



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

3D MODEL VYBRANÉHO OBJEKTU

3D MODEL OF THE SELECTED OBJECT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KALVODA, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0532A260001 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Milan Veselý
Název	3D model vybraného objektu
Vedoucí práce	Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON, Stephen KYLE a Jan BOEHM, 2019. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* [online]. 3rd revised and expanded edition. Berlin: De Gruyter [cit. 2021-10-27]. ISBN 9783110607253. Dostupné z: doi:10.1515/9783110607253

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

ONIGA, Valeria-Ersilia, Norbert PFEIFER a Ana-Maria LOGHIN, 2018. 3D Calibration Test-Field for Digital Cameras Mounted on Unmanned Aerial Systems (UAS). *Remote Sensing* [online]. **10** (12) [cit. 2021-10-27]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10122017

YILMAZTURK, Ferruh a Ali Ersin GURBAK, 2019. Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Information. *International Journal of Optics* [online]. **2019**, 1-10 [cit. 2021-02-10]. ISSN 1687-9384. Dostupné z: doi:10.1155/2019/8561380

COSTANZO, Antonio, Sergio FALCONE, Rosalbino BISIGNANO, Michele STRAFACE, Giuseppe RITACCO, Carmelo La PIANA, Massimo MUSACCHIO a Francesco CALIMERI, 2018. A Smartphone Application for Supporting the Data Collection and Analysis of the Cultural Heritage Damaged during Natural Disasters. *Proceedings* [online]. **2** (3) [cit. 2021-02-10]. ISSN 2504-3900. Dostupné z: doi:10.3390/ecsa-4-04930

BARBERO-GARCÍA, Inés, José Luis LERMA, Ángel MARQUÉS-MATEU a Pablo MIRANDA, 2017. Low-Cost Smartphone-Based Photogrammetry for the Analysis of Cranial Deformation in Infants. *World Neurosurgery* [online]. **102**, 545-554 [cit. 2021-02-10]. ISSN 18788750. 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.

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*. 2nd edition.

Dokumentace k použitému software.

Odborné články v národních i zahraničních časopisech.

VÚGTK. Odborný slovník. Vutk.cz [online]. © 2005-2012 [cit. 2012-1-16]. Dostupné z: <http://www.slovníkczk.eu/>

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

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Vypracujte rešerši metod fotogrammetrické tvorby 3D modelů objektů včetně softwarů pro vyhodnocení. Pořídte fotogrammetrické snímky exteriéru Kaple svatého Jana Nepomuckého (Guntramovice) digitální zrcadlovkou a low-cost kamerou tak, aby bylo umožněno automatizované zpracování. Vyhotovte georeferencované 3D modely. Analyzujte dosaženou přesnost pomocí kontrolních bodů a referenčního mračna TLS včetně posouzení relativní četnosti vybočujících a odlehklých měření. Porovnejte a komentujte dosažené výsledky obou typů kamer. Vyhotovte vhodné prezentace výsledných modelů.

Pro zajištění další využitelnosti výsledků spolupracujte se spoluřešiteli projektu FAST-S-21-7484.

Výsledné modely a meziprodukty vzniklé při řešení zadání odevzdejte v míře a formě, která umožní posoudit geometrickou a polohovou správnost a kvalitu výsledků práce.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Milan Veselý *3D model vybraného objektu*. Brno, 2022. 58 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Petr Kalvoda, Ph.D.

ABSTRAKT

Cílem diplomová práce bylo posoudit přesnost fotogrammetrických výsledků ze snímků pořízených nízkonákladovou kamerou mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro a profesionální digitální zrcadlovou kamerou Canon EOS 6D Mark II s 24 mm objektivem s pevným ohniskem. Jako objekt pro pořízení snímků byla vybrána kaple sv. Jana Nepomuckého poblíž Guntramovic. Na kapli bylo zaměřeno a naskenováno 49 vlícovacích a kontrolních bodů. Blokové vyrovnání paprskových svazků a tvorba 3D mesh modelů byla realizována v programu Bentley ContextCapture. Statisticky byly testovány směrodatné odchylky všech tří os (X, Y, Z) a polohová směrodatná odchylka na kontrolních bodech a odchylky vůči referenčnímu mračnu bodů pořízeného pozemním laserovým skenerem. Z výsledků vyplývá, že při správně zvoleném způsobu snímkování a způsobu zpracování lze dosáhnout srovnatelných výsledků i s využitím nízkonákladové kamery mobilního telefonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Blízká fotogrammetrie, nízkonákladová kamera, mobilní telefon, ContextCaptur, Agisoft Metashape, 3D model, kaple

ABSTRACT

The aim of the thesis was to assess the accuracy of photogrammetric results from images taken with a low-cost Xiaomi Mi 10T Pro camera and a professional digital SLR camera Canon EOS 6D Mark II with a 24 mm fixed lens. The chapel of St. John of Nepomuk near Guntramovice was chosen as the subject for the images. Forty-nine insertion and control points were targeted and scanned at the chapel. Block and beam alignment and creation of 3D mesh models was performed in Bentley ContextCapture software. The standard deviations of all three axes (X, Y, Z) and positional standard deviation on the control points and deviations relative to a reference point cloud acquired with a ground-based laser scanner were statistically tested. The results show that, with the right imaging and processing methods, comparable results can be achieved using a low-cost camera.

KEYWORDS

Close-range photogrammetry, low-cost camera, mobile phone, ContextCaptur, Agisoft Metashape, 3D model, chapel

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *3D model vybraného objektu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 20. 5. 2022

Bc. Milan Veselý
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *3D model vybraného objektu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2022

Bc. Milan Veselý
autor práce

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kalvodovi, Ph.D. za poskytnuté rady, uskutečněné konzultace v průběhu psaní této diplomové práce a za výpomoc při terénních pracích. Rovněž mé díky za pomoc v terénu patří Bc. Jaromíru Prokopovi. Poslední poděkování patří Ing. Jakobovi Noskovi za technickou pomoc při publikování modelů.

Obsah

Úvod	10
1 Současný stav	11
2 Dělení fotogrammetrie	12
3 Příklady využití fotogrammetrie nízkonákladovými kamerami	12
4 Použité fotogrammetrické metody	13
4.1 Centrální projekce	13
4.2 Průřezová fotogrammetrie	14
4.3 Přesnost blízké fotogrammetrie	15
5 Rešerše fotogrammetrických softwarů	16
6 Zájmový objekt	19
7 Použité přístroje	20
8 Zásady pořizování snímků	24
9 Nastavení kamer	26
9.1 Hloubka ostrosti	26
9.2 Zaostření	26
9.3 Expoziční čas	28
9.4 ISO	29
9.5 Vyvážení bílé	29
10 Terénní práce	30
10.1 Pořizování snímků	30
10.2 Terestrické měření	30
10.3 Laserové skenování	31
11 Kancelářské práce	32
11.1 Zpracování dat z totální stanice	32
11.2 Zpracování fotogrammetrických dat	32
11.3 Editace 3D mesh modelu	35
11.4 Prekalibrace mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro	37
11.4.1 Zpracování snímků pro kalibraci kamery	39
11.4.2 Porovnání výsledků	43
11.5 Zpracování laserového skenování	43
11.6 Práce s 3D mesh modelem	44
11.7 Prezentace 3D mesh modelu	45
12 Dosažené výsledky	46
Závěr	50

Úvod

Fotogrammetrie je progresivní rychle se rozvíjející obor nacházející čím dál tím větší možnosti uplatnění. Vysoká pořizovací cena měřických kamer zabraňuje velkému množství subjektů vstoupit do tohoto vědecko-technického oboru. Naštěstí fotoaparáty chytrých mobilních telefonů za posledních 10 let učinili takový pokrok, že se po stránce technické vybavenosti dokážou vyrovnat, a v některých parametrech dokonce i překonat špičkové digitální kamery. Chytré mobilní telefony mají hlavní výhodu ve výrazně nižší pořizovací ceně, ale také v menších rozměrech zařízení a v jednodušší obsluze při pořizování snímků. Papírový předpoklad stejné kvality zaznamenávání a rekonstrukce reálného světa se ovšem nemusí slučovat se skutečností, a proto byla vypracována diplomová práce na toto téma, aby potvrdila, nebo vyvrátila tento předpoklad.

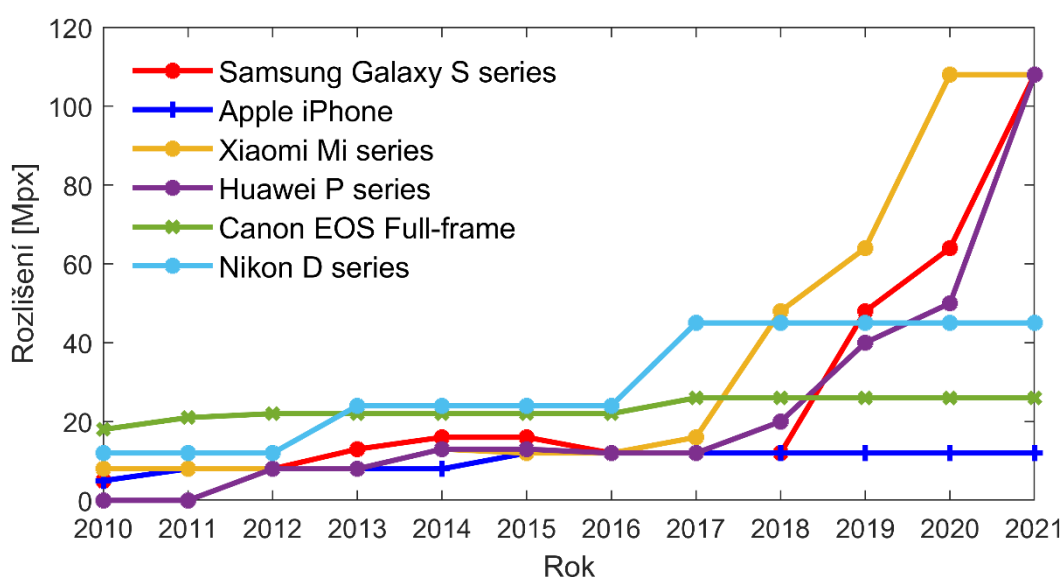
Tato diplomová práce je zaměřena na zpracování snímků pořízených profesionální digitální zrcadlovou kamerou a chytrým mobilním telefonem s následným porovnáním dosažených výsledků z obou zařízení. V první části jsou rozebrány teoretické základy týkající se diplomové práce. Byla provedena rešerše softwarů a fotogrammetrických metod s odkazem na vědecké publikace. Dále byl popsán zájmový objekt, použité přístrojové vybavení, metody pořizování snímků a způsob nastavení kamery. V druhé části je popsána už samotná praktická část diplomové práce. Je zde rozebrán postup získávání dat v terénu. Kancelářské práce obsahují metody, kterými byly získány souřadnice vlíčovacích bodů, které sloužily ke georeferencování relativních modelů. Byly vyprodukovány dva 3D mesh modely. Byla uskutečněna prekalibrace kamery mobilního telefonu. Závěrem tato diplomová práce posuzuje dosažené výsledky 3D mesh modelů, a to jak mezi modely navzájem, tak vůči referenčnímu mračnu bodů pořízeného pozemním laserovým skenerem. Závěrem práce definuje celkové porovnání těchto dvou zařízení, jež byly využity. Porovnává jak výpočtem doložené výsledky, tak srovnání z pohledu praktičnosti.

1 Současný stav

Programy, které jsou schopny vytvářet 3D modely jsou založeny na algoritmech Structure from Motion (SfM, struktura z pohybu) a Multi view Stereo (MVS). Díky těmto algoritmům je možno získat mračno bodů o vysoké hustotě. Tyto programy vyžadují snímky s vysokou mírou překrytí.

Programy pro tento účel vyvíjejí stále větší tlak na digitální snímky pořízené low-cost snímači. Nízkonákladové kamery mají nižší spolehlivost prvků vnitřní orientace, než mají profesionální kamery, a to díky nižší geometrické stabilitě. Vývoj nízkonákladových kamer za poslední roky vykazuje markantní pokroky. Na trhu je několik low-cost kamer, které mohou teoreticky být schopné konkurovat profesionálním kamerám.

Při výběru nízkonákladové kamery je důležité se zaměřit na řadu kritérií, a to na vysoké rozlišení, kvalitu optiky, možnosti pokročilého nastavení fotoaparátu a fixní ohniskovou vzdálenost bez optického zoomu, který zhoršuje kvalitu pořízeného snímku. Tyto podmínky splňují novější řady chytrých telefonů, u kterých se kvalita pořizování snímků v posledních letech výrazně zvýšila.



Obrázek č. 1 Vývoj rozlišení senzorů v čase (Kalvoda, 2021)

V grafu lze vidět průběžný růst rozlišení klasických kamer, zatímco nárůst rozlišení u kamer mobilních telefonů má kvaziexponenciální trend, tudíž vzniká prostor pro porovnání profesionální kamery s mobilním telefonem, který má vyšší rozlišení. Je nutné dbát na správný způsob a přesnost vlíčování, kalibrace kamer, geometrickou přesnost a typ referenčních 3D dat pro korektní analýzu geometrické přesnosti. Je nutné provádět komplexní statistické

analýzy včetně testování relativní četnosti výskytu vybočujících měření a odlehlých hodnot. (Kalvoda, 2021)

2 Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie jako obor se v průběhu let rozdělovala na různé typy, a to podle metod jakými byly snímky pořizovány i podle toho, jak tyto snímky byly vyhodnocovány. Samotné dělení se lišilo podle koutů světa. Pro nás se klasická evropská fotogrammetrie rozdělovala na pozemní a leteckou, jednalo se o rozdílné postupy pořizování a zpracování snímků. Toto rozdělení ztratilo postupem času svůj význam, jelikož se všechny typy fotogrammetrie počítaly obdobnou technologií a často i na stejném zařízení. V posledních letech se ovšem tato situace změnila s vývojem digitálních kamer, které poskytují vysokou kvalitu snímků. Tato situace zapříčinila přibývání pozemních aplikací. V současné době dělíme fotogrammetrii podle následujících kritérií:

- poloha stanoviště – pozemní, blízká, letecká, družicová
- počet a konfigurace vyhodnocovaných snímků – jednosnímková, vícesnímková
- technologický způsob zpracování – analogové, analytické, digitální
- typy výstupů – grafické, číselné (Pavelka, 2009)

Podle tohoto rozdělení se tato diplomová práce zabývá řešením pozemní, vícesnímkové, digitální fotogrammetrie s grafickým výstupem, jejíž snímky byly pořízeny kamerou mobilního telefonu a digitální zrcadlovou kamerou.

3 Příklady využití fotogrammetrie nízkonákladovými kamerami

Kamery, kterými jsou digitální zrcadlové kamery firem jako např. Canon, Nikon, Sony atd., nebo nízkonákladové kamery jimiž disponují chytré telefony značek Xiaomi, Apple, Samsung atd. jsou zajímavým nástrojem pro aplikaci blízké fotogrammetrie. Těchto zařízení bylo v této diplomové práci využito pro tvorbu 3D mesh modelu kaple, protože tato zařízení v současné době disponují takovými rozlišeními, že je možné s nimi dosáhnout přesnosti bodových mračen na úrovni milimetrů.

V tomto vědeckém článku se autoři zabývali testováním přesnosti pěti chytrých telefonů a jedné digitální zrcadlové kamery na testovacím poli o známých souřadnicích. Nejlepších výsledků dosahoval mobilní telefon Samsung Galaxy S4, který měl rozlišení 13 Mpx.

Tímto telefonem byl následně nasnímkován historický kruhový objekt. Autoři uvádí jako hlavní faktory ovlivňující přesnost rozlišení kamery, velikost pixelu a použití adekvátního zpracovatelského programu. Tato studie se zaměřovala na zařízení s výrazně nižším rozlišením, než jsou k dispozici dnes, a než byly použity v této diplomové práci. (Yilmazturk, 2019)

Při průzkumu jeskyní pro speleologické účely se využívají laserové skenery a profesionální měřické kamery. Jejich použitím lze získat za krátký časový úsek přesný trojrozměrný model jeskynních prostor. Jejich nevýhodou je ovšem vysoká pořizovací cena, náročné plánování průzkumu pro získání dat, vyžadují určité zkušenosti měřiče a ve stísněných prostorách jeskyní je jejich použití nekomfortní. Tato práce se proto zaměřuje na využití chytrého mobilního telefonu pro blízké snímkování jeskynních prostor pro následné zpracování do 3D modelu. Sada obrazových dat byla zpracována metodou SfM pro generování hustého mráčka bodů. Dosažené výsledky byly porovnány s referenčním hustým mráčnem bodů získaných z laserového skeneru a ze snímků pořízených měřickou kamerou. Testování prokázalo dobrou výkonnost chytrého telefonu z hlediska geometrické přesnosti, potřebného času pro pořízení snímků, zpracování a použitelnosti pro tento účel. (Dabove, 2019)

V rámci této studie bylo třemi chytrými mobilními telefony nasnímkováno skalnaté pobřeží. Byly porovnávány metody lineárního a vějířovitého pořizování snímků v různých vzdálenostech od snímaného objektu. Uspokojivých rekonstrukcí s průměrnou chybou pod 5 cm skalní stěny bylo dosaženo pomocí všech testovaných telefonů. Nejlepších výsledků bylo dosaženo za použití vějířovitého pořizování snímků ve vzdálenosti 20 m od skalní stěny. Z výsledků této studie lze soudit, že pro snímání pobřeží jsou lepší snímky pod velkým úhlem, což může omezit použití metody na určitých lokalitách. (Jaud, 2019)

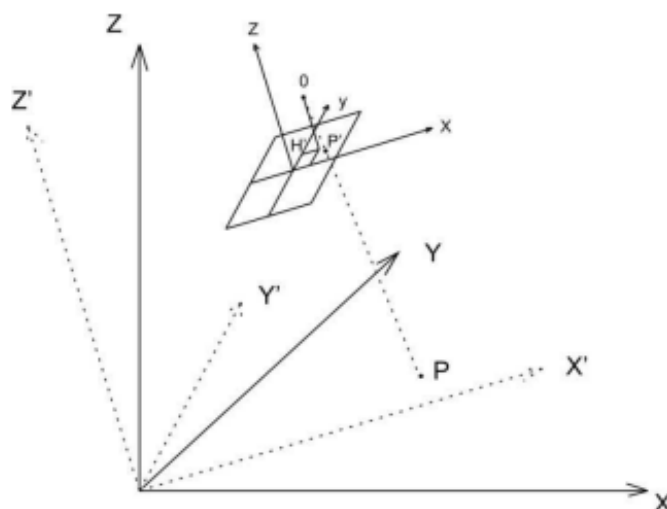
4 Použité fotogrammetrické metody

V této kapitole jsou rozebrány teoretické základy fotogrammetrie jako vědního oboru a fotogrammetrických metod využitých v této diplomové práci.

4.1 Centrální projekce

Snímky sloužící pro fotogrammetrické účely jsou považovány za centrální projekci prostorových objektů do 2D roviny snímače kamery. Vztah mezi snímkovými (x, y, z) a objektovými souřadnicemi bodu (X, Y, Z) vyjadřuje podmínka kolinearity. Podmínka

kolinearity definuje, že bod na objektu, projekční centrum a bod na snímku, který odpovídá bodu na objektu, leží na jedné společné přímce. Tento vztah je viditelný na obrázku č.2. (Hanzl, 2001)



Obrázek č. 2 Znáznornění centrální projekce v prostoru

Projekční centrum ve snímkovém souřadnicovém systému je definováno prvky vnitřní orientace (x_0, y_0, c). Poloha a pootočení kamery v objektovém souřadnicovém systému jsou zase definovány prvky vnější orientace ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$). Prvky vnější orientace představují pevnou transformaci z 3D objektového souřadnicového systému do 3D souřadnicového systému kamery. Prvky vnitřní orientace představují projektivní transformaci z 3D souřadnicového systému kamery na 2D souřadnice obrazu. Pomocí snímkových souřadnic a prvků vnitřní orientace je možné rekonstruovat paprsek vycházející z projekčního centra zpět do 3D scény a skrze prvky vnější orientace tento paprsek orientovat v objektovém souřadnicovém systému. Tímto způsobem byl získán směr, ne však délka k bodu ve 3D scéně, ze kterého paprsek přišel. Pro získání vzdáleností, a tedy jednoznačné řešení 3D rekonstrukce je zapotřebí více než jedna pozice kamery. (Hanzl, 2001)

4.2 Průseková fotogrammetrie

Jedná se o geodetickou metodu protínání vpřed řešenou pomocí snímků, jejichž osy záběru svírají konvergentní úhel. Princip je založen na základních fotogrammetrických rovnicích (4.1, 4.2).

$$X - X_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x-x_0)+r_{12}(y-y_0)+r_{13}c}{r_{13}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}c}, \quad (4.1)$$

$$Y - Y_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x-x_0)+r_{22}(y-y_0)+r_{23}c}{r_{13}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}c}. \quad (4.2)$$

Tyto rovnice dokazují, že pro každý snímkový bod existuje nekonečné množství řešení, a tedy není možné rekonstruovat prostorový bod z jednoho snímku. Je nutné pro jednoznačné řešení mít minimálně dva snímky, nebo jeden snímek a doplňkovou informaci o souřadnici Z. (Pavelka, 2009)

4.3 Přesnost blízké fotogrammetrie

Míra přesnosti určení souřadnic bodů v blízké fotogrammetrii závisí na geometrických a negeometrických faktorech.

Mezi geometrické faktory patří:

- velikost formátu a konstanty kamery, vzdálenost projekčního centra od objektu (čím větší formát a větší měřítko snímku, tím větší přesnost)
- velikost úhlu protnutí paprsku (optimální je 60° úhel protnutí)
- počet a rozmístění vlíčovacích bodů (ideální je rovnoměrné rozmístění po celém zájmovém objektu v dostatečné hustotě)
- geometrie pořizování snímků (nejlepších výsledků je dosahováno ze snímkování z více stanovisek rozmístěných po obvodu zájmového objektu)

Mezi negeometrické parametry patří:

- matematický model pro odstranění systematických chyb, hlavně pro eliminaci vlivu zkreslení objektivu
- přesnost zařízení, jímž jsou pořizovány snímky
- jednoznačnost identifikace bodů (vlíčovacích, kontrolních, atd.)
- počet snímků a jejich vzájemné překrytí

Hlavním faktorem, který ovlivňuje výslednou přesnost fotogrammetrického měření je zkreslení objektivu. Pro eliminaci tohoto faktoru se používá polynom ve tvaru (4.3, 4.4).

$$dx_0(x, y) = x(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy, \quad (4.3)$$

$$dy_0(x, y) = y(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy. \quad (4.4)$$

Koeficienty K_i a P_i popisují radiální a tangenciální zkreslení objektivu, do vyrovnání jsou zahrnuty jako doplňkové parametry. (Pavelka, 2009)

5 Rešerše fotogrammetrických softwarů

Posuzovat softwary pro zpracování fotogrammetrického měření na základě provedených studií je obtížné z důvodu rychlého vývoje těchto programů. Studie se velmi rychle stávají neaktuální, a problémy, které byly řešeny při její tvorbě už dávno mohou být vyřešené prostřednictvím updatu softwaru. Proto studie pro tuto rešerši nebyly vybrány pouze na základě obsahu, ale také na základě data publikování, aby byly co nejaktuálnější.

Softwarů pro zpracování pořízených snímků do podoby 3D modelů metodou SfM je na trhu celá řada, ať pro profesionální nebo amatérské využití. Tyto softwary se hlavně zaměřují na tvorbu ortofotomozajek a rekonstrukcí velkého, či malého rozsahu území, nebo objektů. Hlavní kritéria, která se u těchto softwarů porovnávají jsou:

- efektivita a rychlost zpracování
- kvalita výsledků
- cena zpracovatelského softwaru

Fotogrammetrie je ideální nástroj pro dokumentaci památkových objektů. Ve vědecké studii *„Comparison of documentation cultural artifacts using the 3D model in different software“* vytvářeli 3D model hrobky v Turecku. Snímky byly pořízeny digitální zrcadlovou kamerou Nikon D3100 a dronem Phantom 3 Pro. Zpracování takto získaných snímků bylo provedeno v softwarech Agisoft PhotoScan, ContextCapture a Photomodeler UAS. Po zpracování snímků do 3D modelu bylo provedeno porovnání mezi softwary pomocí kritérií. Mezi hlavní hodnocená kritéria patří velikosti rozdílů na vlíčovacích bodech, kvalita textur, hustota mračna bodů a cena. Agisoft PhotoScan je běžně používán pro jiný druh zpracování, než byl tento případ. Jeho silnou stránkou ovšem je jednoduchost a cenová dostupnost. Dále nabízí omezenou možnost editace přímo v tomto softwaru. V porovnávaných parametrech dosáhl dobrých výsledků. ContextCapture nemá sice tak jednoduchou orientaci v programu a má ze všech testovaných softwaru nejvyšší pořizovací cenu, ale vytvořil nejhustší mračno bodů a poskytl „nejhezčí“ mesh model. Photomodeler poskytuje možnost editace přímo v programu, od kterého se odvíjí výsledná přesnost modelu. Orientace v programu je obtížná a celkový proces je zdlouhavý. (Kabadayi, 2020)

Studie *„Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage“* se zaměřila na nafocení historického předmětu (aryballos) digitální zrcadlovou kamerou Nikon D3400 s 50 mm objektivem a následné zpracování těchto snímků ve třech

softwarech. Ke zpracování byly použity softwary Agisoft Metashape, ContextCapture a RealityCapture. Mezi hlavní hodnocená kritéria v této studii patří časová náročnost procesu, kvalita textur a složitost zpracování. Agisoft Metashape byl ponechán ve výchozím nastavení s výjimkou nastavení vysoké priority hustoty mračna bodů a nastavení vysoké kvality orientace snímků. Veškeré nastavení v softwaru ContextCapture bylo zvoleno jako „high“, model se nejdříve vytvořil pro úpravu geometrie a následně byl přetexturován. Orientace snímků v softwaru RealityCapture byla nastavena na „high“, bylo provedeno měření vlíčovacích bodů na snímcích. Následně byl model vyčištěn a byly vytvořeny textury 3D modelu. Agisoft Metashape byl ze všech testovaných softwaru vyhodnocen jako nejhorší. V jeho prospěch hovoří pouze pořizovací cena, která je nejnižší ze všech tří programů. Čas celého procesu byl dvakrát delší než v případě RealityCapture, a také poskytl nejméně ostré textury. ContextCapture byl hodnocen kladně z důvodu rychlého zpracování, nejostřejších textur a nižší ceny licence než u RealityCapture. Nejlépe dopadl software RealityCapture, je sice ze všech programů nejdražší, ale měl nejrychlejší čas zpracování a nabízí editace textur a geometrie modelu. (Kingsland, 2020)

Ve studii *„Benchmarking Close-range Structure from Motion 3D Reconstruction Software Under Varying Capturing Conditions“* bylo otestováno šest fotogrammetrických programů. Testovanými softwary byly Agisoft Photoscan, ContextCapture, Autodesk Memento, Pix4D, 3DF Zephyr a Reality Capture. Pro toto testování bylo vybráno šest malých předmětů o různých strukturách. Snímky byly pořizovány za různých snímacích podmínek. Cílem práce bylo objasnit, jakých výsledků dosáhnou jednotlivé programy při zpracování jednoduchých a složitějších předmětů za různých snímacích podmínek. Bylo prokázáno, že nejlepší metodou snímání je pořizování fotek z více stanovisek a z více úhlů, otočný stůl měl negativní dopad na výslednou přesnost za přítomnosti více světelných zdrojů než jednoho. U jednotlivých programů se porovnávala rychlost zpracování, přesnost modelu a odolnost softwaru vůči šumu obrazových dat. Pro porovnání geometrické přesnosti 3D modelu bylo vyhotoveno mračno bodů objektů prostřednictvím laserového skenu a v softwaru CloudCompare byla vypočtena vzdálenost mezi 3D modelem vyhotoveným z fotek jednotlivými softwary a referenčním mračnem bodů z laserového skenování. Studie rozdělila softwary do dvou skupin. Software Autodesk Memento, 3DF Zephyr a Agisoft Photoscan patří do skupiny, která je schopná vyhotovit modely všech objektů, ale nedosahují dostatečných kvalit při rekonstrukcích menších detailů a při porovnání geometrické přesnosti

mají velké rozptyly vzdáleností. Programy ContextCapture a RealityCapture patří do skupiny, která dokáže vykreslit detaily, ale jejich přesnost je velmi náchylná na kvalitu vstupujících snímků a šumu. Pix4D ve všech rekonstrukcích měl vysokou míru šumu. Softwary Pix4D, Autodesk Memento a RealityCapture vykazovali zvýšenou přítomnost šumu a poruch na hladkých texturách. Studie konstatovala, že každý program má své výhody a nevýhody a nedá se jednoznačně určit, který program je univerzálně nejlepší. Pix4D byl označen za nejhorší program ze všech testovaných, jelikož generoval nadměrné množství šumu. (Nikolov, 2016)

Na základě zprostředkovaných zkušeností ze studií uvedených výše a z pořizovacích cen dostupných na oficiálních webových stránkách jednotlivých softwaru byla sestavena tabulka č. 1.

Software	Kvalita textur	Rychlost zpracování	Orientace softwaru	v Cena Standard/Pro [Kč]
Agisoft Metashape/Photoscan	Dobrá	Pomalá	Jednoduchá	4164/81387
ContextCapture	Velmi dobrá	Rychlá	Normální	Není/78898
RealityCapture	Dobrá	Normální	Normální	Není/87225
3DF Zephyr	Normální	Normální	Nehodnoceno	Zdarma/90714
Autodesk Memento	Normální	Pomalá	Nehodnoceno	1047/7908
Pix4D	Špatná	Normální	Nehodnoceno	5024/92807
Photomodeler	Dobrá	Pomalá	Složitá	23144/69664

Tabulka č. 1 Přehled parametrů porovnávaných softwaru

Ceny jsou přepočtené z amerického dolaru na české koruny na základě aktuálního kurzu, který činil v den sestavování tabulky 23,26 Kč za jeden americký dolar. Ceny jsou vztažené k ročním licencím a jsou zaokrouhleny na celé koruny. Rozdíl mezi standardní a pro verzí bývá zpravidla to, že standardní verzi chybí určité funkce oproti pro verzi.

Pro zpracování této diplomové práce byl vybrán software Bentley ContextCapture z důvodu dobrého hodnocení ve studiích, jeho dostupnosti a osobní zkušenosti zpracovatele s tímto softwarem. ContextCapture byl použit na zpracování pořízených snímků a následné vyprodukování 3D mesh modelů. Bylo zapotřebí využít i dalšího softwaru Bentley Descartes pro editaci mesh modelu. Byl použit také software Agisoft Metashape pro výpočet vnitřních prvků orientace mobilního telefonu Xiaomi v rámci prekalibrace. Agisoft Metashape

pro prekalibraci byl upřednostněn, jelikož nabízí širší možností nastavení kalibrace kamery, než ContextCapture.

6 Zájmový objekt

Hlavními parametry pro výběr cílového objektu, jenž bude fotogrammetricky zpracován do 3D modelu, byly jeho rozměry a volné prostranství v blízkém okolí. Rozměrově byl požadován menší objekt, u něhož nebude nutná časově delší terénní práce než jeden den. Volné prostranství v dostatečné vzdálenosti od pozorovaného objektu, bylo nutné kvůli pořízení snímku bez překážející zeleně nebo jiné zástavby.

Přes internet bylo vytypováno pár kaplí, které následně byly navštíveny a porovnány mezi sebou. Obě tato kritéria nejlépe splnila kaple sv. Jana Nepomuckého v Guntramovicích (okres Opava). Tato kaple se nachází jihovýchodně od vesnice Guntramovice ve výšce 679 m. n. m., je umístěna na holé louce, kde je dostatek volného místa v jejím okolí. Kaple je společně s blízko se nacházející cestou česko-německého porozumění věnována obětem bitvy u Guntramovic. Půdorys je obdélníkového tvaru s lomeným obloukem v zadní části a s věží nad vstupem do kaple. Obvodové zdi jsou tvořeny kamennými stěnami. Kaple má dvě obdélníková okna orientovaná na výšku, usazená v delších stěnách obdélníkového obvodu a jedno kruhové okno nacházející se nad vchodovými dveřmi. (Kaple svatého Jana Nepomuckého (Guntramovice), 2001)



Obrázek č. 3 Kaple sv. Jana Nepomuckého

7 Použité přístroje

K pořízení fotografií kaple bylo školou poskytnuto toto vybavení, chytrý mobilní telefon Xiaomi Mi 10T Pro se 108 Mpx fotoaparátem a profesionální zrcadlová kamera Canon EOS 6D Mark II s 24 mm objektivem.

Název parametru	Hodnota parametru
Typ zařízení	Chytrý mobilní telefon
Rozměry snímáče	12000 x 9000 px
Rozlišení fotoaparátu	108 Mpx
Velikost pixelu	0,8 μm
Ohnisková vzdálenost	26 mm
Clona	1,7
Pořizovací cena	13000 Kč a výše
Hmotnost	220 g

Tabulka č. 2 Parametry Xiaomi Mi 10T Pro (Xiaomi Mi 10T Pro)



Obrázek č. 4 Mobilní telefon Xiaomi Mi 10T Pro (Xiaomi Mi 10T Pro)

Název parametru	Hodnota parametru
Typ zařízení	Digitální zrcadlová kamera a objektiv s pevným ohniskem
Rozměry snímáče	6240 x 4160 px
Rozlišení fotoaparátu	26,2 Mpx
Velikost pixelu	5,67 μm
Ohnisková vzdálenost	24 mm
Nejnižší clona	1,4
Pořizovací cena	70000 Kč
Hmotnost	770 g + 650 g

Tabulka č. 3 Parametry Canon EOS 6D Mark II + 24 mm objektiv (Canon EOS 6D Mark II)



Obrázek č. 5 Canon EOS 6D Mark II (Canon EOS 6D Mark II)

Pro zaměření měřické sítě a identických bodů, které byly v procesu zpracování použity na georeferencování modelů kaple, byla použita totální stanice Trimble S8.

Název parametru	Hodnota parametru
Typ zařízení	Totální stanice
Přesnost měření délek dle ISO 17123-4:	
Na hranol	1 mm + 2 ppm
Bez hranolu	2 mm + 2 ppm
Nejkratší měřitelná vzdálenost	0,2 m
Nejdelší měřitelná vzdálenost	5500 m
Přesnost měření úhlů dle DIN 18723	1"/0,3 mgon
Minimální přírůstek	0,1"/0,01 mgon

Tabulka č. 4 Parametry totální stanice Trimble S8 (Trimble S8 total station)



Obrázek č. 6 Totální stanice Trimble S8 (Trimble S8 total station)

Souřadnice stanovisek, na kterých byla postavena totální stanice pro zaměření identických bodů, a kde následně byly umístěny vlicovací koule, byly určeny metodou GNSS přijmačem GNSS – RTK Trimble R8s.

Název parametru	Hodnota parametru
Typ zařízení	GNSS přijímač
Čip	Trimble Maxwell 6 custom survey GNSS
Počet kanálů	440
Družicové signály sledované zároveň	GPS, GLONASS, SBAS, Galileo, Bei - Dou
Přesnost RTK měření:	
Délka základny ≤ 30 km	
Poloha	8 mm + 1 ppm RMS
Výška	15 mm + 1 ppm RMS
Síťové RTK	
Poloha	8 mm + 0,5 ppm RMS
Výška	15 mm + 0,5 ppm RMS
Doba trvání inicializace	Typicky méně než 8 sekund

Tabulka č. 5 Parametry přijímače GNSS – RTK Trimble R8s (Trimble R8s GNSS system)



Obrázek č. 7 Přijímač GNSS-RTK Trimble R8s (Trimble R8s GNSS system)

Laserové skenování pro pořízení mračna bodů bylo realizováno laserovým skenerem FARO Focus 3D X130.

Název parametru	Hodnota parametru
Typ zařízení	Pozemní laserový skener
Rozsah měření	0,6 m–130 m
Rychlost měření	až 976000 bodů/s
Chyba vzdálenosti	2 mm
Rozlišení barev	70 Mpx
Zorné pole (vertikální/horizontální)	360°/360°
Úhlový krok (vertikální/horizontální)	0,009°/0,009°

Tabulka č. 6 Parametry pozemního skeneru FARO Focus 3D X130 (FARO Focus X 130)



Obrázek č. 8 Pozemní skener FARO Focus 3D X130 (FARO Focus X 130)

K mobilnímu telefonu a zrcadlové kameře byl použit stativ, k totální stanici trojpodstavcové soupravy (hranol + trojnožka), minihranol a stativy, k pozemnímu skeneru sada vlíčovacích koulí (5 ks o průměr 14 cm a 3 ks o průměru 20 cm).



Obrázek č. 9 Trojpodstavcová souprava Seco



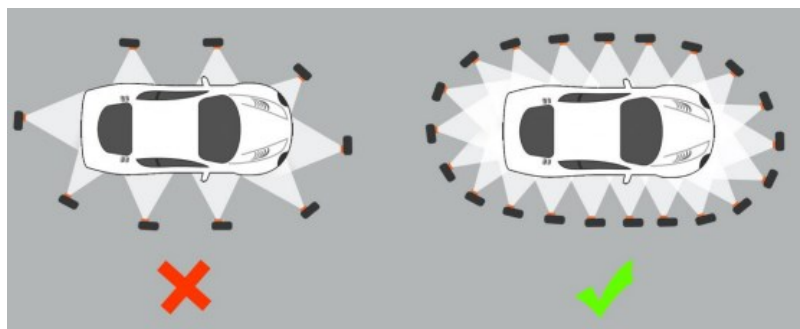
Obrázek č. 10 Vytyčovací minihranol NPS 112



Obrázek č. 11 sada referenčních koulí (průměr 20 cm)

8 Zásady pořizování snímků

Před zahájením terénních prací je nutné si ujasnit zásady pro pořizování snímků zájmového objektu. Základním pravidlem je, že objekt by měl být nafocen kolem dokola, aby bylo získáno dostatečné množství dat pro následné vyhodnocení. Mezi po sobě následujícími postaveními kamery by měla být konstantní vzdálenost. Úhel mezi vedlejšími snímky by neměl překročit hodnotu 15°. Je nutné, aby snímky měly dostatečné překrytí, který činí minimálně 60 %.



Obrázek č. 12 způsob pořizování snímků zájmového objektu (Context Capture: Acquisition best practices)

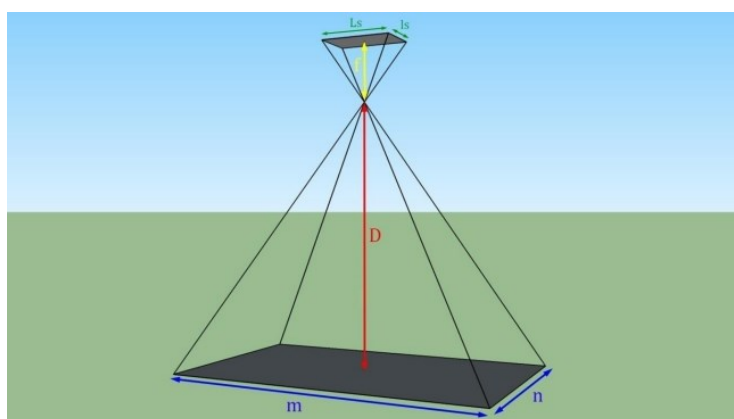
Vzdálenost od foceného objektu se volí tak, aby snímky obsahovaly co nejvíce užitečných dat, a co možná nejméně neužitečných dat, jako je například obloha, voda atd.

Před zahájením terénních prací je vhodné cílovou lokalitu navštívit a promyslet si postup pořizování snímku, je-li objekt přístupný ze všech stran, jaké má rozměry, kolik bude zapotřebí pořídit snímků, jakou má strukturu povrchu a tomu přizpůsobit vzdálenost kamery od objektu, vyhledat zřetelné tvary, které se použijí jako vlíčovací body a zvolit vhodné nastavení kamery.

Poslední věc, která byla stanovena před zahájením terénních prací je rozměr jednoho pixelu ve skutečnosti. Na základě této informace byla vypočtena vzdálenost, která se během pořizování snímků nesmí překročit pro dodržení stanovené maximální velikosti pixelu ve skutečnosti. Vzorec (8.1) pro výpočet vzdálenosti mezi objektem a kamerou D jsme odvodili ze vzorce pro prostorové rozlišení fotografie R .

$$R = \frac{L_s \cdot D}{f \cdot L} \quad (8.1)$$

L_s je větší strana senzoru, f je ohnisková vzdálenost a L větší strana snímku. (Context Capture: Acquisition best practices)



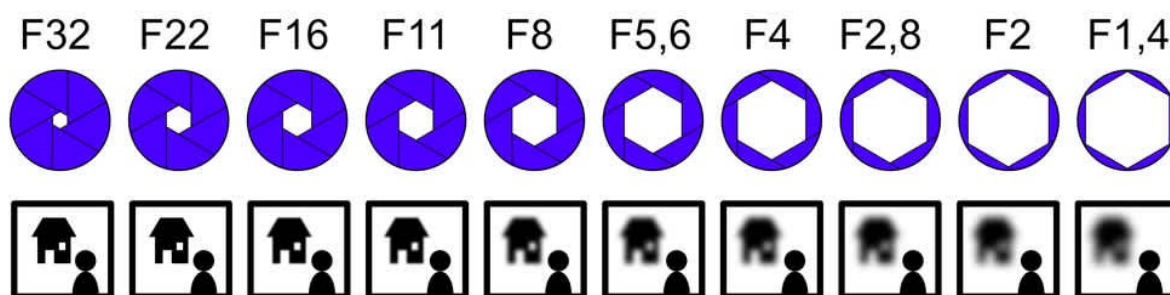
Obrázek č. 13 Prostorové rozlišení fotografie (Context Capture: Acquisition best practices)

9 Nastavení kamer

Pro vytváření 3D modelu je důležité, aby pořízené snímky, které budou vstupovat do zpracování měly co nejvyšší a konstantní kvalitu. Těchto požadavků se docílí manuálním nastavením kamer, které je po celou dobu pořizování snímků neměnné. Při nastavení kamer se musíme dbát na adekvátně zvolenou hloubku ostrosti, zaostření na “nekonečno”, expoziční čas, nízkou hodnotu ISO a vyvážení bílé. Všechny tyto parametry jsou nastaveny ručně. U profesionální kamery ve fotorežimu manuál a u mobilního telefonu v pro režimu fotoaparátu.

9.1 Hloubka ostrosti

Hloubka ostrosti je rozsah vzdálenosti, ve které se focený objekt bude jevit lidskému oku jako ostrý. Hloubka ostrosti se reguluje clonou. Clona je zařízení nacházející v objektivu mezi jednotlivými čočkami sloužící k regulaci množství světla procházející objektivem a dopadající na světločivný senzor fotoaparátu. Čím vyšší bude clonové číslo, tím méně světla projde objektivem za stejný čas, a tím pádem bude větší hloubka ostrosti. Pro tento projekt vzhledem k rozměrům focené kaple byla zvolena hloubka ostrosti na hodnotu 10. Takto nastavená hloubka ostrosti zajistí, že celý zájmový objekt bude na snímcích ostrý. Toto nastavení je však možné pouze u zrcadlové kamery s objektivem, protože mobilní telefon Xiaomi Mi 10T Pro má clonu pevně zafixovanou na hodnotě $f/1,7$. (Hloubka ostrosti, 2021), (Clona, 2001)



Obrázek č. 14 Vztah hodnoty clony a hloubky ostrosti (Context Capture: Acquisition best practices)

9.2 Zaostření

Zaostřením zajišťujeme, že objekty nacházející se v zaostřené vzdálenosti a v rovině rovnoběžné se snímačem budou pro lidské oko ostré. Na objektivu se nachází stupnice vzdálenosti, na jejímž konci je značka nekonečno (∞), což znamená, že objekty v nekonečnu

by v rámci možností objektivu měly být zaostřeny. Snímky kaple byly pořizovány z takové vzdálenosti, že bylo potřeba ostřit už na nekonečno.

Profesionální kamery s výměnnými objektivy mají možnost tuto hranici nekonečna překročit. Vysvětluje se to tím, že autofokus nejdříve přeostrí zájmový objekt a následně se vrátí na správnou hodnotu zaostření, tudíž nachází-li se zaostřovaný objekt v nekonečnu, autofokus při přeostrění překročí hodnotu nekonečna a poté se na ni vrátí. Canon uvádí za důvod možnosti překročení nekonečna tepelnou roztažnost kovového těla objektivu. Pokud se mění geometrické proporce objektivu, bude se měnit i pozice nekonečna. Canon z tohoto důvodu vyrábí teleobjektivy v bílé barvě, aby co nejméně pohlcovaly světlo, a tím se co nejméně zahřívaly. (Neff), (Maintaining Trust in the Canon Brand)

U profesionální kamery se zaostření na nekonečno realizuje přepnutím objektivu do režimu automatického ostření, zacílením a zaostřením na objekt v takové vzdálenosti, že zaostřovaný objekt se bude již nacházet v nekonečnu. Takto zaostřený objektiv se přepne do režimu manuálního ostření a po celou dobu pořizování snímků se nehýbe zaostřovacím kolečkem.



Obrázek č. 15 Zaostření na nekonečno

U mobilního telefonu byla provedena série testovacích snímků, díky které se měla nalézt hodnota ideální nastavení zaostření, žádná taková nalezena nebyla. Problémem byla možnost v pro režimu fotoaparátu posouvat zaostření pouze po celých číslech, což je nedostatečně jemné ovládání tohoto parametru. Byly vyzkoušeny aplikace externích vývojářů pro mobilní telefony, které umožňují jemnější ovládání ostření. Tyto aplikace ovšem neumožňují ovládat primární 108 Mpx fotoaparát, ale pouze sekundární 27 Mpx,

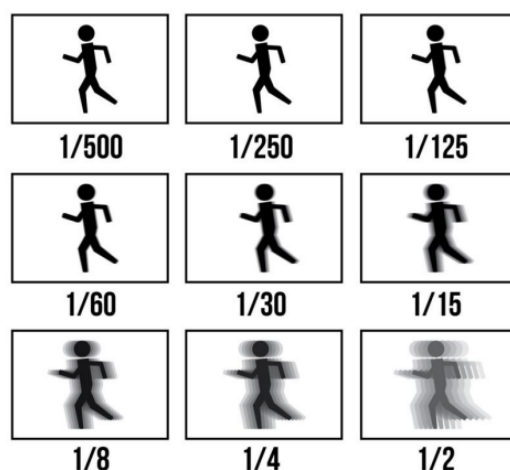
tudíž možnost jejich použití byla vyloučena. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při ručním zaostření na střed fotografovaného objektu. Toto rozhodnutí znamená, že při následném zpracování budou muset být prvky vnitřní orientace spočteny pro každou fotografii zvlášť jako neznámé, protože každý snímek bude mít jinou hodnotu ostření.

9.3 Expoziční čas

Expoziční čas určuje, jak dlouho bude otevřená závěrka fotoaparátu pro průchod a dopad světla na obrazový senzor. Čím větší bude hloubka ostrosti, tím menší prostor bude pro průchod světla a o to delší časový úsek je potřeba pro dosažení stejné expozice než při nižší hloubce ostrosti. (Expoziční čas, 2021)

Expoziční čas u zrcadlové kamery byl spočítán v režimu auto při zadání požadovaného clonového čísla a hodnoty ISO, následně byla kamera přepnuta do manuálního režimu a zjištěný čas byl zadán jako neměnná hodnota, která byla konstantní po celou dobu pořizování snímků.

Mobilní telefon v pro režimu fotoaparátu nabízí živý náhled snímku, tak byl zvolen ideální expoziční čas, aby se na snímku nenacházeli přexponovaná nebo naopak podexponovaná místa. Při pořizování snímků, kdy je kamera držena v ruce může vznikat pohybová neostrost, proto kamery byly umístěny na stativ. Aby bylo zabráněno této neostrosti také na stativu, z důvodu otřesu způsobené zmáčknutím spouště, byla nastavena tří sekundová samospouště u obou zařízení.



Obrázek č. 16 Vztah expozičního času a pohybové neostrosti (Context Capture: Acquisition best practices)

9.4 ISO

ISO neboli citlivost filmu/senzoru je škála vyjadřující míru fotocitlivosti na světlo stanovené senzimetricky. Čím nižší hodnota ISO, tím nižší citlivost na světlo, a tím je nutný delší expoziční čas pro vytvoření stejně hustého obrazu jako při vyšších hodnotách ISO. Při nastavení vyšší hodnoty ISO ovšem dochází ke zhoršování kvality obrazu z důvodu výskytu obrazového šumu. (Citlivost, 2021)



Obrázek č. 17 Vztah mezi hodnotou ISO a obrazovým šumem (Context Capture: Acquisition best practices)

Při použití stativu je zajištěna stabilita kamery, delší expoziční čas tudíž není problémem a může být navolena nižší hodnota ISO. V tomto projektu byla hodnota ISO u zrcadlové kamery Canon nastavena na hodnotu 100 a u mobilního telefonu Xiaomi na hodnotu 50.

9.5 Vyvážení bílé

Vyvážení bílé je proces, při kterém se vyvažují barvy obrazu snímaného předmětu tak, aby se zachycený obraz barevně co nejvíce shodoval s obrazem, jaký vidí lidské oko. Každé světlo má barevnou teplotu, a zatímco lidské oko se těmto podmínkám dokáže do značné míry přizpůsobit, čip digitální kamery nikoliv a musí se měnit jeho nastavení v závislosti na teplotě světla. (Vyvážení bílé, 2021)

Normálně by se volil automatický režim, kde si kamera před každým snímkem spočítá a nastaví vyvážení bílé podle světelných podmínek. Pro fotogrammetrické účely je však nutné, aby nastavení bílé bylo neměnné po celou dobu pořizování snímků cílového objektu.

Až na lokalitě byl tedy vybrán u obou zařízení jeden z předdefinovaných profilů, který co nejvíce odpovídal skutečnosti.

10 Terénní práce

Terénní práce byly rozděleny do 3 etap, etapa pořizování snímků, etapa terestrického měření a etapa laserového skenování.

10.1 Pořizování snímků

Podle počasí byl vybrán den pro pořízení snímků. Ideální počasí je zataženo, kdy se na zájmovém objektu nevyskytují žádné ostré stíny a mraky slouží jako modifikátory světla, které světlo "změkčí". Zájmový objekt byl nafocen ze všech stran s konstantní vzdáleností a konstantní vzdáleností mezi jednotlivými postaveními kamer. Na lokalitě bylo pořízeno 47 snímků digitální kamerou Canon a 57 snímků chytrým telefonem Xiaomi. Snímky byly v terénu zkontrolovány, zdali mají dostatečnou kvalitu a jestli zachycují veškerá potřebná data pro následné zpracování.



Obrázek č. 18 Testovací pořizování snímků při rekognoskaci terénu

10.2 Terestrické měření

Na základě předešlé rekognoskace terénu bylo rozhodnuto, že kolem kaple se zřídí čtyři body pomocné měřické sítě označené čísli 4001 až 4004. Body nebylo vzhledem k památce možné stabilizovat permanentně. Jelikož terestrické měření a laserové skenování bylo realizováno v jeden den, bylo možné body pomocné měřické sítě dočasně stabilizovat stativy.

Určení prostorových souřadnic bodů pomocné sítě bylo uskutečněno metodou GNSS dvěma po sobě následujícími nezávislými měřeními aparaturou Trimble R8s. Pomocná měřická síť byla proměřena ve dvou polohách dalekohledu totální stanice s obousměrným měřením vzdáleností vždy na dva sousední viditelné body, jelikož protější bod se vždy nacházel na druhé straně kaple a byl ní zakrytý. Zaměření bylo realizováno na odrazné hranoly v trojnožce umístěné na stativu. Při následném výpočtu byla síť polohově i výškově vyrovnána volně, jelikož na lokalitě se nenacházely žádné dostupné nivelační značky pro výškové připojení pomocné sítě. Body pomocné měřické sítě byly tedy polohově připojeny do systému S – JTSK a výškově do systému Bpv.

Současně se zaměřením pomocné měřické sítě bylo realizováno zaměření 49 vlícovacích a kontrolních bodů prostorovou polární metodou ze sítě čtyř pomocných bodů. Vlícovací body se nacházejí na objektu a jsou označeny čísly 1 až 49. Vlícovací a kontrolní body nebyly reprezentovány terči, ale přirozeně se vyskytujícími jevy na objektu, např. zřetelné praskliny na obkladových kamenech, rožky písmen na žulové tabuli atd. Body, které se nacházely do určité výšky, byly zaměřeny na mini hranol a body nacházející se nad touto úrovní byly zaměřeny v bezhranolovém režimu. Vlícovací a kontrolní body byly doplněny o grafické znázornění, kde je vyznačena jejich poloha na objektu. Zaměření prvků pomocné měřické sítě i zaměření vlícovacích a kontrolních bodů byly uskutečněno totální stanicí Trimble S8.

10.3 Laserové skenování

Následně po zaměření souboru vlícovacích a kontrolních bodů byly na stativy, které stabilizují body pomocné měřické sítě, umístěny 3 vlícovací koule o průměru 20 cm. Na lokalitě bylo celkově pořízeno 10 skenů kolem dokola kaple, při kterých bylo vždy vidět minimálně na dvě velké vlícovací koule a na pět menších koulí o průměru 14 cm. Menší vlícovací koule byly buďto umístěné na terénu na malé trojnožce nebo na objektu za pomoci magnetu. Mezi jednotlivými skeny byla změněna poloha pouze dvou malých vlícovacích koulí, aby mohlo být provedeno úplné spojení skenů.

11 Kancelářské práce

Kancelářské práce se skládají ze zpracování měření pořízených totální stanicí Trimble S8 a GNSS aparaturou R8s ve výpočetním programu Groma, ze zpracování pořízených snímků digitální kamerou Canon EOS 6D Mark II a mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro v programu Bentley ContextCapture a ze zpracování mračka bodů z laser skeneru FARO Focus 3D X130 a následného porovnání mesh modelů z obou kamer s referenčním mračnem bodů v programu CloudCompare.

11.1 Zpracování dat z totální stanice

Zpracování dat z totální stanice bylo realizováno ve výpočetním softwaru Groma v. 12.3. Po importu naměřených hodnot se provedl výpočet opravených směrů z měření v první a druhé poloze dalekohledu ze všech čtyřech stanovisek. Oprava kolimační chyby činila 0,0002^g a oprava indexové chyby 0,0008^g. Následně bylo vypočteno převýšení všech 57 položek (49 vlíčovacích a kontrolních bodů a 8 převýšení mezi stanovisky). Dalším krokem bylo zpracování obousměrně měřených délek mezi stanovisky. Provedlo se polohové vyrovnání sítě s přibližnými souřadnicemi bodů měřické sítě z měření GNSS aparaturou Trimble R8s. Následně bylo realizováno výškové vyrovnání sítě. Byla spuštěna polární metody dávkou, která nám spočítala finální prostorové souřadnice všech 49 vlíčovacích a kontrolních bodů.

11.2 Zpracování fotogrammetrických dat.

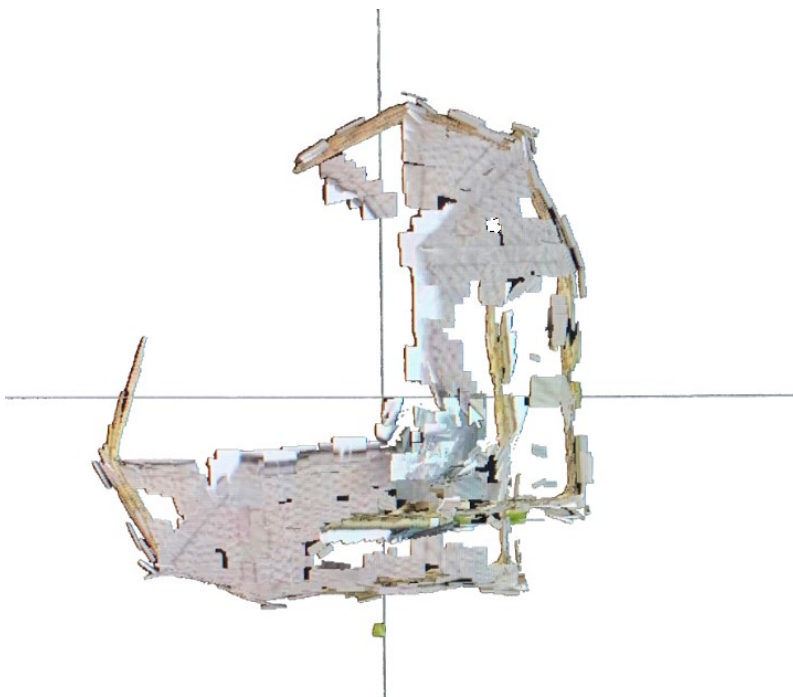
Fotografie jak z mobilního telefonu Xiaomi, tak ze zrcadlové kamery byly zpracovány odděleně, každé ve svém vlastním novém projektu. Zpracování fotogrammetrických dat bylo realizováno v softwaru ContextCapture v. 10.18. Po založení nového projektu vznikne prázdný blok, do kterého byly nahrány fotografie zájmového objektu a tím vznikla „Photogroup“. V rámci „Photogroup“ je možné nastavit prvky vnitřní orientace jednotlivých kamer. ContextCapture má svou databázi kamer s jejich prvky vnitřní orientace, bohužel však neobsahoval ani jednu použitou kameru. Prvky vnitřní orientace u zrcadlové kamery Canon nám byly poskytnuty z předešlého testovacího snímkování dřevěné chatky v Jedovnicích.

Prvek	Hodnota
Ohnisková vzdálenost	24,5354 mm
Souřadnice X hlavního bodu	3073,12 px
Souřadnice Y hlavního bodu	2040,75 px
K1	-0,0979791
K2	0,0951397
K3	-0,026985
P1	-0,0000960807
P2	-0,000874268

Tabulka č. 7 Prvky vnitřní orientace zrcadlové kamery Canon EOS 6D Mark II.

Prvky vnitřní orientace u zrcadlové kamery Canon byly v průběhu celého výpočtu fixovány, zatímco u mobilního telefonu Xiamo se nechaly spočítat pro každý snímek zvlášť. Tento postup byl použit z důvodu, že u mobilního telefonu byl každý snímek zvlášť zaostřen, tudíž nebylo možné použít jedny hodnoty prvků vnitřní orientace pro všechny snímky.

Byla spuštěna triangulace. První triangulace je bez připojení do referenčního systému, tudíž se jedná o relativní model. Pro zrcadlovou kameru Canon byl v hlavním nastavení triangulace nastaven „Pair selection mode“ jako výchozí (dle doporučení manuálu ke ContextCapture). Pro mobilní telefon Xiaomi byl „Pair selection mode“ při první triangulaci také nastaven jako výchozí, ale při tomto nastavení docházelo k „rozskočení“ kaple, proto byla triangulace spočtena znovu s módem „Similar images only“, kde ContextCapture odhadne relativní páry na základě podobnosti klíčových bodů.



Obrázek č. 19 „Rozskočení“ kaple

Ze stejného důvodu byl u mobilního telefonu „Optical properties estimation mode“ nastaven na „Multi-pass“, oproti zrcadlové kameře, kde byl dle doporučení manuálu ponechán mód „One-pass“. „Estimation groups“ byl nastaven u zrcadlové kamery pro celou fotoskupinu, jelikož jsme měli konstantní nastavení kamery po celou dobu focení, zatímco u mobilního telefonu byl nastaven pro každou fotku, tudíž byly spočteny vnitřní prvky orientace pro každý snímek zvlášť. Byl spuštěn proces „Aerotriangulation“.

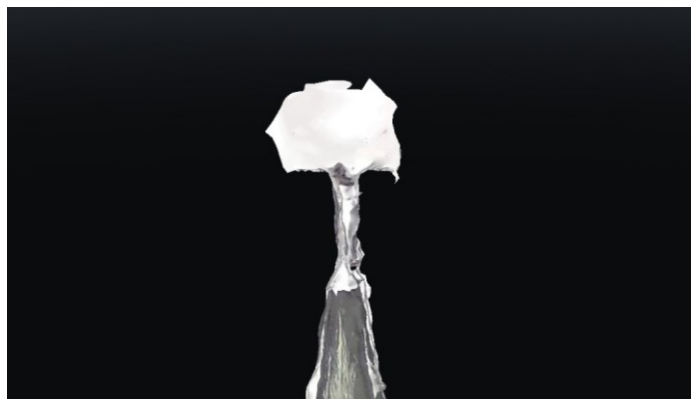
Po dokončení triangulace je hotový relativní mesh model. Dosažené výsledky jako je například počet navazovacích bodů, reprojekční chyba, nebo 3D chyba na kontrolních bodech jsou k nahlédnutí ve vygenerovaném kvalitě reportu.

Na řadě je vytvořit z relativního mesh modelu georeferencovaný. Na záložce „Surveys“ naimportujeme souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů. Identifikujeme všechny naimportované body na co největším množství snímků. Pomůckou jsou epipolární linie, které by se v ideálním případě měly protínat v jediném bodě.

Byl spuštěn opět výpočetní proces triangulace, ale nyní už byl nastaven „Final rigid registration“ na mód „Control points“, což je nastavení, dle jakých bodů se má provádět robustní podobnostní transformace. Pro první georeferencovanou triangulaci se všechny naměřené body stanovily jako vlíčovací. Po nahlédnutí do kvality reportu byly vybrány body, které měly nejlepší poměr reprojekční chyby a rovnoměrné rozmístění na objektu. Takto bylo vybráno u mobilního telefonu 9 bodů a u zrcadlové kamery 7 bodů, zbytku bodů byl přiřazen status kontrolních bodů, které nebudou vstupovat do vyrovnání a bude na nich provedeno testování přesnosti. Byla znovu spuštěna triangulace.

Po dosažení uspokojivých výsledků se může přejít k rekonstrukci modelu. Nastavíme referenční systém, ve kterém je požadována výsledná produkce, v tomto případě se jedná o S-JTSK/Krovak East North (EPSG:5514). Dalším důležitým nastavením je „Tiling“. „Tiling“ je způsob, jak rozložit model na menší části, aby se při produkci nepřetěžovala RAM. Vzhledem k velikosti objektu a faktu, že PC, na kterém se prováděly veškeré výpočty má velikost RAM 128 GB byla zvolena možnost „No tiling“. Tato možnost znamená, že objekt nebyl rozdělen na menší části, ale byl vyprodukován v jednom kuse. Po zvolení formátu účelu produkce, tedy „3D mesh“ a zvolení hranic produkce, která definuje v jakých rozměrech se výsledný mesh bude produkovat, byl spuštěn výpočet modelu.

Výsledný mesh je k nahlédnutí na kartě „3D view“. Byla provedena vizuální kontrola meshe, při které byly odhaleny estetické nedostatky hlavně na kříži nacházejícím se na vrcholku věže kaple.



Obrázek č. 20 Nesprávná rekonstrukce kříže na věži kaple

Tento nedostatek je z největší pravděpodobnosti způsoben tím, že při pořizování snímků ze země se kříž nacházel již pod příliš strmým úhlem.

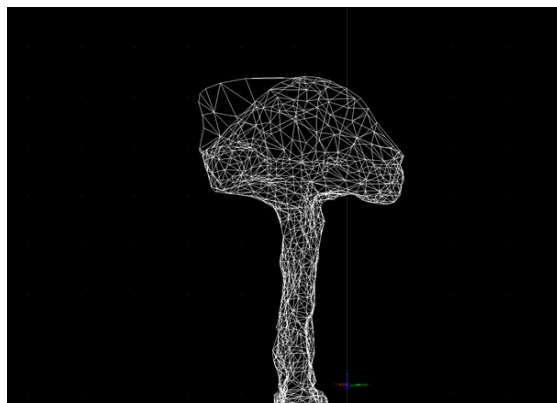
Program ContextCapture nabízí možnost editace meshe v externím programu Descartes z rodiny programů Bentley.

11.3 Editace 3D mesh modelu

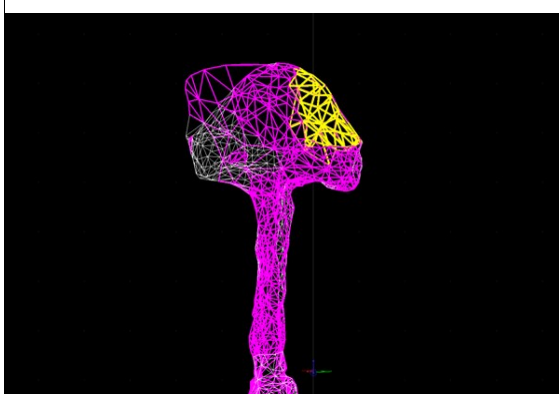
Byla opětovně spuštěna produkce mesh modelu v programu ContextCapture, ale nyní byl vybrán účel „3D mesh for retouching“. Tento formát je možné otevřít v programu Descartes, ve kterém lze provádět modelace mesh modelu. Editace modelu byla realizována v softwaru Bentley Descartes v. 10.05. V levém horní rohu se přepne pracovní tok do „Modelování reality“ a na kartě „Retuše“ v sekci „Upravit síť“ jsou možnosti, jak editovat trojúhelníkovou síť. Je možnost si přepínat i mezi zobrazovacími styly pro lepší orientaci v modelu v nabídce „Stylu zobrazení“. Byl použit styl zobrazení „Hladké: Modelování“, který vykreslí model, tak jak byl vyprodukován. Toto zobrazení je vhodné při hledání vad z pohledu na kapličku jako celek. Po lokalizaci problémových míst bylo zobrazení přepnuté do zobrazení „Drátová síť“, které nám vykreslí trojúhelníkovou síť. Toto zobrazení je užitečné při detailním výběru problematických míst. Nástroj „Odstranit plošku sítě“ byl použit k výběru skupiny plošek (fialová barva), ze kterých byly následně vyselektovány a odstraněny nežádoucí trojúhelníky (žlutá barva). Proces editace lze vidět na obrázcích č. 21–24.



Obrázek č. 21 Pohled na kříž v zobrazení hladké modelování



Obrázek č. 22 Pohled na kříž v zobrazení drátový model



Obrázek č. 23 Selektce nežádoucích plošek



Obrázek č. 24 Kříž po odstranění části nežádoucích plošek

Tímto způsobem byl editován celý model, následně byla odstraněna tráva v okolí kaple. Takto upravený model se vyexportoval do formátu OBJ, který se opětovně naimportoval do ContextCapture na kartě „Reference model“. Výsledný mesh se nemusí znovu produkovat, ale stačí pouze na kartě „General“ spustit operaci „Submit update“ a mesh se updatuje podle naimportovaného editovaného OBJ souboru. Tento proces je mnohonásobně rychlejší než produkce samotného meshe.



Obrázek č. 25 Porovnání modelu před (vlevo) a po (vpravo) editaci

11.4 Prekalibrace mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro

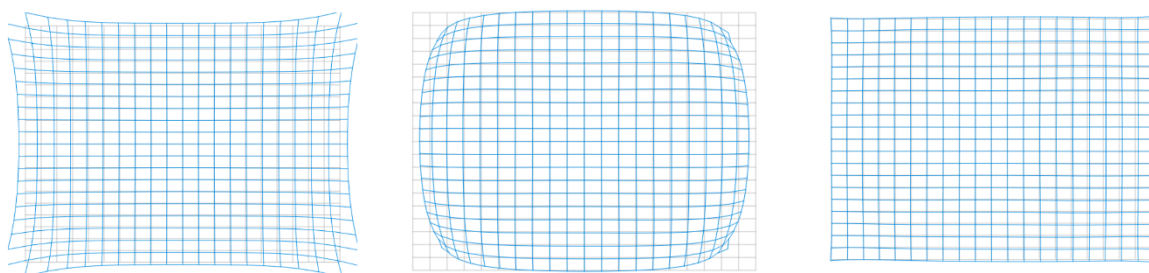
Bylo stanoveno, že prvky vnitřní orientace budou v průběhu výpočtu triangulace vypočteny jako neznámé pro každý snímek zvlášť. Vědecký článek „*Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Information*“ se zabývá využitelností snímků z kamer chytrých mobilních telefonů pro 3D určování polohy pomocí fotogrammetrických technik. Tento článek ve své druhé polovině popisuje vytvoření 3D mesh modelu historické budovy ze snímků pořízených chytrým telefonem Samsung Galaxy S4. Prvky vnitřní orientace v tomto případě byly spočteny jako neznámé a byla provedena selfkalibrace až během zpracování pořízených snímků. (Yilmazturk, 2019)

Tento proces byl v rámci této diplomové práce replikován. Při triangulaci ve výpočetním programu ContextCapture byl zvolen režim triangulace „Adjust all“, což znamená, že prvky vnitřní orientace se vypočtou jako neznámé, a to pro každý snímek zvlášť. V kvalitě reportu se tedy nacházejí vypočtené parametry vnitřní orientace pro každý snímek zvlášť. Proměnlivost ohniskové vzdálenosti a polohy hlavního snímkového bodu byla očekávaná z důvodu přestřžení při pořízení každého snímku. Prvky, které ovšem ovlivňují geometrii zobrazení a mají tedy zásadní vliv na výslednou přesnost měření se nazývají distorze. Tyto prvky (K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2) nejsou ovlivněny změnou ostření a měly by tedy být v průběhu výpočtu konstantní.

Distorze jsou způsobené souhrnem geometrických nepřesností při sestavování objektivu a vlastnostmi čoček. Objektivy se skládají z prvků, které není možné sestavit za sebe do optické osy, tudíž úhel vstupujícího paprsku není naprosto stejný jako úhel vystupujícího paprsku, který následně dopadá na senzor. Distorze dělíme na tangenciální a radiální.

Radiální distorze způsobuje posun bodů ve směru radiálním od hlavního bodu snímku. Tangenciální distorze je způsobená nepřesnou centrací jednotlivých čoček. Tangenciální zkreslení působí kolmo na radiální zkreslení a zapříčiňuje nepravidelné špatně definované lokální posuny. (Hofmanová, 2016)

Hodnoty distorze při kontrole kvality reportu ovšem nabývali rozdílných hodnot a v případě parametru P_1 docházelo i k výskytu jak záporných hodnot, tak hodnot kladných. Vyskytovaly se i rozdílné grafické podoby obdélníkové sítě, která znázorňuje distorze objektivu kamery. Tento jev lze vidět na obrázku č. 26.



Obrázek č. 26 grafické znázornění vyskytujících se distorzí objektivu kamery

Šedá mřížka představuje stav, kdy se nevyskytuje žádná distorze objektivu. Modrá mřížka znázorňuje spočtenou distorzi při výpočtu triangulace. Bylo tedy přistoupeno k otestování souborů jednotlivých parametrů radiálního a tangenciálního zkreslení na odlehlé hodnoty.

Z každého souboru jednotlivých parametrů byla vypočtena průměrná hodnota a opravy od této hodnoty. Opravy byly použity k výpočtu směrodatné odchylky výběrového souboru S prostřednictvím vzorce (11.1).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (11.1)$$

Hodnota v_i zastupuje opravy jednotlivých hodnot od průměru a n je počet hodnot v souboru. Následně byla spočtena mezní hodnota δ , která je rovna dvojnásobku směrodatné odchylky. Hodnoty oprav byly porovnány s mezní hodnotou a ty, které ji překročily byly označeny jako odlehlé hodnoty. Tímto testováním bylo nalezeno u hodnot K1 jedno, u hodnot K2 jedno, u hodnot K3 tři, u hodnot V1 pět a u hodnot V2 čtyři odlehlé hodnoty. Testování bylo realizováno na souboru obsahující hodnoty distorze ze všech 57 snímků pořízených mobilním telefonem Xiaomi Mi 10T Pro. Počet nalezených odlehlých hodnot není nějakým způsobem nadměrný, ale rozptyl, který tyto hodnoty vykazují je již značný. Směrodatná odchylka parametru K2 je stejného řádu jako samotná hodnota a směrodatná odchylka parametru P1 je dokonce o řád vyšší než samotná hodnota. Výskyt těchto jevů je nežádoucí.

Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že se uskuteční prekalibrace kamery mobilního telefonu. Nebylo k dispozici testovací pole, na kterém se běžně realizují prekalibrace kamer. Testovací pole bylo nahrazeno vyřezávaným okrasným dřevěným pařezem.



Obrázek č. 27 Dřevěný pařez použitý pro prekalibraci

Objekt pro prekalibraci by měl zakrývat celý snímek z důvodu celosnímkového vykreslení jednotlivých distorzí. U tohoto předmětu to ovšem nebylo možné. Aby totiž předmět obsáhl celý snímek, musela se kamera nacházet v takové blízkosti, při které již nebylo možné zaostřit snímáný předmět. Bylo tedy přistoupeno k metodě vějířovitého pořizování fotografií. Tato metoda spočívá v pořízení více snímků z jednoho místa. Z každého postavení kamery byly tedy pořízeny tři snímky. Na prvním snímku se focený předmět nacházel na pravé, na druhém uprostřed a na třetím na levé straně snímku.

11.4.1 Zpracování snímků pro kalibraci kamery

Zpracování snímků a následný výpočet prvků vnitřní orientace byly uskutečněny ve výpočetním programu Agisoft Metashape v. 1.8.1. Nejdříve do programu byly naimportovány všechny fotky, které budou následně vstupovat do výpočtů a uložením vytvoříme nový projekt. V okně „Workspace“ se nám vytvoří „Chunk“, ve kterém vidíme skupinu snímků. „Chunk“ je obdoba „Blocku“ v softwaru ContextCapture. V okně „References“ vidíme jednotlivé importované snímky. Agisoft Metashape nabízí nástroj „Estimate Image Quality“, který automatizovaně odhadne kvalitu jednotlivých snímků. Odhadnutá kvalita se nachází v řádcích jednotlivých fotek v okně „References“. Kvalita je vyjádřena bezrozměrovou jednotkou nabývající hodnoty od 0 do 1. Agisoft Metashape nedoporučuje používat snímky s kvalitou pod hodnotu 0,5. Žádný ze snímků neklesl pod tuto hodnotu. Bylo přistoupeno k výpočtu relativní snímkové orientace přes funkci

„Align Photos“ v záložce „Workflow“. U „Accuracy“ zvolíme možnost „High“, která nastaví měřítko snímku na původní velikost snímku při snímkové orientaci. Zaklikneme „Generic preselection“, který zajistí, že vyhledávání společných prvků na párech snímků je nejdříve provedeno v „Accuracy Low“ (16x menší měřítko), což zajistí zrychlení celého procesu zpracování. V „Reference preselection“ byla vybrána možnost „Source“, způsobující předvýběr dvojce snímků na základě známých prvků vnější orientace. „Key point limit“ určuje limit pro maximální počet vyhledávaných klíčových bodů v jednom snímku. Byl nastaven na hodnotu 40000. „Tie point limit“ je to samé, jako „Key point limit“, akorát pro spojovací body. Tato hodnota byla nastavena na 0, to znamená, že jich Agisoft Metashape má hledat co nejvíce. Zaškrtnutím možnosti „Exclude stationary tie points“ je zajištěno vyřazení bodů, jejichž poloha se na snímcích nemění. „Guided image matching“ se používá pro navýšení počtu klíčových bodů ve specifických případech, jako jsou např. snímky s vegetací, snímky ze sférických kamer, satelitů atd. V tomto případě tato možnost nebyla zaškrtnutá. Posledním nastavitelným parametrem je „Adaptive camera model fitting“, který automaticky vybere prvky vnitřní orientace pro přeúčtení. Spustíme výpočet. Po výpočtu se zobrazí řídké mračno bodů skládající se ze spojovacích bodů.



Obrázek č. 28 Řídké mračno bodů

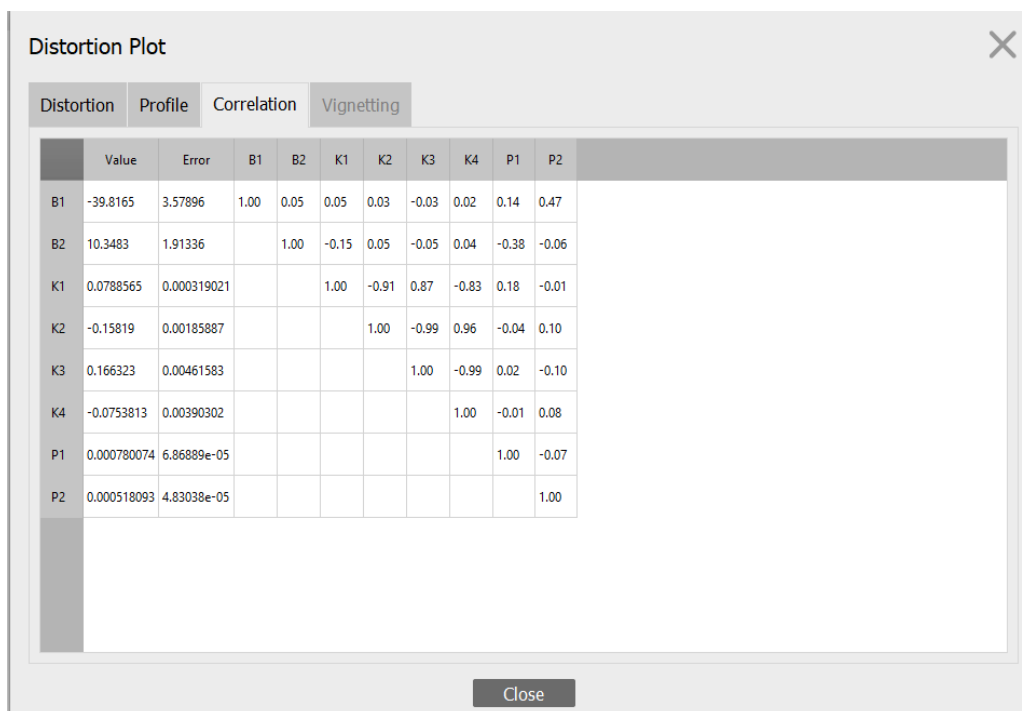
Byla provedena vizuální kontrola, zdali se mračno bodů vygenerovalo podle skutečnosti. Informace o mračnu bodů si lze zobrazit po kliknutí pravým tlačítkem myši na „Chunk“ a zvolení možnosti „Show info“. Zde se nachází informace o dosažené reprojekční chybě a počtu spojovacích bodů.

Property	Value
General	
Cameras	39
Aligned cameras	39
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	148,935 of 193,975
RMS reprojection error	0.199906 (1.87259 pix)
Max reprojection error	2.755 (58.0784 pix)
Mean key point size	11.187 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	2.43473

Obrázek č. 29 Informace o Chunk

Dalším krokem je filtrace spojovacích bodů s velkými hodnotami reprojekční chyby. Filtrace se provádí nástrojem „Gradual Selection“ nacházející se v záložce „Model“. Filtrace se prováděla podle dvou parametrů, „Projection accuracy“ a „Reprojection error“. „Projection accuracy“ je kritérium, na základě, kterého se odfiltrují body, jejichž projekce byly relativně hůře lokalizované vzhledem k jejich větší velikosti. Kritériem „Reprojection error“ se filtrují body podle jejich reprojekční chyby. Hodnoty reprojekční chyby jsou normované, hodnoty v pixelech jim odpovídající lze nalézt v „Show info“. Filtrace provádíme po malých hodnotách. Po odfiltrování nežádoucích bodů je nutné v okně „Camera Calibration“ definovat, které parametry vnitřní orientace má Agisoft Metashape počítat pro celý „Chunk“, a které pro každý snímek zvlášť. Předpoklad je, že prvky související s ostřením kamery (ohnisková vzdálenost a poloha hlavního bodu) jsou pro každou fotku jiné z důvodu přeostrňování mezi snímky, zatímco distorze by měly být neměnné po celou dobu pořizování snímků. Proto parametry f , C_x , C_y necháme spočítat pro každý snímek zvlášť a parametry K_1 , K_2 , K_3 , P_1 a P_2 necháme spočítat pro celý „Chunk“. Provedeme optimalizaci kamery přes tlačítko „Optimize Cameras“. Necháme zakliknuty všechny parametry vnitřní orientace. V pokročilém nastavení zaklikneme možnosti „Adaptive camera model fitting“ a „Estimate tie point covariance“. „Adaptive camera model fitting“ je stejné jako u „Align Photos“. „Estimate

tie point covariance“ je možnost, která při zaškrtnutí vypočte tabulku korelací prvků vnitřní orientace.



	Value	Error	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
B1	-39.8165	3.57896	1.00	0.05	0.05	0.03	-0.03	0.02	0.14	0.47
B2	10.3483	1.91336		1.00	-0.15	0.05	-0.05	0.04	-0.38	-0.06
K1	0.0788565	0.000319021			1.00	-0.91	0.87	-0.83	0.18	-0.01
K2	-0.15819	0.00185887				1.00	-0.99	0.96	-0.04	0.10
K3	0.166323	0.00461583					1.00	-0.99	0.02	-0.10
K4	-0.0753813	0.00390302						1.00	-0.01	0.08
P1	0.000780074	6.86889e-05							1.00	-0.07
P2	0.000518093	4.83038e-05								1.00

Obrázek č. 30 Tabulka korelací

Zde vidíme hodnoty jednotlivých neznámých parametrů a jejich chybu. Je důležité, aby se chyby pohybovaly v nižších řádech než výsledné hodnoty. Posoudíme významnost zavádění jednotlivých parametrů na základě korelací. Korelace mezi parametry K3 a K4 nabývá hodnoty 99%, tedy parametr K4 nemá smysl zavádět. Mezi parametry K2 a K3 je také korelace 99%, ale než se bude uvažovat o nezavádění parametru K3 je nutné přepočítat parametry kamery, jelikož po odstranění jednoho parametru se korelační matice změní. Proces filtrace a kontroly korelační matice se opakuje do doby, než je dosažena uspokojivá hodnota reprojekční chyby. V tomto případě to byla hodnota 0,5 pixelu.

Dosud je model bezrozměrný. Rozměry mu lze dát pomocí měr na objektu. Je potřeba nejdříve přidat do modelu spojovací body, které na snímcích lokalizujeme manuálně přes funkci „Place Marker“. Po kontrole reprojekční chyby na takto určených bodech lze vytvořit „Scale Bar“, kterému přidáme skutečnou hodnotu délky a znovu spočteme „Optimize Cameras“. Nyní máme finální prvky vnitřní orientace, které lze exportovat a importovat do dalších programů. Společně s exportem parametrů lze exportovat i protokol.

11.4.2 Porovnání výsledků

Tímto způsobem zjištěné prvky distorze byly do programu ContextCapture vloženy jako parametry kamery. Triangulace byla znovu spočtena se zafixováním radiálního a tangenciálního zkreslení.

Porovnání mezi výsledky triangulace na kontrolních bodech se zafixováním radiálního a tangenciálního zkreslení a bez fixace lze vidět v tabulce č.8.

Parametry	S fixací parametrů distorze		Bez fixace parametrů distorze	
	Global RMS	Median	Global RMS	Median
Reprojekční chyba [px]	7,12	6,17	5,02	2,95
Vzdálenost k paprsku [m]	0,00764	0,00671	0,00578	0,00412
3D chyba [m]	0,00957	0,00798	0,00592	0,00371
Horizontální chyby X [m]	0,00668	0,00170	0,00324	0,00079
Horizontální chyby Y [m]	0,00508	-0,00003	0,00412	0,00120
Vertikální chyba [m]	0,00460	0,00138	0,00275	-0,00035

Tabulka č. 8 Porovnání výsledků triangulace na kontrolních bodech s fixací parametrů distorze a bez fixace

Z tabulky je zřejmé, že bez zafixování radiálního a tangenciálního zkreslení bylo dosaženo výsledků s nižšími hodnotami kontrolních parametrů, tudíž byla pro finální produkci mesh modelu použita triangulace, při které se prvky vnitřní orientace spočetly jako neznámé.

Nelze konstatovat, že by zavádění prvků vnitřní orientace z prekalibrace mělo vždy nežádoucí vliv na výslednou přesnost. Musela by být provedena prekalibrace kamery na testovacím poli určeném k tomuto účelu, aby bylo možné jednoznačně prohlásit toto tvrzení. Testovací pole nebylo k dispozici a prekalibrace byla provedena na objektu s dobrou strukturou, ale s nevhodnými rozměry, které nebyly schopny zajistit zakrytí celého snímku vhodnou texturou. Vějířovitý způsob focení tyto nežádoucí vlivy omezí, ale neeliminuje.

11.5 Zpracování laserového skenování

V softwaru Trimble RealWorks v. 11.2 bylo provedeno spojení jednotlivých laserových skenů do jednoho mračna bodů. Nejdříve je nutné do programu naimportovat jednotlivé skeny přes funkci „Import“ ve formátu FLS. Celkově bylo naimportováno 10 skenů. Projekt si uložíme. Po načtení všech skenů je možné zahájit registraci jednotlivých mračen v režimu „Registration“. Po kliknutí pravým tlačítkem myši na sken/stanovisko byla vybrána možnost

„Station Setup“. Otevře se okno „Tools“, v něm byla vybrána možnost „Extract“ v sekci „Measure Target“. Otevře se okno, ve kterém byly označeny všechny terče postupně ve všech skenech. Musí se dbát na správně zvolený typ terče, v tom případě byl použit „Spherical Target“ o průměru 14 cm a 20 cm. Tímto způsobem byly označeny všechny terče v mračnu. Po označení všech terčů v každém mračnu byla spuštěna registrace prostřednictvím funkce „Target-Based Registration“. Po zpracování se zobrazí výsledky registrace jednotlivých skenů. Poslední věc, která byla provedena, je transformace mračna bodů. Mračno bodů bylo natransformováno na 3 vlíčovací koule o průměru 20 cm, které byly po dobu celého skenování umístěny na stativěch a měly konstantní polohu. Souřadnice vlíčovacích koulí byly určeny přičtením výškové konstanty k vyrovnaným souřadnicím, které patří odraznému hranolu na stativu, jenž se nachází na bodech měřické sítě.

11.6 Práce s 3D mesh modelem

V programu CloudCompare v.2.11 byly provedeny dvě operace. První byla lokalizace kontrolních bodů a jejich následný vstup do analýzy souřadnicových rozdílů se souřadnicemi určenými z vyrovnání.

Nejprve je nutné nastavit v programu ContextCapture při produkci do formátu OBJ nulový „Coordinates origin“ u všech tří souřadnic, jinak nebude fungovat přenesení souřadnicového systému mezi programy. Při otevření mesh modelu v programu CloudCompare vyskočí okno pro redukci souřadnic, které poskytuje informaci, jakým způsobem budou redukovány jednotlivé souřadnice. Nyní v mesh modelu vyhledáme jednoznačně identifikovatelné kontrolní body a přes funkci „Point picking“ necháme vypsát jejich souřadnice. „Point picking“ poskytuje jak redukované, tak neredukované souřadnice. Pro tento účel jsou důležité souřadnice neredukované.

Druhým případem využití tohoto programu bylo počítání a následné znázornění odchylek 3D mesh modelů vytvořených z dat z obou kamer od referenčního mračna bodů pořízeného pozemním laserovým skenerem. V tomto případě je nutné si ověřit, zda byla redukce souřadnic provedena o stejné hodnoty jak u mračna bodů, tak u 3D mesh modelů. Toto grafické znázornění, které je viditelné v kapitole „dosažené výsledky“, se vygeneruje přes funkci „Cloud-to-Cloud distance“, která nám vykreslí vzdálenosti mezi referenčním mračnem bodů a 3D mesh modelem. Velikosti odchylek/vzdáleností jsou realizovány barvami, jenž reprezentují hodnoty, které jsou znázorněné na přiložené barevné škále.

11.7 Prezentace 3D mesh modelu

Sketchfab je webová platforma, která slouží k publikování, prodávání, kupování a sdílení 3D, VR a AR obsahu. Sketchfab je ideální možností pro rychlé a jednoduché prezentování vytvořeného mesh modelu v rozhraní webového prohlížeče.

ContextCapture nabízí přímé publikování na Sketchfab. Stačí opětovně vyprodukovat model ve formátu OBJ a následně na kartě „General“ zaškrtnout možnost „Publish to Sketchfab“. Je nutné vyplnit jméno modelu a API token, což je unikátní číslo, které obdržíte při registraci a slouží k nahrání modelu na váš profil.

Samotný 3D náhled má několik možností nastavení. Dá se nastavit kvalita textury na „SD“ a „HD“. Funkce „Model Inspector“ má nastavení nejrůznějších zobrazení. „Final Render“ zobrazí model po finálním renderu, při kterém byly vygenerované i stíny, které vrhá samotný model. V sekci „MATERIAL CHANNELS“ lze zobrazit jednotlivé materiály, ze kterých je model složen. Jelikož tento model je vytvořen z fotek jako celek, má tak význam si zobrazit pouze „Base Color“, která zobrazí model tak, jak byl vyprodukován v ContextCapture. V sekci „GEOMETRY“ lze zobrazit trojúhelníkovou síť modelu při aktivování možnosti „Wireframe“, možnost „Vertex Normals“ nám zobrazí vrcholové normály. Poslední možnost „UV Checker“ nám na základě mřížkové textury zobrazí UV záření, které vyzařují jednotlivé části modelu.



Obrázek č. 31 Náhled ve Sketchfabu s otevřeným „Model Inspector“

Sketchfab dále nabízí možnost nastavení výchozího pohledu při otevření modelu a vkládání anotací. V tomto případě byly do modelu vloženy 4 anotace. Prvními dvěma anotacemi jsou deformace kruhového okna nad hlavním vstupem a deformace hřebenu střechy. Jelikož snímky byly pořízeny ze země, chybí v této výškové úrovni u těchto problematických míst data. Další deformace nastala u kříže na vrcholu věže kaple. Kříž se totiž nachází pod strmým úhlem vůči místům, ze kterých se pořizovaly snímky. Tento úhel má negativní vliv na následnou produkci mesh modelu. Poslední anotací je pamětní deska, na které je demonstrována kvalita textur čitelností textu.



Obrázek č. 32 Anotace ve Sketchfabu

12 Dosažené výsledky

Vizuální porovnání obou výsledných 3D mesh modelů kaple je možné vidět na obrázku č. 33. Pro toto porovnání nebyly použity editované 3D mesh modely, nýbrž modely z výsledku produkce programu Bentley ContextCapture. Důvodem byla viditelnost rozdílů mezi needitovanými mesh modely.



Obrázek č. 33 Výsledné 3D mesh modely z produkce (vlevo Canon, vpravo Xiaomi)

Byla provedena analýza souřadnicových rozdílů na kontrolních bodech. Tato analýza reprezentuje přesnost výsledných modelů v diskrétních dobře identifikovatelných bodech na objektu, které jsou po objektu rovnoměrně rozmístěné. Pro oba mesh modely bylo vybráno 25 kontrolních bodů. Pro každý mesh byl vybrán jiný soubor 25 kontrolních bodů. Kontrolní body byly vybrány podle míry jednoznačnosti jejich určení při hledání v programu CloudCompare. Analýza odhaluje vybočující a odlehlé hodnoty. Byly analyzovány rozdíly na ose X, Y, Z a rozdíly v poloze. Souřadnicové rozdíly byly realizovány mezi souřadnicemi z terestrického měření a 3D mesh modely z produkce v Bentley ContextCapture. Výsledky analýzy souřadnicových rozdílů na kontrolních bodech lze vidět v tabulce č. 9 pro zrcadlovou kameru Canon a v tabulce č. 10 pro mobilní telefon Xioami.

Parametry		X	Y	P	Z
Střední chyba		1,7 mm	2,3 mm	2,9 mm	1,2 mm
Součinitel konfidence (P=0,95)	2		2	2,5	2
Součinitel konfidence (P=0,99)	2,5		2,5	3	2,5
Kritická hodnota (p=0,95)		3,4 mm	4,6 mm	7,2 mm	2,3 mm
Kritická hodnota (p=0,99)		4,3 mm	5,8 mm	8,6 mm	2,9 mm

Tabulka č. 9 Analýza souřadnicových rozdílů pro zrcadlovou kameru Canon

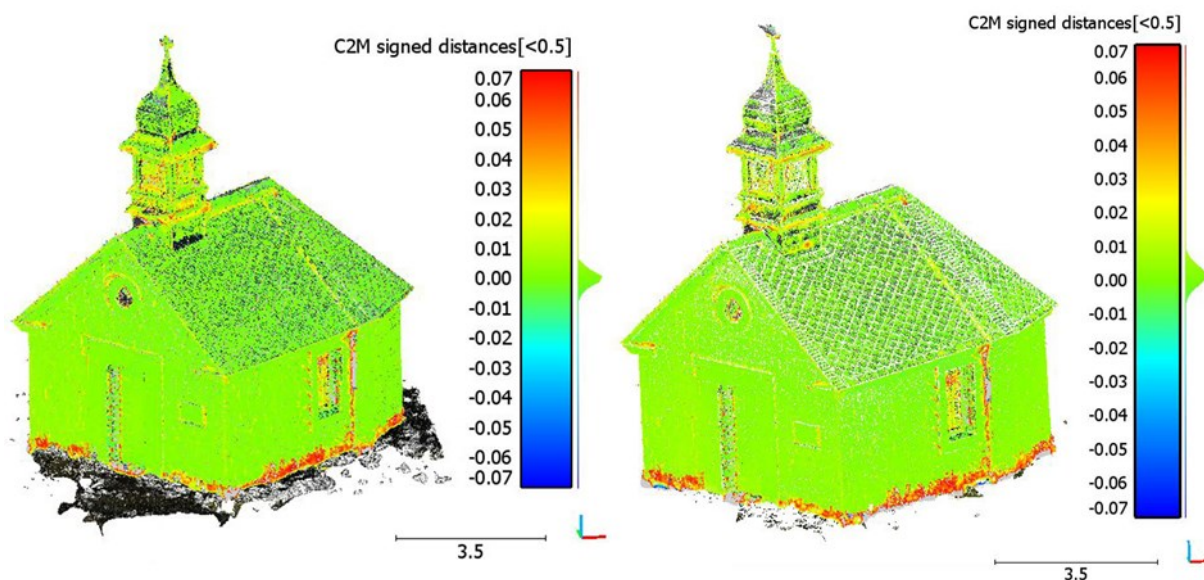
Parametry		X	Y	P	Z
Střední chyba		1,9 mm	2,3 mm	3,0 mm	1,2 mm
Součinitel konfidence (P=0,95)		2	2	2,5	2
Součinitel konfidence (P=0,99)		2,5	2,5	3	2,5
Kritická hodnota (p=0,95)		3,8 mm	4,6 mm	7,5 mm	2,4 mm
Kritická hodnota (p=0,99)		4,8 mm	5,7 mm	9,0 mm	3,0 mm

Tabulka č. 10 Analýza souřadnicových rozdílů pro mobilní telefon Xiaomi

U zrcadlové kamery Canon EOS 6D Mark II byla odhalena jedna vybočující hodnota v souřadnici Y a žádná odlehlá hodnota. U mobilního telefonu Xiaomi Mi 10T Pro byla odhalena jedna vybočující hodnota v souřadnici X, jedna v souřadnici Y, jedna v souřadnici Z a žádná odlehlá hodnota. Excel s kompletní analýzou je přiložen k této diplomové práci jako příloha č. 13.

Pomocí F-testu byla provedena zkouška shody při analýze souřadnicových rozdílů na kontrolních bodech na hladině významnosti 1% mezi mobilním telefonem Xiaomi a zrcadlovou kamerou Canon. F-test prokázal statisticky srovnatelnou přesnost fotogrammetrických výsledků na dobře identifikovatelných kontrolních bodech.

Bylo provedeno grafické znázornění odchylek 3D mesh modelů, které byly vytvořeny pomocí dat z obou kamer od referenčního mračna bodů z pozemního laserového skenování. Toto znázornění je viditelné na Obrázku č. 34.



Obrázek č. 34 Porovnání referenčního mračna a 3D mesh modelů (vlevo Canon, vpravo Xiaomi)

Testování směrodatných odchylek vypočtených z odchylek mesh modelů od referenčního mračna bodů a výsledky testování těchto odchylek na výskyt vybočujících a odlehlých hodnot se nachází v tabulce č. 11. Testování směrodatných odchylek bylo vypočteno z necelých

85 milionů odchylek u obou mesh modelů. Test shody směrodatných 3D odchylek vypočtených na základě porovnání mesh modelů oproti referenčnímu mračnu bodů na hladině významnosti 1% prokázal statistickou srovnatelnost přesností fotogrammetrických výsledků jak ze zrcadlové kamery, tak z mobilního telefonu. (Prokop, 2021)

Parametry	Canon EOS 6D Mark II	Xiaomi Mi 10T Pro
Směrodatná odchylka s_{C2M}	15 mm	16 mm
Vybočující hodnoty vzdáleností C2M	0,5%	0,4%
Odehlé hodnoty vzdáleností C2M	1,4%	1,5%

Tabulka č. 11 testování vzdáleností 3D mesh modelů na výskyt vybočujících a odehlých hodnot.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnat profesionální digitální zrcadlovou kameru s cenově dostupným chytrým mobilním telefonem a jejich dosažené výsledky. Snahou bylo potvrdit nebo vyvrátit možnost využití mobilního zařízení za razantně nižší cenu oproti profesionální kameře ve fotogrammetrických aplikacích.

V úvodu práce jsou popsány rešerše fotogrammetrických metod a softwarových možností. Jsou uvedeny důvody výběru zájmového objektu a jeho poloha. Dále je vyjmenováno a popsáno přístrojové vybavení, které bylo použito v rámci této práce. Rozbor metod pořizování snímků zájmového objektu a použité nastavení jak zrcadlové digitální kamery, tak mobilního telefonu. Hlavním zdrojem informací pro tuto část práce byly vědecké články, manuály a skripta.

Další část diplomové práce tvoří samotné získávání a zpracování dat z terénu. Data z terénu se skládala ze záznamů z měření totální stanicí a GNSS aparaturou, mračen bodů z pozemního laserového skeneru a snímků z obou použitých kamer. Hlavní zpracovatelské práce byly realizovány v softwaru Bentley ContextCapture, kde byla uskutečněna triangulace snímků, identifikace vlíčovacích bodů pro následné georeferencování a konečná produkce 3D mesh modelů pro obě kamery. Dále je v této části popsána editace 3D mesh modelu, prekalibrace chytrého mobilního telefonu a publikace modelu. Proces prekalibrace chytrého mobilního telefonu byl uskutečněn v softwaru Agisoft Metashape. Tento software poskytuje rozsáhlejší možnosti nastavení kalibrace kamery, než hlavní zpracovatelský software ContextCapture, a proto byl upřednostněn. Prekalibrace nakonec nebyla využita z důvodu dosažení neuspokojivých výsledků oproti využití možnosti selfkalibrace, což bylo z největší pravděpodobností zapříčiněné využitím předmětu s dobrou strukturou pro prekalibraci namísto testovacího pole, které je speciálně uzpůsobené pro tyto účely.

V kapitole o dosažených výsledcích je možné vizuálně porovnat oba 3D mesh modely vedle sebe. Byla provedena analýza souřadnicových rozdílů na kontrolních bodech. Pro oba modely bylo vybráno 25 kontrolních bodů. U profesionální zrcadlové kamery dosáhly střední chyby u osy X hodnoty 1,7 mm, u osy Y 2,3 mm, u osy Z 1,2 mm a v poloze 2,9 mm. U chytrého mobilního telefonu dosáhly střední chyby u osy X hodnoty 1,9 mm, u osy Y 2,3 mm, u osy Z 1,2 mm a v poloze 3,0 mm. Na základě hodnot součinitelů konfidence byly stanoveny kritické hodnoty pro vybočující a odlehlé hodnoty. U chytrého mobilního telefonu byly odhaleny tři

vybočující hodnoty a u zrcadlové kamery pouze jedna vybočující hodnota. F-test mezi použitými kamerami na hladině významnosti 1% prokázal statisticky srovnatelnou přesnost fotogrammetrických výsledků. Testování směrodatných odchylek vypočtených z rozdílů mesh modelů od referenčního mračna bodů a jeho testování na výskyt vybočujících a odlehlých hodnot odhalil u zrcadlové kamery 0,5% vybočujících hodnot a 1,4% odlehlých hodnot a u mobilního telefonu 0,4% vybočujících hodnot a 1,5% odlehlých hodnot. Test shody opět prokázal statistickou srovnatelnost výsledků obou kamer.

Tato diplomová práce na základě dosažených výsledků prokázala možnost využití low-cost kamery Xiaomi Mi 10T Pro v rámci fotogrammetrických aplikací ve stejném rozsahu jako profesionální digitální zrcadlová kamera Canon EOS 6D Mark II s 24 mm objektivem, který má pevné ohnisko. Po stránce vizuální prezentace dosahoval 3D mesh model vytvořený ze snímků pořízených mobilním telefonem větších detailů, než model ze snímků pořízených digitální kamerou. V případě, kdy by při rozhodování o pořízení nového přístroje pro fotogrammetrické účely bylo hlavním kritériem poměr ceny a výkonu, vyhrál by mobilní telefon na “plné čáře”. Mobilní telefon je statisticky schopen dosáhnout stejně přesných výsledku jako profesionální kamera, a to za pětínovou cenu.

Použitá literatura

Canon EOS 6D Mark II. In: *Canon* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.usa.canon.com/internet/portal/us/home/products/details/cameras/eos-dslr-and-mirrorless-cameras/dslr/eos-6d-mark-ii>

Citlivost, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Citlivost>

Clona, 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Clona>

Context Capture: Acquisition best practices: Reality Modeling. In: *Bentley* [online]. Bentley [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.bentleyuser.dk/sites/default/files/files/A8%20-%20Best%20Practices%20for%20Consuming%20Reality%20Meshes%20in%20Bentley%27s%20Applications.pdf>

DABOVE, GRASSO a PIRAS, 2019. Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure. *Applied Sciences* [online]. 9(18) [cit. 2022-05-07]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: [doi:10.3390/app9183884](https://doi.org/10.3390/app9183884)

Expoziční čas, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Expozi%C4%8Dn%C3%AD_%C4%8Das

FARO Focus X 130: High - Speed 3D Laser Scanner. In: *Building point southeast* [online]. Building point southeast [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.buildingpointseast.com/wp-content/uploads/2015/12/Focus3D-X130-laser-scanner_DS_US_0815_LR.pdf

HANZL, Vlastimil a Karel SUKUP, 2001. *Fotogrammetrie I*. Brno: CERM. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2049-9.

Hloubka ostrosti, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hloubka_ostrosti

HOFMANOVÁ, Alžběta, 2016. *Stabilita prvků vnitřní orientace digitálního fotoaparátu* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/23621>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Fiala Radek, Ing. Ph.D.

JAUD, Marion, Matthieu KERVOT, Christophe DELACOURT a Stéphane BERTIN, 2019. Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics. *Remote Sensing* [online]. 11(19) [cit. 2022-05-07]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs11192242](https://doi.org/10.3390/rs11192242)

KABADAYI, Adem, Yunus KAYA a Abdurahman YASIN YİĞİT, 2020. Comparison of documentation cultural artifacts using the 3D model in different software. *Mersin Photogrammetry Journal* [online]. **2020**(2), 51-58 [cit. 2022-05-07]. ISSN 2687-654X. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1173728>

KALVODA, Petr, 2021. Efektivita využití low-cost kamer v aplikacích blízké fotogrammetrie. In: *VUT* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vav/projekty/detail/32771>

Kaple svatého Jana Nepomuckého (Guntramovice), 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaple_svat%C3%A9ho_Jana_Nepomuck%C3%A9ho_\(Guntramovice\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaple_svat%C3%A9ho_Jana_Nepomuck%C3%A9ho_(Guntramovice))

KINGSLAND, Kaitlyn, 2020. Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* [online]. **18** [cit. 2022-05-07]. ISSN 22120548. Dostupné z: doi:10.1016/j.daach.2020.e00157

Maintaining Trust in the Canon Brand: Vol.2 The reason behind the "white lens": Searching for a brand-new coating. *Canon Global* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://global.canon/en/quality/story/vol02.html>

NEFF, Ondřej. *Záhada značky nekonečno (∞)* [online]. 2 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://digneff.cz/zahada-znacky-nekonecno-%E2%88%9E/>

NIKOLOV, Ivan a Claus MADSEN, 2016. Benchmarking Close-range Structure from Motion 3D Reconstruction Software Under Varying Capturing Conditions. *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* [online]. Cham: Springer International Publishing, 15-26 [cit. 2022-05-07]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-319-48495-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-48496-9_2

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

PROKOP, Jaromír, Jakub NOSEK, Petr KALVODA a Milan VESELÝ, 2021. Posouzení přesnosti fotogrammetrických výsledků z nízkonákladové a profesionální kamery. *Juniorstav* [online]. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, **2022**, 597-602 [cit. 2022-05-07]. ISBN 978-80-86433-76-9. Dostupné z: doi:10.13164/juniorstav.2022.597

Trimble R8s GNSS system. In: *Geospatial Trimble* [online]. Trimble Navigation limited [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-10/Datasheet%20-%20Trimble%20R8s%20GNSS%20-%20English%20US%20-%20Screen.pdf>
Trimble S8 total station. In: *Trimble* [online]. Trimble Navigation limited [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf

Vyvážení bílé, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyv%C3%A1%C5%BEn%C3%AD_b%C3%AD%C3%A9

Xiaomi Mi 10T Pro. In: *Mi* [online]. [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.mi.com/global/mi-10t-pro/specs/>

YILMAZTURK, Ferruh a Ali Ersin GURBAK, 2019. Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Information. *International Journal of Optics* [online]. **2019**, 1-10 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1687-9384. Dostupné z: doi:10.1155/2019/8561380

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Vývoj rozlišení senzorů v čase

Obrázek č. 2 Znázornění centrální projekce v prostoru

Obrázek č. 3 Kaple sv. Jana Nepomuckého

Obrázek č. 4 Mobilní telefon Xiaomi Mi 10T Pro

Obrázek č. 5 Canon EOS 6D Mark II

Obrázek č. 6 Totální stanice Trimble S8

Obrázek č. 7 Přijímač GNSS-RTK Trimble R8s

Obrázek č. 8 Pozemní skener FARO Focus 3D X130

Obrázek č. 9 Trojpodstavcová souprava Seco

Obrázek č. 10 Vytyčovací minihranol NPS 112

Obrázek č. 11 sada referenčních koulí

Obrázek č. 12 způsob pořizování snímků zájmového objektu

Obrázek č. 13 Prostorové rozlišení fotografie

Obrázek č. 14 Vztah hodnoty clony a hloubky ostrosti

Obrázek č. 15 Zaostření na nekonečno

Obrázek č. 16 Vztah expozičního času a pohybové neostrosti

Obrázek č. 17 Vztah mezi hodnotou ISO a obrazovým šumem

Obrázek č. 18 Testovací pořizování snímků při rekognoskaci terénu

Obrázek č. 19 “Rozskočení” kaple

Obrázek č. 20 Nesprávná rekonstrukce kříže na věži kaple

Obrázek č. 21 Pohled na kříž v zobrazení hladké modelování

Obrázek č. 22 Pohled na kříž v zobrazení drátový model

Obrázek č. 23 Selektce nežádoucích plošek

Obrázek č. 24 Kříž po odstranění části nežádoucích plošek

Obrázek č. 25 Porovnání modelu před (vlevo) a po (vpravo) editaci

Obrázek č. 26 grafické znázornění vyskytujících se distorzí objektivu kamery

Obrázek č. 27 Dřevěný pařez použitý pro prekalibraci

Obrázek č. 28 Řídké mračno bodů

Obrázek č. 29 Informace o Chunk

Obrázek č. 30 Tabulka korelací

Obrázek č. 31 Náhled ve Sketchfabu s otevřeným „Model Inspector“

Obrázek č. 32 Anotace ve Sketchfabu

Obrázek č. 33 Výsledné 3D mesh modely z produkce (vlevo Canon, vpravo Xiaomi)

Obrázek č. 34 Porovnání referenčního mračna a 3D mesh modelů (vlevo Canon, vpravo Xiaomi)

Seznam Tabulek

Tabulka č. 1 Přehled parametrů porovnávaných softwaru

Tabulka č. 2 Parametry Xiaomi Mi 10T Pro

Tabulka č. 3 Parametry Canon EOS 6D Mark II + 24 mm objektiv

Tabulka č. 4 Parametry totální stanice Trimble S8

Tabulka č. 5 Parametry přijímače GNSS – RTK Trimble R8s

Tabulka č. 6 Parametry pozemního skeneru FARO Focus 3D X130

Tabulka č. 7 Prvky vnitřní orientace zrcadlové kamery Canon EOS 6D Mark II.

Tabulka č. 8 Porovnání výsledků triangulace na kontrolních bodech s fixací parametrů distorze a bez fixace

Tabulka č. 9 Analýza souřadnicových rozdílů pro zrcadlovou kameru Canon

Tabulka č. 10 Analýza souřadnicových rozdílů pro mobilní telefon Xiaomi

Tabulka č. 11 testování vzdáleností 3D mesh modelů na výskyt vybočujících a odlehlých hodnot.

Seznam digitálních příloh

Příloha č. 1 – Protokol k výpočtu souřadnic vlíčovacích a kontrolních bodů

Příloha č. 2 – Přehled vlíčovacích a kontrolních bodů (DVD)

Příloha č. 3 – Souřadnice vlíčovacích a kontrolních bodů

Příloha č. 4 – Protokol registrace mračna bodů

Příloha č. 5 – Očištěné mračno bodů (DVD)

Příloha č. 6 – Kvality report Canon Bentley ContextCapture

Příloha č. 7 – Kvality report Xiaomi Bentley ContextCapture

Příloha č. 8 – Testování odlehklých hodnot distorze

Příloha č. 9 – Report o prekalibraci Agisoft Metashape

Příloha č. 10 – Kvality report Xiaomi s prekalibrací Bentley ContextCapture

Příloha č. 11 – Mesh model kaple Canon (DVD)

Příloha č. 12 – Mesh model kaple Xiaomi (DVD)

Příloha č. 13 – Analýza přesnosti výsledných mesh modelů

* - poznámka DVD v závorce znamená, že tato příloha se nachází pouze na přiloženém DVD.

Seznam fyzických příloh

Příloha č. 14 – model kaple vyhotovený na 3D tiskárně