvy objektu.

Bylo zjištěno, že při zpracování trojrozměrného objektu a s použitím konvergentního snímkování dosahuje Meshroom téměř stejných výsledků přesnosti jako Agisoft Metashape. Naopak v případě paralelního snímkování plochého objektu je přesnost 3D rekonstrukce výrazně nižší ve srovnání s komerčním programem. Detaily byly rovněž lépe viditelné na trojrozměrném objektu než na plochém, kde byly pozorovány dutiny

a nedostatky. Záznam vlastností materiálu a barev se u obou objektů při porovnání textur generovaných programem Meshroom s těmi z Agisoft Metashape mírně lišil. [7]

Na základě výše uvedeného lze říct, že výsledky tvorby modelu v open-source programech se mohou lišit v závislosti na tvaru objektu, přístupu ke snímkování a také počtu fotografií použitých pro 3D rekonstrukci. Software AliceVision Meshroom tedy může být vhodnou alternativou ke komerčním softwarům v případě zpracování volně stojícího a převážně trojrozměrného objektu. [7]

1.4.3 Studie Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage

V případě této studie byly hodnoceny rozdíly mezi: [8]

- Agisoft Photoscan Professional (verze 1.4.4, nyní Agisoft Metashape Professional)
- Bentley ContextCapture (verze 4.4.9, nyní iTwin Capture Modeler)
- RealityCapture (verze CLI, 2018).

Zájmový objekt (aryballos) byl snímkován ve dvou polohách a v každé ve třech výškových úrovních. Celkem bylo pořízeno 144 snímků fotoaparátem Nikon D3400 s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Byly posouzeny možnosti jednotlivých softwarů, proces zpracování v nich a cena předplatného. [8]

Agisoft Photoscan vyžaduje nejdelší čas zpracování a vytvořil nejhorší textury. Má nejspolehlivější snímkovou orientaci, kterou lze provádět i manuálně, a poskytuje největší kontrolu nad celým procesem zpracování. Umožňuje vytvářet jednotlivé „Chunky“ a následně je spojovat ve finální model. Velkou výhodou je nejnižší cena licence mezi testovanými programy. [8]

Bentley ContextCapture vytvořil nejlepší textury, které ale nelze upravovat před finálním výstupem, stejně tak model nelze upravovat přímo v tomto programu. Manuální snímková orientace a škálování modelů bylo náročné a nakonec neúspěšné. Tento program poskytuje nejmenší manuální kontrolu zpracování a neumožňuje práci rozdělit do více „Chunků“. [8]

RealityCapture vyžaduje nejkratší čas na zpracování a má nejúspěšnější manuální snímkovou orientaci. Data sice vkládá pouze do jednoho „Chunku“, ale zpracovává je někdy jako samostatné modely, které lze následně kombinovat. Nevýhodou tohoto softwaru je vysoká cena jeho předplatného. [8]

1.4.4 Studie 3D cultural heritage documentation: a comparison between different photogrammetric software and their products

Jedná se o studii hodnotící několik softwarů, komerčních i bezplatných: Agisoft Photoscan (nyní Agisoft Metashape), Pix4Dmapper, ContextCapture (nyní iTwin

Capture Modeler), VisualSFM, insight3d, MicMac. Tři sady snímků byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS-M s fixní ohniskovou vzdáleností 22 mm. Jedna sada byla získána terestrickým snímkováním a pro pořízení dalších dvou sad byl fotoaparát připevněn na hexakoptéru, kde první sada měla nadírní úhel pohledu a druhá sklon 45°. [9]

Softwary byly jednotlivě analyzovány a hodnoceny podle několika kritérií. Program Agisoft Photoscan byl brán pro hodnocení ostatních softwarů jako referenční kvůli zkušenostem autorů s programem. Výsledky hodnocení byly použity při porovnání vybraných programů v následující kapitole (Tab. 2). [9]

Mračna bodů z jednotlivých programů byla porovnána s mračnem z laserového skenování. Byla porovnána hustota mračna, kdy největší hustotu má mračno získané laserovým skenováním a nejnižší mračno z Agisoft Photoscan. Poté byly vypočítány vzdálenosti mezi mračny z jednotlivých softwarů a mračnem z laserového skenování a MicMac měl nejmenší střední odchylku. [9]

1.4.5 Porovnání vybraných softwarů

Pomocí výše uvedených studií a informací, dostupných na webových stránkách jednotlivých softwarů, byla sestavena Tab. 2. Ceny byly přepočteny podle aktuálních kurzů na české koruny a zaokrouhleny na celé koruny (kurzy v den sestavení tabulky: 1\$ = 23,78Kč a 1€ = 25,30Kč).

Tab. 2 Porovnání vybraných softwarů. [6, 9]

Software	Cena licence na rok	Rozhraní	Manuály, dokumentace	GCP	Tvorba mesh modelu
3DF Zephyr	106 260 Kč permanentní	nehodnoceno	Ano	Ano	Ano
RealityCapture	89 175 Kč permanentní	nehodnoceno	Ano	Ano	Ano
Agisoft Metashape	professional 83 206 Kč (standard 4 267 Kč)	přehledné	Ano	Ano	Ano
PhotoModeler	premium 23 019 Kč (standard 13 031 Kč)	nehodnoceno	Ano	Ano	Ano
Bentley iTwin Capture	147 531 Kč	přehledné	Ano	Ano	Ano
Pix4Dmapper	73 370 Kč (118 657 Kč permanentní)	méně přehledné	Ano	Ano	Ano
VisualSFM	Bezplatná	méně přehledné	Omezené	Ano	Ne
AliceVision Meshroom	Bezplatná	nehodnoceno	Ano	Ne	Ano
MicMac	Bezplatná	nepřehledné	Omezené	Ano	Ne

Bezplatné softwary jsou často méně přehledné než ty placené a mohou jim chybět některé možnosti zpracování, například možnost importovat ground control points (GCP), nebo vygenerovat mesh model. Některým placeným programům ale mohou také chybět některé funkce, například iTwin Capture neumožňuje úpravu mesh modelu a textu. Ve studiích byly lépe hodnocené placené softwary, a to 3DF Zephyr, Agisoft Metashape a RealityCapture.

Pro zpracování této bakalářské práce byl vybrán program Agisoft Metashape. A to z důvodu jeho dostupnosti na fakultě a dobré orientace v pracovním prostředí. Ve studiích byl pozitivně hodnocen například na základě nízkého procenta šumu, nebo vysokého procenta dokončení prvků modelu. Také má dostupné poměrně velké množství informací ke zpracování, na oficiálních stránkách se nachází kompletní manuál, několik typů pro zpracování, videa i fórum.

2 ZÁJMOVÝ OBJEKT

Snímkovaným objektem je kaple v Rudicích (okres Blansko), zasvěcená svaté Barboře, patronce obce Rudice, horníků a jeskyňářů. Jedná se o sakrální stavbu, postavenou v letech 1999–2002, kterou navrhla brněnská architektka Petra Vorlíčková. Kaple slouží k církevním obřadům a posledním rozloučením. Bohoslužby zde probíhají v létě každou sobotu v 18 hod. a přes zimu každou sobotu v 17 hod. [10, 11]

Stěny jsou tvořeny z cihel a kamene a střecha je pokryta šedou břidlicí. Jako zdívo byly použity vápencové kameny, místy jsou stěny doplněny pruhy bílé omítky, a to převážně po obvodu stěn. Rozměry kaple jsou přibližně 12 a 15 m. Hřbety dvou uskočených sedlových střech dosahují výšky 7 m a věž 11 m. [10]



Obr. 1 Kaple sv. Barbory v Rudicích

3 POUŽITÉ VYBAVENÍ

Pro zpracování 3D modelu byly poskytnuty vedoucím práce snímky pořízené třemi fotoaparáty, souřadnice vřícovacích a kontrolních bodů a referenční mračno bodů pro posouzení přesnosti. Měření a snímkování proběhlo v květnu roku 2022.

Pomocná měřičská síť byla zřízena aparaturou Trimble R8s metodou GNSS RTK.

Tab. 3 Parametry GNSS přijímače Trimble R8s. [12]

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	GNSS přijímač
RTK měření (jedna délka základny <30 km)	
Přesnost polohy	8 mm + 1 ppm RMS
Přesnost výšky	15 mm + 1 ppm RMS
Síťové RTK (k nejbližší fyzické základnové stanici)	
Přesnost polohy	8 mm + 0,5 ppm RMS
Přesnost výšky	15 mm + 0,5 ppm RMS
Doba trvání inicializace	typicky <8 sekund
Spolehlivost inicializace	typicky >99,9 %



Obr. 2 GNSS přijímač Trimble R8s. [12]

Kontrolní a vřícovací body byly přirozeně signalizovány a zaměřeny totální stanicí Trimble S8 HP.

Tab. 4 Parametry totální stanice Trimble S8 HP. [13]

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	Totální stanice
Přesnost délek – hranolový mód	1 mm + 1 ppm
Přesnost délek – bezhranolový mód	3 mm + 2 ppm
Úhlová přesnost	0,15 mgon (0,5")



Obr. 3 Totální stanice Trimble S8 HP. [14]

Referenční mračno bodů bylo naskenováno pozemním skenerem Faro Focus 3D X130.

Tab. 5 Parametry Laserového skeneru Faro Focus 3D X130. [15]

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	Laser skener
Chyba měření	± 2 mm
Rozsah měření	0,6 - 130 m
Zorné pole (vertikální/horizontální)	300°/360°
Rychlost měření (bodů/sec)	122 000 až 976 000



Obr. 4 Laserový skener Faro Focus 3D X130. [16]

První sada snímků byla snímkována zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II, kterou bylo pořízeno 170 snímků.

Tab. 6 Parametry kamery Canon EOS 6D Mark II [17].

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	Digitální zrcadlová kamera
Rozlišení	26,2 Mpx
Velikost pixelu	3,79 μm
Typ snímače	CMOS
Hmotnost	0,77 kg



Obr. 5 zrcadlová kamera Canon EOS 6D Mark II [17].

Mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro byla pořízena sada 521 snímků.

Tab. 7 Parametry kamery Xiaomi Mi 10T Pro [18].

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	Mobilní telefon
Rozlišení	108 Mpx
Velikost pixelu	0,805 μm
Typ snímače	ISOCELL
Hmotnost	0,218 kg



Obr. 6 mobilní telefon Xiaomi MI 10T Pro [18].

Pro snímkování střechy byl použit UAV DJI Phantom 3 Advance, jímž bylo pořízeno 550 snímků.

Tab. 8 Parametry kamery DJI Phantom 3 Advance [19].

Parametr	Hodnota parametru
Typ zařízení	Kvadroptéra
Rozlišení	12 Mpx
Velikost pixelu	1,56 μm
Typ snímače	CMOS
Hmotnost	1280 g
Maximální dosah	1000 m
Maximální výška	500 m
Maximální rychlost	57 km/h



Obr. 7 UAV DJI Phantom 3 Advance [19].

4 ZPRACOVATELSKÉ PRÁCE

Modely kaple byly zpracovány v softwaru Agisoft Metashape Professional verze 2.0.2.16404. Byly zpracovány dva modely, jeden ze snímků pořízených zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II (dále jen Canon), druhý z mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro (dále jen Xiaomi). U obou byly pro tvorbu střechy využity snímky z UAV DJI Phantom 3 Advance (dále jen Phantom). Na závěr bylo provedeno testování přesnosti. V následujícím textu je popsán postup zpracování obou modelů a jejich testování.

4.1 Tvorba modelů

Tvorba mesh modelu se skládá z několika částí. Nejprve je potřeba získat prvky vnitřní orientace pomocí kalibrace kamery. Poté se prvky z kalibrace zafixují a vygeneruje nové řídké mračno bodů s již správnými prvky vnitřní orientace, které zůstanou neměnné. Následuje tvorba hustého mračna bodů, které je zdrojem dat pro vytvoření mesh modelu. V něm se opraví případné nedostatky a texturováním se obarví.

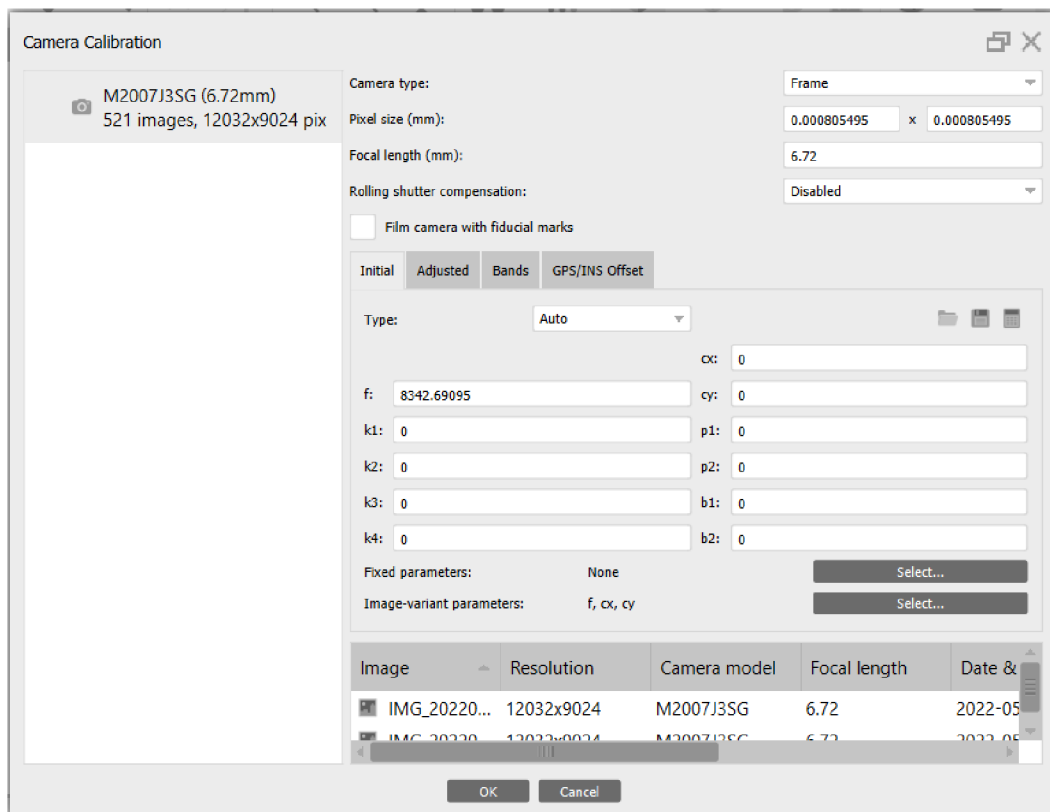
4.1.1 Kalibrace kamery

Prvním krokem po importu snímků přes *Add photos* v záložce *Workflow* do nově založeného projektu je odhad kvality snímků. Hodnota tohoto parametru je vypočtena na základě míry ostrosti v nejvíce zaostřené části snímku. Uživatelský manuál doporučuje vyloučit snímky s kvalitou nižší jak 0,5 pro další zpracování. Toto kritérium splnily všechny snímky (Tab. 9). Ze zpracování byla vyřazena pouze jedna fotografie z projektu Canon, jelikož byla jako jediná focena z dálky. [4]

Tab. 9 Kvalita snímků z jednotlivých kamer.

Kamera	Canon	Xiaomi	Phantom
Mín. kvalita	0,693154	0,501182	0,714537
Max. kvalita	0,913907	0,771374	0,881554

Následně je možné v záložce *Tools – Camera Calibration* nastavit typ kamery, velikost pixelu, ohniskovou vzdálenost a v případě pre-kalibrace načíst prvky vnitřní orientace. Pre-kalibrace v této práci nebyla provedena, ale výpočet prvků proběhl formou self-kalibrace přímo při zpracování jednotlivých projektů, jelikož kaple má dobrou texturu stěn. V projektu Xiaomi zde bylo potřeba nastavit ohniskovou vzdálenost a souřadnice hlavního snímkového bodu jako *Image-variant parameters*, aby se počítaly pro každý snímek zvlášť, jelikož se v průběhu snímkování měnily (Obr. 8). V projektech Canon a Phantom byly počítány stejné parametry vnitřní orientace pro všechny snímky. Výpočet relativní snímkové orientace se spustí pomocí *Align Photos* na záložce *Workflow*.



Obr. 8 Ukázka nastavení u projektu Xiaomi.

Při výpočtu relativní snímkové orientace se vygeneruje řídké mračno bodů, tzv. *Tie Points*. Následuje filtrace tohoto mračna, navazovacích bodů, na základě parametrů *Projection Accuracy* a *Reprojection error* pomocí *Gradual selection* na záložce *Model*. Vždy po promazání bodů je potřeba přepočítat prvky vnitřní orientace nástrojem *Optimize cameras* na záložce *Tools*. Parametr *Projection Accuracy* umožňuje filtrovat body na základě relativní přesnosti určení jejich polohy v závislosti na jejich velikosti. Výběrem podle *Reprojection error* lze odstanit body s vysokými hodnotami reprojekční chyby. Zároveň je vhodné v této chvíli promazat body v okolí zájmového objektu, jako například stromy, které se mohou při snímkování hýbat a zhoršují tak přesnost. Ukázka řídkých mračen po filtraci je na Obr. 9. [4]



Obr. 9 Filtrované *Tie Points* projektů Canon (vlevo) a Xiaomi (vpravo).

Následně byly importovány souřadnice vřícovacích a kontrolních bodů na panelu *Reference* (Obr. 10) přes *Import reference*, pomocí nichž se určuje rozměr a poloha modelu v souřadnicovém systému. Po importu bylo potřeba nastavit souřadnicové systémy kamery (WGS 84) a vřícovacích bodů (S-JTSK). Importované body byly zaměřeny na snímcích, kde jsou dobře viditelné a kde nejsou na okrajích snímků. Jelikož poloha bodů hned neodpovídá jejich pozici na snímcích, je vhodné po zaměření pár bodů aktualizovat transformaci pomocí tlačítka *Update transform* a všechny značky se tak přesunou na přibližně správnou pozici. Přesnost zaměření bodů lze sledovat podle parametrů *Error (m)* a *Error (pix)*. *Error (m)* udává polohovou odchylku mezi pozicí bodu ze zdrojových dat a jeho zaměřenou pozicí na snímku. *Error (pix)* je střední kvadratická chyba vypočtená ze zaměřených souřadnic na snímcích. Poté byly vybrány vřícovací body tak, aby byly rovnoměrně rozmístěny po celém objektu (zhruba 2–3 na každé stěně), zbytek bodů byl použit jako kontrolní. Označené body jsou použity jako vřícovací, neoznačené jako kontrolní. Poté byly odznačeny všechny snímky, protože jejich poloha nebyla určena dostatečně přesně. Následně byla aktualizována transformace pomocí *Update transform* a pomocí *Optimize cameras* byl model georeferencován a byly přepočítány opět prvky vnitřní orientace.

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Yaw (°)
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722723	49.332650	525.000000	10.000000	40.938317	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722702	49.332642	526.100000	10.000000	39.898808	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722705	49.332642	527.900000	10.000000	38.091746	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722673	49.332660	531.700000	10.000000	34.363253	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722732	49.332680	531.300000	10.000000	34.837989	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722702	49.332742	537.800000	10.000000	29.902441	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> IMG_4...	16.722727	49.332690	526.600000	10.000000	39.686165	<input type="checkbox"/>

Markers	Westing (m)	Southing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> T16	588238.148000	1146447.810000	522.077000	0.005000	0.002617	15	0.190
<input checked="" type="checkbox"/> 11	588233.154000	1146446.164000	527.556000	0.005000	0.003472	15	0.121
<input checked="" type="checkbox"/> T03	588232.504000	1146453.952000	522.528000	0.005000	0.002359	17	0.122
<input type="checkbox"/> V02	588237.765000	1146459.455000	522.092000	0.005000	0.001273	18	0.175
<input checked="" type="checkbox"/> T08	588237.717000	1146459.589000	526.289000	0.005000	0.002294	27	0.183

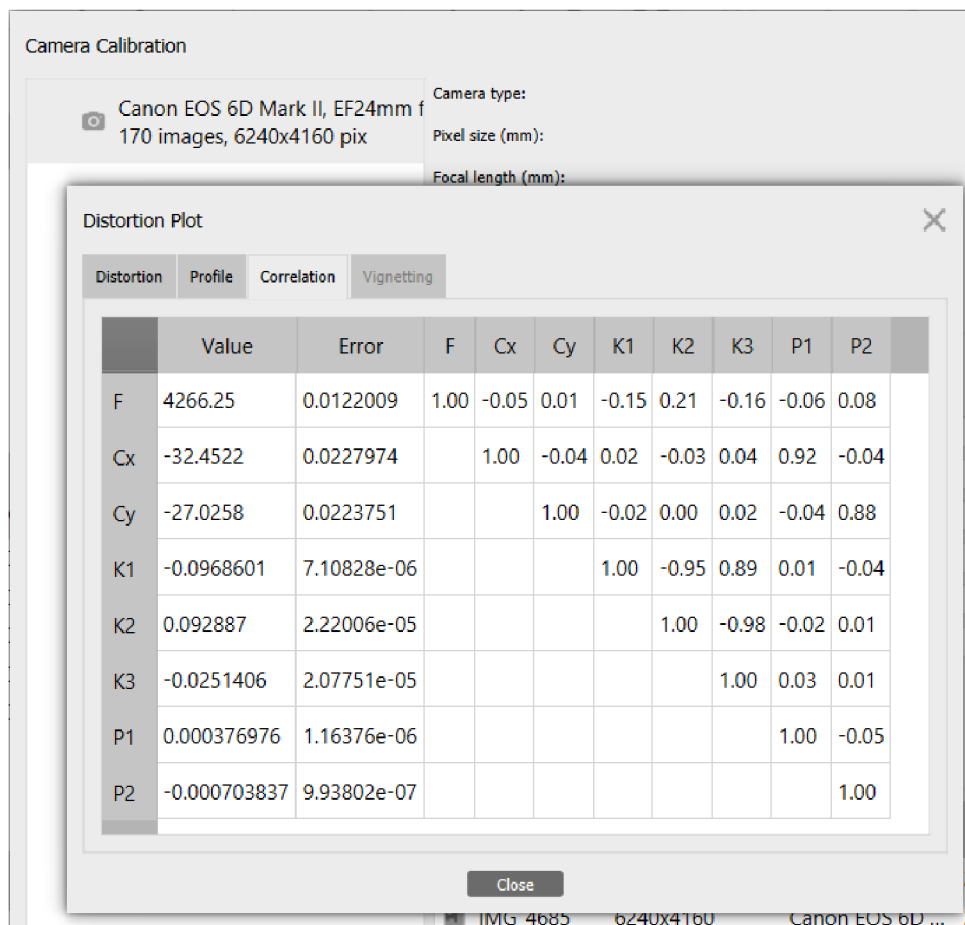
Total Error							
Control points					0.002587		0.156
Check points					0.003293		0.182

Obr. 10 Ukázka záložky *Reference*.

Pro dosažení požadované přesnosti se provede opět filtrace mračna, tentokrát podle parametrů *Reconstruction uncertainty* a *Reprojection error* a vždy po promazání se přepočtou prvky vnitřní orientace. Při filtraci podle *Reconstruction uncertainty* jsou vybírány body podle nejistoty jejich rekonstrukce. Body s vysokou nejistotou vytváří šum. I když jejich odstranění výrazně neovlivňuje přesnost, je doporučeno je odmazat před generací hustého mračna bodů. Filtrování bylo prováděno postupně po malých částech a byly pozorovány hodnoty parametrů RMS reprojection error a *Max reprojection error*. U projektů Canon a Phantom by se měla hodnota maximální reprojekční chyby blížit ke 3 pixelům a RMS by neměla být větší než 0,5 pixelu. V projektu Xiaomi by měla být maximální pod 10 pixelů a RMS menší než 1 pixel. [4]

Kromě filtrování mračna je nutné také řešit parametry kamery, a to na základě jejich hodnoty, vzájemné korelace a vlivu jejich zavádění na přesnost. Hodnoty prvků vnitřní orientace, jejich chyby a korelační matici lze zjistit přes záložku *Tools* otevřením okna *Camera Calibration*. Kliknutím pravého tlačítka myši na skupinu snímků se zobrazí několik možností, vybere se možnost *Distortion Plot* a požadované hodnoty jsou na záložce *Correlation* (Obr. 11). Parametry byly zavedeny pro všechny kamery stejně. Nebyl zaváděn koeficient radiálního zkreslení K4 z důvodu vysoké korelace, koeficient K3 byl ponechán i přes jeho hodnoty korelace, protože jeho odstranění vedlo ke zhoršení přesnosti. Naopak koeficienty afinity a neortogonality B1 a B2 nebyly počítány, protože jejich použití přesnost zhoršovalo. Kalibraci kamery lze vyexportovat pro další použití v okně *Camera Calibration* na záložce *Adjusted* tlačítkem *Save*. V této fázi byly

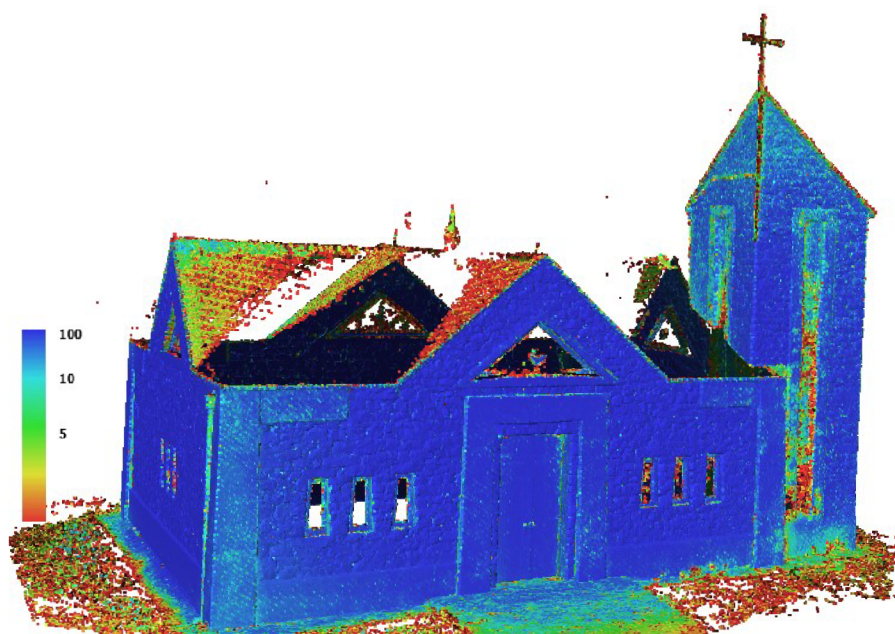
vyexportovány protokoly o zpracování na záložce *File – export – Generate Report*, tyto protokoly ze zpracování jednotlivých projektů jsou v přílohách práce. [4]



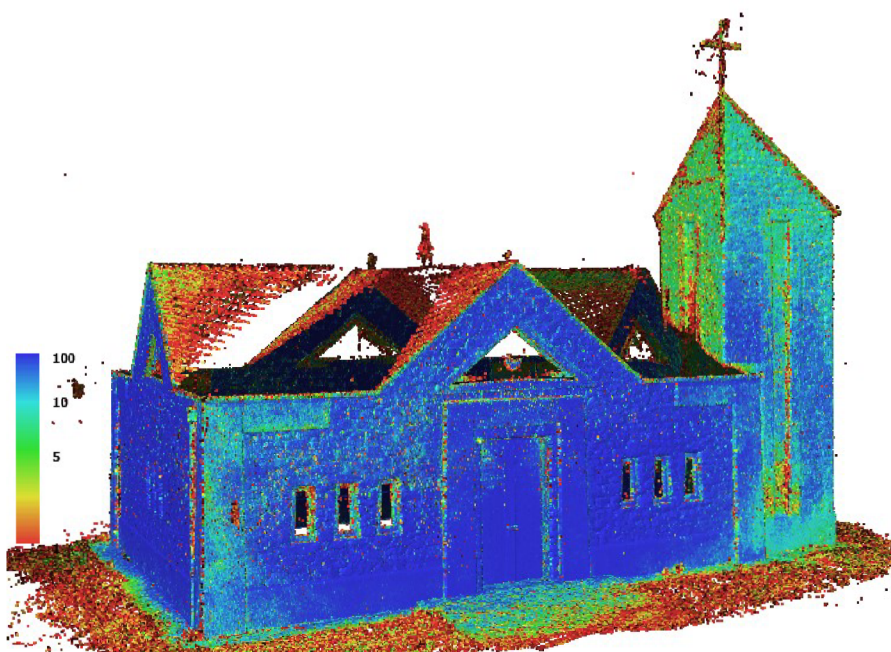
Obr. 11 Vypočtené prvky vnitřní orientace pro kameru Canon.

4.1.2 Tvorba mesh modelu

Nejprve je potřeba vygenerovat nové řídké mračno bodů s již správnými prvky vnitřní orientace, protože velké množství bodů bylo promazáno při filtrování. To se provede pomocí *Build tie points* na záložce *Tools*. Mračno je potřeba opět filtrovat, v tomto případě podle *Projection accuracy* a *Reconstruction Uncertainty*. V tuto chvíli se již kamera neoptimalizuje, aby se prvky neměnily. Před generací hustého mračna bodů se nastaví region pro generaci, aby se nepočítaly body v širokém okolí zájmového objektu, které nejsou žádoucí. Tvorba hustého mračna bodů se spustí na záložce *Workflow* pomocí *Build Point Cloud*. Zde je potřeba nastavit výpočet konfidence bodů pro následné promazávání šumu. Při mazání bodů podle hodnot konfidence by se mohlo stát, že dojde ke smazání i nechybných bodů. Proto je lepší promazávat odlehlé a šumové body ručně při režimu zobrazení podle konfidence (Obr. 12 a Obr. 13).



Obr. 12 Husté mračno projektu Canon před úpravou – zobrazení podle confidence.



Obr. 13 Husté mračno projektu Xiaomi před úpravou – zobrazení podle confidence.

Po promazání šumu následuje generace mesh modelu. Ta se spustí na záložce *Workflow* přes *Generate Mesh*. Zdrojová data pro tvorbu mesh modelu mohou být:

- navazovací body (Tie points),
- hloubkové mapy (Depth maps),
- husté mračno bodů (Point cloud).

Byla vybrána možnost tvorby z hustého mračna bodů kvůli možnosti upravit problematické části v mračnu bodů a opětovně mesh vygenerovat. Před generací mesh modelu bylo potřeba odřezat u mračna z Canonu a Xiaomi střechu a u mračna z Phantomu stěny, aby docházelo k minimálnímu překrytu. V případě věže byly ponechány některé části mračna i v oblasti stěny, jelikož docházelo k vypuklinám z důvodu malého množství bodů. Takto ořezaná a očistěná mračna byla spojena pomocí nástroje *Merge Chunks* na záložce *Workflow*. Vzniklo tak jedno kompletní mračno bodů spojením stěn z projektu Canon a střechy z projektu Phantom (Obr. 14) a druhé spojením projektů Xiaomi a Phantom (Obr. 15). Pro spojení mračen je nutné mít *Chunky* s jednotlivými mračny v jednom projektu. V případě, kdy jsou snímky z jednotlivých kamer zpracovány odděleně v jiných projektech, je možné potřebný *Chunk* připojit do projektu pomocí *Append* na záložce *File*.



Obr. 14 Spojená mračna bodů Canon + Phantom.

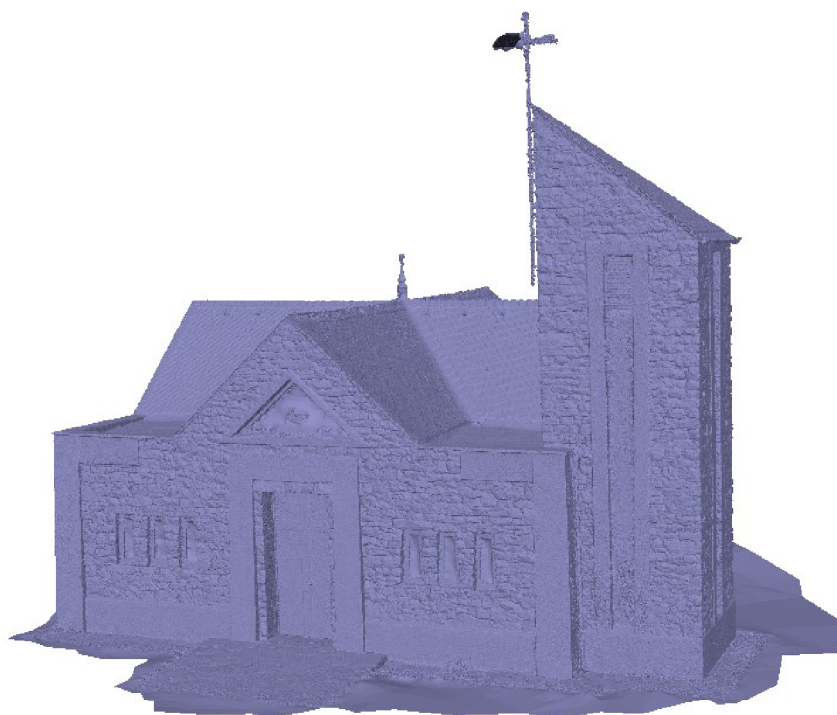


Obr. 15 Spojená mračna bodů Xiaomi + Phantom.

Po vytvoření mesh modelů se objevilo několik problematických oblastí. Modely před úpravou jsou na Obr. 16 a Obr. 17, ty byly následně upravovány dostupnými nástroji.



Obr. 16 Mesh model před úpravou (Canon).



Obr. 17 Mesh model před úpravou (Xiaomi).

4.1.3 Úprava problematických částí

Největší úpravy byly provedeny na všech oknech v obou modelech. Okna jsou ve fotogrametrii problematická kvůli jejich průhlednosti. Na obdélníkových oknech se vytvořily vydutiny, které bylo potřeba upravit do podoby rovného skla. Nejprve se musely v mračnu bodů odmazat body uprostřed oken, které vedly k tvorbě samostatných bublin, výsledek je vidět na Obr. 18 vlevo. Následně byly v mesh modelu jednotlivé dutiny promazány a byly zaceleny pomocí nástroje *Close holes* na záložce *Tools – Mesh*. Vytvořená plocha byla ještě vyhlazena pomocí nástroje *Smooth Mesh*, aby nebyly viditelné jednotlivé trojúhelníčky. Tento nástroj umožňuje vyhlazení pouze označené části modelu.

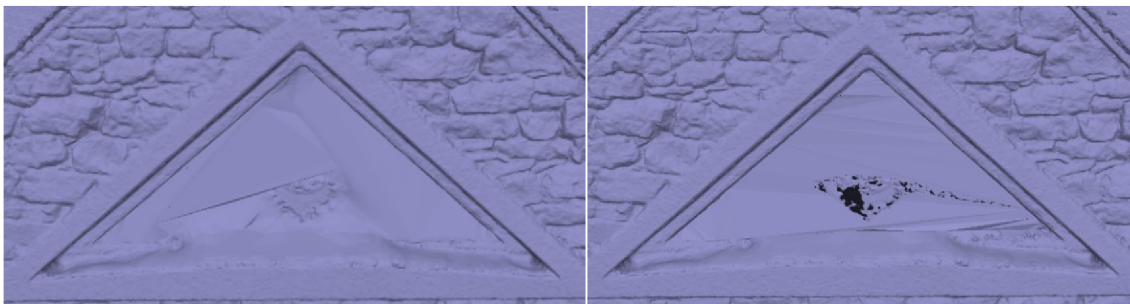


Obr. 18 Ukázka oken před úpravou (vlevo) a po jejich vyhlazení (vpravo).

Trojúhelníková okna měla navíc uprostřed holubičku (Obr. 19). Ta byla sice dobře viditelná, ale byla poměrně vystouplá od roviny okna. S cílem zachovat holubičku v geometrii bylo okno promazáváno po částech a zacelováno (Obr. 20 vlevo). Dále bylo vyzkoušeno promazání celé nerovné plochy a ponechání jen ořezané holubičky uprostřed a použití nástroje *Close holes* (Obr. 20 vpravo). Žádný z postupů však nevedl k požadovanému cíli, proto byla odstraněna celá plocha a zacelena rovnou plochou. Nakonec byla okna opět vyhlazena pomocí *Smooth mesh* (Obr. 21 vpravo). Trojúhelníkové okno na zadní stěně bylo upraveno pouze funkcí *Smooth mesh*. Nemělo totiž jako jediné holubičku a jeho nerovnosti nebyly tak výrazné.



Obr. 19 Snímek upravovaného okna.



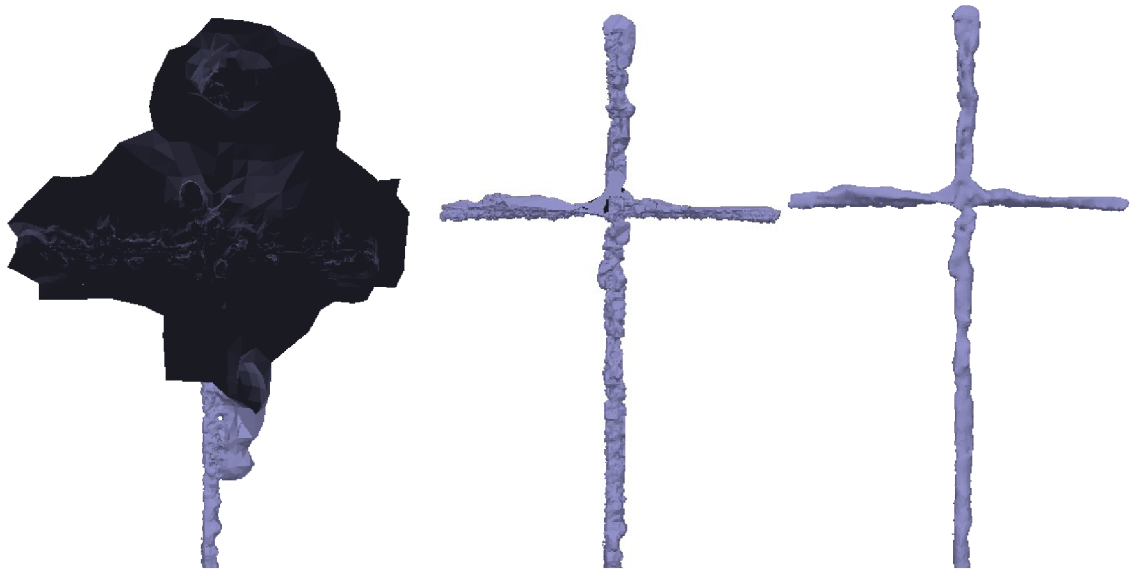
Obr. 20 Úprava pomocí postupného promazávání (vlevo) a pomocí výřezu holubičky (vpravo).



Obr. 21 Porovnání okna před úpravou (vlevo) a po vyhlazení (vpravo).

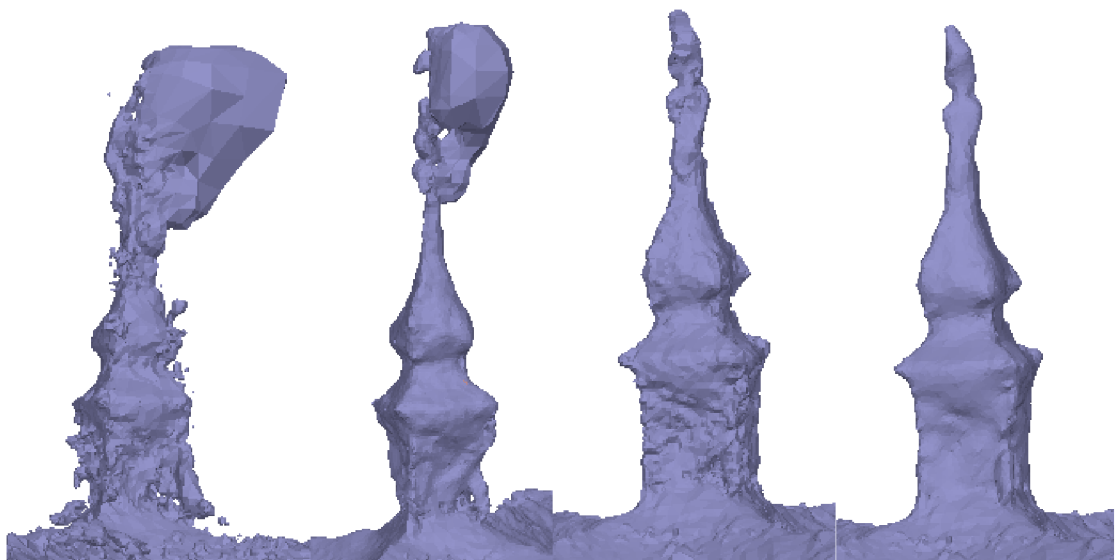
Další upravovanou částí byl kříž na věži (Obr. 22). Zde bylo důležité nesmazat příliš velké množství bodů v hustém mračně, aby nedošlo k jeho roztržení. V mesh modelu se vygenerovala velká otevřená plocha z přední strany kříže. Ta byla odstraňována po

malých částech a následně uzavírána pomocí nástroje *Close holes*. I v tomto případě byl kříž na závěr vyhlazen.



Obr. 22 Kříž před úpravou (vlevo), po úpravě (uprostřed) a vyhlazený (vpravo).

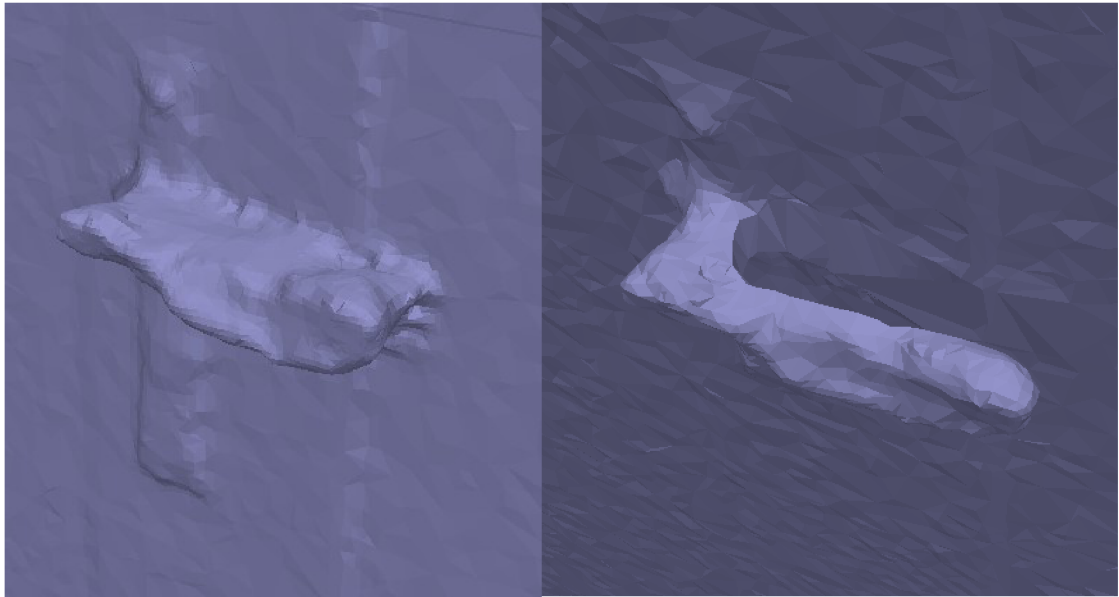
Na špičce malé věžičky na křížení hřbetů střech se vytvořila velká vypuklina a ve spodní části se objevila díra, a to i po promazání šumu v mračnu bodů. Oba problémy byly řešeny podobným způsobem jako výše uvedené. Postup úpravy je vidět na Obr. 23, kde vlevo je vzhled před promazáním šumu z hustého mračna bodů. Dále pak směrem doprava je věžička před úpravou mesh modelu, po úpravě a vpravo po vyhlazení.



Obr. 23 Postup úpravy věžičky na křížení hřbetů střechy.

Poslední ukázkou je klika, která byla spojena s dveřmi (Obr. 24). Nepomohlo zde pouhé odstranění bodů z mračna, ale opět bylo nutné použít nástroj *Close holes*. Dále byly

opravované různé výstupky, například na hřbetu střechy. Ve všech případech pomohl výše uvedený nástroj.



Obr. 24 Klika před úpravou (vlevo) a po úpravě (vpravo).

4.1.4 Texturování modelu

Texturování bylo provedeno na základě snímků. Jako zdrojová data lze kromě snímků vybrat i jiný 3D model. Nastavení parametrů pro texturování se spustí pomocí *Build Texture* přes záložku *Workflow*. Zde je možné nastavit několik parametrů, u všech bylo ponecháno výchozí nastavení. Po výpočtu textury bylo provedeno maskování. Masky byly vytvořeny nástrojem *Generate Masks* na záložce *Tools*. Zde je nutné vybrat možnost *All cameras*, aby se masky vytvořily pro všechny snímky v příslušném *Chunku*. Tyto masky jsou vypočteny na základě geometrie modelu. Je možné zamaskovat i další oblasti. Potřebné místo se nástrojem pro výběr označí a následně se přidá k masce pomocí *Add Selection*. Takto byla zamaskována mřížka v rohu za věží společně s hromosvodem, které se nepodařilo v modelech vytvořit. Mřížka i hromosvod se v textuře objevily i přesto, že byly masky pro toto místo vytvořeny na všech snímcích. Rozdíl mezi texturou před a po maskování je vidět na Obr. 25. Po vytvoření masek bylo potřeba znovu spustit texturování. Výsledné texturované 3D modely jsou na Obr. 26 a Obr. 27.



Obr. 25 Textura před maskováním (vlevo) a po maskování (vpravo).



Obr. 26 Texturovaný 3D model ze snímků z kamery Canon.



Obr. 27 Texturovaný 3D model ze snímků z kamery Xiaomi.

4.2 Testování přesnosti výsledných modelů

Testování přesnosti bylo provedeno dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo porovnání pomocí kontrolních bodů. Druhou analýzou bylo porovnání s referenčním mračnem z laserového skenování. Analýzy byly provedeny na výsledných modelech Canon + Phantom a Xiaomi + Phantom.

Analýza pomocí kontrolních bodů spočívá v porovnání rozdílů mezi souřadnicemi z terestrického měření a těmi naměřenými na výsledném modelu. Měření bylo provedeno přímo v programu Agisoft Metashape pomocí nástroje Ruler. Byly vypočteny rozdíly v jednotlivých souřadnicových složkách X, Y, Z a rozdíly v poloze P. Z rozdílů se vypočítaly směrodatné odchylky a z nich pak na základě součinitele konfidence mezní odchylky. Vybočující hodnoty jsou testovány na hladině významnosti $\alpha = 5\%$ a odlehle hodnoty pro $\alpha = 1\%$. Tato analýza vypovídá o přesnosti mesh modelů jen v diskrétních místech. [20]

Testování obou modelů bylo provedeno pomocí 13 kontrolních bodů, u každého modelu se ale jednalo o jiné. Směrodatné odchylky a kritické hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10 pro kameru Canon a v Tab. 11 pro Xiaomi. Celkové testování je přílohou této práce (Příloha č. 7). Výsledkem testování modelu vytvořeného ze snímků z kamery Canon jsou 3

vybočující rozdíly, jedná se o jednu hodnotu pro každou souřadnicovou osu. Analýza přesnosti modelu z kamery Xiaomi neukázala žádnou vybočující ani odlehlou hodnotu.

Tab. 10 Testování přesnosti pomocí kontrolních bodů – Canon.

Parametr	Y [mm]	X [mm]	Z [mm]	P [mm]
Směrodatná odchylka	2,1	1,5	1,9	2,6
Kritická hodnota ($\alpha=5\%$)	4,2	3,0	3,8	6,4
Kritická hodnota ($\alpha=1\%$)	5,2	3,8	4,8	7,7

Tab. 11 Testování přesnosti pomocí kontrolních bodů – Xiaomi.

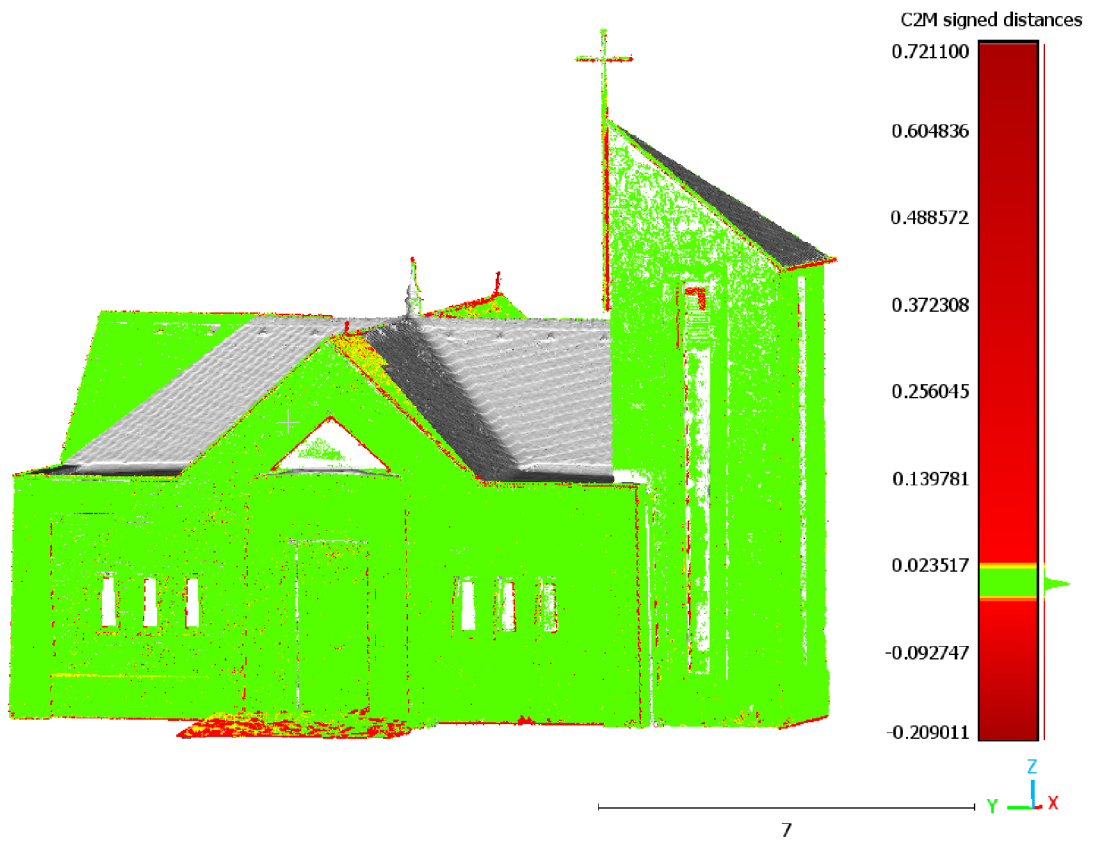
Parametr	Y [mm]	X [mm]	Z [mm]	P [mm]
Směrodatná odchylka	2,7	1,8	1,9	3,3
Kritická hodnota ($\alpha=5\%$)	5,4	3,7	3,7	8,2
Kritická hodnota ($\alpha=1\%$)	6,8	4,6	4,7	9,8

Druhý test byl založen na porovnání výsledných mesh modelů s mračenem bodů z laserového skenování. Byl proveden pomocí nástroje *Compute cloud/mesh distance* v programu CloudCompare. Takto byly vypočteny vzdálenosti jednotlivých bodů mračna od mesh modelu. V každém modelu byl vypočten jiný počet vzdáleností z důvodu rozdílného ořezání modelů, a tak i mračna bodů. Výsledky výpočtu ve formě histogramu lze vyexportovat jako *.svc soubor. Pomocí něj lze následně vypočítat směrodatnou odchylku, a tak i intervaly pro vybočující a odlehlé hodnoty. Testování proběhlo opět na hladině významnosti $\alpha = 5\%$ pro vybočující hodnoty a $\alpha = 1\%$ pro odlehlé. V modelu Canon bylo 1,38 % vybočujících vzdáleností a 1,47 % odlehlých. V případě modelu Xiaomi bylo vybočujících hodnot 1,25 % a odlehlých 1,50 %.

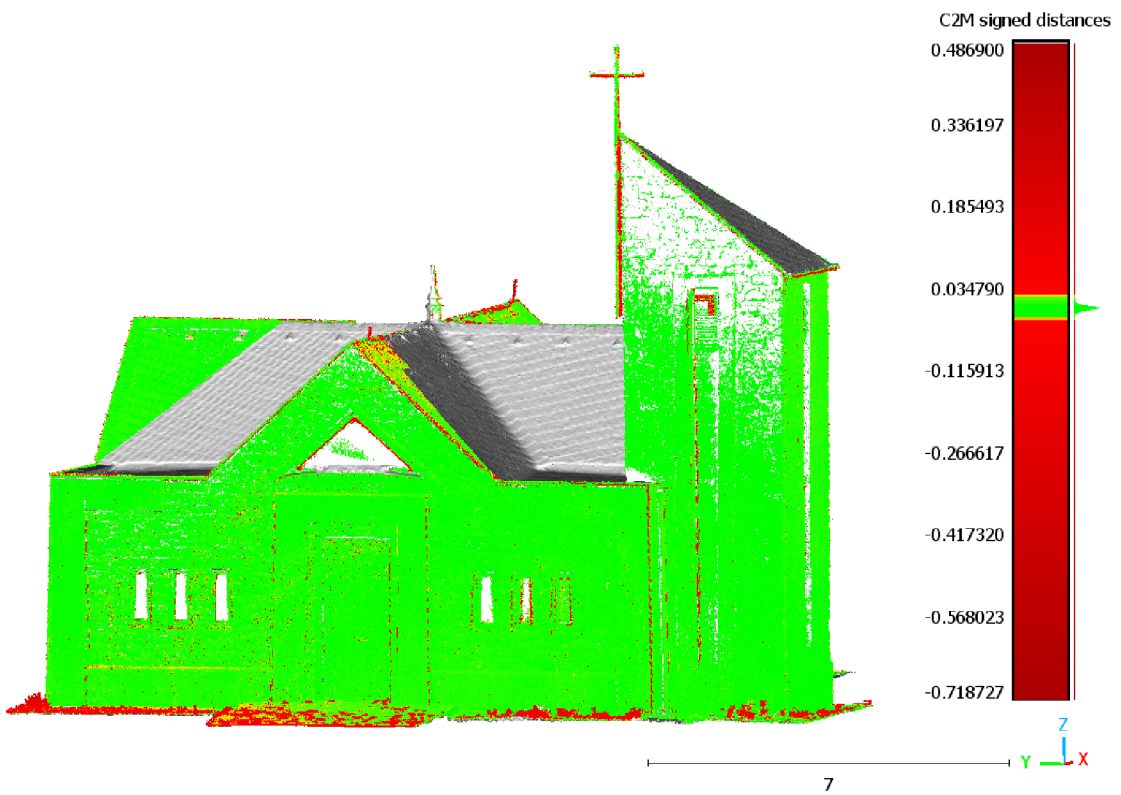
Tab. 12 Testování přesnosti pomocí referenčního mračna.

Testovaný model	Canon	Xiaomi
Celkový počet vzdáleností	52 726 549	55 228 438
Počet vybočujících	229 985	688 754
Počet odlehlých	776 284	826 130
Směrodatná odchylka [mm]	9,30	9,11
Vybočující hodnoty [%]	0,44	1,25
Odlehlé hodnoty [%]	1,47	1,50

V grafickém okně se zobrazí histogram, ve kterém lze nastavit barevná škála. Nastavení bylo provedeno podle vypočtených intervalů pro vybočující a odlehlé hodnoty. Zelená barva odpovídá hodnotám správným, pro vybočující hodnoty přechází histogram do oranžové a červené jsou hodnoty odlehlé (Obr. 28 a Obr. 29).



Obr. 28 Grafické zobrazení testování pomocí referenčního mračna pro model Canon.



Obr. 29 Grafické zobrazení testování pomocí referenčního mračna pro model Xiaomi.

4.3 Prezentace výsledného modelu

Pro prezentaci byl použit model vytvořený ze snímků z kamery Canon, doplněný snímky z kamery Phantom pro tvorbu střechy. Model je zveřejněn na internetových stránkách pomocí Sketchfabu. Jedná se o web, kde lze 3D modely prezentovat, sdílet, nakupovat a prodávat. Model lze na tuto platformu nahrát přímo z programu Agisoft Metashape *Upload data* na záložce *File*. Model je dostupný přes odkaz: <https://geodesy.fce.vutbr.cz/BP-rudice/>. [21]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vyhotovení 3D texturovaných modelů kaple svaté Barbory. Pro zpracování byly vedoucím práce poskytnuty snímky pořízené zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II, mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro a kamerou UAV DJI Phantom 3 Advance. Tyto modely byly testovány pomocí kontrolních bodů a referenčního mračna.

V úvodu práce byl zpracován teoretický základ fotogrammetrie. Obsahuje popis několika vybraných pojmů z fotogrammetrie, týkajících se následně zpracování modelů. Poté byly popsány čtyři vybrané studie, které se věnovaly fotogrammetrickým softwarům. Na základě získaných informací byla sestavena tabulka porovnávající vybrané softwary.

Dále byl popsán zájmový objekt a použité přístrojové vybavení pro sběr dat. Následoval popis samotného zpracování. Byly vytvořeny dva mesh modely, jeden ze snímků pořízených kamerou Canon EOS 6D Mark II a druhý ze snímků mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro. U obou byly využity snímky z kamery UAV DJI Phantom 3 Advance pro tvorbu střechy.

Na závěr bylo provedeno testování přesnosti výsledných modelů. Analýza na základě porovnání souřadnicových rozdílů na kontrolních bodech byla provedena pomocí 13 kontrolních bodů pro každý model. Byly vypočteny střední chyby pro jednotlivé souřadnicové chyby a polohová střední chyba. U zrcadlové kamery bylo dosaženo střední chyby v ose Y 2,1 mm, v ose X 1,5 mm, v ose Z 1,9 mm a v poloze 2,6 mm. U mobilního telefonu bylo dosaženo střední chyby v ose Y 2,7 mm, v ose X 1,8 mm, v ose Z 1,9 mm a v poloze 3,3 mm. Byly stanoveny kritické hodnoty pro vybočující a odlehlé hodnoty. U zrcadlové kamery byly odhaleny tři vybočující hodnoty a u mobilního telefonu nebyla žádná vybočující ani odlehlá hodnota. Poté bylo provedeno testování pomocí referenčního mračna bodů. Tento test odhalil 0,44 % vybočujících hodnot a 1,47 % odlehlých pro zrcadlovou kameru a 1,25 % vybočujících a 1,50 % odlehlých pro mobilní telefon.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LUHMANN, T. et al., 2019. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging [online]. 3rd edition. ISBN 9783110607253. Dostupné z: doi:10.1515/9783110607253
2. HANZL, Vlastimil. *Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie*. Online. 2006. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5001906-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-fakulta-stavebni-vlastimil-hanzl-fotogrammetrie-modul-01-teoreticke-zaklady-fotogrammetrie.html>. [cit. 2024-05-24].
3. PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie I*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.
4. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.1*. Online. 2024. Dostupné také z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_1_en.pdf.
5. 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
6. QURESHI, A. H.; ALALOUL, W. S.; MURTIYOSO, A.; SAAD, S. a MANZOOR, B. COMPARISON OF PHOTOGRAMMETRY TOOLS CONSIDERING REBAR PROGRESS RECOGNITION. Online. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Gottingen: Copernicus, 2022, s. 141-146. ISSN 1682-1750. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-141-2022>. [cit. 2024-05-24].
7. *Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage*. 2021. Dostupné také z: https://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2021_117.pdf.
8. KINGSLAND, Kaitlyn. Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. Online. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2020, roč. 18, s. e00157. ISSN 2212-0548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>. [cit. 2024-05-24].
9. GAGLILOLO, S.; AUSONIO, E.; FEDERICI, B.; FERRANDO, I.; PASSONI, D. et al. 3D cultural heritage documentation: A comparison between different photogrammetric software and their products. Online. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2018, roč. 42, č. 2, s. 347-354. ISSN 1682-1750. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-347-2018>. [cit. 2024-05-24].
10. CHARVÁT, Jan. FOTO: Cihly, kámen a zvon po papeži. Rudická kaple slaví dvacet let. Online. *Blanenský deník.cz*. 2022. Dostupné z: https://blanensky.denik.cz/zpravy_region/foto-cihly-kamen-a-zvon-po-papezi-rudicka-kaple-slavi-dvacet-let-20220923.html. [cit. 2024-05-24].
11. *Církev římskokatolická*. Online. OBEC Rudice. Dostupné z: <https://www.rudice.cz/kultura/cirkev-rimskokatolicka>. [cit. 2024-05-24].

12. *Trimble R8s GNSS přijímač*. Online. In: GEOTRONICS Praha. 2015. Dostupné z: https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2016/05/022516-130-CZE_TrimbleR8s_DS_A4_0415_LR_Geotronics.pdf. [cit. 2024-05-24].
13. *TRIMBLE S8 TOTAL STATION*. Online. In: TRIMBLE. Dostupné z: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf. [cit. 2024-05-24].
14. *TRIMBLE S8 High Precision*. Online. METRICUS GEODEESIA. Dostupné z: <http://www.metricus.ee/instrumendid.html>. [cit. 2024-05-24].
15. *FARO® Laser Scanner Focus3D X 130*. Online. In: Metrologie. 2022. Dostupné z: https://metrologie.cz/files/ckeditor/5_Produkty/5-10_FARO/6-x130/FARO_Laser_Scanner_Focus3D_X_130.pdf. [cit. 2024-05-24].
16. *Laser Scanner - Products*. Online. 3D TARGET. 2015. Dostupné z: <https://www.3dtarget.it/eu/en/laser-scanner-eng/laser-scanner-products/terrestrial/demo-pre-owned/faro-x130-detail.html>. [cit. 2024-05-24].
17. *CANON EOS 6D MARK II*. Online. CANON. 2024. Dostupné z: <https://www.canon.cz/cameras/eos-6d-mark-ii/>. [cit. 2024-05-08].
18. *Xiaomi Mi 10T Pro 8GB/256GB*. Online. Heureka!. Dostupné z: https://mobilni-telefony.heureka.cz/xiaomi-mi-10t-pro-8gb-256gb/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwxeyxBhC7ARIsAC7dS39Hb8M-NC_JfDtL-yQ2lkscQBDACHEvGqx4St0CuyYCHVRU4TaA8EaAvUgEALw_wcB#specifikace/. [cit. 2024-05-24].
19. *Dron DJI Phantom 3 Advanced*. Online. DRON PRO. C2016-2024. Dostupné z: <https://dronpro.cz/dji-phantom-3-advanced>. [cit. 2024-05-24].
20. KALVODA, Petr; NOSEK, Jakub; KURUC, Michal; VOLARIK, Tomas a KALVODOVA, Petra. Accuracy Evaluation and Comparison of Mobile Laser Scanning and Mobile Photogrammetry Data. Online. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, roč. 609, č. 1, s. 12091. ISSN 1755-1307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012091>. [cit. 2024-05-24].
21. *Sketchfab*. Online. C2024. Dostupné z: <https://sketchfab.com/>. [cit. 2024-05-24].

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kaple sv. Barbory v Rudicích	17
Obr. 2 GNSS přijímač Trimble R8s. [12]	18
Obr. 3 Totální stanice Trimble S8 HP. [14]	19
Obr. 4 Laserový skener Faro Focus 3D X130. [16]	19
Obr. 5 zrcadlová kamera Canon EOS 6D Mark II [17].	20
Obr. 6 mobilní telefon Xiaomi MI 10T Pro [18].	21
Obr. 7 UAV DJI Phantom 3 Advance [19].	21
Obr. 8 Ukázka nastavení u projektu Xiaomi.	23
Obr. 9 Filtrované <i>Tie Points</i> projektů Canon (vlevo) a Xiaomi (vpravo).	24
Obr. 10 Ukázka záložky <i>Reference</i>	25
Obr. 11 Vypočtené prvky vnitřní orientace pro kameru Canon.	26
Obr. 12 Husté mračno projektu Canon před úpravou – zobrazení podle konfidence.	27
Obr. 13 Husté mračno projektu Xiaomi před úpravou – zobrazení podle konfidence.	27
Obr. 14 Spojená mračna bodů Canon + Phantom.	28
Obr. 15 Spojená mračna bodů Xiaomi + Phantom.	29
Obr. 16 Mesh model před úpravou (Canon).	29
Obr. 17 Mesh model před úpravou (Xiaomi).	30
Obr. 18 Ukázka oken před úpravou (vlevo) a po jejich vyhlazení (vpravo).	30
Obr. 19 Snímek upravovaného okna.	31
Obr. 20 Úprava pomocí postupného promazávání (vlevo) a pomocí výřezu holubičky (vpravo).	31
Obr. 21 Porovnání okna před úpravou (vlevo) a po vyhlazení (vpravo).	31
Obr. 22 Kříž před úpravou (vlevo), po úpravě (uprostřed) a vyhlazený (vpravo).	32
Obr. 23 Postup úpravy věžičky na křížení hřbetů střechy.	32
Obr. 24 Klika před úpravou (vlevo) a po úpravě (vpravo).	33
Obr. 25 Textura před maskováním (vlevo) a po maskování (vpravo).	34
Obr. 26 Texturovaný 3D model ze snímků z kamery Canon.	34
Obr. 27 Texturovaný 3D model ze snímků z kamery Xiaomi.	35
Obr. 28 Grafické zobrazení testování pomocí referenčního mračna pro model Canon.	37
Obr. 29 Grafické zobrazení testování pomocí referenčního mračna pro model Xiaomi.	37

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Výsledky hodnocení parametrů. [6].....	13
Tab. 2 Porovnání vybraných softwarů. [6, 9].....	15
Tab. 3 Parametry GNSS přijímače Trimble R8s. [12]	18
Tab. 4 Parametry totální stanice Trimble S8 HP. [13]	18
Tab. 5 Parametry Laserového skeneru Faro Focus 3D X130. [15].....	19
Tab. 6 Parametry kamery Canon EOS 6D Mark II [17].	20
Tab. 7 Parametry kamery Xiaomi Mi 10T Pro [18].....	20
Tab. 8 Parametry kamery DJI Phantom 3 Advance [19].	21
Tab. 9 Kvalita snímků z jednotlivých kamer.	22
Tab. 10 Testování přesnosti pomocí kontrolních bodů – Canon.....	36
Tab. 11 Testování přesnosti pomocí kontrolních bodů – Xiaomi.....	36
Tab. 12 Testování přesnosti pomocí referenčního mračna.	36

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 Topografie vlícovacích a kontrolních bodů
- Příloha č.2 Processing report Canon Agisoft Metashape Professional
- Příloha č.3 Processing report Xiaomi Agisoft Metashape Professional
- Příloha č.4 Processing report Phantom Agisoft Metashape Professional
- Příloha č.5 Mesh model objektu Canon + Phantom (jen na USB)
- Příloha č.6 Mesh model objektu Xiaomi + Phantom (jen na USB)
- Příloha č.7 Analýza přesnosti výsledných mesh modelů