

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

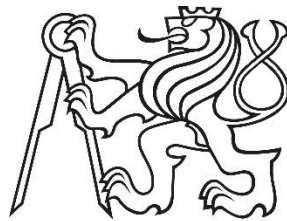
DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tvorba 3D modelu kostela
Creating a 3D model of the church

Vedoucí práce: doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

Katedra speciální geodézie

květen 2019

Bc. Michal NOVOTNÝ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novotný Jméno: Michal Osobní číslo: 439254
Zadávací katedra: katedra speciální geodézie
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tvorba 3D modelu kostela
Název diplomové práce anglicky: Creating a 3D model of the church

Pokyny pro vypracování:

Vlastní zaměření kostela pomocí UAV a laserového skeneru. Tvorba mračna bodů v různých fotogrammetrických softwarech a jejich porovnání. Porovnání mračna z UAV a laserového skeneru. Vytvoření výsledného 3D modelu pomocí 3D tisku.

Seznam doporučené literatury:

Urban, R.: Geodetické práce při měření posunů a přetvoření stavebních objektů. 1. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2015.

Štroner, M. - Hampacher, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 1. vyd. Praha: CTU Publishing House, 2011. 313 s. ISBN 978-80-01-04900-6.

Štroner a kol.: 3D skenovací systémy. 1. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2013.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.2.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

12.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním čtyř fotogrammetrických softwarů, jedná se konkrétně o softwary Agisoft PhotoScan, Meshroom, Reality Capture a Pix4Dmapper. Ve všech softwarech bylo zpracováno fotogrammetrické zaměření kaple Nanebevzetí Panny Marie. Výsledné mračno bodů a mesh model byly matematicky a vizuálně porovnány v programu CloudCompare s referenčním měřením pořízeným laserovým skenováním. Tato práce shrnuje výhody a nevýhody jednotlivých softwarů při zpracování interiéru a exteriéru stavby.

Exteriér objektu byl nasnímán UAV fotogrammetrií a interiér pozemní fotogrammetrií z pevného postavení kamery. Model byl připojen geodetickým měřením do polohového systému JTSK (Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální) a výškového systému Bpv (Výškový systém baltský – po vyrovnání). Tato práce se částečně zabývá i 3D tiskem jako jednou z metod pro 3D vizuální výstupy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laserové skenování, fotogrammetrie, mračno bodů, 3D model, 3D tisk, mesh model, textury, kaple Navštívení Panny Marie

ABSTRACT

This diploma thesis deals with comparison of four photogrammetric software, namely Agisoft PhotoScan, Meshroom, Reality Capture and Pix4Dmapper. In all software was processed photogrammetric measurement of the chapel Navštívení Panny Marie. The final point cloud and mesh model were mathematically and visually compared in the software CloudCompare with reference measure obtained by laser scanning. This thesis summarizes advantages and disadvantages of individual software in the interior and exterior processing.

The exterior of the building was scanned by UAV photogrammetry and the interior by ground photogrammetry from a static camera position. The model was connected by geodetic measurement to the position system JTSK (Datum of Uniform Trigonometric Cadastral Network) and the vertical system Bpv (Baltic Vertical Datum – After Adjustment). This thesis also deals with 3D printing as one of the methods for 3D visual output.

KEYWORDS

Laser scanning, photogrammetry, point cloud, 3D model, 3D print, mesh model, textures, chapel Navštívení Panny Marie

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci s názvem Tvorba 3D modelu kostela jsem vypracoval samostatně na základě odborných konzultací s vedoucím práce. Použitou literaturu a podklady k vypracování diplomové práce uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Rudolfu Urbanovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a konzultace, které byly pro její vyhotovení nezbytné. Dále děkuji firmě G4D s. r. o. za zapůjčení měřické techniky a za snímkování kaple leteckou fotogrammetrií. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu, trpělivost a ohleduplnost v mém dosavadním studiu.

Obsah

Seznam zkratk	10
Úvod	11
1 Literární řešerše	12
2 Kaple Navštívení Panny Marie	14
2.1 Základní informace o kapli	14
2.2 Historie kaple	15
3 Použité technologie	16
3.1 Letecká fotogrammetrie	16
3.1.1 Legislativa provozu UAV	16
3.1.2 Měřické komory a nosiče	17
3.1.3 Metody snímkování	19
3.1.4 Vlivy ovlivňující přesnost.....	23
3.1.5 Výstupy UAV fotogrammetrie	24
3.2 Pozemní fotogrammetrie	25
3.2.1 Měřické komory	25
3.2.2 Metody snímkování	26
3.2.3 Vlivy ovlivňující přesnost snímků	26
3.2.4 Výstupy pozemní fotogrammetrie	27
3.3 3D skenovací systémy.....	28
3.3.1 Metody a principy laserového měření.....	29
3.3.2 Měřické laserové přístroje.....	32
3.3.3 Vlivy ovlivňující přesnost.....	33
3.3.4 Výstupy 3D skenování	34
3.4 3D tisk	35
4 Měření kaple	37
4.1 Vybudování geodetického bodového pole	37
4.2 Snímkování UAV fotogrammetrií	39
4.3 Snímkování pozemní fotogrammetrií	41
4.4 Laserové skenování.....	43

5	Zpracování	45
5.1	Tvorba modelu v softwaru Agisoft PhotoScan	45
5.1.1	Zpracování exteriéru	46
5.1.2	Zpracování interiéru	47
5.2	Tvorba modelu v softwaru Reality Capture	48
5.2.1	Zpracování exteriéru	49
5.2.2	Zpracování interiéru	50
5.3	Tvorba modelu v softwaru Pix4Dmapper	51
5.3.1	Zpracování exteriéru	52
5.3.2	Zpracování interiéru	53
5.4	Tvorba modelu v softwaru Meshroom	54
5.4.1	Zpracování exteriéru	55
5.4.2	Zpracování interiéru	56
5.5	Doplňující práce v softwaru CloudCompare	57
5.6	3D tisk	58
6	Porovnání kvality a přesnosti výstupů	60
6.1	Porovnání mračen bodů	60
6.1.1	Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)	61
6.1.2	Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér)	63
6.1.3	Porovnání kulatého okna (exteriér)	65
6.1.4	Porovnání křížové klenby kaple (interiér)	67
6.1.5	Porovnání dřevěného obložení (interiér)	69
6.2	Porovnání síťových modelů	71
6.2.1	Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)	71
6.2.2	Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér)	73
6.2.3	Porovnání kulatého okna (exteriér)	75
6.2.4	Porovnání křížové klenby kaple (interiér)	77
6.2.5	Porovnání dřevěného obložení (interiér)	79
6.3	Porovnání realistických textur	81



6.3.1	Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)	81
6.3.2	Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér).....	82
6.3.3	Porovnání kulatého okna (exteriér).....	83
6.3.4	Porovnání křížové klenby (interiér)	84
6.3.5	Porovnání dřevěného obložení (interiér)	85
6.4	Zhodnocení dosažených výsledků	86
7	Závěr	88
	Použité zdroje	89
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek	95
	Seznam příloh.....	96

Seznam zkratek

CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
CZEPOS	Síť permanentních stanic GNSS České republiky
FDM	Fusion Deposition Modelling
GIS	Geografický informační systém
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Integrated Navigation System
ISO	Citlivost fotografické vrstvy
PLA	Polylactic Acid
RAM	Operační paměť počítače
RMS	Root Mean Square
RTK	Real Time Kinematic
SFAP	Small Format Aerial Photography
SfM	Structure from Motion
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ÚCL	Úřad pro civilní letectví

Úvod

Fotogrammetrie je stále častěji využívána v oblasti geodézie pro vytváření 3D modelů, dokumentaci historických památek a další geodetické práce. Pro zpracování fotogrammetrického zaměření je na trhu nabízeno mnoho různých softwarů. Za účelem usnadnění výběru vhodného softwaru pro zpracování členité stavby byl zaměřen interiér a exteriér kaple Nanebevzetí Panny Marie v obci Žďár pomocí pozemní a UAV fotogrammetrie a pořízené snímky byly postupně zpracovány ve specializovaných softwarech pro tvorbu mračen a mesh modelů s realistickými texturami.

Cílem této práce je porovnání čtyř fotogrammetrických softwarů, ve kterých lze vyhotovit model z fotogrammetrického zaměření. Pro zpracování byly vybrány tři nejčastěji používané placené softwary – Agisoft PhotoScan, Reality Capture a Pix4Dmapper a jeden neplacený „open source“ software Meshroom. Výsledná mračna bodů a mesh modely exteriéru a interiéru zaměřené kaple budou matematicky a vizuálně porovnány v programu CloudCompare s referenčním měřením pořízeným laserovým skenováním. Pro vizuální a prezenční účely bude vyhotoven 3D výtisk modelu pomocí vlastní tiskárny využívající technologii FDM (*Fusion Deposition Modelling*).

Diplomová práce je rozdělena do několika částí. V první části jsou uvedeny základní informace o zaměřované kapli, která sloužila jako objekt pro porovnání fotogrammetrického zpracování. Ve druhé části jsou teoreticky popsány technologie nezbytné pro zaměření objektu a 3D tisk, jež byl využit pro vizuální prezentaci digitálního modelu. Třetí část se věnuje samotnému zaměření interiéru a exteriéru kaple, které bylo rozděleno na klasické geodetické práce, fotogrammetrické zaměření a laserové skenování. V další kapitole jsou popsány jednotlivé softwary využité pro zpracování fotogrammetrického zaměření a příprava modelu na 3D tisk. Na závěr je uvedeno porovnání výstupů z jednotlivých softwarů s referenčním měřením pořízeným laserovým skenováním.

1 Literární rešerše

V této kapitole budou uvedeny vybrané odborné články zabývající se fotogrammetrickým a laserovým zaměřením objektů. Dále zde budou uvedeny závěrečné vysokoškolské práce, které se též zabývají danou problematikou a na závěr zde budou uvedeny příklady zpracování 3D modelů a dokumentací od vybraných firem, které se specializují na fotogrammetrii a laserové skenování.

Odborný článek [1] se zabývá tvorbou 3D modelu ze snímků pořízených průřezovou metodou, které byly následně zpracovány v softwaru PhotoModeler Scanner. Práce se dále zabývá správnou volbou a technikou zpracování. Objekt zájmu byl zaměřen i laserovým skenerem a model z laserového skenování byl vyhotoven v softwaru Trimble RealWorks. Na závěr byly oba modely porovnány na základě horizontálních řezů.

V článku [2] je uveden způsob tvorby 3D modelu nízkonákladovým způsobem s použitím digitálních neměřických komor. V práci je uveden postup zpracování modelu v softwarech z laboratoře MATIS, které jsou volně dostupné. Tento postup zpracování je vhodný pro uživatele s omezenými finančními zdroji a minimální znalostí fotogrammetrie. V závěru jsou uvedeny ukázky zpracování méně rozsáhlých modelů.

V publikaci [3] je popsáno fotogrammetrické zaměření kalibrovaným digitálním fotoaparátem a přesným laserovým skenerem bronzové sochy Jana Žižky. Dále je zde popsáno rozmístění identických bodů ve formě kulatých terčů a vlíčovacích bodů ve formě geodetických reflexních cílů, které byly zaměřeny totální stanicí. Orientace snímků byla provedena v softwaru Photomodeler. Pro kombinaci fotogrammetrie a laserového skenování byl v rámci této práce vyvinut vlastní software v programu Matlab.

V bakalářské práci [4] je uvedeno zpracování objektů ve fotogrammetrických softwarech Agisoft PhotoScan, Reality Capture, Pix4Dmapper a 3DFlow Zephyr Free, při pořízení nízkého počtu snímků. V této publikaci však byly porovnány pouze drobné předměty, neboť ostatní modely se nepodařilo vyhotovit.

Diplomová práce [5] pojednává o testování hranice, kdy ještě dojde k úspěšnému spojení snímků, a o tvorbě 3D modelu v softwarech Agisoft PhotoScan a Reality Capture a následné porovnání vytvořených modelů s daty z laserového skenování.

Cílem diplomové práce [6] bylo teoretické porovnání fotogrammetrie a laserového skenování při tvorbě 3D modelu. Model z fotogrammetrie byl vytvořen v programu PhotoModeler Scanner a model vytvořený z mráčka pořízeného laserovým skenováním v softwaru Leica Cyclone. Porovnávaným objektem byla malá skříňka.

Firma G4D s. r. o. [7] se zabývá převážně fotogrammetrií a laserovým skenováním. Na webových stránkách prezentují ukázkové vypracované projekty. Jako jeden z mnoha příkladů uvádí skenování technologie papírenského stroje v Mondí Štětí z ledna 2019, kde bylo použito čistě laserové skenování. Další z příkladů realizace uvádí zaměření skutečného stavu Chrámu sv. Bartoloměje z května 2018, kde bylo použito laserové skenování s doplněním fotogrammetrie z UAV systému.

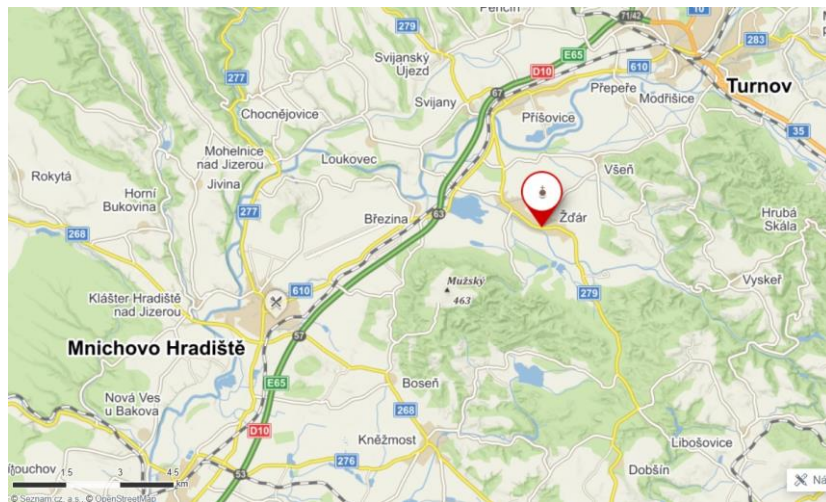
Společnost DigiTry Art Technologies s.r.o. [8] se zabývá fotogrammetrií, 3D skenováním a návrhem a realizací moderních interaktivních expozic. Jako příklad svých realizací uvádějí geofyzikální průzkum a 3D skenování chrámu sv. Cyrila a Metoděje či zaměření historického krovu kostela sv. Ignáce z Loyoly, kde výstupem byly 2D a 3D výkresové dokumentace půdorysů a řezů.

2 Kaple Navštívení Panny Marie

V této kapitole budou uvedeny základní informace o kapli Navštívení panny Marie, která byla předmětem měření. Dále zde bude pro úplnost zmíněna i její stručná historie. Kaple je definována jako kostel menších rozměrů, který nikdy nebyl ve vlastnictví církve. Tato stavba byla pro diplomovou práci vybrána kvůli svým rozměrům a dostatečně členité fasádě v novogotickém slohu.

2.1 Základní informace o kapli

Kaple Navštívení Panny Marie se nachází ve Středočeském kraji v okrese Mladá Boleslav v obci Žďár. Obec leží mezi městy Turnov a Mnichovo Hradiště, která jsou ve vzdálenosti do 10 km (obr. 1). Obec Žďár se skládá ze 6 osad. Osady se nazývají Břehey, Doubrava, Příhrazy, Skokovy, Žďár a Žehrov. Kaple se nachází v osadě Žďár u hlavní silnice spojující Svijany a Dobšín.



Obr. 1 Přehledná situace umístění kaple ¹

Stavba byla postavena na počátku 20. století podle vzoru hřbitovní kaple v Pelhřimově. Kaple se pyšní svým neogotickým slohem s velmi zachovalou fasádou (obr. 2). Objekt je menších rozměrů. Ve své delší části měří okolo 22 m, v té kratší pak zhruba 9 m. Výraznou charakteristikou je vysoká západní věž, která se tyčí do 27 m výšky. Ve věži ze západní strany je vstup do kaple. Další vstup do kaple, který vede za oltář, je pak z východní strany. V této podkapitole bylo čerpáno z [9].

¹ <https://mapy.cz/zakladni?x=15.0831352&y=50.5430222&z=18&lngd=1&source=base&id=2073255>



Obr. 2 Kaple Navštívení Panny Marie ²

2.2 Historie kaple

Dne 2. prosince 1898 zastupitelstvo obce rozhodlo, že na počest 50. letého výročí nástupu císaře a krále Františka Josefa I. na trůn bude v obci vystavěna kaple. Na základě tohoto rozhodnutí byla vzápětí uspořádaná veřejná sbírka. Velikou částí do sbírky přispěla rodina Kovářova, a to nejen finančními prostředky, ale také vybavením celé kaple. Jednalo se o kostelní náčiní, bohoslužební roucha, oltář, kazatelnu a lavice. Dále také financovala vymalování kaple a zasklení oken a věnovala pro stavbu pozemek o výměře 123 m². Dalšími dary přispěli obyvatelé z okolí. Přípravné práce na stavbu trvaly téměř 6 let, zatímco samotná stavba pouhý 1 rok. Se stavbou se začalo v červnu roku 1903 podle vzoru již zmíněné Pelhřimovské kaple. Kaple byla dokončena v červenci roku 1904 stavitelem Kobosilem a vysvěcena byla 31. července 1904 biskupem Dr. Františkem Kráslem. Toho dne byla do věže vložena pamětní listina a drobné mince. Roku 2016 byla kaple rekonstruována z důvodu zatékání do kaple a propadu podlahy. Rekonstruována byla fasáda, podlaha, omítky a vybavení kaple. V tomto odstavci bylo čerpáno z [9] a [10].

² [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaple_Navštívení_Panny_Marie_\(Žďár\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaple_Navštívení_Panny_Marie_(Žďár))

3 Použité technologie

V této kapitole bude uveden souhrnný popis technologií a metod, které byly použity pro vyhotovení měřických prací. Dále zde budou přiblíženy měřické přístroje, měřické komory a jejich nosiče.

3.1 Letecká fotogrammetrie

V našem případě byla využita UAS (*Unmanned Aerial Systems*) fotogrammetrie, která vychází z principu klasické fotogrammetrie. Jedná se o získávání dat bezkontaktním způsobem, kdy je využit nosič UAV (*unmanned aerial vehicle*), který je schopný pořizovat snímky. UAV je obecně definováno jako letadlo bez posádky, které je pilotováno buď manuálně na dálku, nebo se pohybuje poloautomaticky pomocí předem definovaných letových plánů, anebo se pohybuje plně automaticky pomocí dynamických autonomních systémů.

3.1.1 Legislativa provozu UAV

Při využívání UAV systémů je nutné se řídit platnou legislativou v dané zemi. Dříve bylo z důvodu utajování polohových informací velice obtížné získat letecké povolení pro fotogrammetrické práce. Dnes je situace již jiná a lze snímkovat jakýkoliv objekt, není-li to výslovně zakázáno. Do konce února roku 2012 nemělo létání s bezpilotními systémy oporu v zákoně a na stroje se nevztahovala žádná pravidla, dokonce ani pro zařízení převyšující hmotnost 20 kg. Dne 1. 3. 2012 byl schválen doplněk X leteckého předpisu L2. V první části tohoto předpisu jsou definovány základní pojmy jako je autonomní letadlo, bezpilotní letadlo, bezpilotní systém či model letadla. Dále je zde uveden rozsah působnosti, který stanovuje závazné národní požadavky, jež splňují kritéria přílohy II nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008 v platném znění. Níže je definována i bezpečnost, dohled pilota a jeho odpovědnost. Z doplňku X vyplývá, že let bezpilotního letadla smí být prováděn takovým způsobem, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru, osob a majetku na zemi. Pilot musí mít bezpilotní letadlo vždy v přímém dohledu, aby mohl sledovat překážky a okolní letový prostor, s výjimkou, kdy Úřad pro civilní letectví (ÚCL) nestanoví jinak. Pilot je odpovědný za provedení bezpečného letu a přípravy bez ohledu na automatizaci řízení letu. Dále je uvedeno, že by pilot měl mít možnost zasáhnout do průběhu letu a ukončit

ho v případě, že by mohlo dojít k ohrožení. Dále jsou zde uvedeny meteorologické podmínky a prostory, ve kterých lze bezpilotní systémy provozovat. Zákon také nařizuje, že bezpilotní letadla nesmí být použita k přepravě nebezpečných nákladů, které by mohly způsobit obecné ohrožení, a že letadlo nesmí být použito ke shazování nákladu za letu. Na závěr je uvedena ostatní legislativa, která musí být v souladu s platnými právními předpisy. V tomto odstavci bylo čerpáno z [11] a [12].

3.1.2 Měřické komory a nosiče

Měřické nosiče (nebo též platformy) se dají rozdělit do několika kategorií, nejčastěji se však dělí na motorové a nemotorové. Mezi nemotorové UAV nosiče můžeme zařadit draky. **Draci** byli používáni jako jeden z prvních nosičů pro SFAP (*small format aerial photography*). Jak je uvedeno v literatuře [11], velikou výhodou je, že drak může operovat ve zvýšených povětrnostních podmínkách, které jsou dokonce nezbytné pro použití tohoto nosiče. Typ draka uvedený v této literatuře může létat od 50 m do 150 m a rychlost větru musí být vyšší než 4 m/s. Drak je uvázán na lano, kterým je ovládán, a proto je jeho využití vhodné pouze na větší vzdálenosti. Další možností jsou **balóny**, které se plní lehčím plynem, než je vzduch. Nejčastěji to bývá hélium. V současné době se tato platforma prakticky nepoužívá. Balóny jsou vhodné pro snímkování území s menším rozsahem, kde se předpokládá nižší frekvence snímkování. Jejich výhodou je možnost stát na místě a snímkovat bez vibrací, které způsobují motorové UAV platformy. Další výhodou je, že lze snímkovat ve velkých výškách nad terénem. Použití je však výrazně limitováno povětrnostními podmínkami (balón lze prakticky použít pouze za úplného bezvětří). **Letadla a křídla** mají široké zastoupení v UAV fotogrammetrii, avšak jejich aplikace je dosti omezena, neboť jejich let je poměrně rychlý a doba expozice musí být velice krátká, aby snímky nebyly rozmazané. Konstrukce letadla většinou neumožňuje bezpečné umístění kamery, aby nebyla ohrožena při vzletu a přistání. Pilotování letadla není snadné, a proto je nejčastěji navigováno pomocí předem připraveného letového plánu. **Vzducholoď, vrtulníky a multirotorové systémy** (multikoptery) jsou další kategorií, která je hojně využívána. Vzducholoď mají podobné vlastnosti jako balóny, ale jsou ovládány motory. Výhodou vzducholoď je pomalý a klidný let a dlouhá doba letu. Vrtulník je schopen zůstat ve vzduchu na jednom místě, což je velká výhoda při pořizování snímků. Ovládání je však velice náročné a vyžaduje dlouhou praxi. Multirotorové systémy mají všechny výhody vrtulníku a k tomu disponují

poměrně snadnou pilotáží. Multirotorové systémy pracují na podobném principu jako vrtulníky, přičemž vrtulníky mají zadní vrtuli s horizontálním tahem, která umožňuje rotaci kolem svislé osy, zatímco multikoptery mají několik vrtulí s vertikálním tahem a jejich ovládání a stabilita je zajištěna rozdílným tahem jednotlivých vrtulí. Na obrázku (obr. 3) je vyobrazena kvadrokoptera DJI Phantom 4 Pro+ a křídlo eBee Plus.



Obr. 3 Vlevo DJI Phantom 4 Pro+ v pravo eBee Plus³

Nejdůležitějším vybavením UAV systémů pro fotogrammetrii jsou zařízení, která pořizují snímky. Tato zařízení se dají obecně rozdělit na dvě kategorie, a to na měřické a neměřické komory. Měřické komory jsou primárně přizpůsobené na přesné fotogrammetrické práce a jejich objektiv je tvořen soustavou čoček, která zmírňuje optické vady. Jedná se o geometrickou přesnost, která je způsobená převážně radiální a tangenciální distorzí, a obrazovou kvalitou, která může být ovlivněna barevnými vadami, jež jsou způsobeny odlišným indexem lomu pro různá barevná spektra.

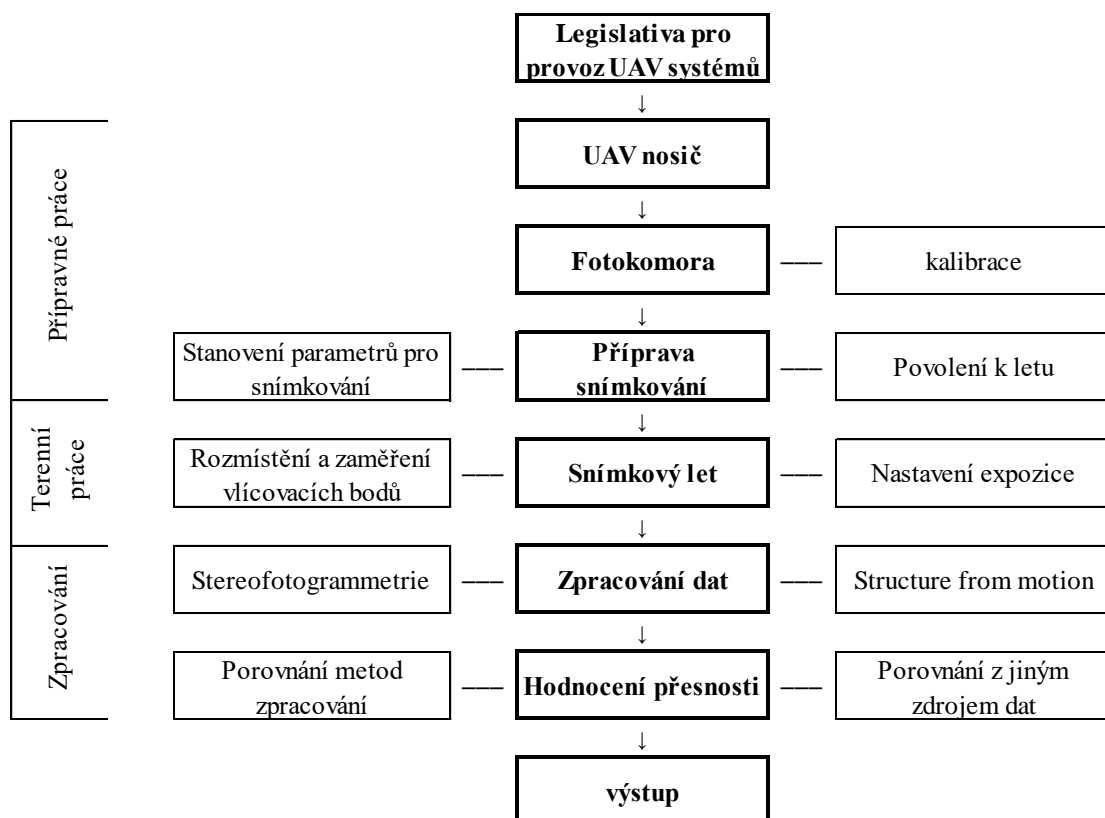
Dalším vybavením mohou být IMU (*Inertial Measurement Unit*), GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a INS (*Inertial Navigation System*), které umožňují provádění letu podle letového plánu, navedení na náletové osy a přímé určení prvků vnější orientace, které však nejsou dostatečně přesné a nelze je tak přímo užít pro následné zpracování. Mezi prvky vnější orientace se řadí prostorové souřadnice projekčního centra (X_0, Y_0, Z_0) a tři úhly definující polohu osy záběru vůči souřadnicovým osám (ω, φ, κ). Náklony a rychlost nosičů jsou zaznamenávány pomocí soustav akcelerometrů a gyroskopů a jejich pozice je určena pomocí GNSS technologie. Některé UAV systémy mohou být manuálně ovládány pomocí dálkového zařízení, které komunikuje s nosičem

³ <https://unmanned-aerial.com/senseflys-latest-fixed-wing-mapping-drone-is-here>
<https://www.wired.com/2017/06/review-dji-phantom-4-pro-plus/>

pomocí rádiového či Wi-Fi signálu. Nosič může být také vybaven gimbalem, na který se připevňuje měřická komora. Tento gimbal může být pomocí krokových motorů či servomotorů ovládán a komorou poté lze cílit do určitého směru bez pohybu nosiče. Dálková zařízení jsou dále vybavena pomocným zařízením pro pozorování snímaného obrazu, které je buď přímo zabudované v dálkovém zařízení, nebo ho lze k němu externě připojit. V této podkapitole bylo čerpáno z [11] a [13].

3.1.3 Metody snímkování

Před samotným snímkováním je potřeba si naplánovat koncept prací. Na obrázku (obr. 4) je znázorněno schéma, jak by se mělo postupovat při nasazení UAV systémů. V prostředním sloupci s tučným textem jsou uvedené činnosti, které je nutné dodržet, ostatní zmíněné činnosti jsou pouze doporučené.



Obr. 4 Schéma činností při nasazení UAV systému [11]

Pro nastavení optimálních parametrů snímkování je důležité před snímkováním zadat některý ze základních parametrů. Pro vytvoření fotoplánů a ortofotomap tímto parametrem nejčastěji bývá GSD (*Ground Sample Distance*), tedy prostorová rozlišovací

schopnost. Mezi další důležité parametry snímkování patří výška letu, měřítko snímku, délka základny mezi středy snímků a ohnisková vzdálenost komory. Při požadované hodnotě GSD jednoho pixelu lze dopočítat výšku letu podle uvedeného vzorce:

$$H = \frac{GSD \cdot f}{p} \quad (1)$$

kde:

H – průměrná výška letu

GSD – prostorová rozlišovací schopnost

f – ohnisková vzdálenost

p – skutečná velikost obrazového prvku

Pokud je známa výška letu, je možné dopočítat, jak velké území bude na snímku zobrazeno. Před tímto krokem je potřeba dopočítat měřítko snímku:

$$m = \frac{H}{f} \quad (2)$$

kde:

m – měřítko snímku

H – průměrná výška letu

f – ohnisková vzdálenost

Následně lze dopočítat velikost zobrazeného území na snímku. Pro výpočet musí být známa velikost obrazového snímače (tuto hodnotu udává výrobce dané komory). Poté lze dopočítat šířku a délku zobrazené scény:

$$D = d \cdot m \quad (3)$$

$$S = s \cdot m \quad (4)$$

kde:

D – délka skutečně zobrazená na snímku

d – délka obrazového snímače

S – šířka skutečně zobrazená na snímku

s – šířka obrazového snímače

m – měřítko snímku

Pokud je zvolen překryv snímků, lze také dopočítat vzdálenost mezi stanovišti, na kterých proběhne expozice. V letecké fotogrammetrii se podélný překryv doporučuje 80 % a příčný 60 %, v UAV fotogrammetrii se oba překryvy doporučují 80 %. Před samotným snímáním je dobré si uvědomit, že neměřické komory mají obdélníkový formát výstupu a je nutné si tak zvolit, která ze stran senzoru bude v linii letu. Při zvolení překryvu a rychlosti letu lze dopočítat čas mezi dvěma expozičními stanovišti dle uvedených vzorců:

$$B = D \cdot \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \quad (5)$$

$$B = S \cdot \left(1 - \frac{PE}{100}\right) \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{B}{Vg} \quad (7)$$

kde:

B – vzdálenost mezi dvěma expozičními stanovišti

D – délka skutečně zobrazená na snímku

PE – požadovaný procentuální překryv snímků

S – šířka skutečně zobrazená na snímku

ΔT – čas mezi dvěma expozičními stanovišti

Vg – průměrná rychlost letu

Na základě vypočtených hodnot lze provést navigaci snímkového letu. Navigace se provádí tzv. letovými body a letovými osami. Letový bod je stanoviště, které má zadané prostorové souřadnice, kterým UAV systém proletí a pořídí snímek či sérii snímků. Letové osy jsou pak spojnice letových bodů, po kterých se UAV pohybuje. Spousta softwarů pro plánování letu automaticky připraví plán letu podle zadaných parametrů. Pokud je UAV systém vybaven GPS/INS či IMU jednotkou, může být systém navigován automaticky, a pilot pouze kontroluje, zda systém provádí let správně a zda neohrožuje okolí. Pokud UAV systém nedisponuje navigačními jednotkami, musí být let proveden v manuálním režimu, kdy pilot ručně navádí systém do zvolených bodů, kde pořídí snímek, nebo je pilotováno takzvaným kontinuálním režimem, kdy je zvolen čas mezi expozicemi a systém je ručně navigován nad danou oblastí. Výsledky z manuálního a kontinuálního režimu jsou výrazně závislé na zkušenostech pilota.

Fotogrametrii můžeme rozdělit do kategorií podle počtu pořízených snímků na jednosnímkovou a vícesnímkovou a dále může být rozdělena podle metody zpracování snímků. Nejjednodušší metodou je **jednosnímková fotogrammetrie**, kdy je pořízen jediný snímek, nejlépe kolmý k povrchu daného objektu. Tato metoda však neumožňuje získat prostorové souřadnice, a proto není vhodná pro snímkování členitých objektů. Mezi více snímkovou fotogrametrii se řadí **průseková fotogrammetrie**, která vychází z metody prostorového protínání vpřed z úhlů s konvergentními osami záběru, a tudíž umožňuje získat prostorové souřadnice. Pro tuto metodu musí být pořízeny minimálně dva snímky stejné scény, je však vhodné pořídit snímků více. Nadbytečné snímky slouží pro zpřesnění výsledků a jejich kontrolu. Při snímkování je nutné dodržet základní pravidla, jako je překryv na daném objektu, konvergentní osy záběru a dostatečně velká základna mezi pořízenými snímky. **Stereofotogrammetrie** je založena na principu stereoskopického vjemu, kdy jsou pořízeny minimálně dva snímky, v ideálním případě kolmé k objektu, a na základě úhlové paralaxy jsou vyhodnoceny prostorové souřadnice. Při skládání stereodvojic snímků do bloků lze vyhodnotit rozsáhlé stereomodely. Poslední metodou je metoda **SfM** (*Structure from Motion*), která přebírá všechny výhodné vlastnosti ze stereofotogrammetrie a průsekové fotogrammetrie, mohou být tedy pořízeny snímky jak s rovnoběžnou, tak s konvergentní osou záběru. Snímkování je tak jednodušší a rychlejší. Na tomto principu pracuje většina moderních softwarů na vyhodnocování 3D modelů. V literatuře [11] je uvedeno porovnání stereofotogrammetrie a SfM při zpracování digitálního modelu povrchu a jako kvalitnější a přesnější uvádí výsledky z metody SfM. Metoda SfM je založena na zpracování digitálního obrazu, nebo počítačového vidění, kde nemusí být známy vlíčovací body a řeší se přímé vztahy nejméně dvou snímků za pomoci epipolární geometrie.

Fotogrammetrie je obecně založena na přímém vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi, kde výpočet vychází z kolineárních rovnic a je prováděn iteračním postupem. Vstupními hodnotami jsou snímkové souřadnice a souřadnice geodeticky zaměřených vlíčovacích bodů. Neznámými jsou pak prvky vnější a vnitřní orientace a souřadnice nově určovaných bodů. Mezi prvky vnitřní orientace patří souřadnice hlavního snímkového bodu (dx' , dy'), konstanta komory (f) a často se mezi tyto prvky také řadí průběh radiální distorze. Níže je uvedena rovnice komplexního řešení:

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \quad (8)$$

$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \quad (9)$$

kde:

x' , y' , $(-f)$ – měřené snímkové souřadnice

x'_0 , y'_0 – souřadnice hlavního bodu snímku

r_{11} až r_{33} – prvky prostorové matice rotace

X , Y , Z – geodetické souřadnice bodů

X_0 , Y_0 , Z_0 – souřadnice projekčního centra

V této podkapitole bylo čerpáno z [11], [13] a [14].

3.1.4 Vlivy ovlivňující přesnost

Mezi vlivy ovlivňující přesnost se řadí kvalita snímků, kde se jedná jak o rozlišovací schopnost, tak o smaz snímků. Rozlišovací schopnost, která je dána velikostí pixelu na povrchu předmětu, má značný vliv na určení jednotlivých prvků na snímku. Tuto hodnotu lze ovlivnit vzdáleností snímkování od předmětu, tedy čím blíže jsme k předmětu, tím lépe na snímku dokážeme rozlišit jednotlivé prvky, kterými mohou být například signalizační terče identických bodů. Na výslednou kvalitu snímků mají vliv meteorologické podmínky, jako je světelnost, srážky či silný vítr, který může pohybovat nosičem.

Kvalita snímků je dále ovlivněna typem a kvalitou snímače a způsobem vzniku digitálního obrazu. Snímače jsou vyráběny z křemíkové fotodiody a patří mezi ně CCD snímače (*Charge Coupled Device* – zařízení se sdruženými náboji) a CMOS snímače (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Čidlo **CCD snímače** se skládá z polovodičových křemíkových prvků, které reagují na vlnové délky od 200 nm do 1100 nm a vlnovou délku vykazuje změnou elektrického odporu. Pro určení citlivosti k viditelnému spektru (380–720 nm) musí být elektrický odpor filtrován. Při expozici vzniká na křemíkových prvcích elektrický náboj, který je přenesen do registru jako analogový signál, jež je následně zesílen, digitalizován a uložen. **CMOS snímače** pracují na principu tranzistorového jevu a jsou využívány nejen jako snímače obrazu, ale také

například jako mikroprocesory a elektronické paměti. CMOS čidlo oproti CCD čidlu sice spotřebovává mnohem méně elektrického proudu, je levnější na výrobu a má nižší šum, ale nemá konstantní citlivost k barvám.

Smaz snímků vzniká při nežádoucím pohybu komory při expozici. Smaz lze ovlivnit volbou nosiče, jehož vibrace jsou přenášeny na kameru. Dále lze tuto chybu ovlivnit rychlostí pohybu nosiče, popřípadě zkrácením expozičního času s ohledem na to, aby snímek nebyl podexponován.

Mezi další vlivy ovlivňující výslednou přesnost se řadí volba a rozmístění vlíčovacích bodů. Počet vlíčovacích bodů je dán podle typu výstupu, obvykle to bývá více jak 5 bodů, a jejich poloha se volí tak, aby byly co nejvíce rovnoměrně rozmístěny na zaměřovaném objektu. Dále se uvádí [15], že vlíčovací body by měly být zaměřeny minimálně takovou přesností, jaká je požadovaná od výstupu.

Výsledná přesnost je dále ovlivněna určením prvků vnitřní a vnější orientace. Prvky vnější orientace jsou určovány z již zmíněných vlíčovacích bodů a prvky vnitřní orientace se pro nejpřesnější práce zjišťují laboratorním způsobem, nebo současně při zarovnávání snímků. V této podkapitole bylo čerpáno z [11], [13], [14] a [15].

3.1.5 Výstupy UAV fotogrammetrie

Mezi výstupy UAV fotogrammetrie patří ortofotomapy s vysokým rozlišením nebo digitální modely terénu a reliéfu [7] (obr. 5). Snímkování může sloužit pro provádění pozemkových úprav či pro jiné mapovací účely. Dále lze UAV fotogrammetrii použít pro kontrolu geodetického měření a pro určování aktuálního stavu jak objektů, tak povrchů. Ze snímků se často vytvářejí 3D modely objektů nebo pouze mračna bodů. Výstupy lze dále použít například pro určování kubatur uskladněného materiálu nebo jako podklad pro terénní úpravy. Snímkování se také používá jako sběr dat do GIS (geografických informačních systémů) [8], neboť lze za velmi krátký čas získat informace z velkého území. Velikou výhodou je, že výstupy přebírají barevnou informaci ze snímků a mají velikou vypovídající hodnotu, která usnadňuje orientaci a zrychluje práci s pořízenými daty. V tomto odstavci bylo čerpáno z [13] a [16].



Obr. 5 Digitální model terénu⁴

3.2 Pozemní fotogrammetrie

Pozemní fotogrammetrie je měřická metoda, při které je pořízen měřický snímek či snímky ze statického stanoviště umístěného na zemi či takzvaně z ruky. Statická stanoviška mají výhodu v tom, že se jejich poloha může přesně geodeticky zaměřit. Pomocí pozemní fotogrammetrie lze pořídit kvalitní ostré snímky bez smazu, a proto je tato metoda vhodná pro zachycení velmi malých detailů na objektu.

3.2.1 Měřické komory

V dnešní době lze při správném postupu zpracování a při dostatečném počtu vlíčovacích bodů zpracovat snímky z libovolné komory. Speciální měřické komory jsou však nezbytné pro nejpřesnější práce, neboť jsou u nich dány prvky vnitřní orientace. Jedná se o geometrické vztahy, které popisují průchod paprsků komorou. Každá komora má určité chyby, které jsou způsobeny nepřesnou výrobou soustavy čoček, a výsledný snímek tedy nemusí geometricky odpovídat skutečnosti. V praxi to může vypadat tak, že prvky, které jsou ve skutečnosti přímé, mohou být na snímku prohnuté. Tento jev je způsobený radiální distorzí, která zásadně ovlivňuje přesnost výsledků. Radiální distorze se zvětšuje od středu snímku k jeho okrajům, což vyplívá ze vztahů pro středové promítání, na kterém je fotogrammetrie založena. Z těchto vztahů je jasné, že ve středu snímku jsou nejmenší chyby. Tangenciální distorze nezpůsobuje tak velké chyby, a proto

⁴ <https://www.g4d.cz/digitalni-3d-modely/digitalni-modely-terenu>

byla dříve při zpracování snímků často zanedbávána. V dnešní době není důvod tuto distorzi opomíjet, jelikož jí většina softwarů automaticky dopočítá. V současné době se více používají takzvané neměřické komory. Jedná se o klasické digitální fotoaparáty, u kterých však výrobce neudává prvky vnitřní orientace. Tyto prvky se zpětně zjišťují laboratorním způsobem, nebo v rámci postprocessingu při zarovnávání snímků. V této podkapitole bylo čerpáno z [15], [16] a [17].

3.2.2 Metody snímkování

Metody snímkování v pozemní fotogrammetrii se nijak zvlášť neliší od UAV fotogrammetrie. Velikou výhodou je, že si můžeme snadno rozvrhnout stanoviště snímkování a kontrolovat si dostatečný překryv na snímcích. Stejně jako u UAV fotogrammetrie se jedná o jednosnímkovou pozemní fotogrammetrii, průsekovou fotogrammetrii, stereofotogrammetrii a o metodu SfM.

3.2.3 Vlivy ovlivňující přesnost snímků

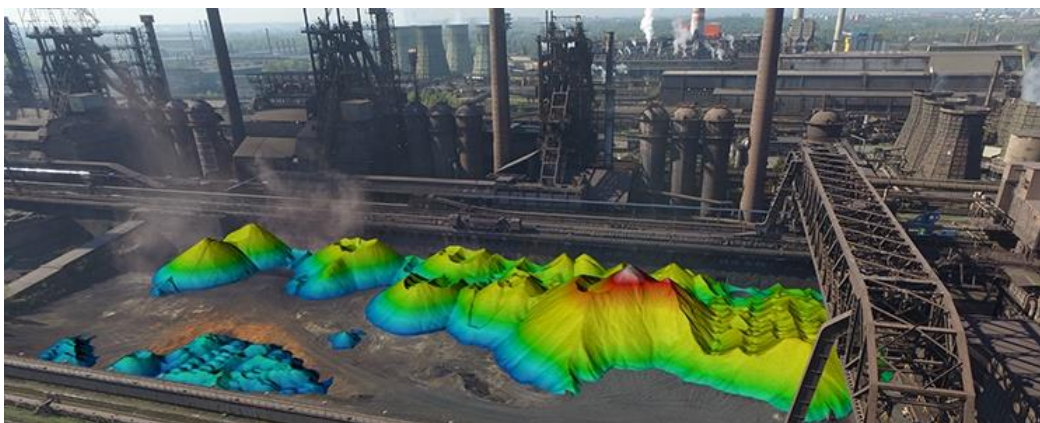
Mezi vlivy ovlivňující přesnost, jak již bylo zmíněno v části UAV fotogrammetrie, patří kvalita snímku. Oproti UAV fotogrammetrii můžeme výrazně omezit smaz snímku pořízením snímků ze stativu (obr. 6). Přesto se může stát, že se při stisku spouště uzávěrky pohne s kamerou a vznikne tak smaz. Většina moderních kamer umožňuje pořídit snímek několik sekund po zmáčknutí spouště, nebo na dálku pomocí mobilní aplikace či jiného dálkového zařízení. Jak již bylo zmíněno, kvalita snímku je ovlivněna kvalitou a typem snímače. Při použití jednosnímkové fotogrammetrie přesnost nejvíce ovlivňuje prostorová členitost objektu, proto je důležité snímkovat pouze rovné plochy, popřípadě se seznámit, jak velkou chybu způsobí prostorová členitost na snímku. Rovnice pro výpočet chyb z prostorové členitosti jsou uvedeny ve [14]. Hloubka ostrosti udává rozsah vzdáleností, kde se předmět musí nacházet, aby se jevil ostře. Hloubku ostrosti je částečně možné ovlivnit clonovým číslem a volbou ohniskové vzdálenosti. Při zvyšování clonového čísla vstupuje méně světla do komory a snímky mohou být tmavé, až nečitelné. Další vlivy ovlivňující přesnost jsou stejné jako u UAV fotogrammetrie. Jedná se jak o rozmístění a zaměření vlčovacíh bodů, tak o určení prvků vnitřní a vnější orientace. V této podkapitole bylo čerpáno z [11], [13] a [14].



Obr. 6 Fotoaparát Sony upevněný na karbonovém stativu⁵

3.2.4 Výstupy pozemní fotogrammetrie

Pozemní fotogrammetrie se nejčastěji využívá pro dokumentaci architektonických objektů, jako jsou fasády, fresky, klenby rytiny a další zajímavé prvky. V oblasti stavebnictví se fotogrammetrie používá pro určování deformací staveb. Může se jednat o mosty, hráze a jiné stavby, které je důležité pravidelně kontrolovat. Dále se používá pro výpočet kubatur uskladněného nejčastěji sypkého materiálu jako je uhlí, písek, šterka a jiné násypy (obr. 7). Pozemní fotogrammetrie je také známa pod pojmem blízká fotogrammetrie, která je využívána v kriminalistice pro dokumentaci trestných činů a dopravních nehod. Blízká fotogrammetrie se také využívá pro dokumentaci drobných předmětů získaných z archeologické činnosti. Může se jednat o mince, vázy, šperky a další historicky zajímavé prvky. Dalšími výstupy fotogrammetrie jsou mapy, plány, ortofotomapy, mračna bodů a mesh modely, které mohou sloužit jako podklady pro nejrůznější činnosti. V této podkapitole bylo čerpáno z [13] a [16].

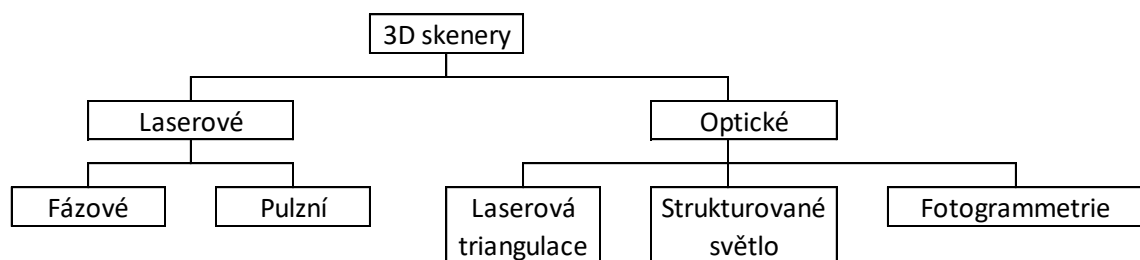


Obr. 7 Výpočet kubatur násypů

⁵ <https://www.fotoskoda.cz/gitzo-gk1545ta-traveler-karbonovy-stativ/>

3.3 3D skenovací systémy

Odvětví 3D skenování je v geodetické oblasti poměrně nové. 3D skenovací systémy se dělí na optické a laserové (obr. 8). Laserové skenovací systémy využívají pro určování vzdálenosti od skenovacího systému k předmětu měření pulzní laserovou technologii nebo fázovou technologii, kdy je určován fázový rozdíl. Poloha bodů je pak určena prostorovou polární metodou. Optické systémy jsou založeny na prostorovém protínání vpřed na principu fotogrammetrie, která již byla popsána v předchozí kapitole. Nejnovější skenovací systémy jsou schopné měřit až miliony bodů za sekundu, záleží na požadované přesnosti a vzdálenosti od objektu. Velikou výhodou 3D skenování je rychlý neselektivní bezkontaktní sběr dat, která jsou ve formě mračka bodů (*point cloud*). Metoda není limitovaná velikostí ani tvarem objektu a dokáže zaměřit povrchy různých typů. Sběr dat není mimo čistě fotogrammetrické systémy podmíněn osvětlením objektu a v průmyslu může být použit bez nutnosti zastavení provozu. V případě, že je odstávka provozu nezbytná, je čas zaměření minimální, a proto je metoda stále častěji využívána.



Obr. 8 Rozdělení 3D skenovacích systémů [20]

3D systémy jsou nyní neodmyslitelnou součástí geodézie. Technologie se rychle rozvíjí a na trhu se objevují stále rychlejší a přesnější přístroje, které mají důmyslnější programy na automatizaci a zpracování, jež dokážou maximálně zkrátit čas při zaměření a zpracování výsledků. Stále častěji se objevují přístroje, které jsou specializované na konkrétní činnosti. Jedním z příkladů může být totální stanice s integrovaným laserovým skenerem, umožňující kombinaci klasického geodetického měření a laserového skenování. Její výhodou je přesnější určení polohy přístroje a přesné zaměření mračka bodů s minimálním šumem. V této podkapitole bylo čerpáno z [18], [19] a [20].

3.3.1 Metody a principy laserového měření

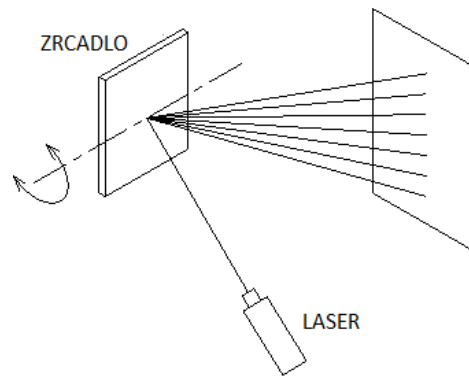
Výsledkem měření, tedy jednoho skenu, jsou prostorové souřadnice mračna bodů, které jsou určovány prostorovou polární metodou. U prostorové polární metody je určován vertikální a horizontální úhel a délka průvodiče k měřenému bodu, která je měřena elektronicky nebo optoelektronicky.

Mezi elektronické určování délek patří pulsní měření, které je založeno na vyslání elektromagnetického impulsu a měření tranzitního času. Při vyslání impulsu se zároveň začne elektronicky měřit čas. Elektromagnetický impuls se odrazí od měřeného objektu a dopadne na přijímač, který zastaví měření elektronického času. Při známé rychlosti průchodu impulsu daným prostředím, které je závislé na fyzikálních korekcích, lze dopočítat vzdálenost. Veliký důraz je kladen na přesnost měření tranzitního času, neboť průchod impulsu prostředím je velice krátký.

Další elektronické určení vzdálenosti je založeno na fázovém rozdílu. Přístroj vyšle amplitudově modulovanou vlnu o známé délce. Vlna vyslána ve fázi φ_1 se odrazí o měřený objekt s opačnou fází φ_2 a rozdíl těchto vln určí fázoměr. Pokud známe rychlost šíření vlny a frekvenci výsledného vlnění, můžeme vypočítat neznámou vzdálenost. Při tomto způsobu měření nemůžeme určit počet celých vln, proto je důležité, aby amplitudově modulovaná vlna byla delší než určovaná vzdálenost. Toto omezení limituje dosah měření fázových dálkoměrů. Přesnost závisí na určení rychlosti vlny, která je ovlivněna indexem lomu prostředí, vlnovou délkou a fyzikálními korekcemi.

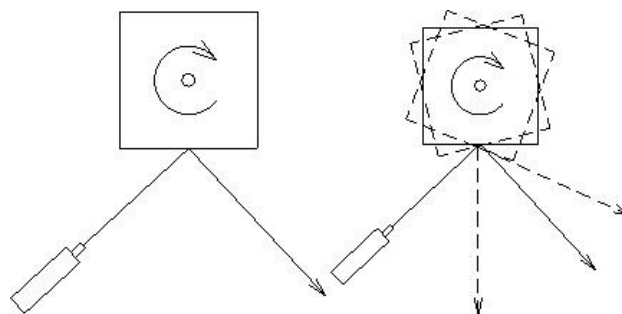
Frekvenční určování délky je další ze způsobů určování vzdálenosti, který se však při měření laserovými systémy nepoužívá.

Rozmítání svazku laserového paprsku umožňuje měřit body na povrchu předmětu dle zvolené hustoty. Prvním způsobem je rozmítání laserového svazku pomocí jednoho zrcadla. Na obrázku (obr. 9) je znázorněno, že laserový svazek je zacílen na osu otáčení zrcátka. Tento reflexní objekt rozmítá laserový svazek do svislého profilu. Podle rychlosti otáčení zrcadla a sekvence měření jednotlivých bodů lze volit hustotu bodů v naskenovaném profilu. Pro zachycení měřených horizontálních profilů se přístroj otáčí kolem své osy. Tímto způsobem lze zachytit velké zorné pole, které používají panoramatické skenovací systémy.



Obr. 9 Rozmítání svazku jedním zrcadlem [19]

Druhou možností jsou skenery se dvěma zrcadly, která se otáčejí kolem dvou různých os. Dále se používá rozmítání svazku pomocí odrazu od optického hranolu, kterým bývá pravidelný n -úhelník, jež rotuje v ose svého těžiště. Toto řešení je limitováno zorným úhlem, který nebývá příliš velký v profilu rozmítání svazku. Opět je možné rotovat skenovacím systémem v jeho ose a získat tak i kolmé profily a zachytit panoramatickou scénu. Na obrázku (obr. 10) je znázorněné schéma rozmítání laserového paprsku odrazným optickým hranolem.

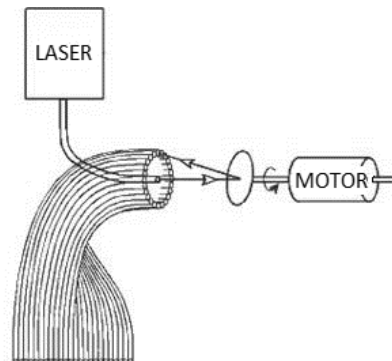


Obr. 10 Rozmítání laserového paprsku odrazným optickým hranolem [19]

Motorizované totální stanice s možností skenování využívají k vychylování laserového svazku krokových motorů či servomotorů. Za pomoci těchto motorů se paprsek vychyluje v horizontálním a vertikálním směru s vysokou úhlovou přesností a mají možnost zachytit velké zorné pole. Tyto totální stanice jsou však limitovány svou rychlostí skenování.

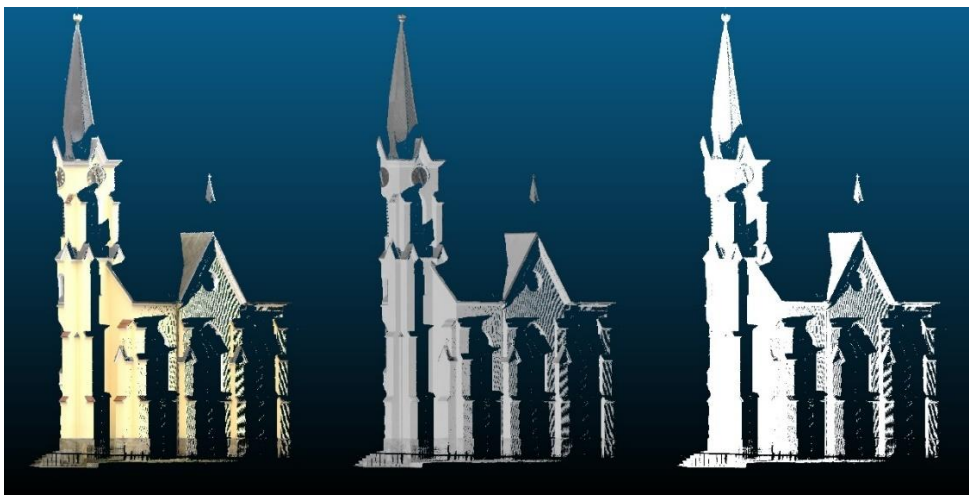
Mezi další možnosti vychylování laserového svazku se řadí usměrnění pomocí optických vláken. Laserový svazek cílí na rotující zrcadlo, které se odráží v kruhovém průmětu do optických vláken, které jsou umístěny právě v tomto kruhovém průmětu. Optická vlákna jsou dále rozvinuta do roviny s určitým úhlem rozbíhavosti a vytváří

liniový svazek paprsků. Princip rozmítání laserového svazku pomocí optických vláken je znázorněn na obrázku (obr. 11).



Obr. 11 Rozmítání laserového svazku pomocí optických vláken [19]

Pokud je naměřené mračno bodů bez barevné informace, není snadné se v mračnu bodů dobře orientovat a prodlužuje se doba zpracování. Proto 3D laserové skenovací systémy pro zlepšení prostorové představivosti a odlišení materiálu používají intenzitu navraceného signálu. Tento způsob však nevrací reálné barvy. Pro přidání reálných barev se používají digitální snímky, které skenovací systém pořizuje při měření skenu. Pro obarvení jednotlivých bodů mračna musí být známý vztah mezi prostorovými a snímkovými souřadnicemi. Pro porovnání orientace a materiálové představy uvádím obrázek (obr. 12) s mračnem bodů v reálných barvách, intenzitou odraženého signálu a bezbarvého mračna. V této podkapitole bylo čerpáno z [19] a [20].



Obr. 12 Porovnání barev mračen

3.3.2 Měřické laserové přístroje

V předchozí kapitole bylo uvedeno rozdělení 3D laserových přístrojů podle metod a principů měření, druhů dělení ale může být vícero. Dále lze tyto systémy rozdělit na statické a kinematické. Z jiného hlediska je lze klasifikovat podle dosahu, přesnosti a rychlosti získávání dat. Rychlost 3D laserových skenovacích systémů se pohybuje v řádu stovek tisíc až jednotek milionů [20]. Dále je možné přístroje rozdělit podle zorného pole měření na přístroje kamerové a panoramatické. Zorné pole je definováno jako rozdíl krajních úhlových poloh ve směru vertikálním a horizontálním, který je přístroj schopný zaměřit na jeden sken. Například u kamerového přístroje ILIRIS-36D (obr. 13) od firmy Optech se jedná o $40^\circ \times 40^\circ$. U panoramatických systému se jedná u horizontálního úhlu o 360° a vertikální úhel je omezen konstrukcí přístroje. Například u přístroje Focus^s 350 (obr. 13) od společnosti FARO je zorný úhel $300^\circ \times 360^\circ$.



Obr. 13 kamerový skener ILIRIS-36D a panoramatický skener Focus^s 350⁶

Kinematické systémy jsou všechny systémy, které se během skenování pohybují. Mezi nejčastěji používané patří letecké skenování, které se používá na určení digitálního povrchu terénu a reliéfu. Systém je umisťován do letadel nebo helikoptér, které mohou letět pomaleji a zhustit a zpřesnit výsledné mračno bodů. Další kinematické skenovací systémy se používají například na skenování železničních tratí, kdy je skenovací systém posouván po drážním tělese. Další velice rozšířenou možností jsou takzvané ruční skenery, u kterých uživatel drží skener v ruce a pohybuje se okolo předmětu, na který cílí. Software v počítači naskenované body spojuje do mračna bodů. Na obrázku (obr. 14) je znázorněn ruční skener F6 SMART od společnosti Mantis Vision. V této podkapitole bylo čerpáno z [20] a [21].

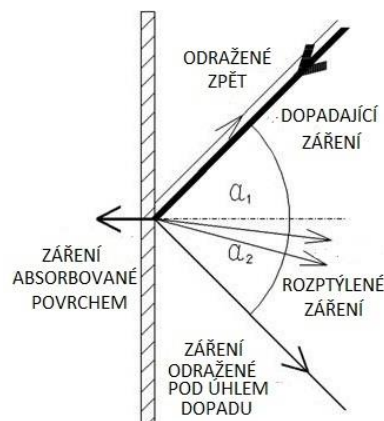
⁶ <https://www.teledyneoptech.com/en/support/legacy-products/>; <https://geotronics.cz/faro-skenery/>



Obr. 14 ruční skener F6 SMART⁷

3.3.3 Vlivy ovlivňující přesnost

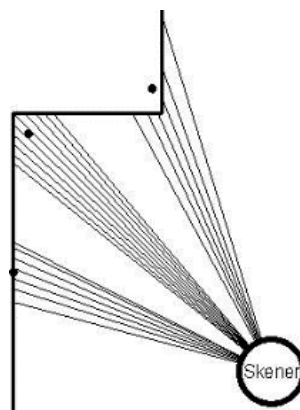
Vlivy ovlivňující přesnost lze rozdělit na vnitřní a vnější vlivy. Vnitřní vlivy jsou způsobeny výrobními nedokonalostmi jednotlivých dílů ve skenovacím systému, což se při měření projevuje chybným zaměřením šikmých vzdáleností a vodorovných a svislých úhlů. Vnější vlivy lze rozdělit na dvě kategorie. První kategorie je spojena s průchodem svazku daným prostředím. Za ideálních podmínek by elektromagnetické záření mělo přímou trajektorii, obecně tomu tak ale není a záření se pohybuje po obecně velmi složité křivce. Tento jev je způsoben vlivem atmosféry, která je primárně ovlivněna teplotou, tlakem, vlhkostí vzduchu a vlnovou délkou elektromagnetického záření. Informace, jak potlačit atmosférické vlivy jsou uvedeny v [19]. Druhá kategorie se zabývá vlivy způsobenými geometrií a povrchem objektu. Obecně platí, že bezhranolové dálkoměry vysílají elektromagnetické záření, které se odrazí od objektu. Při dopadu záření na objekt dojde k rozptýlení svazku, odrazení svazku pod úhlem dopadu, absorbování záření povrchem a odrazení svazku zpět k přístroji. Na obrázku (obr. 15) je znázorněn princip dopadu záření na obecný povrch při měření bezhranolovým dálkoměrem.



Obr. 15 Princip dopadu elektromagnetického záření na obecný povrch [19]

⁷ <https://mantis-vision.com/professional-solutions/f6-smart-about/>

Pokud je zaměřován objekt, jehož stěny svírají pravý úhel a na jehož povrchu dochází k odrazu záření, tak se může tento objekt chovat jako odrazný hranol. Trajektorie paprsku se prodlouží a dojde k nesprávnému změření času. Tímto principem se zaměřovaný bod promítne ve směru záměrné přímky dále od přístroje a může dojít i k vícenásobnému odrazu paprsku. Při každém odrazu ztrácí záření intenzitu a poloha bodu je buď chybně určena, nebo bod nelze určit vůbec. Laserový svazek se kónický rozbíhá a jeho stopa má v daných vzdálenostech určitý poloměr. Pokud budeme měřit ostré hrany na objektu a stopa dopadne na obě strany rozhraní, tak dojde ke zprůměrování vzdáleností a výsledný bod bude mít taktéž chybně určenou polohu. Obrázek (obr. 16) naznačuje, jak může vypadat chyba z rozbíhavosti svazku paprsku.



Obr. 16 chyba způsobená rozbíhavostí laserového svazku [19]

Dalším zdrojem chyb je rozdělení laserového svazku o hranu měřeného objektu. Část paprsku měří vzdálenost k hraně objektu a druhá část paprsku měří objekt v pozadí. V tomto případě dochází k váženému průměru, kde je váha volena podle intenzity navraceného signálu. Dalším zdrojem chyb může být úhel dopadu laserového paprsku při měření vzdálenosti bezodrazným dálkoměrem, jak je uvedeno v [19].

3.3.4 Výstupy 3D skenování

Využití metody je velice rozsáhlé, může se jednat například o dokumentaci skutečného provedení staveb, silnic, železnic či vodních toků. Dále může sloužit jako podklad pro 3D modelování průmyslových strojů a areálů, fasád moderních a historických staveb, kompletních archeologických nalezišť či drobných vykopávek, interiérů a podzemních prostor nebo může sloužit pro digitální vizualizaci. Tvorba digitálních povrchů a reliéfu a další zpracování v geografických informačních systémech není výjimkou. V tomto odstavci bylo čerpáno z [18] a [19].

3.4 3D tisk

3D tisk je mladé odvětví tvorby pevných prostorových objektů z digitálních souborů. Vývoj technologií 3D tisku začal ve druhé polovině 20. století, pojem 3D tisk je však používán až ve druhé polovině 90. let. Již od počátku se 3D tisk zaměřoval na výrobu prototypů a je doménou průmyslových firem. Díky technologickému vývoji a širokému zájmu je v současné době 3D tisk dostupný široké veřejnosti. Všechny tiskárny pracují na podobném principu, a to že se model vytváří po jednotlivých vrstvách. Samotný tisk je však technologicky velmi odlišný.

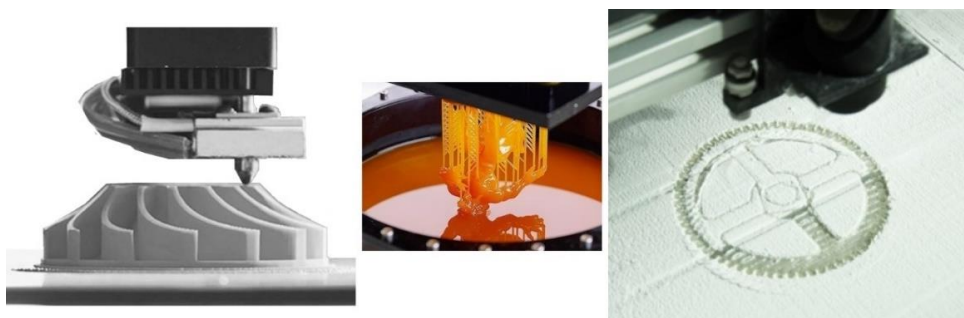
3D tiskárny můžeme rozdělit do čtyř kategorií podle typu konstrukce. Jedná se o kartézskou tiskárnu, deltu, polární tiskárnu a scaru. **Kartézská** tiskárna má klasické rozložení os a tisková hlava se pohybuje v ose X a Z. Podložka, na které probíhá tisk, se pohybuje v ose Y. Tento typ tiskáren není vhodný pro tisk vyšších výtisků, které nemají dostatečnou stykovou plochu s podložkou. Dalším typem je takzvaná **delta**. Tento typ tiskáren také využívá osy X, Y a Z, ale tisková hlava je zavěšena na tři ramena. Tisková podložka se tedy nepohybuje a je možné tisknout i vysoké úzké předměty. Tento typ tiskáren byl navržen tak, aby tisk probíhal rychleji. Třetím typem je tiskárna **polar**, která tiskovou hlavou pohybuje ve dvou osách a tisková podložka je rotační. Tato konstrukce umožňuje pohybovat tiskovou hlavou po křivkách, což může být výhodné pro některé typy modelů. Posledním typem je tiskárna **scara**, která pro pohyb tiskové hlavy používá robotické rameno se dvěma klouby, nebo dvě robotická ramena. Na obrázku (obr. 17) jsou zobrazeny tiskárny dle typu konstrukce.



Obr. 17 V pořadí zleva tiskárna delta, polar, kartézská a scara ⁸

⁸ <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/flsun-delta-kossel-diy-kit/>
<http://www.3ders.org/articles/20131108-r-360-a-simple-and-modular-3d-printer.html>
<https://www.3dtisk-online.cz/technologie-3d-tisku/>
<http://archive.fabacademy.org/archives/2017/fablabbcn/students/354/assignment9.html>

Technologii 3D tisku můžeme rozdělit na tři základní kategorie – FDM, SLA (*Stereolithography*), SLS (*Selective Laser Sintering*). Existuje však mnoho dalších technologií, které se většinou odvíjí od těchto základních. Hlavní a nerozšířenější technologií je **FDM**. Jako tiskový materiál je používána plastová tisková struna namotaná do cívky, která se nazývá filament. Filament je protlačován tiskovou hlavou, kde je rozehrátá tryska. Materiál je nanášen v tenkých vrstvách, a proto se rychle ochladí a vytvrdne. K dostání je obrovské množství filamentů s různými vlastnostmi, které dělají tuto technologii nejpoužívanější i mezi veřejností. Jako příklady materiálů lze uvést PLA, ABS, PET, Nylon, TPU a mnoho dalších, které mají různé příměsi k těmto materiálům. **SLA** je nejstarší technologie, která jako tiskový materiál používá fotopolymerové pryskyřice. Při kontaktu pryskyřice s UV světlem dochází k vytvrdnutí materiálu. Pro přesné osvětlení materiálu jsou využívány UV lasery, díky kterým může být tisk velice detailní. Pryskyřice v tekutém stavu je velice toxická a vyžaduje speciální pracoviště a profesionální obsluhu. Třetí technologie **SLS** je založena na laserovém spékání materiálu. Vrstvy materiálu, většinou plastového prášku, jsou nanášeny na tiskovou podložku, kde je v požadovaných místech spéká laser. Tento způsob tisku je také velice přesný a jednotlivé vrstvy na výtisku prakticky nejsou znát. U technologie SLA a SLS musí být bráno v potaz, že je materiálem zaplněna celá plocha tisku a pokud se tiskne výtisk s dutinou, musí být model upraven tak, aby materiál mohl opustit dutinu. Modely před tiskem musí být převedeny do *g-code*, což je soubor s instrukcemi pro ovládání tiskárny. O tento převod se starají speciální programy, tzv. *slicery*. Na obrázku (obr.18) jsou ukázky technologií při tisku. V této kapitole bylo čerpáno z [22] a [23].



Obr. 18 V pořadí zleva technologie FDM, SLA a SLS⁹

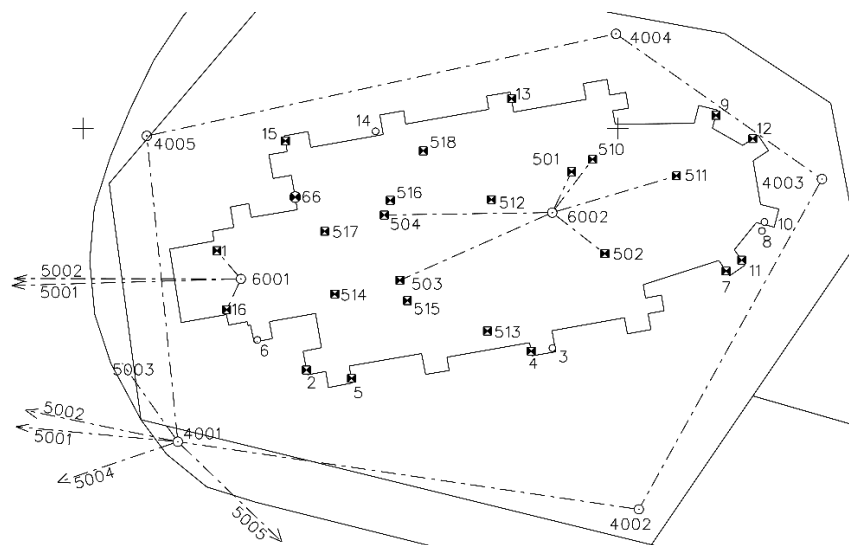
⁹ <https://www.kimya.fr/en/manufacturers-of-fdm-3d-printers/>
<https://www.indiamart.com/proddetail/sla-3d-printing-service-17269301155.html>
<https://makezine.com/2015/05/13/polyforge-unveiling-affordable-sls-printer-maker-faire/>

4 Měření kaple

V této části budou popsány měřické postupy a pomůcky, se kterými byly provedeny měřické práce v terénu. Kapitola je rozdělena do čtyř částí podle typu prováděných prací.

4.1 Vybudování geodetického bodového pole

V blízkém okolí kaple s přímou viditelností na vstupní dveře bylo stabilizováno 5 bodů (č. 5001–5005) pomocí nastřelovacích hřebů (obr. 19). Tyto body byly zaměřeny GNSS technologií metodou RTK pomocí přístroje Trimble GeoXR (obr. 21). Měření bylo provedeno dvakrát s tříhodinovým odstupem a čtyřminutovou observací, přičemž korekce byly získány ze sítě CZEPOS RTK a RTK3. Konfigurace bodů byla volena s ohledem na připojení uzavřeného polygonového pořadu orientovaného právě na body zaměřené GNSS technologií – viz. Příloha A. Zaměření GNSS technologií bylo provedeno 21. 2. 2019. Přehledná situace rozmístění bodů znázorňuje Příloha B.



Obr. 19 Přehledná situace rozmístění bodů

Polygonový pořad tvořený 5 stanovisky (č. 4001–4005), mezi kterými byly měřeny obousměrné délky, zenitové úhly a vodorovné směry, byl zaměřen přístrojem Trimble S6 HP (obr. 21). Body č. 4001 a 4005 byly stabilizovány pomocí nastřelovacích hřebů, ostatní body byly stabilizovány pomocí kolíků. Z bodů polygonového pořadu byly dále bezhranolovým dálkoměrem měřeny podrobné body, které sloužily jako vřícovací body pro fotogrammetrickou část. Vřícovací body byly signalizovány čtvercovou

značkou s kontrastním křížem (obr. 20), který rozděluje černé a bílé rozhraní. Těchto značek bylo v exteriéru rozmístěno 11. Poté byly zaměřeny uměle signalizované body na fasádě, které taktéž sloužily jako vlíčovací body pro fotogrammetrickou část.



Obr. 20 Vlícovací body, vlevo přirozeně signalizovaný, vpravo uměle signalizovaný

Pro kontrolu výškového připojení byl zaměřen vrchol značky nivelačního bodu Db2-12 umístěného na kapli, který je součástí nivelačního pořadu 3. řádu Db2 Břehy – Sobotka. Vypočtená výška tohoto bodu se liší od výšky uvedené v nivelačních údajích o 7 mm a nadále byla využívána výšková složka z bodů zaměřených GNSS technologií. Zaměření polygonového pořadu a vlíčovacích bodů exteriéru bylo provedeno 21. 2. 2019.



Obr. 21 vlevo Trimble GeoXR a vpravo Trimble S6 HP¹⁰

¹⁰ http://www.hk7710.com/mall/m_mall_list.php?ps_ctid=01040000
<https://www.ebay.com/itm/TRIMBLE-STYLE-360-ROBOTIC-PRISM-FOR-TOTAL-STATION-SURVEYING-S3-S6-S8-SPS-/192293238933?oid=223411105566>

Dále byla zaměřena dvě volná stanoviska (č. 6001 a 6002). První stanovisko bylo umístěno do vstupních dveří kaple a sloužilo k zaměření vřícovacích bodů a terčů v interiéru kaple, jež byly použity pro připojení laserového skenování. Druhé volné stanovisko bylo umístěno do interiéru kaple a jeho souřadnice byly určeny připojením na již zaměřené vřícovací body a terče. Vřícovací body a terče byly měřeny vždy v obou polohách dalekohledu. Příloha C obsahuje zpracované zápisníky měření. Výrobní čísla a parametry použitých přístrojů jsou uvedeny v tabulkách (tab. 1 a tab. 2). Zaměření volných stanovisek a vřícovacích bodů v interiéru kaple bylo provedeno 2. 3. 2019.

Tab. 1 Použitý přístroj Trimble GeoXR

Přístroj	Trimble GeoXR
Výrobní číslo	5135407185
Horizontální přesnost (RTK)	10 mm + 0,5 ppm
Vertikální přesnost (RTK)	15 mm + 0,5 ppm

Tab. 2 Použitý přístroj Trimble S6 HP

Přístroj	Trimble S6 HP
Výrobní číslo	92120086
Dálkoměr (Hranol)	1 mm + 1 ppm
Dálkoměr (Bezhranol)	3 mm + 2 ppm
Úhlová přesnost (Směr 1. sk)	1" (0,3 mgon)

4.2 Snímkování UAV fotogrammetrií

Před samotným letem bylo zažádáno o povolení k letu na ÚCL. Přestože je kaple v částečně zastavěné oblasti, byla žádost povolena. Let byl uskutečněn 13. 2. 2019 mezi 10. až 12. hodinou. Termín byl zvolen s ohledem na počasí. V den měření bylo bezvětrí a zataženo s mírným rozptýleným světlem, které nevytvářelo ostré přechody mezi osvětlenými a stinnými místy. Podmínky tak byly velice příznivé pro nasazení UAV fotogrammetrie.

Před uskutečněním letu byla provedena rekognoskace objektu a blízkého okolí, aby se pilot seznámil s terénem a aby se zamezilo nežádoucím kolizím. Dále bylo vybráno místo pro případné nouzové přistání. Nezbytným krokem pro nastavení parametrů komory bylo zhodnocení světelných podmínek. Pro ověření správnosti tohoto nastavení

byl proveden krátký zkušební let, při kterém bylo pořízeno pár snímků kaple a na základě vizuální kontroly těchto snímků bylo nastavení komory upraveno.

Jako UAV nosič byl použit DJI Phantom 4 PRO (obr. 22) s poznávací značkou OK-X040L. Tento kvadrokopter má obrazová stereo čidla, jež jsou umístěna v přední a zadní části nosiče, a dále má na bocích infračervená čidla. Systém čidel umožňuje automatickou detekci překážek a díky tomu je let bezpečnější. Komunikace mezi dálkovým zařízením a dronem funguje na dvou frekvencích, a to na 2,4GHz a 5,8GHz. Minimální garantovaný dosah výrobcem jsou 2 km. Dron je vybaven dvojicí kompasů a IMU jednotek a v případě přerušení signálu je schopen se vrátit na vzletovou pozici. Součástí UAV nosiče je také GNSS technologie, která při expozici přiřadí snímku prostorové souřadnice a může být využita k navigaci podle letových os.



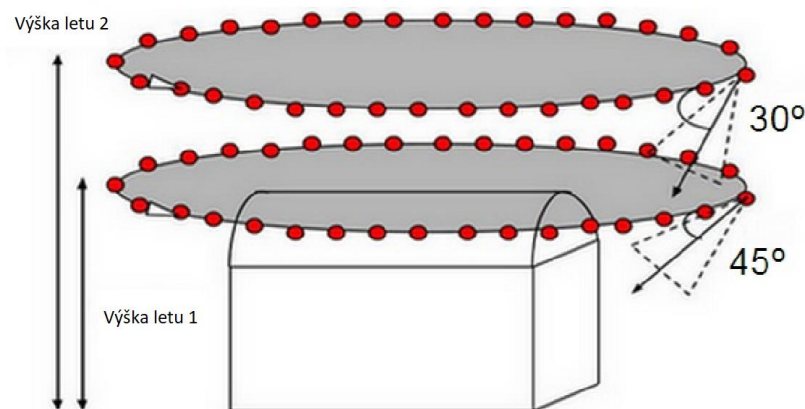
Obr. 22 DJI Phantom 4 PRO s dálkovým ovladačem ¹¹

Součástí UAV nosiče je komora s obrazovým snímačem CMOS o rozměrech čidla 13,2 x 8,8 mm. Maximálními rozměry snímku v poměru 4:3 jsou 5472 x 3648 pixelů, což odpovídá 20 milionů pixelů. Fotoaparát má ohniskovou vzdálenost 9 mm, při přepočtu na kinofilm (35 mm) má pak ohniskovou vzdálenost 24 mm. Kameru je při letu možno natáčet pomocí dálkového zařízení, popřípadě lze při nastavení letového plánu definovat směry natočení kamery.

V našem případě byl jako způsob navigování UAV nosiče zvolen tzv. kontinuální režim, kdy byl nosič pilotován manuálně pilotem z firmy G4D, časová prodleva mezi snímky byla nastavena na 2 sekundy. Jako priorita pro nastavení komory byla zvolena délka expozice, jež byla nastavena na hodnotu 1/500 sekundy a krok expozice byl nastaven na -0,3. Ostatní parametry byly proměnné a automaticky nastavované komorou.

¹¹ https://www.ihracicky.eu/Prislusenstvi-k-hrackam-c1_32_4.htm

Závěrka clony se pohybovala od $f/2,8$ do $f/5,6$. Hodnota ISO byla po celou dobu snímkování konstantní na hodnotě 200. Celkem byly provedeny tři nálety, mezi kterými byla vždy vyměněna baterie a během kterých bylo pořízeno 1316 snímků. Snímky musely být před zpracováním protříděny, neboť bylo pořízeno při vzletu a přistání i mnoho snímků, na kterých nebyla zachycena požadovaná scéna. Pro zpracování bylo použito 1104 snímků o celkové velikosti přibližně 8 GB. Snímkování bylo pořízeno z průměrné vzdálenosti 15 m od objektu, což odpovídá 4,0 mm na pixel. Snímkování bylo provedeno obdobně, jako je popisováno v příručce pro software Pix4Dmapper [25]. Snímky byly pořízeny okolo celého objektu s rovnoběžnými osami záběru a v rohových oblastech s konvergentními osami záběru (obr. 23). Tento postup byl proveden v několika výškových úrovních. V této podkapitole bylo čerpáno z [24] a [25].



Obr. 23 Doporučený plán snímkování budov ¹²

4.3 Snímkování pozemní fotogrammetrií

Pozemní fotogrammetrie byla aplikována na zaměření interiéru kaple. Snímkování bylo provedeno digitálním fotoaparátem Nikon Coolpix A (obr. 25). Komora má obrazové čidlo APS-C CMOS o rozměrech 23,6 x 15,6 mm. Maximální rozměry snímku v poměru 3:2 mají 4928 x 3264 pixelů, což odpovídá 16,2 milionů pixelů. Fotoaparát má širokouhlý objektiv NIKKOR s pevnou ohniskovou vzdáleností 18,5 mm, při přepočtu na kinofilm (35 mm) má ohniskovou vzdálenost 28 mm. [26]

Celé snímkování bylo provedeno ze stativu, a tudíž mohla být povolena i delší expozice. Světlo pronikalo do interiéru pouze z jedné strany (obr. 24) přes vitrážová okna

¹² <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf>

a nastavení fotoaparátu by se muselo stále upravovat při focení mezi světlými a tmavými částmi, proto byl nastaven automatický režim, který korigoval správné nastavení.



Obr. 24 Vlevo zastíněná stěna, vpravo osvětlená stěna

Délka expozice se pohybovala od 1/4 sekundy po 1/250 sekundy. Krok expozice byl nastaven na hodnotu 0. Závěrka clony se při snímkování pohybovala od f/2.8 do f/5.6. Hodnota ISO zůstala po celou dobu snímkování konstantní na hodnotě 100.

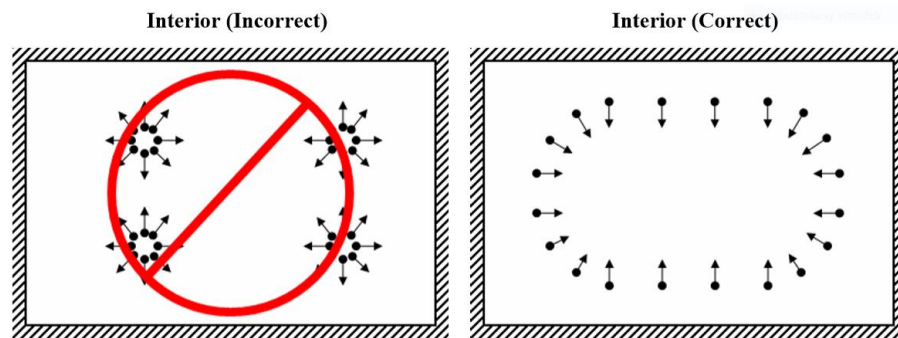


Obr. 25 Fotoaparát Nikon Coolpix A ¹³

V interiéru byly pořízeny dvě sady snímků. První sada byla focena z ruky při velkých úhlech protnutí a byla nevyhovující pro zpracování. Druhá sada snímkování byla provedena ve dvou výškových úrovních. První výšková úroveň byla realizovaná na stativu ve výšce zhruba 1,5 metrů nad podlahou a druhá výšková úroveň byla realizovaná ze štaflí zhruba 2,5 metrů nad podlahou. Snímkování bylo velice obtížné kvůli malým rozměrům kaple a malému zornému poli objektivu. Průměrně bylo snímkováno z 10 m od stěn kaple, což odpovídá pixelu o velikosti 2,6 mm ve skutečnosti. Celkově bylo

¹³ <https://www.digimanie.cz/recenze-nikon-coolpix-a-velmi-prijemna-nevyraznost/5087>

v interiéru kaple pořízeno 1172 a všechny snímky byly použity do zpracování. Ve druhé sadě snímkování již nebyly rozmístěny uměle signalizované vlíčovací body, proto byly vlíčovací body určeny z mračna pořízeného laserovým skenováním. Správné snímkování bylo provedeno podle instrukcí pro snímkování v dokumentu pro Agisoft Photoscan (obr. 26). V této podkapitole bylo čerpáno z [27].



Obr. 26 Doporučený plán snímkování interiéru ¹⁴

4.4 Laserové skenování

Zaměření objektu laserovým skenováním bylo provedeno dvěma přístroji, a to Leica ScanStation P40 a FARO Focus3D X130. Toto měření bylo při zpracování použito jako referenční pro porovnání přesnosti a kvality jednotlivých fotogrammetrických softwarů.

V exteriéru kaple byl použit přístroj FARO Focus3D X130 (obr. 27). Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce (tab. 3). Tímto přístrojem byla zaměřena pouze jižní strana. V exteriéru kaple bylo pořízeno 11 skenů, přičemž jeden sken trval 4 minuty celkově bylo pořízeno 76 milionů bodů. Tyto skeny byly spojeny v softwaru Scene LT od Společnosti Faro pomocí funkce *Cloud to cloud*. Výsledné spojené skeny byly následně transformovány shodností transformací v softwaru CloudCompare na vlíčovací body zaměřené geodetickým způsobem. Kvadratický průměr odchylek při transformaci neboli RMS (*Root mean square*) byl 3,8 mm. Z tohoto důvodu byla přesnost vlíčovacích bodů pro další zpracování zvolena jako 4 mm. Mračno bodů bylo následně zředěno a průměrná vzdálenost mezi jednotlivými body byla zvolena na 1 mm. V tomto odstavci bylo čerpáno z [28].

¹⁴ https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf



Obr. 27 vlevo FARO Focus3D X130 vpravo Leica ScanStation P40 ¹⁵

V interiéru kaple byl použit přístroj Leica ScanStation P40 (obr. 27), jehož parametry jsou uvedeny v tabulce (tab. 4). Tímto přístrojem byly změřeny 3 skeny, jež byly přímo v terénu spojeny pomocí geodeticky zaměřených identických bodů. Jednotlivé skeny byly zaměřeny s rozlišením 0,8 mm. Jeden sken trval přibližně 12 minut a celkově bylo naměřeno 600 milionů bodů. Registrované spojené skeny byly následně redukovány, přičemž průměrná vzdálenost mezi body byla zvolena na 3 mm. Vlíčovací body pro fotogrammetrickou část zpracování interiéru byly následně odečteny z mračna z laserového skenování (Příloha D) a byly vybírány tak, aby byly dostatečně identifikovatelné na snímcích. V tomto odstavci bylo čerpáno z [29].

Tab. 3 Použitý přístroj FARO Focus3D X130

Přístroj	Focus3D X130
Výrobní číslo	LLS071608867
Délková přesnost	2 mm
Úhlová přesnost	0,009° (0,0100 gon)
Rychlost skenování	1 milion bodů za vteřinu
Zorné pole	360° Hz x 300° V

Tab. 4 Použitý přístroj Leica ScanStation P40

Přístroj	ScanStation P40
Výrobní číslo	1851583
Délková přesnost	1,2 mm + 10 ppm
Úhlová přesnost	8“ (0,0025 gon)
Rychlost skenování	1 milion bodů za vteřinu
Zorné pole	360° Hz x 270° V

¹⁵ <https://geo-matching.com/terrestrial-laser-scanners/laser-scanner-focus3d-x130>
<https://transitandlevel.com/product/leica-p30-high-definition-scanner/>

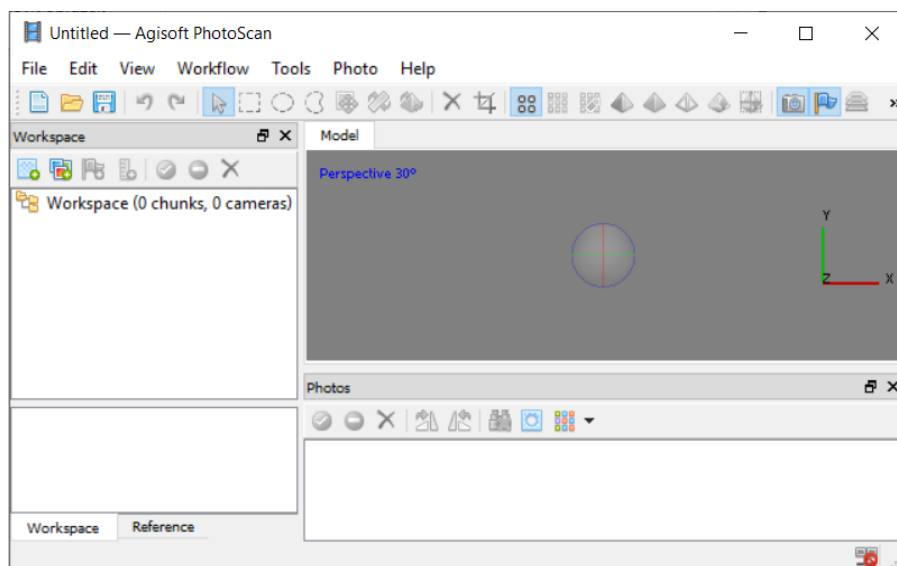
5 Zpracování

V této kapitole bude uvedeno stručné seznámení s použitými softwary a postup zpracování naměřených dat. Zpracování ve fotogrammetrických softwarech bylo provedeno s podobnými parametry, aby bylo porovnání adekvátní. Dále zde bude uveden postup při porovnávání výstupů a na závěr bude popsán vlastní tisk modelu kaple.

5.1 Tvorba modelu v softwaru Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan je fotogrammetrický software od společnosti Agisoft LLC sídlící v Rusku ve městě Petrohrad. Společnost byla založena roku 2006 a specializuje se na počítačové vidění a práci s algoritmy pro zpracování obrazu. V současné době společnost vydala novější verzi softwaru Agisoft Metashape, který nevyžaduje tak náročný hardware jako tomu bylo doposud a u něhož by měly výpočty trvat až o polovinu kratší dobu. [30]

Agisoft PhotoScan má velice příjemné a jednoduché uživatelské prostředí (obr. 28). Okno aplikace se skládá z několika částí. V horní části je seznam záložek s funkcemi a lišta pro snadné a rychlé ovládání. V levé části je okno *Workspace*, kde se zobrazuje složka se snímky a prvky, které již byly v softwaru vypočteny. Pod tímto oknem je záložka *Reference*, kde lze spravovat souřadnicový systém a identické a spojovací body. V hlavní části je okno *Model*, kde lze vizuálně prohlížet vypočtená mračna a mesh modely. V části *Photos* jsou pak nahrané snímky, kde může být zobrazena zmenšenina fotografie, popřípadě podrobné informace o snímcích ve formě seznamu.



Obr. 28 Uživatelské prostředí Agisoft PhotoScan

5.1.1 Zpracování exteriéru

Do prostředí aplikace byly nahrány snímky exteriéru a byla spuštěna funkce na zarovnání snímku. Přesnost zarovnání snímků byla zvolena na hodnotu *High*. Počet klíčových bodů byl zvolen na hodnotu *40 000* a spojovací body na hodnotu *6 000*. Pro výběr párů sousedních snímků byla zvolena hodnota *Reference*. Následně byly odmazány odlehlé spojovací body z řídkého mračna bodů a označeny vlíčovací body na snímcích. Reference snímků určená z GNSS nosiče byla vypnuta a byla spuštěna optimalizace kamer. Přesnost vlíčovacích bodů byla nastavena na hodnotu 4 mm. Největší polohová odchylka byla na vlíčovacím bodě 8 s hodnotou *5,5 mm*, průměrná polohová odchylka byla *3,4 mm* (viz. Příloha E). Přesnost označení vlíčovacích bodů byla pod *0,2 pixelu*. Po optimalizaci kamer byla spuštěna funkce pro výpočet hustého mračna bodů. V tomto kroku byla funkce spuštěna s různými parametry, přičemž s kvalitou *High* počítač výpočet nedokončil pro nedostatečnou paměť RAM (*Random Access Memory*). Kvalita mračna bodů byla nastavena na hodnotu *Medium* a filtrace bodů na *Aggressive*. S těmito parametry výpočet dosahoval nejlepších vizuálních výsledků s nízkým šumem. V předposledním kroku byla spuštěna funkce na výpočet mesh modelu opět s různými parametry, přičemž nejlepší nastavení se jevílo s kvalitou mesh modelu nastavenou na hodnotu *Medium*, filtrací na hodnotu *Aggressive* a interpolací na výchozí hodnotu *Enabled*. V posledním kroku byla spočítána textura na výchozí nastavení softwaru.

Zpracování exteriéru kaple (obr. 29) v tomto softwaru bylo bez větších komplikací, výpočet byl však časově velmi náročný. Orientace snímků trvala skoro *19 hodin* a bylo zorientováno *1093 snímků*, výpočet mračna bodů probíhal *36 hodin*. Při zpracování byla použita funkce na automatickou detekci vlíčovacích bodů čtvercového tvaru, což výrazně ulehčilo manuální práci v softwaru. Výpočty probíhaly na počítači s 64 GB paměti RAM, procesorem Intel® Core™ i7-7700k CPU @ 3.60 Ghz a grafickou kartou NVIDIA Quadro P2000. Zpracování bylo provedeno podle manuálu, který lze nalézt ve zdroji [27].



Obr. 29 Výsledný model exteriéru z programu Agisoft PhotoScan

Software si velice pěkně poradil s vytvořením mesh modelu, kde jsou zachované ostré hrany. V rovných částech, kde je jednoduší fasáda, zachovává věrný povrch a vytváří pouze mírné zvrásnění. Model zachovává i podrobné detaily, mírná nedokonalost vznikla pouze v zákoutích členitých částech, kde nebyla dostatečná hustota snímků. Realistická textura tyto drobné nedokonalosti zakrývá, a vzniká tak velice věrohodný model kaple.

5.1.2 Zpracování interiéru

Zpracování interiéru kaple se lišilo v zarovnání snímků, které musely být rozřazeny do složek podle stanoviska stativu, ze kterého byly pořízeny. Těmto skupinám snímků musel být nastaven typ *Station*, jelikož bez tohoto nastavení nebylo možno zorientovat dostatečný počet snímků. Nastavení parametrů zarovnání snímků bylo stejné kromě parametru pro výběr párů snímku, kde byla zvolena hodnota *Generic*. Pro maximální počet zorientovaných snímků bylo potřeba kromě vřícovacích bodů označit i další spojovací body. Jelikož osa otáčení komory nebyla v projekčním centru, vznikala na jednotlivých stanoviscích výrazná paralaxa. V dalším kroku byly složky stanovisek nastaveny zpět na *Folder* a dále byly přepočteny polohy snímků, čímž byla potlačena paralaxa. Ostatní kroky zpracování byly stejné, i přes to bylo dosaženo horší přesnosti. Největší polohová odchylka byla zaznamenána na bodě *R8*, a to *18,5 mm* (viz. Příloha E) a průměrná polohová odchylka pak činila *10 mm*. Přesnost označení vřícovacích bodů byla průměrně *0,6 pixelů*.

V tomto softwaru bylo velice komplikované zarovnání snímků pořízených v interiéru kaple a ve výsledku bylo zorientováno *1162 snímků*. Polohová přesnost na vlíčovacích bodech byla horší, než při zpracování exteriéru kaple. Zpracování bylo opět časově velice náročné, přičemž zarovnání trvalo přibližně *7 hodin* a výpočet mračna a mesh modelu trval *43 hodin*. Software umožňuje snadný výběr snímků, na kterých mají být označeny vlíčovací body. Výsledný model (obr. 30) má podobné charakteristiky jako exteriér kaple. Zpracování bylo provedeno podle manuálu, který lze nalézt ve zdroji [27].



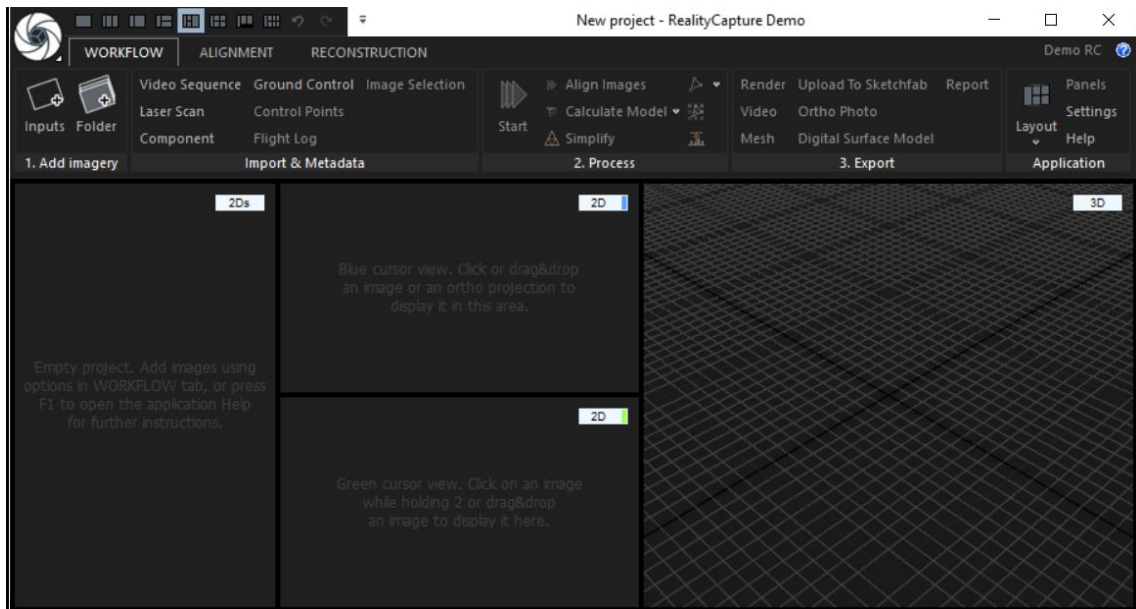
Obr. 30 Výsledný model interiéru z programu Agisoft PhotoScan

5.2 Tvorba modelu v softwaru Reality Capture

Reality Capture je fotogrammetrický software stejnojmenné slovenské společnosti sídlící v Bratislavě, který umožňuje spojit fotogrammetrické zaměření a mračna bodů pořízená laserovými systémy. Software tedy zachovává geometrickou přesnost ze skenování a nepokrytá místa doplňuje z fotogrammetrického měření. Na stránkách produktu je uvedeno, že je tento software již 5 let po sobě nejrychlejším fotogrammetrickým softwarem, a že výpočet probíhá až desetkrát rychleji než u konkurenčních programů. [31]

Uživatelské prostředí (obr. 31) je plně nastavitelné, a je tedy vhodné i pro náročnější uživatele. V horní části programu jsou na výběr přednastavená rozložení oken a pod nimi je lišta s funkcemi pro rychlé ovládání. V levé části je panel (2Ds), kde se zobrazují informace o snímcích, modelech a vlíčovacích bodech. V této části se také zobrazují parametry vybrané funkce. V prostřední části jsou okna (2D), kde se zobrazuje

vybraný snímek. V okně (3D) se po výpočtu zobrazuje mračno bodů, mesh model a orientace kamer.



Obr. 31 Uživatelské prostředí Reality Capture

5.2.1 Zpracování exteriéru

Před zpracováním bylo v záložce *Workflow* v menu *Settings* nastaveno umístění cache souborů, což jsou soubory, do kterých se ukládají informace o projektu, které již byly vypočteny, aby se v případě opakování výpočtu urychlil čas zpracování. Tato cache zabírá velké množství místa na pevném disku, proto je dobré ji mít pod kontrolou. Následně byly nahrány snímky přetažením do okna *2Ds* a ve složce *Alignment* byl nastaven parametr *Max features per images* na hodnotu 40 000, parametr *Max features per mpx* na hodnotu 10 000 a *Camera distortion model* na *Brown3 with tangential2*. V dalším kroku byla spuštěna funkce na zarovnání snímku. Poté byly do projektu nahrány souřadnice vřícovacích bodů a byla vypnuta poloha snímků určená z GNSS nosiče. Následně byly označeny vřícovací body na snímcích. Na závěr byly přepočteny polohy snímků a v záložce *Reconstruction* byla puštěna funkce na vytvoření mračna a mesh modelu s nastavením parametru *Image downscale* na hodnotu 2. Největší polohová odchylka byla na bodech 9 a 12 s hodnotou 2,2 mm (viz. Příloha E) a přesnost označení vřícovacích bodů byla průměrně 0,8 pixelu. Výsledný model (obr. 32) byl na závěr decimován s parametrem pro zachování hran.

Výběr snímků pro označení vlíčovacích bodů se z počátku jevil velice komplikovaně, po seznámení se blíže s programem a využití pomocných funkcí byl však postup velice rychlý a intuitivní. Software pracuje velice rychle. Zarovnání snímků trvalo *1 hodinu* a po následném zopakování výpočtu se výrazně projevila cache a zarovnání trvalo pouhých *11 minut*, přičemž bylo zorientováno *1103 snímků*. Výpočet mračna a mesh modelu, který probíhá v jednom kroku, trval *4,5 hodiny*. Výpočty probíhaly na počítači s 64 GB paměti RAM, procesorem Intel® Core™ i7-6700k CPU @ 4.00 Ghz a grafickou kartou NVIDIA GeForce GTX 1060 6 GB. Rychlé zpracování umožňuje snadnější testování parametrů a hledání optimálního nastavení.



Obr. 32 Výsledný model exteriéru z programu Reality Capture

Vizuálně se jeví, že software lehce vyhlazuje hrany s věrohodným zachováním detailů. Program si bez větších problémů poradil se zákoutími, které byly méně nasnímkané a společně s texturou vytváří model, který se velice přibližuje realitě.

5.2.2 Zpracování interiéru

Zpracování interiéru bylo obdobné, avšak po prvním zarovnání snímků nebylo zorientováno dostatečné množství snímků a musely být na snímcích označeny kromě vlíčovacích bodů také body spojovací. Zarovnání snímků bylo tedy spouštěno vícekrát. Při každém spuštění se vytvořily komponenty, ve kterých byly skupiny snímků. Práce s komponenty je uživatelsky velice příjemná a usnadňuje práci při označování vlíčovacích a spojovacích bodů. Při vytvoření mesh modelu se přes stěny ohraničující oblasti výpočtu vygenerovaly trojúhelníky, které musely být odfiltrovány. Maximální

polohová odchylka byla na bodě *okno2* s hodnotou *4,1 mm* a průměrná chyba v označení vlíčovacích bodů byla *1,4 pixelu* (viz. Příloha E).

Výpočty v softwaru probíhají velice rychle. Celkově bylo zorientováno *1106 snímků* za *45 minut* a výpočet mračna bodů s mesh modelem trval *4 hodiny*. Výsledný model (obr. 33) má obdobné charakteristiky jako exteriér kaple.

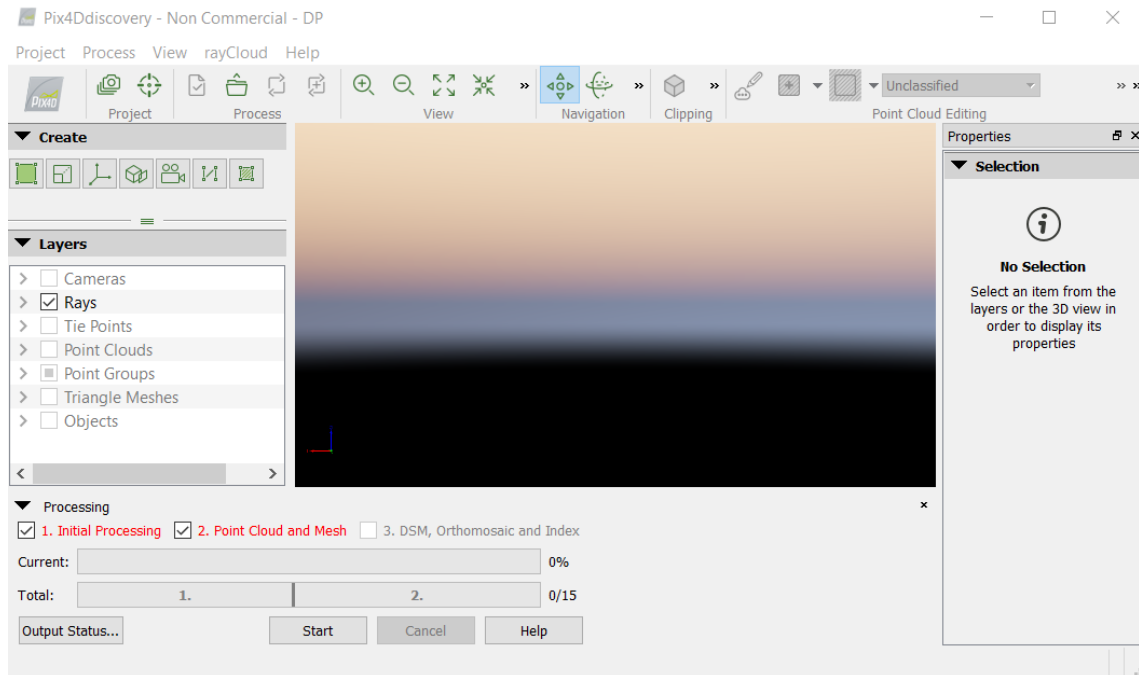


Obr. 33 Výsledný model interiéru z programu *Reality Capture*

5.3 Tvorba modelu v softwaru Pix4Dmapper

Pix4Dmapper je produkt švýcarské společnosti Pix4D, která byla založena v roce 2011. Tato společnost se zabývá počítačovým viděním, fotogrammetrií a strojovým učením. Pix4D nabízí spoustu dalších softwarů, které se zabývají fotogrammetrickými pracemi, jako je například Pix4Dcapture pro sestavení letového plánu nebo Pix4Dfields pro zmapování zemědělské půdy. [32]

Ve vrchní části okna aplikace (obr. 34) je umístěn panel pro rychlé funkce a usnadnění práce. V levé části je panel *Layers*, kde jsou aktivní všechny dopočtené prvky projektu. Po rozkliknutí jedné vrstvy se v pravé části v okně *Properties* zobrazí informace o daném prvku. V části *Processing* jsou znázorněny indikátory o stavu výpočtu. Software je velice automatický a má přednastavené šablony pro typ rekonstruované scény.



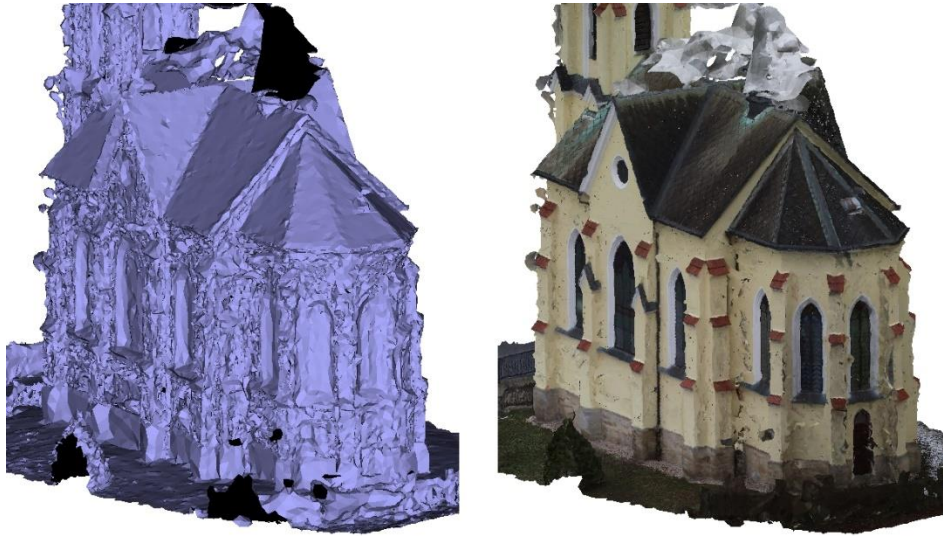
Obr. 34 Uživatelské prostředí Pix4Dmapper

5.3.1 Zpracování exteriéru

Zpracování začíná založením a nastavením projektu. V prvním kroku byl nastaven název a umístění projektu a ve druhém kroku do něj byly nahrány snímky. Následně byla nastavena geolokace snímků a přesnost jejich umístění. V dalším kroku byl zvolen výsledný souřadnicový systém a ze šablon pro zpracování byl vybrán *3D models*. Následně byly nastaveny možnosti zpracování, kde v záložce *Initial Processing* byla pro parametr *Keypoints Image Scale* zvolena hodnota *Full*. V záložce pro výpočet mračna bodů bylo ponecháno výchozí nastavení a jako výstup pro mračno bodů byl zvolen formát PLY. V záložce pro *3D Textured Mesh* byly taktéž ponechány původní parametry a formát exportu byl zvolen OBJ. Nejprve byla spuštěna část pro zarovnání snímků, následně byly označeny vlíčovací body na snímcích a byla nastavena jejich přesnost na *4 mm*. Geolokace určená z UAV nosiče byla vypnuta. Na závěr byl spuštěn kompletní výpočet. Největší polohová odchylka byla na bodě *14* s hodnotou *9 mm* (viz. Příloha E), průměrná polohová odchylka byla *5,3 mm* a přesnost označení vlíčovacích bodů na snímcích byla průměrně *0,3 pixelu*.

Výpočty probíhaly na počítači s 48 GB paměti RAM, procesorem Intel(R) Xeon(R) CPU X5650 @ 2.67GHz a grafickou kartou NVIDIA Quadro 4000. Zorientování snímků nebylo výrazně časově náročné. Trvalo *4 hodiny*, přičemž bylo

zorientováno 1102 snímků. Naopak výpočet mračna bodů byl časově velice náročný, jelikož trval 55 hodin. Po zorientování snímků je velice elegantně vyřešeno označování bodů na snímcích. Software pracuje z větší části automaticky a výsledky nelze výrazně ovlivnit. Vyexportované mračno a mesh model (obr. 35) je v souřadnicovém systému bez nastavené translace, kterou lze dohledat ve složce projektu, a je tedy nutné tento globální posun nastavit v externím programu, v tomto případě to byl software CloudCompare.



Obr. 35 Výsledný model exteriéru z programu Pix4Dmapper

Na výsledném modelu docházelo k otočení orientace trojúhelníků a k velkému vrásnění. Program vytvářel na hranách bubliny a rekonstruoval i část oblohy ve formě bílého mraku nad menší věžičkou. Program si prakticky poradil pouze s vymodelováním střechy, ostatní části modelu se dají považovat za nedostatečné.

5.3.2 Zpracování interiéru

Zpracování interiéru kaple bylo obdobné, jako při zpracování exteriéru. Při prvním zarovnání snímků bylo zorientováno nedostatečné množství snímků. Na snímcích byly označeny jak vlíčovací body, tak i spojovací body, přesto bylo zorientované nižší množství snímků. Proces orientace snímků byl vícekrát opakován bez výrazného zlepšení. Následně byla spuštěna zbývající část výpočtu, ve které bylo vypočteno mračno bodů a mesh model s texturami.

Ve výsledku bylo zorientováno 1044 snímků. Největší polohová odchylka byla na bodě K1 s hodnotou 15,8 mm (viz. Příloha E) a průměrná polohová odchylka činila 7,3 mm. Zorientování snímků trvalo 3 hodiny, výpočet mračna bodů pak trval 37 hodin.

Opět musel být nastaven globální posun u mračna a mesh modelu v softwaru CloudCompare. V interiéru měl model (obr. 36) stejné nedostatky jako při tvorbě exteriéru.

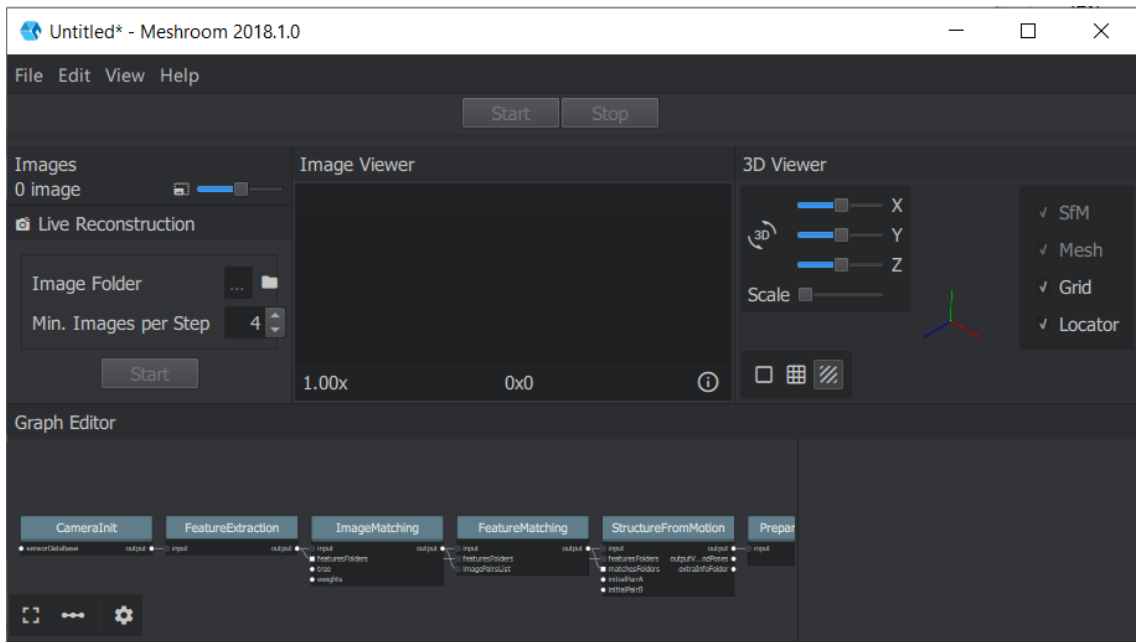


Obr. 36 Výsledný model interiéru z programu Pix4Dmapper

5.4 Tvorba modelu v softwaru Meshroom

Meshroom je volně dostupný fotogrammetrický software od neziskové organizace AliceVision, která vznikla v rámci výzkumu a inovací v programu Horizont 2020, který zastřešuje Evropská Unie. Mezi partnery, kteří se podílejí na výzkumu, patří například francouzská společnost Mikros, ČVUT v Praze či norská společnost Simula. [33]

Software má vizuálně příjemné prostředí (obr. 37), které si uživatel může přizpůsobit dle vlastních potřeb. Okno je rozděleno na čtyři části: *Images*, *Images Viewer*, *3D Viewer* a *Graph Editor*. V nejdůležitější části *Graph Editor* jsou umístěny funkce, které jdou chronologicky za sebou tak, jak postupuje výpočet. Po kliknutí na libovolný prvek grafu se v pravé spodní části objeví parametry, které lze pro danou funkci nastavit. Do tohoto editoru lze připojit další funkce, které se zobrazí po kliknutí na pravé tlačítko myši. Graf je možno větvit od libovolné funkce a nastavit tak více variant pro výpočet. Výpočet lze spustit pro jednotlivé funkce, zvolený úsek či kompletní výpočet.



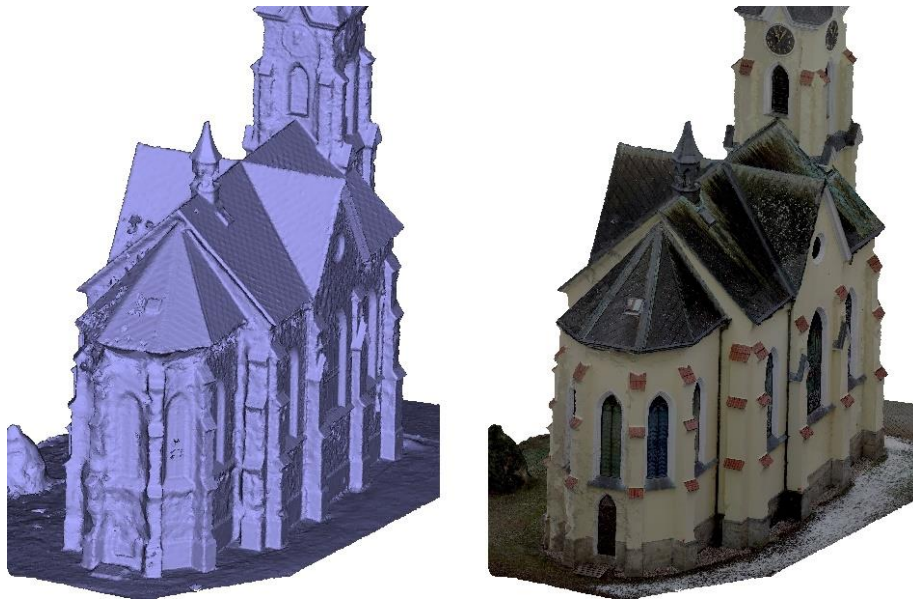
Obr. 37 Uživatelské prostředí Meshroom

5.4.1 Zpracování exteriéru

Do programu byly nahrány snímky a byl kompletně nastaven výpočetní *Graph Editor*. Funkce editoru byly ponechány nezměněné, přičemž výchozí editor obsahuje 12 výpočetních funkcí. První nastavení bylo změněno ve druhé funkci *FeatureExtraction*, kde byl parametr *Descriptor Preset* změněn na hodnotu *high*. Tímto parametrem se nastaví výběr spojovacích bodů, jejichž počet se pohyboval mezi 20 až 50 tisíci body na jednom snímku. Dále byla ve funkci *DepthMap* nastavena hodnota 4 pro parametr *Downscale*. Ve funkci *Meshing* je spousta parametrů pro uživatele s více specifickými požadavky pro tvorbu mesh modelu, ale v mém případě byly parametry ponechány na výchozí nastavení. Ve funkci *Mesh Filtering* byl testován parametr *Large Triangle Factor*, kde optimální nastavení bylo 60, aby v modelu nevznikaly zbytečné díry. Ostatní nezmíněné parametry byly ponechány na výchozích hodnotách, které jsou výhodné pro tento typ rekonstrukce, jak lze dohledat ve zdroji [33].

Výpočty probíhaly na stejném počítači jako v případě zpracování v programu Agisoft PhotoScan, počítač tedy disponoval 64 GB paměti RAM, procesorem Intel® Core™ i7-7700k CPU @ 3.60 Ghz a grafickou kartou NVIDIA Quadro P2000. Tímto způsobem bylo zorientováno 1074 snímků. Celkový výpočet trval necelých 23 hodin, kde časově nejnáročnější byl výpočet mračna, který trval 18 hodin. Tento software neumožňuje práci s vlíčovacemi body a výsledný mesh model (obr. 38) bylo nutné

přetransformovat v externím programu, v tomto případě to byl software CloudCompare. Meshroom má spoustu parametrů, kterými je možno ovlivnit výsledek výpočtu, bez hlubších znalostí je to však velmi obtížné. Software ukládá všechny mezivýpočty do složky *MeshroomCache* na disk, kde je umístěn projekt, aby bylo možno se k jakékoliv části výpočtu vrátit. Tato cache při tomto zpracování zabírala 85 GB dat. Část cache byla vymazána, jednalo se o data z funkce *DepthMap*, *FeatureExtraction*, *PrepareDenseScene* a *StructureFromMotion*, ale veškeré protokoly byly ponechány.



Obr. 38 Výsledný model exteriéru z programu Meshroom

V některých místech jsou v modelu drobné chyby, jak můžeme například pozorovat na střeše kaple. V místech, kde bylo snímkování provedeno skrze drobné větvičky model ztrácí na kvalitě. Vygenerovaná textura je výrazně tmavší než z ostatních softwarů, to lze však napravit úpravou jasu a kontrastu v jakémkoliv editoru obrázků. Výstup je vhodný pro méně náročné uživatele.

5.4.2 Zpracování interiéru

Zpracování interiéru bylo mnohem snazší, neboť jsem již byl seznámen s programem. Nastavení bylo ponecháno stejné, jako při zpracování exteriéru, pouze bylo testováno nastavení ve funkci *Texturing* pro získání kvalitnějších textur.

Výsledný model byl na závěr opět transformován v softwaru CloudCompare. Zorientováno bylo 1122 snímků. Výpočet probíhal 20 hodin, z toho výpočet mračna trval 15,5 hodin. Chybějící možnost nastavení výpočetního regionu prodlužovala výpočetní

čas. Část cache byla vymazána, jednalo se o data z funkce DepthMap, FeatureExtraction, PrepareDenseScene a StructureFromMotion, veškeré protokoly byly ponechány. Původní cache zabírala 66 GB dat.

Software má rozšířenou komunitu mezi uživateli, která se zabývá řešením problémů jednotlivých uživatelů. Na fórech této komunity lze dohledat mnoho užitečných informací při vniklých problémech v rámci zpracování. Model (obr. 39) se v interiéru kaple chová velice podobně jak v exteriéru.



Obr. 39 Výsledný model interiéru z programu Meshroom

5.5 Doplnující práce v softwaru CloudCompare

CloudCompare je software pro práci s mračky bodů, který byl původně vytvořen v rámci spolupráce společnosti Telecom Paris a společnosti EDF. Práce na tomto projektu začaly v roce 2003. Původně byl software vytvořen pro rychlé detekce změn v hustých mračkách bodů získaných z laserového skenování. Později se software vyvinul k obecnějšímu a pokročilejšímu nástroji pro zpracování 3D dat. Lze jej také využít jako prohlížečku 3D dat, neboť podporuje mnoho typů souborů a zvládá načítat i veliké soubory. Tento software je volně dostupný na oficiálních webových stránkách projektu s kompletní dokumentací [34].

Do programu CloudCompare byla nahrána mračna bodů a mesh modely z jednotlivých fotogrammetrických softwarů a mračna bodů z laserového skenování. Z modelu byly vybrány a následně hromadně vyříznuty některé části, které sloužily pro porovnání. Porovnání mračen bodů bylo provedeno funkcí C2C (*Compute cloud/cloud distance*), kde jako referenční mračno bylo vždy vybráno mračno z laserového skenování.

Pro výstup byla následně upravena barevná škála odlehlostí. Porovnání mesh modelů bylo provedeno funkcí C2M (*Compute cloud/mesh distance*) a opět bylo použito mračno z laserového skenování a mesh modely z jednotlivých softwarů a pro výstup byla taktéž upravena barevná škála odlehlostí.

5.6 3D tisk

Samotný tisk byl proveden na vlastní 3D tiskárně Creality Ender 3, což je jedna z nejlevnějších tiskáren na trhu, která pracuje na principu FDM technologie. Tiskárna je prodávána v nesloženém stavu, uživatel si musí tedy tiskárnu složit sám a provést její kalibraci. Tento produkt oproti dražším tiskárnám nemá uživatelskou podporu a je tedy na uživateli, jak provede nastavení programu na vytvoření takzvaného gcodu.

Pro tisk byl zvolen model exteriéru kaple, který byl vypočten softwarem Agisoft PhotoScan. Model před tiskem nebyl nijak upravován, aby byla vidět skutečná geometrie vypočteného modelu, byl pouze oříznut v blízkém okolí kaple tak, aby vznikl podstavec.

Software pro vytvoření gcodu byl zvolen Simplify3D, což je velmi kvalitní profesionální slicer. Pro tisk byl zvolen materiál PLA bílé barvy od značky Gembird, na kterém lze snadno pozorovat geometrii vytisknutého modelu. Před tiskem byla provedena kalibrace extruderu, při které bylo ověřeno, zda tiskárna vytlačuje správné množství materiálu. Po tomto kroku byla vyrovnána podložka pomocí čtyř stavěcích šroubů. Následně byla provedena kalibrace správného rozměru tisku pomocí výtisku kalibrační kostky o daných rozměrech. Po těchto kalibracích byla tiskárna připravena pro tisk daného modelu.

Protože model neměl výrazné převisy a nebylo nutné použít podpory, byl model tisknut bez výplně se třemi obvodovými vrstvami a pěti vrchními. Důležitým parametrem pro nastavení tisku je retrakce, tedy zpětné vtlačení filamentu při přejezdu tiskové hlavy volným prostorem. To je důležité, aby z tiskové hlavy stále nevytékal materiál. Tato hodnota byla nastavena na 5,6 mm a rychlost vtlačení filamentu na 90 mm/s. Výška jedné vrstvy byla nastavena na 0,2 mm. Vyhřívaná podložka byla nastavena na 60 °C, teplota tiskové trysky pro první vrstvu na 210 °C a všechny ostatní vrstvy na 205 °C. Chlazení výtisku větráčkem bylo nastaveno na 100 %. Rychlost tisku byla zvoleno na 40 mm/s a tisk vnější vrstvy na 20 mm/s. Přejezd tiskové hlavy volným prostorem byl nastaven na

90 mm/s a rychlost vertikálního posunu na 30 mm/s. Jako poslední parametr byl nastaven překryv obvodových vrstev na 15 %.

Model byl vytisknut ve dvou velikostech, a to v měřítku 1:200 a 1:125, přičemž menší model se tiskl necelých 7 hodin a bylo spotřebováno 18 metrů filamentu o celkové váze 55 g a tisk většího modelu trval 17 hodin a spotřebováno bylo 51 metrů o celkové váze 155 g. Na obrázku (obr. 40) jsou znázorněny výtisky obou velikostí s kalibrační kostkou o rozměrech 2 x 2 cm.



Obr. 40 Vytisknuté modely ze 3D tiskárny

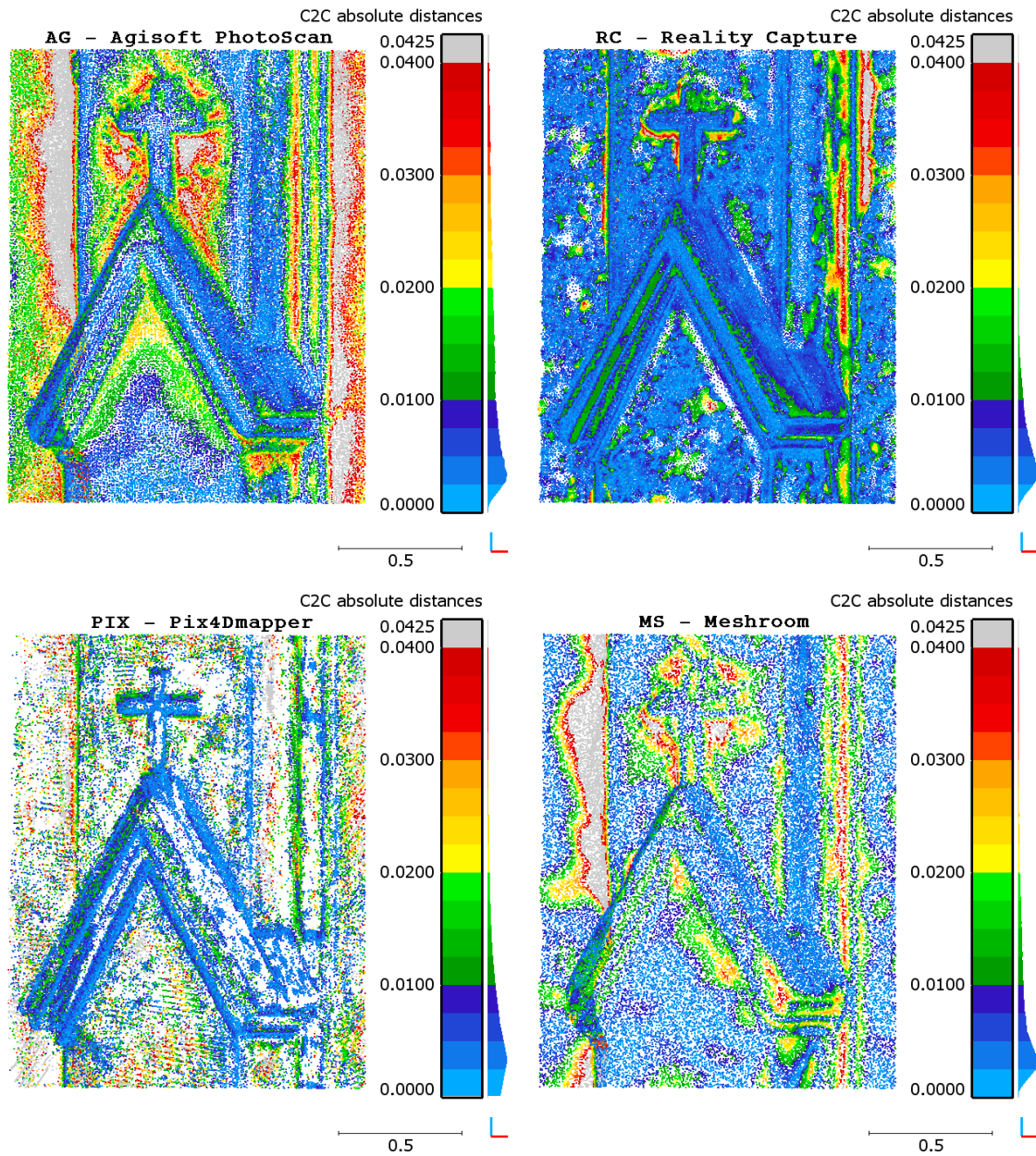
6 Porovnání kvality a přesnosti výstupů

Výsledkem zpracování fotogrammetrického měření je mračno bodů a mesh model s realistickými texturami. Pro vizuální porovnání výsledků ze všech čtyř softwarů jsou jednotlivé výřezy mračen bodů, síťových modelů a realistických textur uspořádány vždy vedle sebe na jednu stránku. V pravé části jednotlivých výřezů je znázorněna barevná stupnice odlehlosti bodů od referenčního mračna z laserového skenování, která je doplněná histogramem, jež znázorňuje četnost odlehlostí. Šedivou barvou jsou znázorněna odlehlá měření. Následně je uvedeno i slovní porovnání a tabulka s matematickými hodnotami statistických veličin pro porovnávané části.

6.1 Porovnání mračen bodů

V této podkapitole budou porovnávány mračna bodů vytvořená jednotlivými fotogrammetrickými programy s referenčními mračny pořízenými laserovým skenováním. Porovnávány budou výřezy jak exteriéru, tak i interiéru.

6.1.1 Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)



Obr. 41 Porovnání mračen bodů ozdobné stříšky

Jako jeden z příkladů pro porovnání byla vybrána ozdobná stříška (obr. 41) v jejíž horní části je detail ve formě křížku. Ve výřezu je možné pozorovat ostré hrany na objektu, které vystihují výsledný model. Jednotlivá mračna byla porovnávána s referenčním mračnem z laserového skenování.

Software Agisoft PhotoScan poměrně zachovává detaily na objektu, avšak přechod mezi křížkem a stěnou plynule přechází, a detail tak může v mračnu občas zanikat. Přechody mezi stěnami, jak lze pozorovat v pravé a levé části objektu, vytvářejí plynulý přechod a rohy objektu jsou zaoblené.

Program Reality Capture si velice dobře poradil s detaily a přechody mezi hranami. V rovných plochách mračna však vznikají drobné výstupky, které se negativně projevují ve výsledcích. Mračno má větší počet bodů, proto se jeví jako výrazně přesnější.

U porovnání mračna z Pix4Dmapper můžeme vidět dostatečně zachované hrany stříšky, to se však nedá říci o hranách na stěnách kaple. Mračno bodů má výrazný šum, jež je znázorněn šedivou barvou a v grafickém výstupu zaniká. Pro zmírnění šumu by muselo být mračno před zpracováním mesh modelu výrazně filtrováno, což však není v tomto softwaru možné.

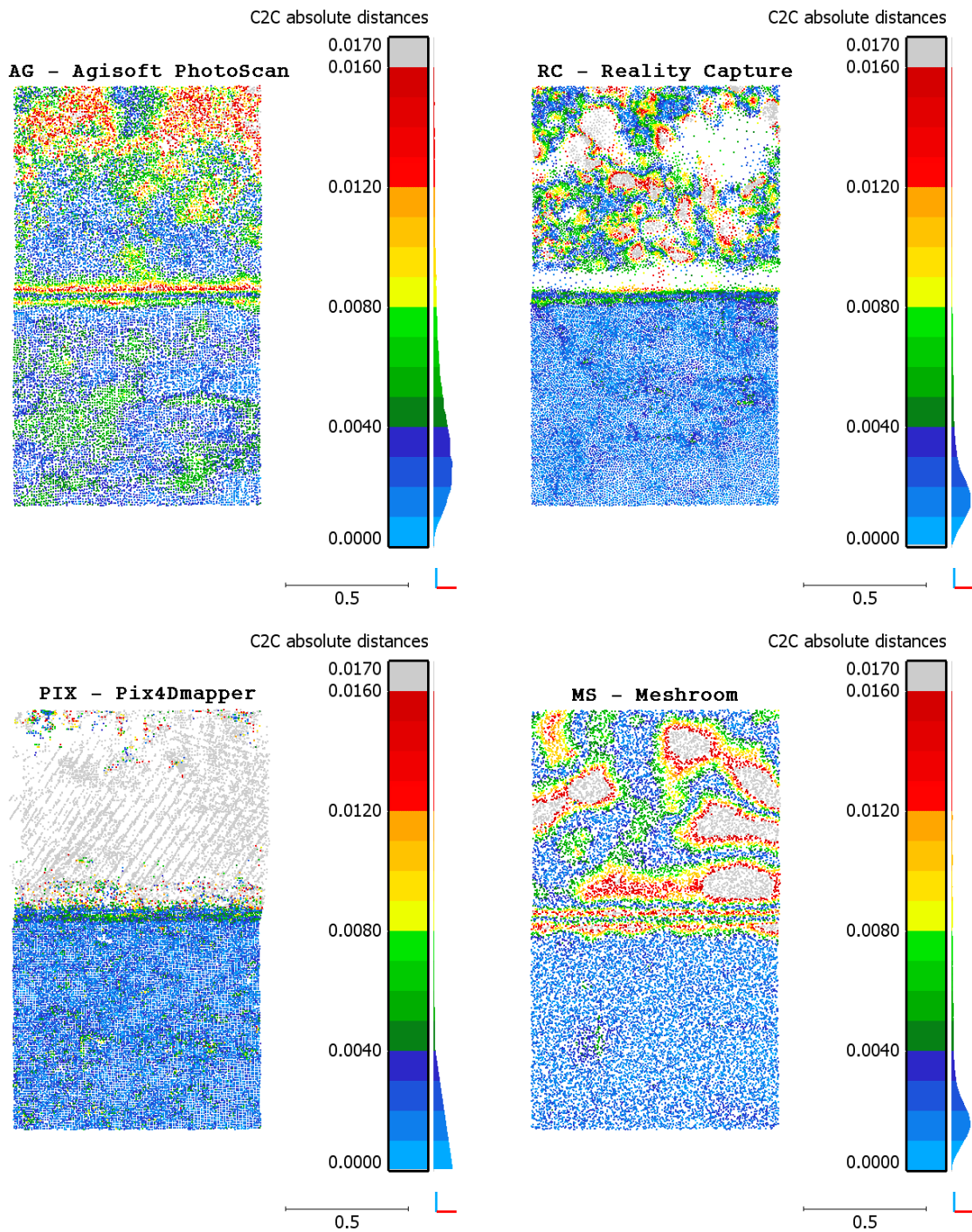
Mračno z programu Meshroom zachovává charakteristiku objektu, ale výrazně potlačuje detaily objektu, jak můžeme vidět třeba na křížku. Stěny kaple jsou poměrně hladké a odpovídají realitě.

V tabulce (tab. 5) jsou barevně zvýrazněny nejlepší a nekritičtější hodnoty. Z porovnání nejlépe vychází program Reality Capture a nejhůře pak Pix4Dmapper.

Tab. 5 Porovnání mračen bodů ozdobné stříšky

Porovnání mračen bodů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,103	0,062	0,893	0,110
Průměrná vzdálenost [m]	0,019	0,008	0,015	0,014
Směrodatná odch. [m]	0,017	0,007	0,029	0,015
Počet bodů	99808	133819	77186	64137

6.1.2 Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér)



Obr. 42 Porovnání mračen bodů přechodu mezi podezdívkou a fasádou

Porovnávaný výřez (obr. 42) byl vybrán z důvodu, aby bylo znázorněno, že pokud má fasáda jednodílnou barvu, tak se při zpracování na fasádě vytvoří minimum spojovacích bodů a výsledný model je poté v těchto plochách negativně ovlivněn. Tomu lze obecně předejít promítáním vybraných vzorů či značek na fasádu.

Program Agisoft PhotoScan vytváří v části podezdívky mírné odchylky, následně bez ostré detekce hrany přejde do části fasády, kde se více přibližuje referenčnímu mračnu z laserového skenování, a ve větší vzdálenosti od hrany se mírně zhoršuje.

Software Reality Capture ve spodní části výřezu velice dobře vystihl referenční mračno a detekoval přechod mezi plochami. V části fasády vzniká drobný šum, který v ploše průměrně přimyká k referenčnímu mračnu.

Pix4Dmapper si velice dobře poradil s podezdívkou a přechodem mezi odlišnými typy povrchu. Povrch fasády je v daném místě výrazně zašuměn a v porovnání jsou body mračna vyhodnoceny jako odlehlé.

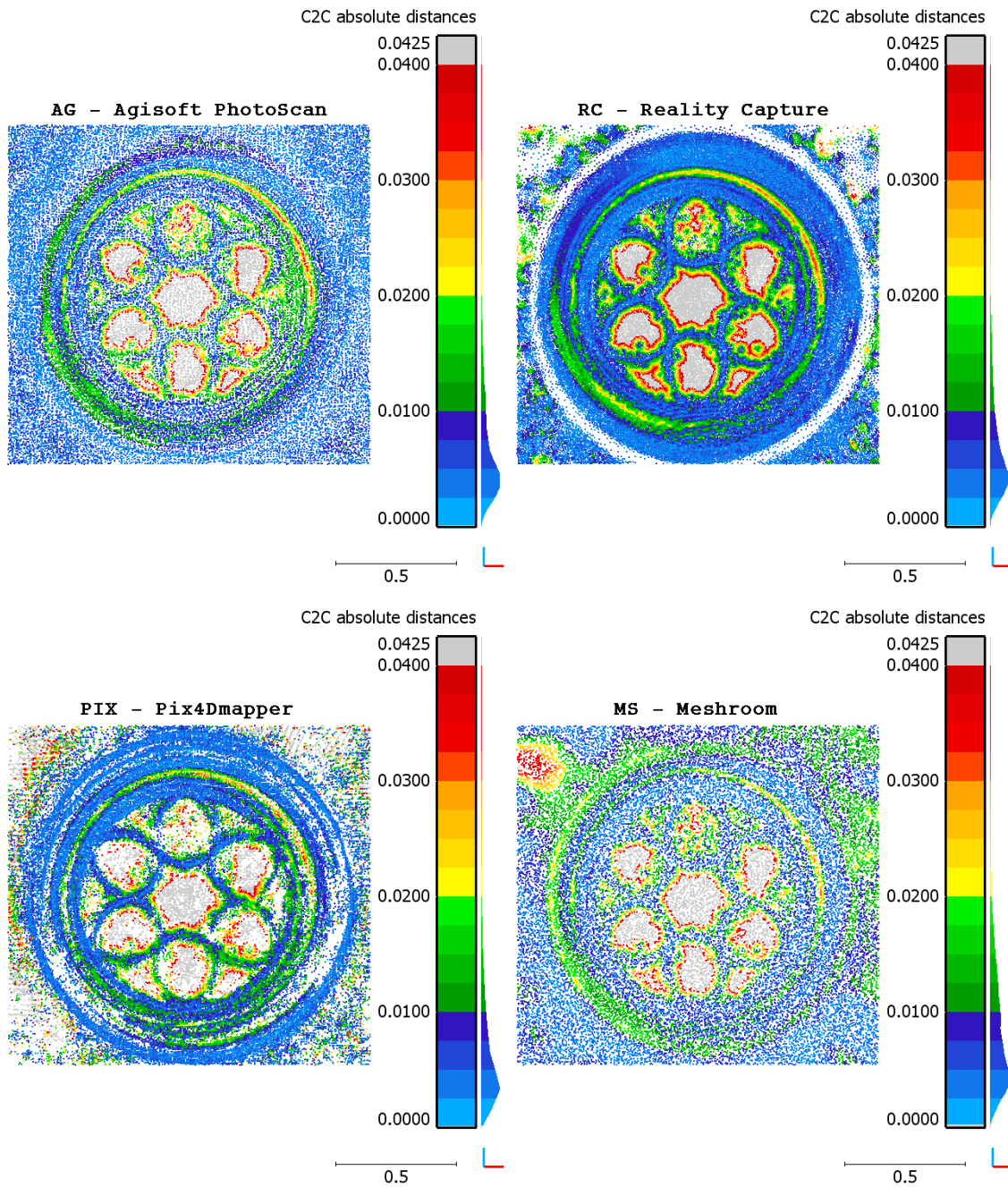
Program Meshroom dobře vystihuje spodní část výřezu, a následně můžeme pozorovat plynulý přechod bez výrazné detekce hrany. V některých místech fasády vznikají větší odlehlosti ve formě vln, zbytek fasády je však bez větších odlehlostí.

V tabulce (tab. 6) je negativně posouzen program Pix4Dmapper s největšími odlehlostmi. Ostatní softwary si vedly velice podobně, nejlépe je však hodnocen Agisoft PhotoScan.

Tab. 6 Porovnání mračen bodů přechodu mezi podezdívkou a fasádou

Porovnání mračen bodů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,030	0,066	0,737	0,032
Průměrná vzdálenost [m]	0,005	0,004	0,044	0,005
Směrodatná odch. [m]	0,004	0,005	0,075	0,006
Počet bodů	24472	25168	33566	24756

6.1.3 Porovnání kulatého okna (exteriér)



Obr. 43 Porovnání mračen bodů kulatého okna

Porovnání kulatého okna (obr. 43) bylo vybráno z důvodu detailního porovnání rámečků pro uchycení jednotlivých tabulek skla a plynulého přechodu otvoru okna do fasády kaple. Odlehlé hodnoty v místech tabulek skla jsou z toho důvodu, že referenční mračno z laserového skenování v těchto místech neobsahuje žádné body, neboť přístroj nedokázal zaměřit tabulky skla.

Software Agisoft PhotoScan má velice přesný přechod mezi okenním otvorem a fasádou a stěna společně s fasádou je v celém výřezu velice přesná. Drobné nepřesnosti vnikají na okrasném výčnělku v otvoru okna. Detail ve formě rámu okenních tabulek je zachovaný a také velice přesný.

Software Reality Capture na přechodu fasády a okenního otvoru vygeneroval velice řídký proužek mračna, oblast fasády je pak s mírnými nedostatky ve formě jemného šumu mračna. Detailní uchycení tabulek skla se vygenerovalo poměrně přesně bez větších problémů.

Oblast fasády vypočtená programem Pix4Dmapper je velice zašumělá a detaily okenního otvoru jsou zachované. Na rámečkách pro uchycení skla vznikají drobné nedostatky.

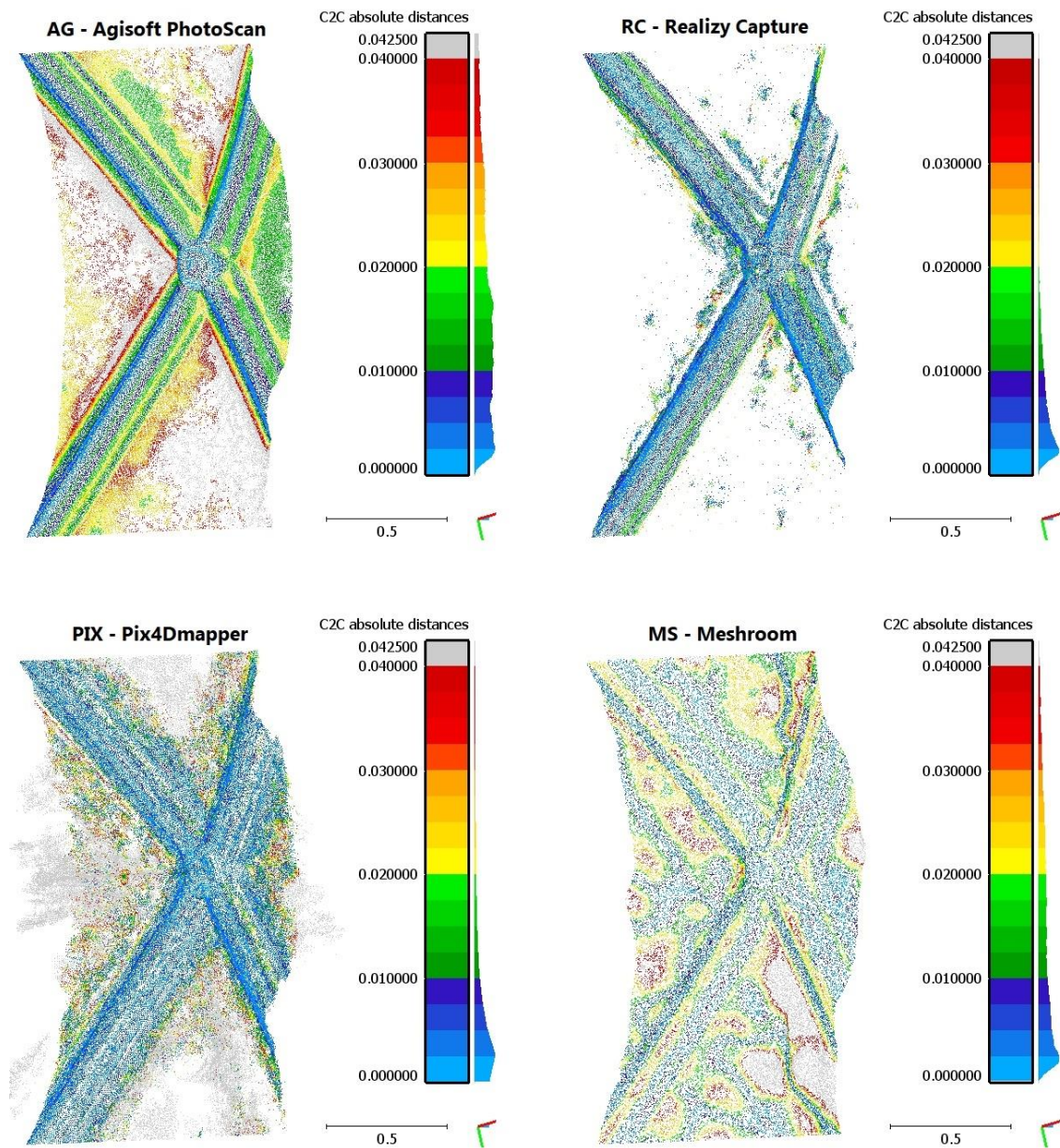
Program Meshroom v levé části okna v přechodu mezi okenním otvorem a fasádou vykazuje mírné odchýlení od referenčního mračna. V okolí okna mírně narůstá odchýlení a vlevo od okna vzniká již výraznější odchýlení.

V tabulce (tab. 7) je znázorněno matematické porovnání, kde si nejhůře vedl software Pix4Dmapper, hlavně kvůli výraznému šumu mračna. Nejlépe si vedl program Agisoft PhotoScan, jak lze i jednoznačně pozorovat na grafickém porovnání.

Tab. 7 Porovnání mračen bodů kulatého okna

Porovnání mračen bodů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,128	0,128	0,414	0,128
Průměrná vzdálenost [m]	0,011	0,012	0,014	0,013
Směrodatná odch. [m]	0,013	0,014	0,025	0,014
Počet bodů	38740	62945	66836	33252

6.1.4 Porovnání křížové klenby kaple (interiér)



Obr. 44 Porovnání mračen bodů křížové klenby

Další srovnání bylo provedeno v interiéru kaple, kde byl porovnáván výřez křížové klenby s ozdobnými žebry (obr. 44). Stěny interiéru kaple mají jednolitou barvu obdobně, jak je tomu v exteriéru, a žebra klenby mají ozdobné hrany.

Program Agisoft PhotoScan má ve výřezu výraznější problémy mimo ozdobná žebra. Mračno je zde poměrně husté, v celé ploše ale vznikají větší odlehlosti. Žebra klenby mají zachovanou strukturu, ale na jejich stranách jsou mírné odlehlosti, kde nebyly zachovány detaily.

Program Reality Capture má minimální odlehlosti na ozdobných žebrech a mračno bodů je zde velice husté. Ve zbylé části křížové klenby je mračno sice řídké, ale nevznikají zde výrazné odchylky od referenčního mračna z laserového skenování.

Na výřezu mračna ze softwaru Pix4Dmapper lze spatřit značný šum, který je znázorněn šedivou barvou. Ozdobná žebra nevykazují výraznější odchýlení. V horní a spodní části mezi žebry vznikají místa bez bodů.

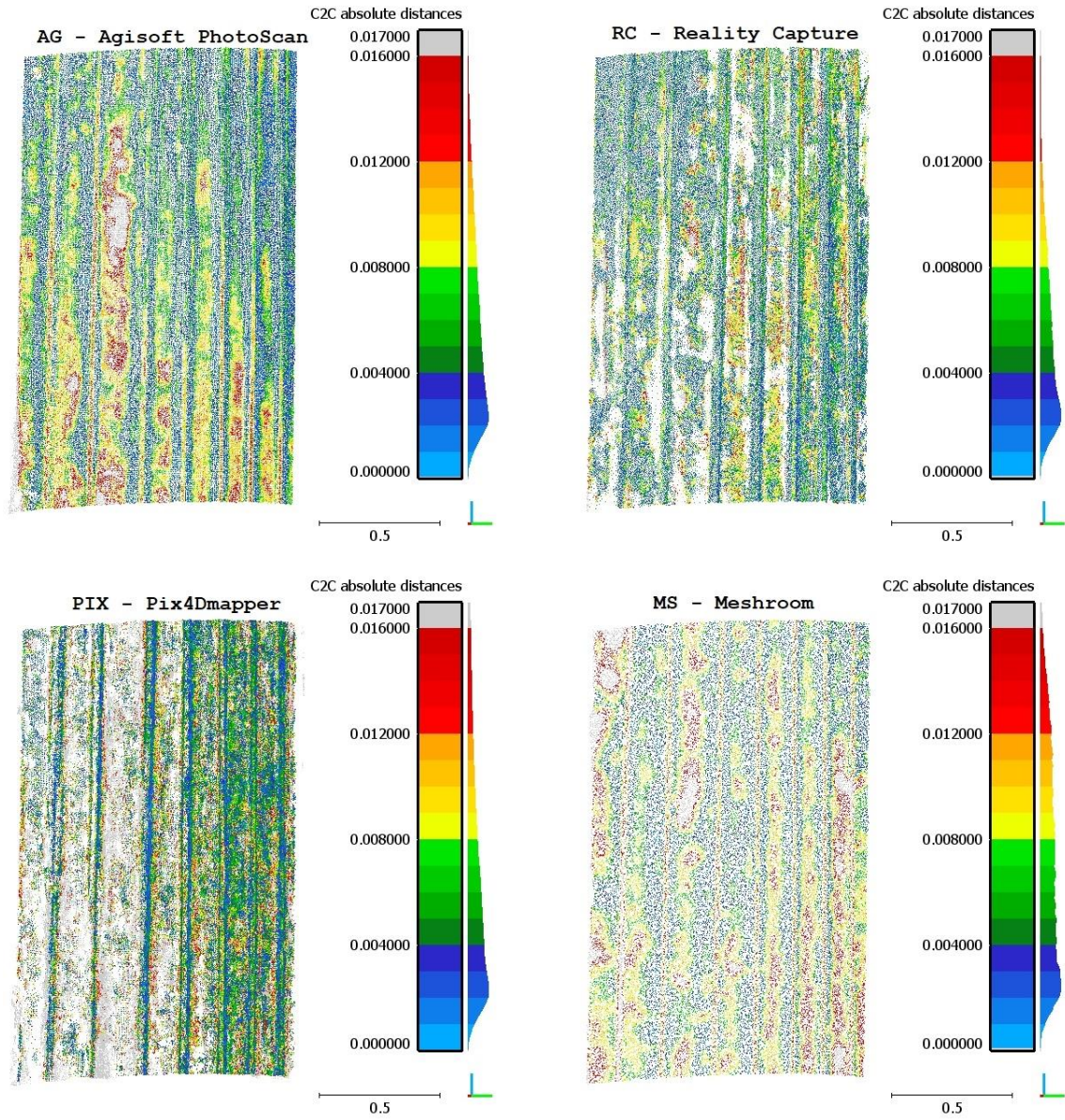
Mračno bodů z programu Meshroom vykazuje pár odlehlých míst, obecně však nevykazuje extrémní odlišení od mračna z laserového skenování.

V tabulce (tab. 8) můžeme sledovat extrémní maximální vzdálenost u programu Pix4Dmapper, která je způsobena výrazným šumem. Jednoznačně nejlépe si v matematickém porovnání vedl software Reality Capture od stejnojmenné slovenské společnosti.

Tab. 8 Porovnání mračen bodů křížové klenby

Porovnání mračen bodů (interiér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,116	0,069	0,951	0,120
Průměrná vzdálenost [m]	0,021	0,008	0,051	0,018
Směrodatná odch. [m]	0,015	0,006	0,109	0,015
Počet bodů	86877	59373	130335	50910

6.1.5 Porovnání dřevěného obložení (interiér)



Obr. 45 Porovnání mrače bodů dřevěného obložení

Druhým porovnávaným výřezem v interiéru kaple je dřevěné obložení (obr. 45) točitého schodiště s úzkými ozdobnými vertikálními lištami, které mírně vystupují před obložení. Jako ve všech předchozích porovnáních je referenčním podkladem mračno z laserového skenování.

Program Agisoft PhotoScan vygeneroval velmi husté mračno bodů a obecně si s výřezem poradil velmi dobře. Nejpresněji byly dopočteny přechody mezi lištami a obložení, naopak nejhůře dopadly mírně zaoblené plochy dřevěného obložení.

Software Reality Capture dává poměrně srovnatelný výstup, jako program Agisoft PhotoScan, co se týče velikosti a počtu odchylek. Plochy dřevěného obložení jsou jen mírně odchýlené a hrany mezi obložení a lištami společně se samotnými lištami jsou velice dobře vygenerované.

Program Pix4Dmapper si s tímto výřezem již poradil o něco hůře. V levé části je mračno bodů méně husté a přechod mezi obložení a lištami není již tak přesný, jako tomu bylo u předchozích dvou programů. Veliký počet šedivých bodů navíc poukazuje na mnoho odlehlých hodnot.

Mračno bodů ze softwaru Meshroom je velmi řídké a body od sebe mají nejvíce pravidelný rozestup. Odchyly na bodech jsou mnohem vyšší než u ostatních softwarů, což lze jasně pozorovat v histogramu.

V následující tabulce (tab. 9) jsou uvedeny hodnoty statistických veličin výřezu ze všech softwarů. Jednoznačně nejhorší výstup poskytl program Pix4Dmapper, ostatní softwary se od sebe nijak zásadně neliší.

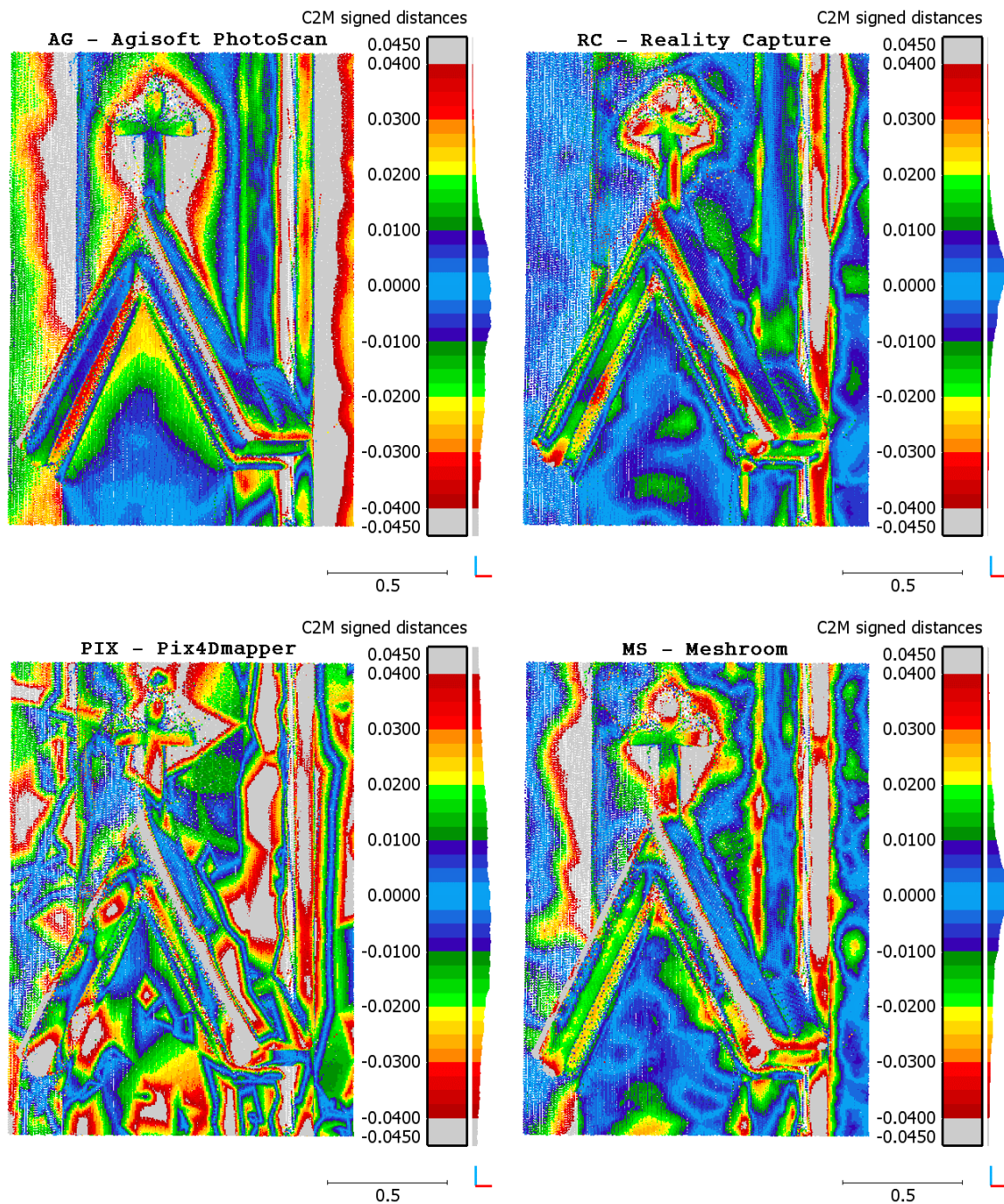
Tab. 9 Porovnání mračen bodů dřevěného obložení

Porovnání mračen bodů (interiér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,098	0,063	0,206	0,043
Průměrná vzdálenost [m]	0,006	0,006	0,012	0,008
Směrodatná odch. [m]	0,005	0,004	0,014	0,005
Počet bodů	106701	96168	290620	50486

6.2 Porovnání síťových modelů

V této podkapitole budou porovnávány výřezy síťových modelů z jednotlivých softwarů s referenčními mračny pořízenými laserovým skenováním.

6.2.1 Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)



Obr 46 Porovnání mesh modelů ozdobné stříšky

Každý software má jiné algoritmy pro filtraci bodů a vytváření mesh modelu, proto je vhodné porovnat i vytvořené modely. Tyto modely byly taktéž porovnány s referenčním měřením z laserového skenování. Stejně jako při porovnání mračen bodů byla jako první porovnána ozdobná stříška (obr. 46).

Agisoft PhotoScan vytvořil vizuálně velice věrohodný model, ale odchylky v ostrých hranách porovnávané části objektu jsou výrazné a mesh model je příliš vyhlazený. V rozích fasády, kde byl stejný barevný povrch, vnikl jemný šum v mračnu bodů a vytvořený model v těchto místech odléhá od referenčního měření. Křížek na stříšce však zůstal velice detailní.

Model ze Softwaru Reality Capture zachoval rovné plochy. Detaily na objektu jsou mírně odchýlené s dostatečnou charakteristikou. Výsledný model má minimum odlehlých hodnot a výsledek vypadá realisticky.

Program Pix4Dmapper měl výrazné problémy s rekonstrukcí mesh modelu, což zapříčinilo výrazný šum v mračnu bodů. V některých částech modelu jsou převrácené trojúhelníky a na těchto místech tak vznikají ostré hrany.

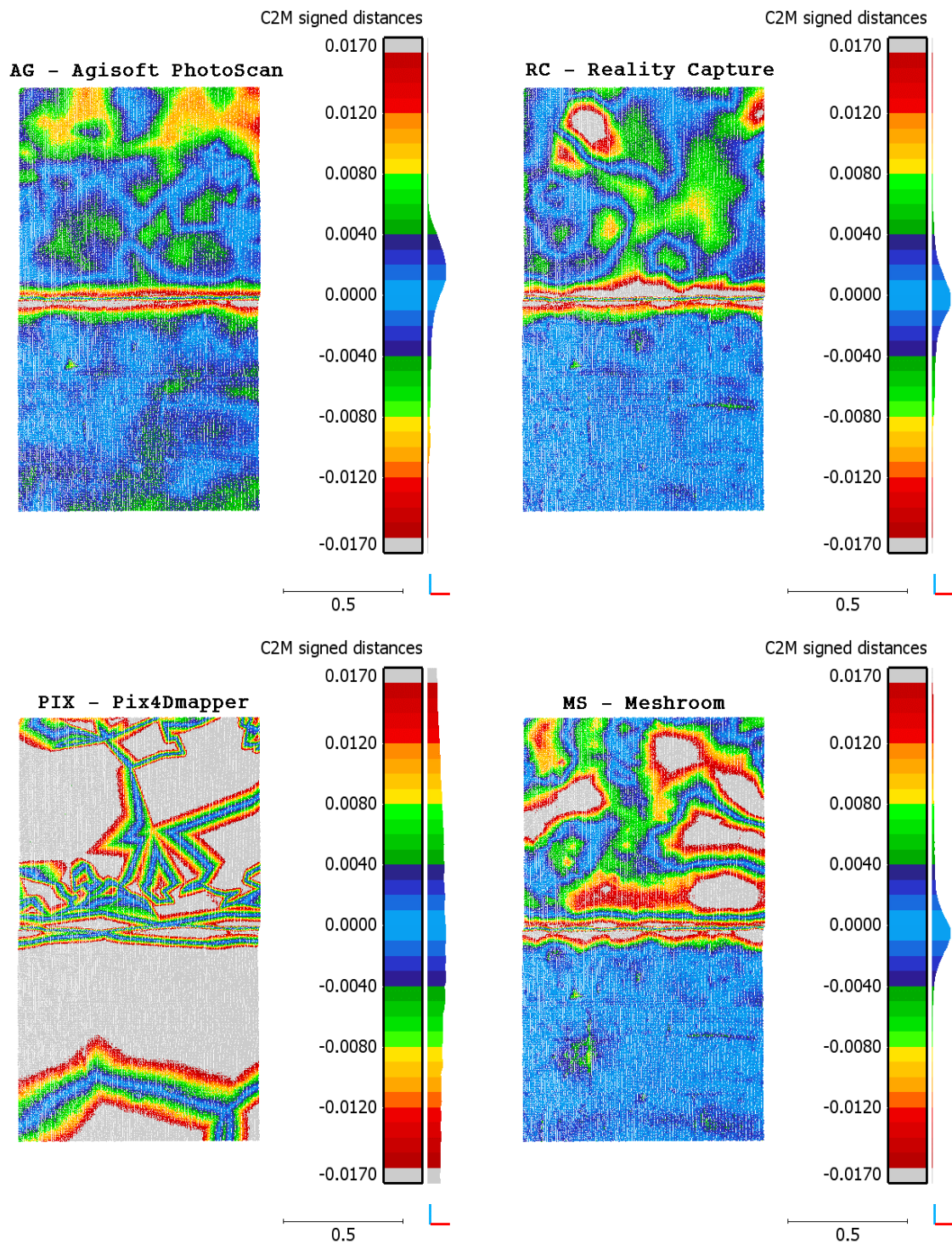
Mesh model ze softwaru Meshroom se přibližuje reálnému tvaru objektu, přesto na modelu vznikají nedostatky ve formě zhoršeného zachování detailů a hran.

V tabulce (tab. 10) jsou uvedeny vypočtené hodnoty z porovnání, kde si nejlépe vedl program Reality Capture. Model z programu Pix4Dmapper nevyšel matematicky nejhůře, neboť trojúhelníky mesh modelu byly odlehlé na obě strany od referenčního mračna.

Tab. 10 Porovnání mesh modelů ozdobné stříšky

Porovnání mesh modelů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,147	0,095	0,127	0,150
Průměrná vzdálenost [m]	-0,019	0,000	0,017	-0,004
Směrodatná odch. [m]	0,030	0,019	0,030	0,031
Počet trojúhelníků	5009	4831	3709	20257

6.2.2 Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér)



Obr. 47 Porovnání mesh modelů přechodu mezi podezdívkou a fasádou

Mesh modely na porovnávané části s přechodem mezi podezdívkou a fasádou (obr. 47) byly taktéž porovnávány s mračnem z referenčního skenování. Toto porovnání vystihuje chování jednotlivých softwarů při „zamešování“ v části, kde v mračnu vznikl plošný šum.

Program Agisoft PhotoScan má velice podobné odchýlení od referenčního mračna jako vykazovalo mračno vytvořené tímto softwarem. Odchýlení mesh modelu v ploše probíhá plynule, extrémů dosahuje pouze v části zlomu dvou částí.

Reality Capture velice věrohodně vystihuje část podezdívky, kde má minimální odchylky. V části fasády však má některé drobné odchýlené prvky považované za odlehlé, model je však celkově velice přesný.

Software Pix4Dmapper má výraznější odchylky než ostatní programy. Většina odlehlých hodnot byla vyhodnocena za chybná, průměrně však vzdálenost od referenčního mračna nedosahuje extrémních hodnot.

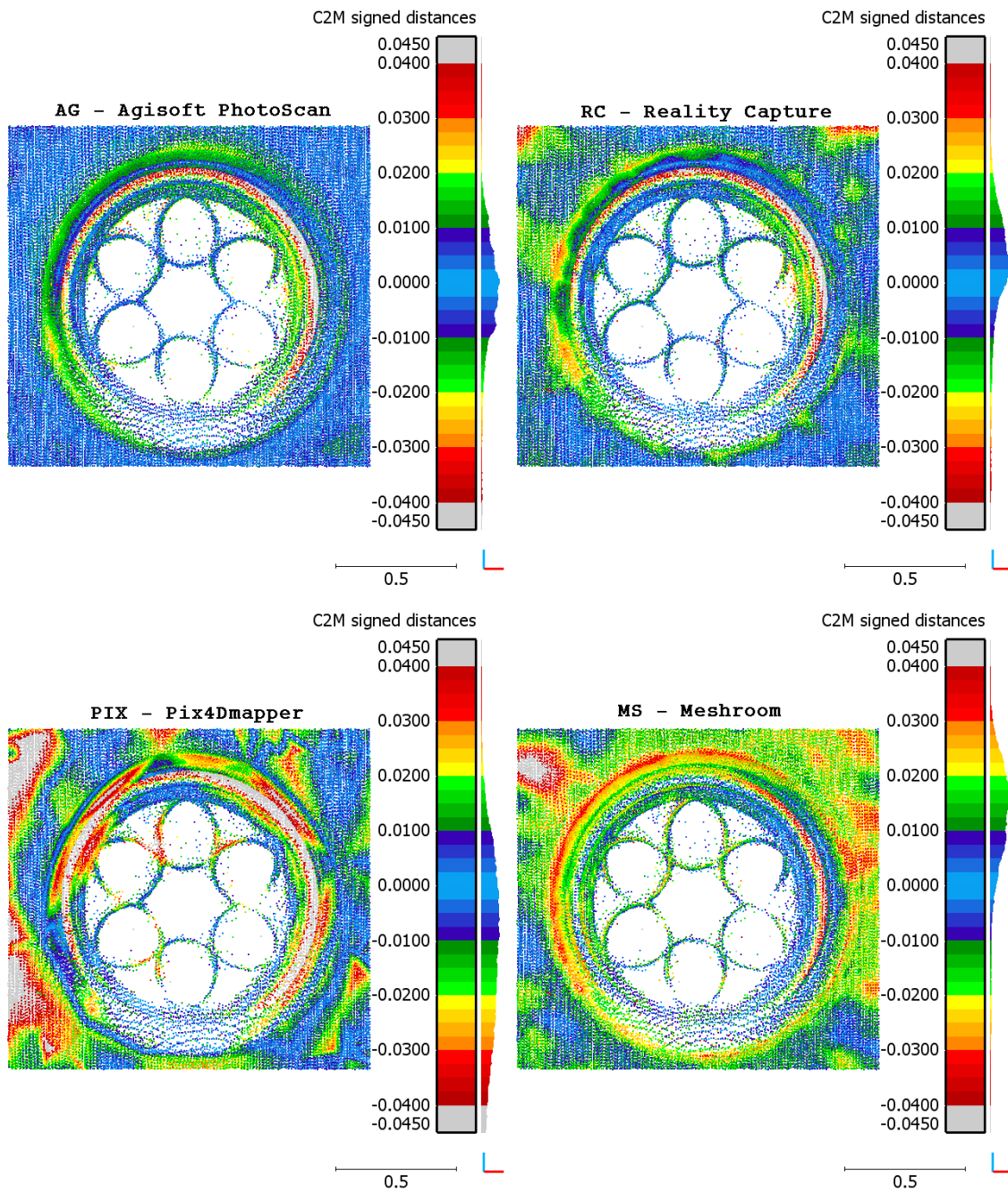
V části s fasádou Meshroom vytváří místa s odlehlými hodnotami, přesto stěna vypadá dostatečně věrohodně. Podezdívka v podstatě nemá odchýlené hodnoty a model v části podezdívky je úhledný.

V tabulce (tab. 11) je znázorněno matematické porovnání, kde si nejlépe vede Agisoft PhotoScan a Reality Capture. Nijak výrazně se neodlišuje ani model z programu Meshroom, nejdlejší hodnoty vykazuje Pix4Dmapper.

Tab. 11 Porovnání mesh modelů přechodu mezi podezdívkou a fasádou

Porovnání mesh modelů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,064	0,064	0,094	0,066
Průměrná vzdálenost [m]	0,000	-0,001	-0,012	0,002
Směrodatná odch. [m]	0,005	0,005	0,029	0,008
Počet trojúhelníků [m]	7211	6160	4992	17855

6.2.3 Porovnání kulatého okna (exteriér)



Obr. 48 Porovnání mesh modelů kulatého okna

Posouzení přesnosti mesh modelů kulatého okna (obr. 48) bylo vyhodnoceno pomocí odlehlostí od referenčního mračna z laserového skenování.

Přestože bylo mračno bodů z programu Agisoft PhotoScan velice přesné, na přechodu mezi okenním otvorem a fasádou vzniká mírná odlehlost od mesh modelu. Fasáda objektu je bez odlehlostí a detaily zůstaly zachovány.

V mračnu modů na přechodu okenního otvoru a fasády vygenerovaném v programu Reality Capture chybělo mnoho bodů, i přes to je mesh model poměrně přesný a výraznější odchylky na přechodu vznikaly pouze v levé části. Detaily okenních rámu zůstaly věrohodné a vystihují reálnou situaci.

Software Pix4Dmapper vykazuje výraznější odchylky a ukazuje i více odlehlých hodnot. Model i v těchto částech trpěl na převrácené trojúhelníky mesh modelu, přesto je zachována charakteristika porovnávané části.

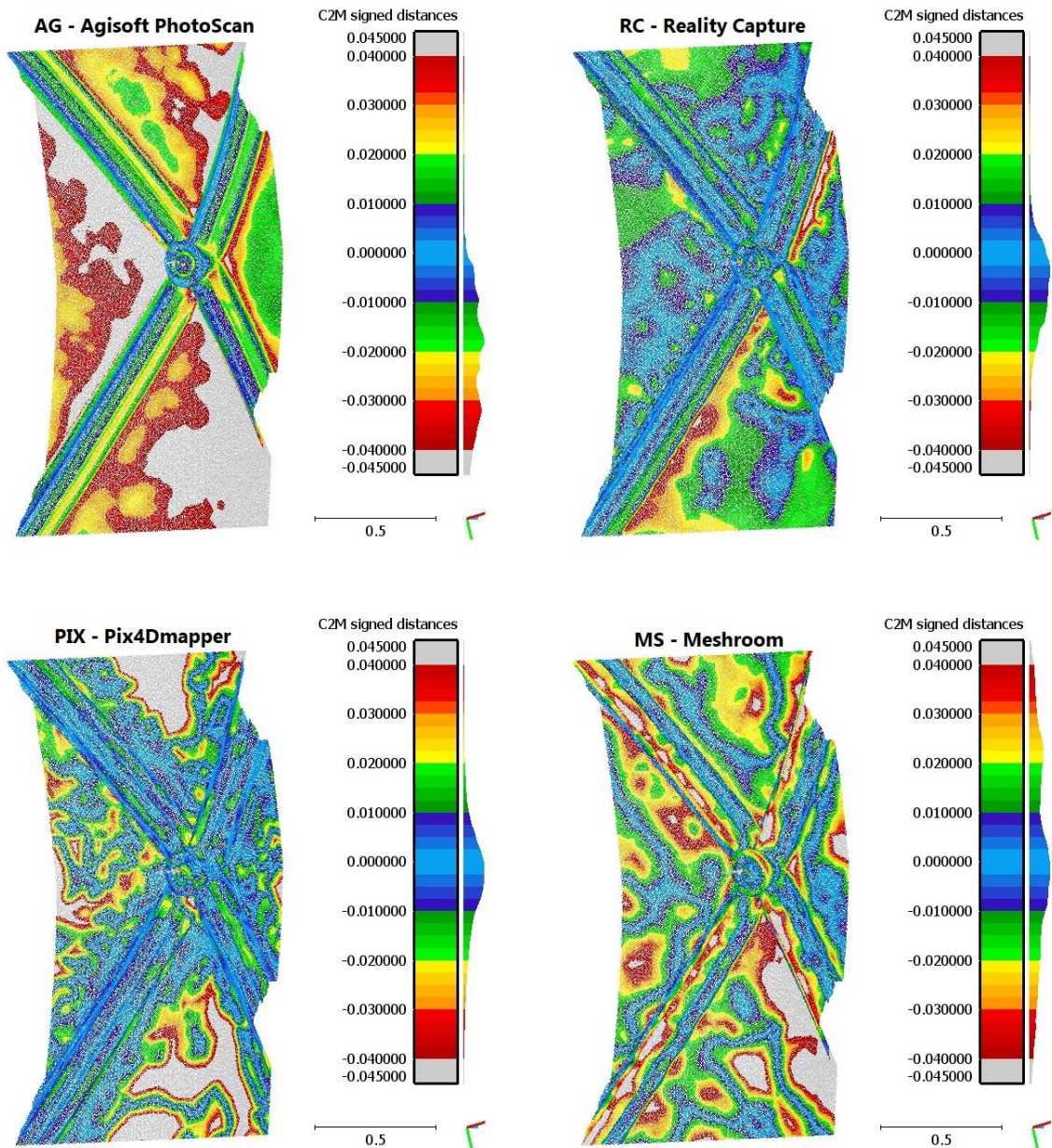
Meshroom v tomto výřezu ukazuje globálně nejvíce odchylek na fasádě s horším přechodem mezi okenním otvorem a fasádou. Pouze v jedné části je odlehlost od referenčního mračna považována za chybnou.

Tabulka (tab. 12) znázorňuje matematické statistiky porovnávaných výřezů. Vizualně si nejlépe vedl program Agisoft PhotoScan, statisticky si je však s modelem ze softwaru Reality Capture velice podobný. Nejhůře se jeví mesh model z Pix4Dmapper.

Tab. 12 Porovnání mesh modelů kulatého okna

Porovnání mesh modelů (exteriér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,074	0,083	0,089	0,091
Průměrná vzdálenost [m]	-0,004	0,001	-0,015	0,011
Směrodatná odch. [m]	0,014	0,015	0,021	0,014
Počet trojúhelníků	3414	3496	4534	18458

6.2.4 Porovnání křížové klenby kaple (interiér)



Obr. 49 Porovnání mesh modelů křížové klenby

Mesh modely křížové klenby kaple (obr. 49) jsou obecně horší než, mesh modely vygenerované v exteriéru kaple. Důvodem může být snížené osvětlení a nedostatečné nasnímkování ve více výškových úrovních.

Software Agisoft PhotoScan se odchyluje v blízkosti ozdobných žeber, jedná se o velice plynulé odchylování od referenčního mračna. Detail a přesnost ozdobných žeber nejsou nijak kritické a jsou především zachovalé v nejvíce vystouplé plošce žebra.

Program Reality Capture vizuálně velice dobře vystihuje referenční mračno z laserového skenování, výraznější odchylení je pouze na jedné hraně ozdobného žebra klenby. Zbylý povrch klenby nevykazuje výraznější vady modelu.

Přes značný šum v mračnu bodů vytvořil program Pix4Dmapper poměrně hezký mesh model, kde jsou výraznější odchylky v horní a spodní části mezi jednotlivými ozdobnými žebry klenby.

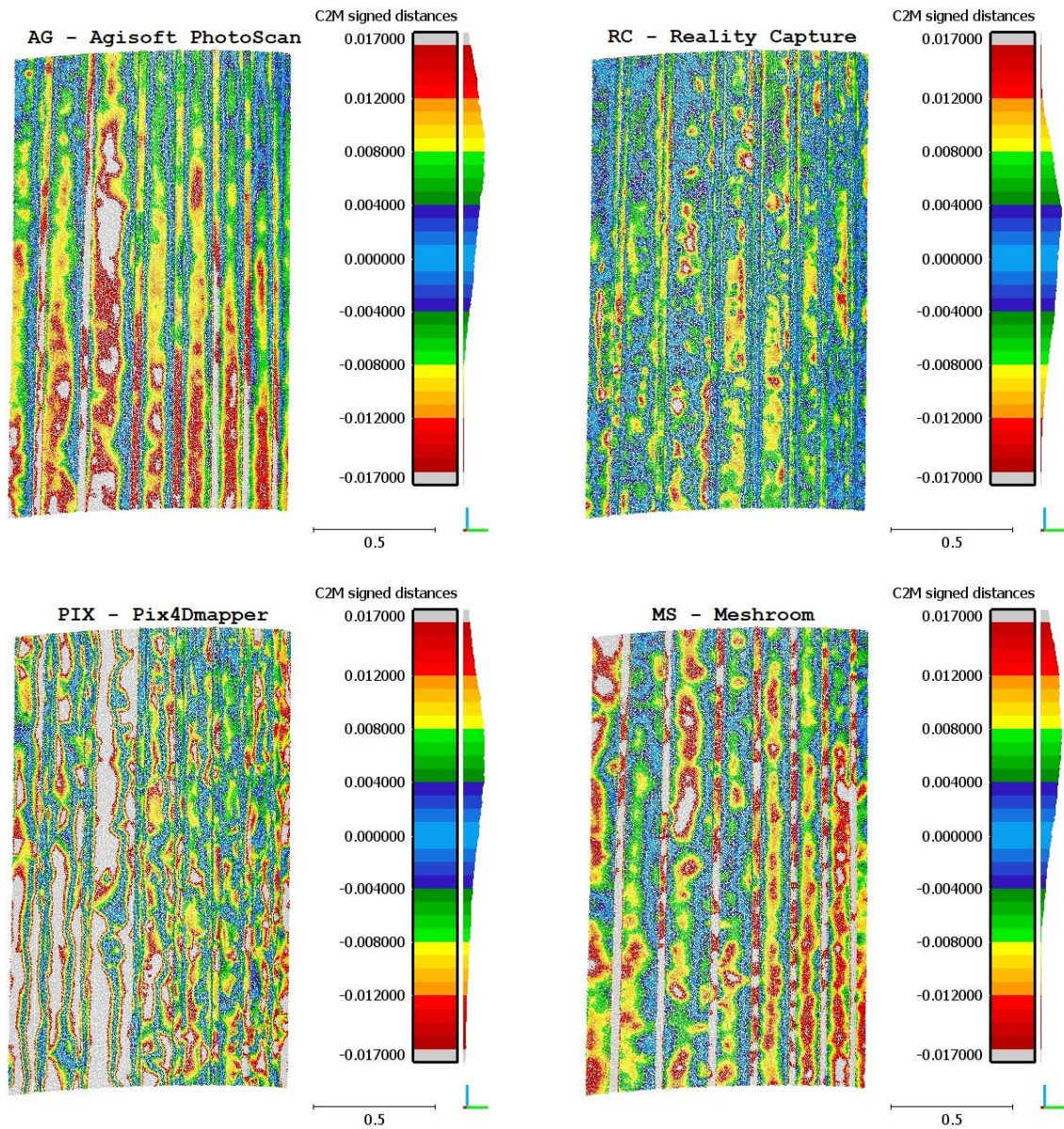
Meshroom vytváří v této části modelu výraznější odchylky. Jak můžeme vidět na histogramu, mesh model se vlní okolo referenčního mračna a průměrná vzdálenost je tak minimální.

V tabulce (tab. 13) je matematické porovnání jednotlivých modelů, kde červeně jsou znázorněny kritické hodnoty, zeleně pak hodnoty nejpřesnější. Posoudit, který model si vedl nejlépe, je i přesto velmi obtížné.

Tab. 13 Porovnání mesh modelů křížové klenby

Porovnání mesh modelů (interiér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,555	0,502	0,564	0,560
Průměrná vzdálenost [m]	-0,028	-0,007	-0,003	0,000
Směrodatná odch. [m]	0,020	0,010	0,023	0,024
Počet trojúhelníků	184393	122122	35901	46665

6.2.5 Porovnání dřevěného obložení (interiér)



Obr. 50 Porovnání mesh modelů dřevěného obložení

Výřezy mesh modelů dřevěného obložení (obr. 50) se nijak extrémně neliší od referenčního mračna. V této části bylo vygenerováno dostatečné množství spojovacích bodů díky rozpoznatelné textuře dřeva.

Program Agisoft PhotoScan má mesh model vystouplý před referenční mračno hlavně v místech mezi ozdobnými lištami. Model se snaží mezi těmito lištami vyhladit povrch a dostat se do stejné úrovně, jako jsou lišty.

Program Reality Capture si vede ze všech porovnávaných výřezů nejlépe. Odchytky jsou minimální a histogram se nejvíce přibližuje nulovým hodnotám.

Software Pix4Dmapper v několika místech mezi lištami vytvořil mesh model, který byl výrazněji odlehlý od referenčního mračna. Výraznější odchytky můžeme pozorovat v levé části výřezu, kde jsou odlehle hodnoty znázorněny šedivou barvou.

Software Meshroom vytvořil geometricky velmi srovnatelný model, jako program Agisoft PhotoScan. V modelu je pár odlehlejších míst, jinak model vystihuje velmi realisticky daný objekt

V tabulce (tab. 14) jsou znázorněny výsledky matematického testu, kde si nejlépe vedl Program Reality Capture. Ostatní programy mají velice podobné výsledky.

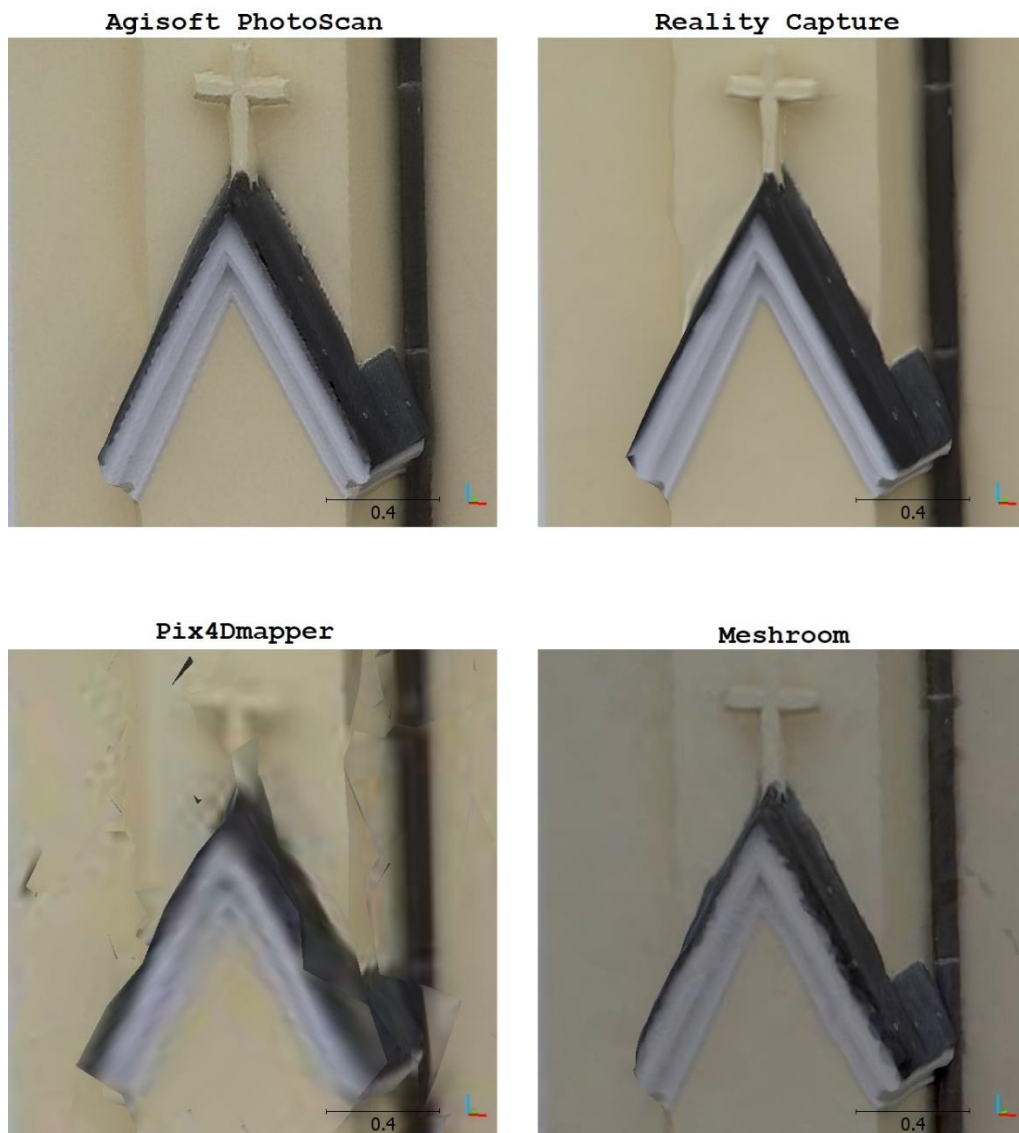
Tab. 14 Porovnání mesh modelů dřevěného obložení

Porovnání mesh modelů (interiér)				
Software	AG	RC	PIX	MS
Maximální vzdálenost [m]	0,066	0,068	0,074	0,071
Průměrná vzdálenost [m]	0,007	0,001	0,004	0,008
Směrodatná odch. [m]	0,007	0,006	0,011	0,007
Počet trojúhelníků	202805	195816	54519	73707

6.3 Porovnání realistických textur

V této podkapitole budou porovnávány realistické textury vytvořené v jednotlivých softwarech s referenčními mračny pořízenými laserovým skenováním.

6.3.1 Porovnání ozdobné stříšky (exteriér)



Obr. 51 Porovnání realistických textur ozdobné stříšky

Na první pohled je vidět, že nejhorší výstup je z programu Pix4Dmapper, kde jsou vidět převrácené trojúhelníky a textura není ostrá. Textura ze softwaru Meshroom je tmavší než z ostatních programů. Agisoft PhotoScan a Reality Capture dává podobné výstupy, přičemž první program si lépe poradil s hranami objektu, naopak druhý program vygeneroval méně zrnitou texturu.

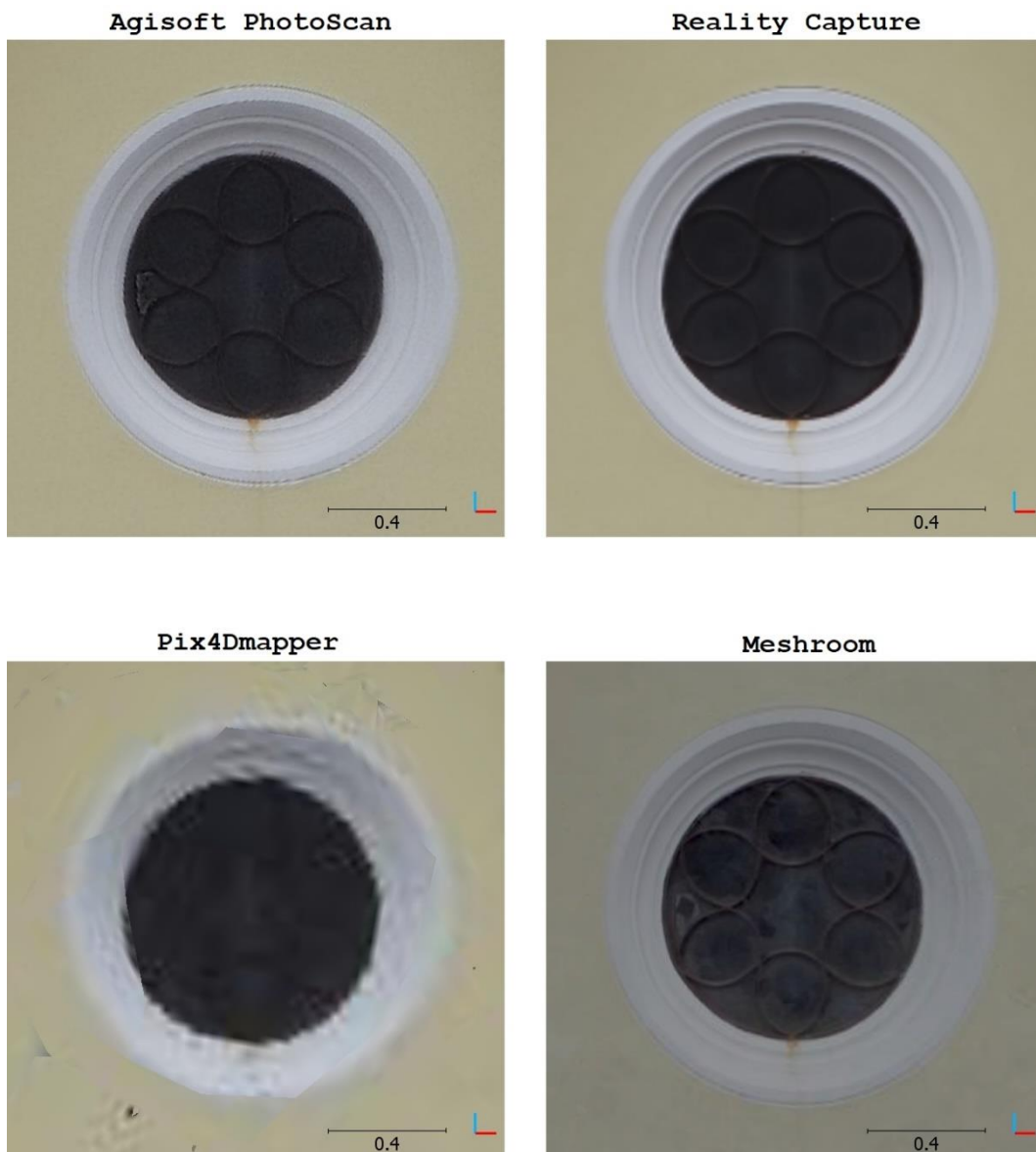
6.3.2 Porovnání přechodu mezi podezdívkou a fasádou (exteriér)



Obr. 52 Porovnání realistických textur přechodu podezdívky a fasády

Na výřezu (obr. 52) z programu Agisoft PhotoScan můžeme vidět promítnutí obrysu stromu na fasádu objektu. Tento jev je možné v programu odstranit odmaskováním snímků, na kterých je strom, popřípadě tyto snímky nepoužít do texturování. Software Reality Capture si s tímto poradil velice elegantně a textura je v těchto místech ostrá, bez výrazných problémů. Na textuře programu Pix4Dmapper jsou vidět černé neotexturované trojúhelníky a textura na podezdívce je rozmazaná. Meshroom vytvořil hezkou texturu v části podezdívky, na textuře fasády jsou ale viditelné jednotlivé trojúhelníky mesh modelu s různými odstíny.

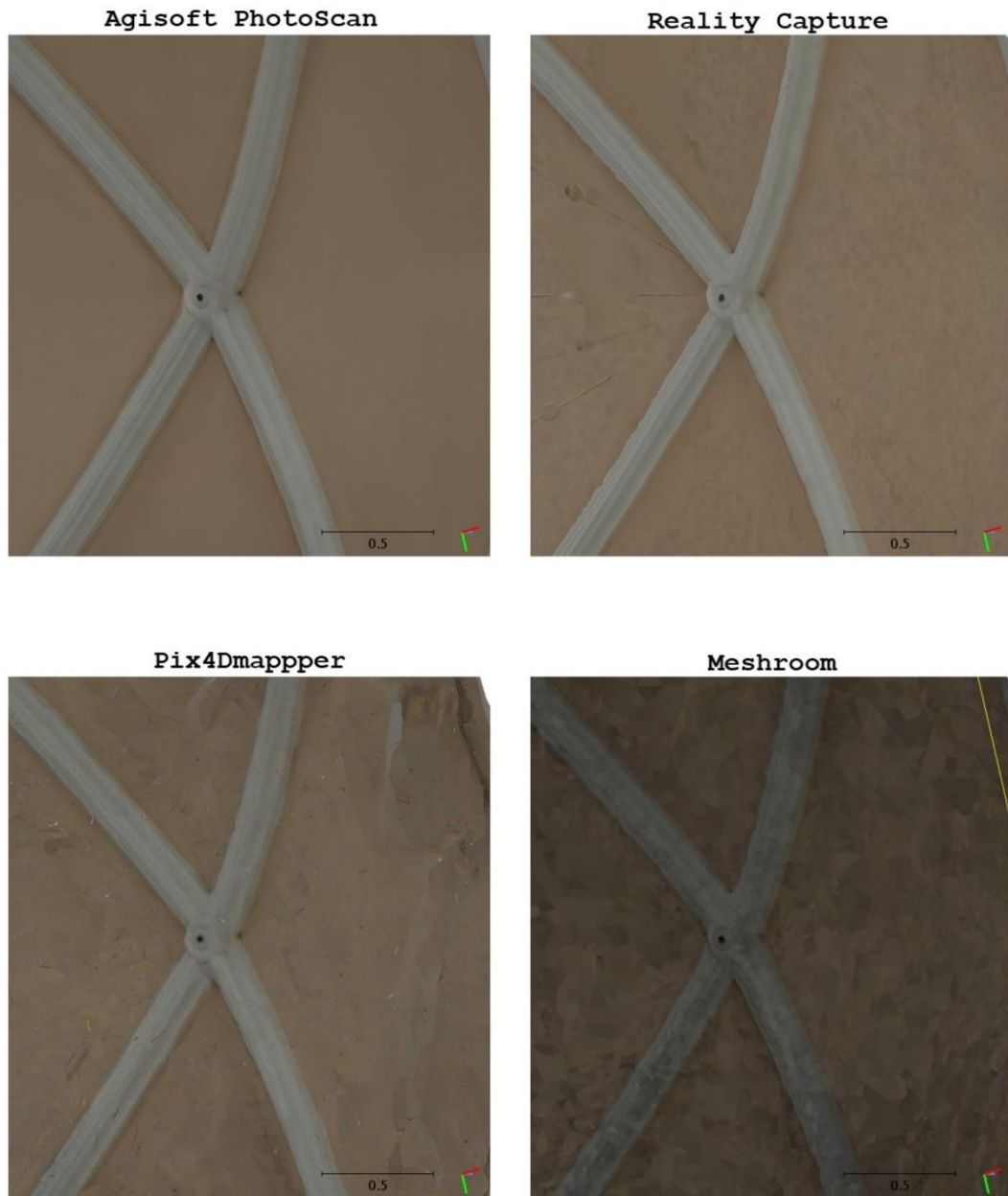
6.3.3 Porovnání kulatého okna (exteriér)



Obr. 53 Porovnání textur kulatého okna

Program Pix4Dmapper na výřezu kulatého okna (obr. 53) dává nejhorší texturu, která je rozmazaná a jsou na ní vidět jednotlivé hrany trojúhelníků z mesh modelu. Ostatní softwary vygenerovaly velice podobné realistické textury. Na výřezu softwaru Meshroom můžeme opět pozorovat výrazně tmavší texturu než na zbylých výstupech.

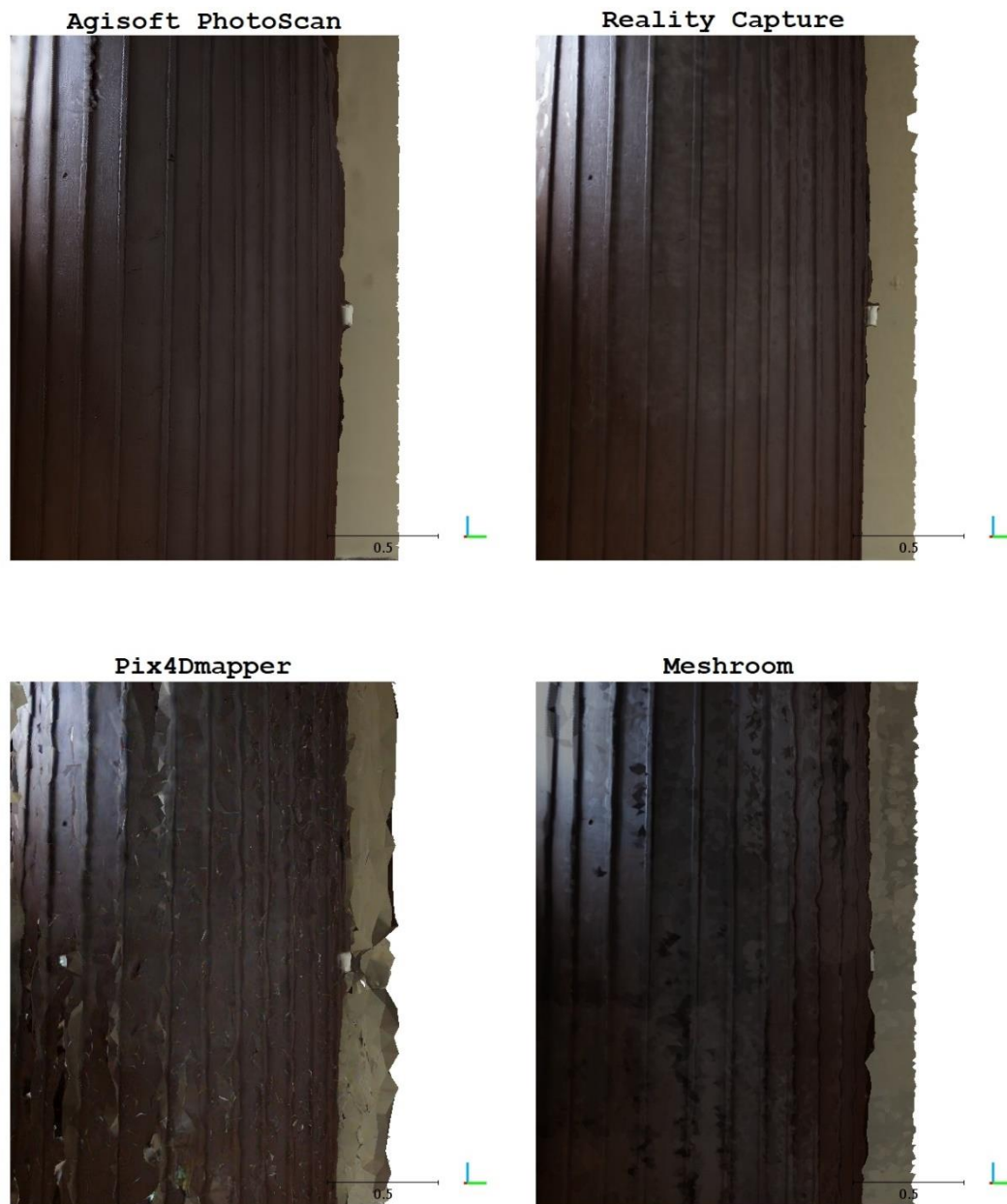
6.3.4 Porovnání křížové klenby (interiér)



Obr. 54 Porovnání textur křížové klenby

Textura křížové klenby (obr. 54) z programu Agisoft PhotoScan je jednoznačně nejhezčí. Je zde zachovaný stejný odstín povrchu a ostrý přechod mezi žebrem klenby a omítkou. Realistická textura z programu Reality Capture má na jednotlivých trojúhelnících mesh modelu jiný odstín. Pix4Dmapper vytvořil ještě poměrně hezkou texturu s menšími vadami a Meshroom vytvořil tmavou texturu s výrazně odlišnými odstíny v ploše omítky.

6.3.5 Porovnání dřevěného obložení (interiér)



Obr. 55 Porovnání textur dřevěného obložení

Na porovnávaném výřezu (obr. 55) si srovnatelně vede Agisoft PhotoScan a Reality Capture, kde v některých místech můžeme pozorovat strukturu dřeva. Ozdobné lišty jsou znázorněny ostrými hranami. Pix4Dmapper dává neestetický výstup, kde jsou vidět obarvené trojúhelníky s jiným odstínem a dále jsou viditelné ostré přechody mezi jednotlivými trojúhelníky mesh modelu. Meshroom generuje poměrně hezkou texturu, kde jsou však viditelné různé odstíny v jednolité ploše.

6.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Ve všech již zmíněných fotogrammetrických softwarech byl vyhotoven model exteriéru a interiéru kaple s realistickými texturami. Srovnatelné a velice hezké modely byly vygenerovány softwary Agisoft PhotoScan a Reality Capture. Model vytvořený programem Reality Capture se matematicky více přibližoval referenčnímu mračnu pořízeného z laserového skenování, program Agisoft PhotoScan však vytvářel detailnější textury, které model přibližují velice realistickému vzhledu. Obecně nejhůře si vedl program Pix4Dmapper, který vytvářel v mračnu výrazný šum, jež se projevoval při vytváření mesh modelu. Volně dostupný program Meshroom až na pár detailů velice dobře vystihl reálný stav kaple. Kvalitnějších výsledků bylo dosaženo v exteriéru kaple, neboť zde bylo provedeno kvalitnější snímání ve více výškových úrovních. V interiéru kaple by pro kvalitnější výstupy muselo být pořízeno více snímků ve více výškových úrovních a muselo by být zajištěno lepší osvětlení. Veliký počet snímků však může vést k nadměrnému objemu dat a časově příliš náročnému zpracování v softwarech, a tudíž je nutné vždy najít určitý kompromis. V plochách se stejně barevnou texturou obecně vznikalo více odchýlených míst ve formě nerovného povrchu. V těchto místech by musely být na stěny nalepeny drobné body, které by sloužily pro spojení snímků, nebo by mohlo být použito promítání vybraných značek či čtvercové sítě projektorem. V tabulce (tab. 15) jsou shrnuty pořizovací ceny softwarů.

Tab. 15 Cenové srovnání softwarů

Cenové srovnání softwarů	
Software	Časově neomezená verze
Agisoft PhotoScan (Metashape)	3 499 \$
Reality Capture	4 000 €
Pix4Dmapper	3 990 €

Společnost Agisoft LLC nabízí ještě standartní verzi za 179 \$, ve které však nelze georeferencovat výsledný model. Verze softwaru od firmy Reality Capture uvedená v tabulce je omezená pro zpracování 2500 snímků, dále však společnost nabízí spoustu dalších možností, ve kterých lze použít i skeny z laserového skenování. Jednou z těchto možností je zakoupit verzi na 3 měsíce za 99 €, která podporuje práci s mračny z laserového skenování a je limitována vložení 2500 snímků, nebo je možné využít neomezenou verzi bez limitů na zpracování počtu snímků a skenů za 15 000 €.

Software Meshroom není v tabulce uveden, neboť se jedná o volně dostupný program, který je bezplatný. V další tabulce (tab. 16) je shrnuta časová náročnost zpracování jednotlivých projektů. Tyto časové hodnoty je důležité posuzovat pouze orientačně, neboť výpočty nebyly prováděny na více různých počítačích, které však disponovaly podobným hardwarovým vybavením.

Tab. 16 Časová náročnost výpočtů

Časová náročnost výpočtů						
Software	Zpracovaná část	Orientace snímku	Rekonstrukce			Kompletní výpočet
			mračen	modelů	textur	
AG - Agisoft PhotoScan	interiér	7 h	33 h	12 min	2 h	42 h
	exteriér	18 h	36 h	12 min	1 h	55 h
RC - Reality Capture	interiér	45 min	4 h			5 h
	exteriér	1 h	4 h			5 h
PIX - Pix4Dmapper	interiér	4 h	37 h		49 min	42 h
	exteriér	4 h	55 h		48 min	60 h
MS - Meshroom	interiér	34 min	16 h	27 min	2 h	19 h
	exteriér	44 min	18 h	27 min	4 h	23 h

Parametry výpočetní techniky:

AG, MS: Intel® Core™ i7-7700k CPU @ 3.60 Ghz, RAM: 64 GB, GPU: NVIDIA Quadro P2000

RC: Intel® Core™ i7-6700k CPU @ 4.00 Ghz, RAM: 64 GB, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB

PIX: Intel® Xeon(R) CPU X5650 @ 2.67GHz, RAM: 48 GB, GPU: NVIDIA Quadro 4000

Na základě porovnání mračen bodů, mesh modelů, realistických textur, časového zpracování, náročnosti úkonů v jednotlivých softwarech a cenového srovnání bych pro fotogrammetrické zpracování doporučil software Reality Capture od stejnojmenné společnosti. Tento software vytvořil velice přesné modely a velice věrohodné realistické textury, které společně tvořily opravdu profesionální výstupy. V program s licenci za 99 €, který je aktivní 3 měsíce, je možno zpracovat 2500 snímků, jež mohou být doplněny i laserovým skenováním. Tato licence může být neomezeně obnovována, a vytváří tak velice levný a silný nástroj na zpracování fotogrammetrického měření. Software Meshroom bych doporučil méně náročným uživatelům, kteří se chtějí zabývat vytvářením 3D modelů, ale chtějí se vydat bezplatnou ale kvalitní cestou pro vytváření prostorových modelů z fotogrammetrického zaměření. V rámci mého zpracování vytvářel nejméně kvalitní výstupy program Pix4Dmapper.

7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vlastní zaměření kaple Navštívení Panny Marie, tvorba mračen bodů ve čtyřech vybraných fotogrammetrických softwarech a jejich porovnání s mračnem pořízeným prostřednictvím laserového skenování. Dále bylo úkolem vytisknout výsledný model pomocí 3D tiskárny.

Kaple Navštívení Panny Marie byla v exteriéru zaměřena UAV fotogrammetrií, kde byl jako nosič použit DJI Phantom 4 PRO. Interiér kaple byl zaměřen pozemní fotogrammetrií snímkováním ze stativu pomocí digitálního fotoaparátu Nikon Coolpix A. Interiér a exteriér kaple byl dále zaměřen laserovými 3D skenery Leica ScanStation P40 a FARO Focus3D X130. Na kapli byly geodeticky zaměřeny vřícovací body, které sloužily pro umístění laserového skenování do souřadnicového systému JTSK a pro zpracování fotogrammetrického zaměření.

Ve vybraných fotogrammetrických programech Agisoft PhotoScan, Reality Capture, Pix4Dmapper a Meshroom byla vytvořena mračna bodů a mesh modely s realistickými texturami, které byly následně v programu CloudCompare porovnány s referenčním mračnem bodů z laserového skenování. Na závěr byl výsledný 3D model vytištěn na vlastní 3D tiskárně Creality Ender 3.

Na základě porovnání mračen bodů, mesh modelů, realistických textur, časového zpracování, náročnosti úkonů v jednotlivých softwarech a cenového srovnání bych jako nejlepší software pro fotogrammetrické zpracování ohodnotil software Reality Capture. Naopak jako nejméně kvalitní software se v této práci ukázal software Pix4Dmapper. Jediný zástupce bezplatných softwarů Meshroom dává překvapivě velmi přijatelné výsledky. Dále by bylo možné tuto práci rozšířit o další porovnání bezplatných softwarů jako je například, COLMAP, 3DF Zephyr Free, MicMac, Regard3D, VisualSFM, OpenMVG a mnoho dalších.

Použité zdroje

- [1] BARTOŠ, Karol, PUKANSKÁ, Katarína, GAJDOŠÍK, Juraj a KRAJŇÁK, Miroslav. The issue of documentation of hardly accessible historical monuments by using of photogrammetry and laser scanner techniques. *Proceedings of CIPA Symposium 23* [online]. CIPA, 2011 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2018/12/Bartoš-e.a.-The-issue-of-documentation-of-hardly-accessible-historical-monuments-by-using-of-photogrammetry-and-laser-scanner-techniques.pdf>
- [2] CLÉRY, Isabelle a PIERROT-DESSEILLIGNY, Marc. An ergonomic interface to compute 3D models using photogrammetry. *Proceedings of CIPA Symposium 23* [online]. CIPA, 2011 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2018/12/Cléry-Pierrot-Desseilligny-An-ergonomic-interface-to-compute-3D-models-using-photogrammetry.pdf>
- [3] REZNICEK, Jan a PAVELKA, Karel. Photogrammetrical documentation of the bronze equestrian statue of Jan Zizka in the form of the accurate 3D model of the bronze plate joints. *Proceedings of CIPA Symposium 23* [online]. CIPA, 2011 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://cipa.icomos.org/wp-content/uploads/2018/12/Rezníček-Pavelka-Photogrammetrical-documentation-of-the-bronze-equestrian-statue-of-Jan-Zizka-in-the-form-of-the-accurate-3D-model-of-the-bronze-pla.pdf>
- [4] ŠARTNER, Jan. *Metody dokumentace a vizualizace drobných objektů a předmětů* [online]. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT v Praze [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77553/F1-BP-2018-Sartner-Jan-Jan_Sartner_BP2018.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [5] CARDA, Jiří. *Možnosti kombinace dat 3D skenerů a IBMR* [online]. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77659/F1-DP-2018-Carda-Jiri-Moznosti%20kombinace%20dat%20ze%203D%20skeneru%20a%20IBMR%20-%20dp.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [6] BUGAJOVÁ, Viera. *Porovnání 3D modelu vyhotoveného fotogrammetricky a 3D skenováním* [online]. Ostrava, 2013. Diplomová práce, VŠB-TU v Ostravě

- [cit. 2019-02-20]. Dostupné z:
http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/97898/PAT0037_HGF_N3646_3646T007_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [7] *G4D: blíže k realitě* [online]. G4D, 2019 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z:
www.g4d.cz
- [8] *Fotogrammetrie* [online]. DigiTry Art Technologies, 2017 [cit. 2019-02-20].
Dostupné z: www.fotogrammetrie.info
- [9] DUMKOVÁ, Jana. Historie obce – podrobně. *Obec Žďár u Mnichova Hradiště* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.obec-zdar.eu/obec/historie/>
- [10] RŮŽKOVÁ, Lucie. Kaple ve Žďáru spojuje vládu i smrt krále Františka Josefa I. *Boleslavský deník.cz* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z:
https://boleslavsky.denik.cz/zpravy_region/kaple-ve-zdaru-spojuje-vladu-i-smrt-krale-frantiska-josefa-i.html
- [11] MĚŘIVSKÝ, Jakub. *Bezpilotní systémy - sběr dat a využití ve fotogrammetrii*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. 169s. ISBN 978-80-244-3923-5
- [12] Doplněk X – bezpilotní systémy. Změna č. 6/ČR, 16. 11. 2017. *Letecká informační služba* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z:
<https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [13] NOVOTNÝ, Michal. *Fotogrammetrické práce pro doplnění 3D modelu hradu Helfenburk u Ústěka*. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. [online]. 2017 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68951/F1-BP-2017-Novotny-Michal-Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6
- [15] Základní pojmy a vztahy ve fotogrammetrii. *SPŠ Zeměměřická* [online]. Praha [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/724/2-1-Mericky-snimek.pdf>

- [16] HODAČ, Jindřich. *Fotogrammetrie-úvod* [online]. Laboratoř fotogrammetrie, ČVUT v Praze [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/6955598/>
- [17] PAVELKA, Karel. Réseau komory. *Zeměměřič* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.zememeric.cz/6+7-00/fotogrammetrie.html>
- [18] ŘÍHA, Jan. Terestrické 3D skenování. *SPŠ Zeměměřická* [online]. Praha [cit.2019-03-15]. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/67/3D-skenovani-2013.pdf>
- [19] ŠTRONER, Martin a kol. *3D skenovací systémy*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2013. 396 s. ISBN 978-80-01-05371-3
- [20] URBAN, Rudolf. *Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebního objektu*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 227 s. ISBN 978-80-01-05786-5
- [21] KOSKA, Bronislav a KŘEMEN, Tomáš. Výběrový přehled: Terestrické skenovací systémy. *Zeměměřič* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~koska/publikace/soubory/zememeric_2008.pdf
- [22] PRŮŠA, Josef a PRŮŠA, Michal. *Základy 3D tisku*. Prusa Research s.r.o. [online]. 2014 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf?fbclid=IwAR2gPpwNc7b5JBDQ8Hx_dewBEsenbMobFamg7v2__6biMUKPT-T2ioQ9gTc
- [23] Typy 3D tiskáren. *Makerslab* [online]. 2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [24] Phantom 4 Pro: Visionary intelligence. Elevated imagination. *DJI* [online]. DJI, 2019 [cit. 2019-05-06] Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/phantom-4-pro>
- [25] Offline Getting Started and Manual (pdf). *Pix4D Support* [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf->

- [26] ŠARKALA, Milan. Nikon Coolpix A: velmi příjemná (ne)výraznost. *Digimanie* [online]. oXy Online, 17. 6. 2013 [cit. 2019-03-27]. ISSN 1214-2190 Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/recenze-nikon-coolpix-a-velmi-prijemna-nevyraznost/5087>
- [27] Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2. *Agisoft* [online]. 2016 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf
- [28] Faro Laser Scanner Focus X130: Nový a výkonný 3D laserový skener série X [online]. 2014 [cit. 2019-04-02] Dostupné z: http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor//5_Produkty/5-10_FARO/6-x130/FARO_Laser_Scanner_Focus3D_X_130.pdf
- [29] ŠVEJDA, Jan. *Testování vlastností 3D skenerů Leica ScanStation P40 a BLK360*. Diplomová práce. ČVUT Vpraze. [online]. 2018 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77941/F1-DP-2018-Svejda-Jan-DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [30] Metashape — photogrammetric processing of digital images and 3D spatial data generation. *Agisoft* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.agisoft.com>
- [31] RealityCapture. *CapturingReality* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.capturingreality.com/Product>
- [32] Measure from images, A unique photogrammetry software suit efor drone mapping. Pix4D [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.pix4d.com>
- [33] Meshroom, Open source photogrammetry software. AliceVision [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://alicevision.github.io/#meshroom>
- [34] Cloud Compare, 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project. Cloud Compare [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.danielgm.net/cc/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Přehledná situace umístění kaple	14
Obr. 2 Kaple Navštívení Panny Marie	15
Obr. 3 Vlevo DJI Phantom 4 Pro+ v pravo eBee Plus	18
Obr. 4 Schéma činností při nasazení UAV systému	19
Obr. 5 Digitální model terénu	25
Obr. 6 Fotoaparát Sony upevněný na karbonovém stativu	27
Obr. 7 Výpočet kubatur násypů	27
Obr. 8 Rozdělení 3D skenovacích systémů	28
Obr. 9 Rozmítání svazku jedním zrcadlem	30
Obr. 10 Rozmítání laserového paprsku odrazným optickým hranolem	30
Obr. 11 Rozmítání laserového svazku pomocí optických vláken	31
Obr. 12 Porovnání barev mračen	31
Obr. 13 kamerový skener ILRIS-36D a panoramatický skener Focus ^s 350	32
Obr. 14 ruční skener F6 SMART	33
Obr. 15 Princip dopadu elektromagnetického záření na obecný povrch	33
Obr. 16 chyba způsobená rozbíhavostí laserového svazku	34
Obr. 17 V pořadí z leva tiskárna delta, polar, kartézská a scara	35
Obr. 18 V pořadí z leva technologie FDM, SLA a SLS	36
Obr. 19 Přehledná situace rozmístění bodů	37
Obr. 20 Vlíčovací body, vlevo přirozeně signalizovaný, vpravo uměle signalizovaný .	38
Obr. 21 vlevo Trimble GeoXR a v pravo Trimble S6 HP	38
Obr. 22 DJI Phantom 4 PRO s dálkovým ovladačem	40
Obr. 23 Doporučený plán snímkování budov	41
Obr. 24 Vlevo zastíněná stěna, vpravo osvětlená stěna	42
Obr. 25 Fotoaparát Nikon Coolpix A	42
Obr. 26 Doporučený plán snímkování interiéru	43
Obr. 27 vlevo FARO Focus3D X130 vpravo Leica ScanStation P40	44
Obr. 28 Uživatelské prostředí Agisoft PhotoScan	45
Obr. 29 Výsledný model exteriéru z programu Agisoft PhotoScan	47
Obr. 30 Výsledný model interiéru z programu Agisoft PhotoScan	48
Obr. 31 Uživatelské prostředí Reality Capture	49

Obr. 32 Výsledný model exteriéru z programu Reality Capture	50
Obr. 33 Výsledný model interiéru z programu Reality Capture	51
Obr. 34 Uživatelské prostředí Pix4Dmapper	52
Obr. 35 Výsledný model exteriéru z programu Pix4Dmapper	53
Obr. 36 Výsledný model interiéru z programu Pix4Dmapper	54
Obr. 37 Uživatelské prostředí Meshroom	55
Obr. 38 Výsledný model exteriéru z programu Meshroom	56
Obr. 39 Výsledný model interiéru z programu Meshroom	57
Obr. 40 Vytisknuté modely ze 3D tiskárny	59
Obr. 41 Porovnání mračen bodů ozdobné stříšky	61
Obr. 42 Porovnání mračen bodů přechodu mezi podezdívkou a fasádou	63
Obr. 43 Porovnání mračen bodů kulatého okna	65
Obr. 44 Porovnání mračen bodů křížové klenby	67
Obr. 45 Porovnání mrače bodů dřevěného obložení	69
Obr. 46 Porovnání mesh modelů ozdobné stříšky	71
Obr. 47 Porovnání mesh modelů přechodu mezi podezdívkou a fasádou	73
Obr. 48 Porovnání mesh modelů kulatého okna	75
Obr. 49 Porovnání mesh modelů křížové klenby	77
Obr. 50 Porovnání mesh modelů dřevěného obložení	79
Obr. 51 Porovnání realistických textur ozdobné stříšky	81
Obr. 52 Porovnání realistických textur přechodu podezdívky a fasády	82
Obr. 53 Porovnání textur kulatého okna	83
Obr. 54 Porovnání textur křížové klenby	84
Obr. 55 Porovnání textur dřevěného obložení	85

Seznam tabulek

Tab. 1 Použitý přístroj Trimble GeoXR	39
Tab. 2 Použitý přístroj Trimble S6 HP	39
Tab. 3 Použitý přístroj FARO Focus3D X130	44
Tab. 4 Použitý přístroj Leica ScanStation P40	44
Tab. 5 Porovnání mračen bodů ozdobné stříšky.....	62
Tab. 6 Porovnání mračen bodů přechodu mezi podezdívkou a fasádou	64
Tab. 7 Porovnání mračen bodů kulatého okna	66
Tab. 8 Porovnání mračen bodů křížové klenby	68
Tab. 9 Porovnání mračen bodů dřevěného obložení.....	70
Tab. 10 Porovnání mesh modelů ozdobné stříšky	72
Tab. 11 Porovnání mesh modelů přechodu mezi podezdívkou a fasádou.....	74
Tab. 12 Porovnání mesh modelů kulatého okna.....	76
Tab. 13 Porovnání mesh modelů křížové klenby	78
Tab. 14 Porovnání mesh modelů dřevěného obložení.....	80
Tab. 15 Cenové srovnání softwarů	86
Tab. 16 Časová náročnost výpočtů	87

Seznam příloh

Příloha A – Protokol z GNSS měření

Příloha B – Výkres přehledné situace bodů se souřadnicemi

Příloha C – Zápisníky měření

Příloha D – Seznam souřadnic vlíčovacích bodů v interiéru

Příloha E – Shrnutí vlíčovacích bodů

Příloha F – Grafické výstupy

Příloha G – Struktura přiloženého disku

PROTOKOL GNSS (RTK) MERENI

Datum: 21.02.2019

Přístroj: Trimble GeoXR, fw: 4.55, vyr. c.: 5135407185

Trimble General Survey SW: 2.11

Verze protokolu: 4.95

Souradnicovy system: Použit transformacni modul zpresnene globalni transformace Trimble 2018 verze 1.0 schvaleny CUZK pro mereni od 1.1.2018

Zona: Krovak_2018

Soubor rovinne dotransformace: KG2018

Model kvazigeoidu: CR2005

POUZITE A MERENE BODY

Cislo bodu Y X Z Presnost PDOP Sit* Pocet Antena Datum Zacatek Doba Kod bodu XY Z sat. vyska;
od** mereni[s]

RTCM0018	703730.963	1011742.207	259.532					3	RTK	CMBO		21.02	08:59	NaN	
5001	689405.672	998987.143	241.899	0.009	0.015	1.60	3	RTK	CMBO	13	2.00	SZ	21.02	09:04	190
5002	689386.230	998985.573	242.125	0.009	0.014	1.37	3	RTK	CMBO	14	2.00	SZ	21.02	09:10	182
5003	689366.170	998977.987	242.954	0.012	0.017	2.10	3	RTK	CMBO	10	2.00	SZ	21.02	09:14	187
5004	689369.954	998996.303	242.259	0.014	0.016	2.00	3	RTK	CMBO	9	2.00	SZ	21.02	09:18	182
5005	689337.735	999009.744	242.370	0.012	0.014	1.50	3	RTK	CMBO	12	2.00	SZ	21.02	09:22	190
4001	689356.458	998991.709	242.507	0.013	0.015	1.65	3	RTK	CMBO	11	2.00	SZ	21.02	09:27	186
51	689405.664	998987.136	241.912	0.012	0.015	2.06	3	RTK	CMBO	10	2.00	SZ	21.02	12:29	182
52#	689386.226	998985.579	242.137	0.009	0.012	1.54	3	RTK	CMBO	13	2.00	SZ	21.02	12:32	182
53	689366.196	998977.963	242.984	0.011	0.014	1.60	3	RTK	CMBO	12	2.00	SZ	21.02	12:36	182
54	689369.956	998996.291	242.281	0.011	0.015	1.70	3	RTK	CMBO	11	2.00	SZ	21.02	12:43	364
55	689337.729	999009.731	242.382	0.009	0.011	1.59	3	RTK	CMBO	13	2.00	SZ	21.02	12:47	188
41	689356.451	998991.717	242.545	0.009	0.012	1.77	3	RTK	CMBO	11	2.00	SZ	21.02	12:51	182

* Bod meren na: 1 VRS = Trimble VRS NOW CZ

2 = TOPNET

3 RTK = CZEPOS RTK a RTK3;

3 RTK3-MSM = CZEPOS RTK3-MSM;

3 PRS = CZEPOS RTK-PRS;

3 FKP = CZEPOS RTK-FKP;

3 MAX = CZEPOS VRS3-MAX;

3 iMAX = CZEPOS VRS3-iMAX;

3 MAXG = CZEPOS VRS3-MAX-GG;

3 iMAXG = CZEPOS VRS3-iMAX-GG;

3 CMR = CZEPOS VRS3-iMAX-GG_CMV;

3 CMV+ = CZEPOS VRS3-iMAX-GG_CMV+;

4 = GEOORBIT

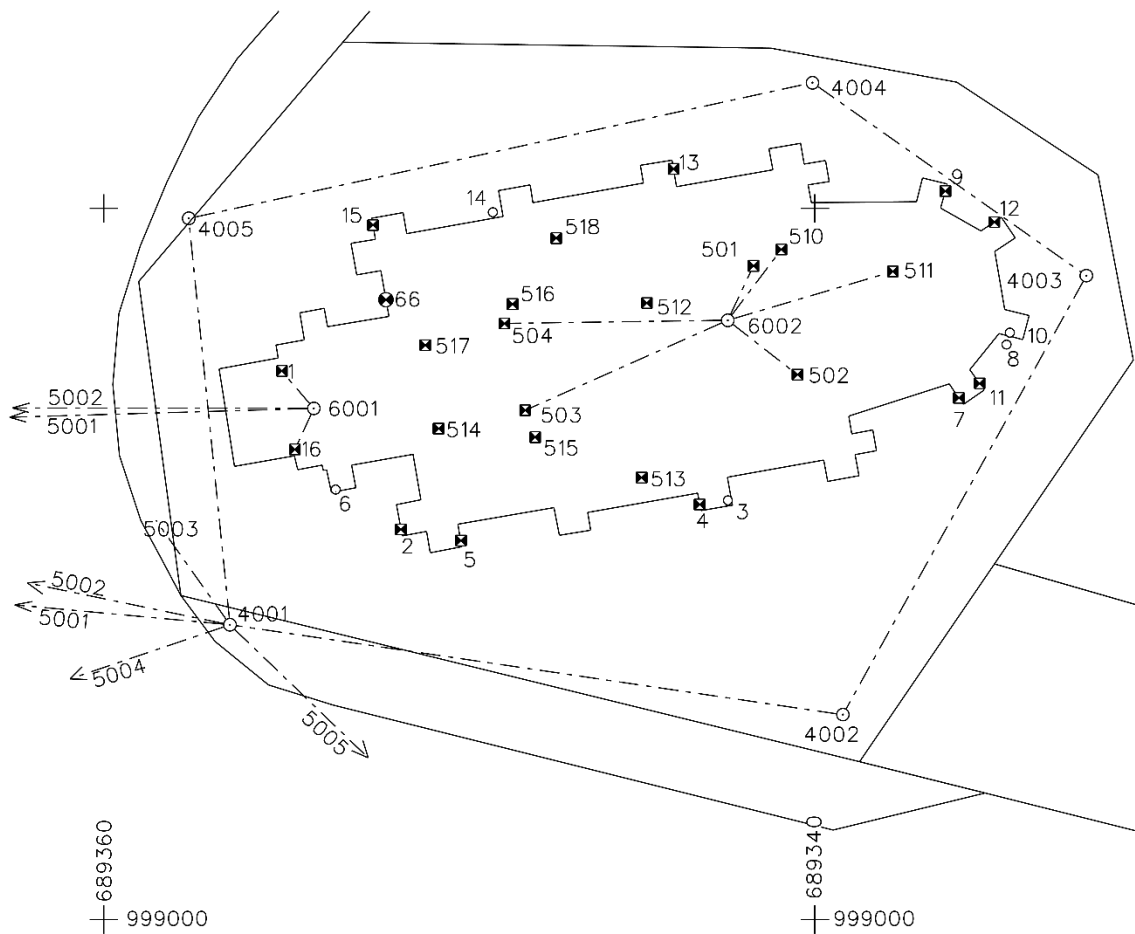
5 = ostatni

** Vyska anteny merena od: FC = fazoveho centra; SZ = spodku zavitu; SN = stredu narazniku

Hodnoty PDOP oznacene * jsou mimo nastavenou toleranci: 7.00

Hodnoty s RMS oznacene # jsou mimo nastavenou toleranci: 40.00

Body oznacene ! NoFix ! pred cislem bodu nebyly pri mereni Fixovany!



Typ stabilizace

- Hlavní bod sítě
- Bod stabilizovaný štítkem
- Přirozeně signalizovaný bod
- Nivelační značka

VYPRACOVAL: BC. MICHAL NOVOTNÝ			
MÍSTO:	ŽDÁR U MNICHOVA HRADIŠTĚ	SOUŘ. SYSTÉM:	S-JTSK
AKCE:	KAPLE NAVŠTÍVENÍ PANNY MARIE	VÝŠK. SYSTÉM:	Bpv
		FORMÁT:	A4
VÝKRES:	PŘEHLEDNÁ SITUACE	DATUM:	10.4.2019
		MĚŘÍTKO:	ČÍSLO:
		1:200	1

Podklad: Hranice katastru nemovitostí

Seznam souřadnic zaměřených bodů

Bod	Y [m]	X [m]	Z [m]
4001	689356.455	998991.713	242.526
4002	689339.212	998994.241	242.556
4003	689332.361	998981.892	243.174
4004	689340.067	998976.463	243.193
4005	689357.612	998980.280	243.116
5001	689405.668	998987.140	241.906
5002	689386.228	998985.576	242.131
5003	689366.183	998977.975	242.969
5004	689369.955	998996.297	242.270
5005	689337.732	999009.738	242.376
6001	689353.633	998985.717	245.326
6002	689343.365	998984.035	245.251
1	689354.994	998984.571	244.556
2	689351.731	998989.162	244.562
3	689342.446	998988.216	252.708
4	689343.334	998988.534	244.580
5	689350.175	998989.529	244.569
6	689353.402	998987.840	256.048
7	689336.020	998985.741	244.551
8	689334.610	998983.830	251.077
9	689336.560	998979.642	244.555
10	689334.517	998983.495	252.712
11	689335.500	998985.427	244.547
12	689335.055	998980.627	244.558
13	689344.193	998979.133	244.557
14	689349.060	998980.109	252.721
15	689352.438	998980.656	244.539
16	689354.626	998986.776	244.564
66	689352.183	998982.748	243.668
501	689341.729	998981.616	245.916
502	689340.486	998984.680	244.748
503	689348.148	998985.677	244.732
504	689348.733	998983.239	244.746
510	689340.944	998981.155	246.270
511	689337.806	998981.772	245.648
512	689344.726	998982.660	244.438
513	689344.875	998987.576	245.056
514	689350.584	998986.192	245.811
515	689347.871	998986.434	248.889
516	689348.507	998982.690	248.888
517	689350.959	998983.847	245.279
518	689347.274	998980.837	245.139

SEZNAM MĚŘENÍ						
Popis: měření polygonu, zpracovaná data						
Číslo bodu	Hz	Z	Vod. délka	Převýšení:	Signál:	Popis
4001					1,542	
5001	233,3714	100,8106	49,423	-0,629	1,532	
5002	240,3989	100,7733	30,397	-0,369	1,532	
5003	288,2659	98,3838	16,880	0,429	1,532	
5004	206,6485	101,1447	14,254	-0,256	1,532	
5005	76,2454	100,3844	25,981	-0,157	1,532	
4002	36,7367	99,9380	17,427	0,017	1,532	
4005	321,0469	96,7895	11,490	0,580	1,532	
1	340,3167	95,7458	7,290	0,488	0,000	
2	395,9454	94,1641	5,369	0,494	0,000	
3	11,8939	65,6735	14,439	8,640	0,000	
4	12,3341	97,5862	13,501	0,512	0,000	
4002					1,548	
4001	392,9543	100,1459	17,426	-0,040	1,532	
4003	115,9304	97,2885	14,128	0,602	1,532	
5	9,5302	97,5230	11,933	0,465	0,000	
6	10,6629	58,3366	15,567	11,944	0,000	
7	106,5557	96,8680	9,080	0,447	0,000	
8	110,1834	65,0094	11,383	6,973	0,000	
4003					1,528	
4002	299,3870	102,7634	14,124	-0,614	1,532	
4004	6,2207	99,8357	9,427	0,024	1,532	
9	398,4650	101,9628	4,764	-0,147	0,000	
10	326,4380	20,6016	2,687	8,010	0,000	
11	313,3723	102,0836	4,728	-0,155	0,000	
4004					1,540	
4003	175,0591	100,1796	9,426	-0,027	1,532	
4005	322,3506	100,2898	17,954	-0,082	1,532	
12	180,1230	101,7136	6,516	-0,175	0,000	
13	299,4258	102,2752	4,915	-0,176	0,000	
14	311,4662	56,1550	9,704	7,988	0,000	
4005					1,668	
4004	321,8319	100,2197	17,958	-0,062	1,532	
4001	29,0480	104,0046	11,491	-0,724	1,532	
15	340,0886	102,9983	5,188	-0,245	0,000	
66	362,6275	95,5639	5,963	0,416	1,532	
16	8,0416	101,9623	7,149	-0,220	0,000	

SEZNAM MĚŘENÍ						
Popis: Volná stanoviška, měření interiéru, zpracovaná data						
Číslo bodu	Hz	Z	Vod. délka	Převýšení:	Signál:	Popis
6001					0,000	
5001	101,4887	104,0398	52,051	-3,307	0,115	
5002	103,4903	105,9309	32,593	-3,045	0,115	
5003	138,5206	109,6034	14,789	-2,248	0,115	
1	147,8031	126,0083	1,780	-0,771	0,000	
16	51,2093	130,7617	1,451	-0,761	0,000	
501	282,1148	97,0164	12,590	0,590	0,000	
502	298,2216	102,7859	13,188	-0,577	0,000	
503	302,7658	106,8635	5,485	-0,594	0,000	
504	273,4253	106,6902	5,491	-0,579	0,000	
510	281,2623	95,5459	13,484	0,945	0,000	
511	287,6824	98,7397	16,311	0,323	0,000	
512	282,1870	105,9832	9,417	-0,888	0,000	
6002					0,000	
501	118,0258	85,7494	2,921	0,665	0,000	
510	124,6720	83,1589	3,764	1,020	0,000	
511	155,5635	95,7940	6,001	0,397	0,000	
502	194,2094	110,7554	2,949	-0,503	0,000	
513	305,8366	103,2192	3,850	-0,195	0,000	
503	359,1281	106,5163	5,058	-0,520	0,000	
514	361,6999	95,2803	7,535	0,560	0,000	
515	349,0387	60,5799	5,104	3,638	0,000	
516	396,4682	61,7950	5,315	3,637	0,000	
517	381,7537	99,7697	7,596	0,027	0,000	
518	23,8329	101,4120	5,051	-0,112	0,000	
504	389,5513	105,9091	5,425	-0,505	0,000	

Seznam souřadnic vřícovacích bodů v interiéru

K0	998982.440811	689335.617355	251.462814
K1	998982.851868	689338.026234	251.840042
K2	998983.542221	689342.136440	252.626981
K3	998984.102729	689345.787698	252.855484
K4	998984.764854	689349.322750	252.638535
O1	998984.216042	689337.367466	244.829254
O2	998981.389870	689337.893383	244.809067
okno1	998984.376572	689336.256657	246.814728
okno2	998980.831291	689336.959290	246.839874
R1	998985.218353	689340.303364	244.328323
R2	998981.344566	689340.982315	244.336243
R4	998980.729889	689344.743977	244.319672
R5	998987.559349	689346.729683	244.335297
R7	998985.894104	689350.583908	244.317657
R8	998984.121178	689350.870033	244.310440
V01	998985.055138	689338.942814	248.464859
V02	998981.097321	689339.661167	248.504929
V1	998987.028831	689343.118809	248.643860
V2	998980.580383	689344.239536	248.662308
V3	998987.722260	689347.312328	248.652802
V4	998981.294998	689348.375237	248.650360
V10	998984.091980	689348.266510	247.853119



Shrnutí vřícovacích bodů exteriéru

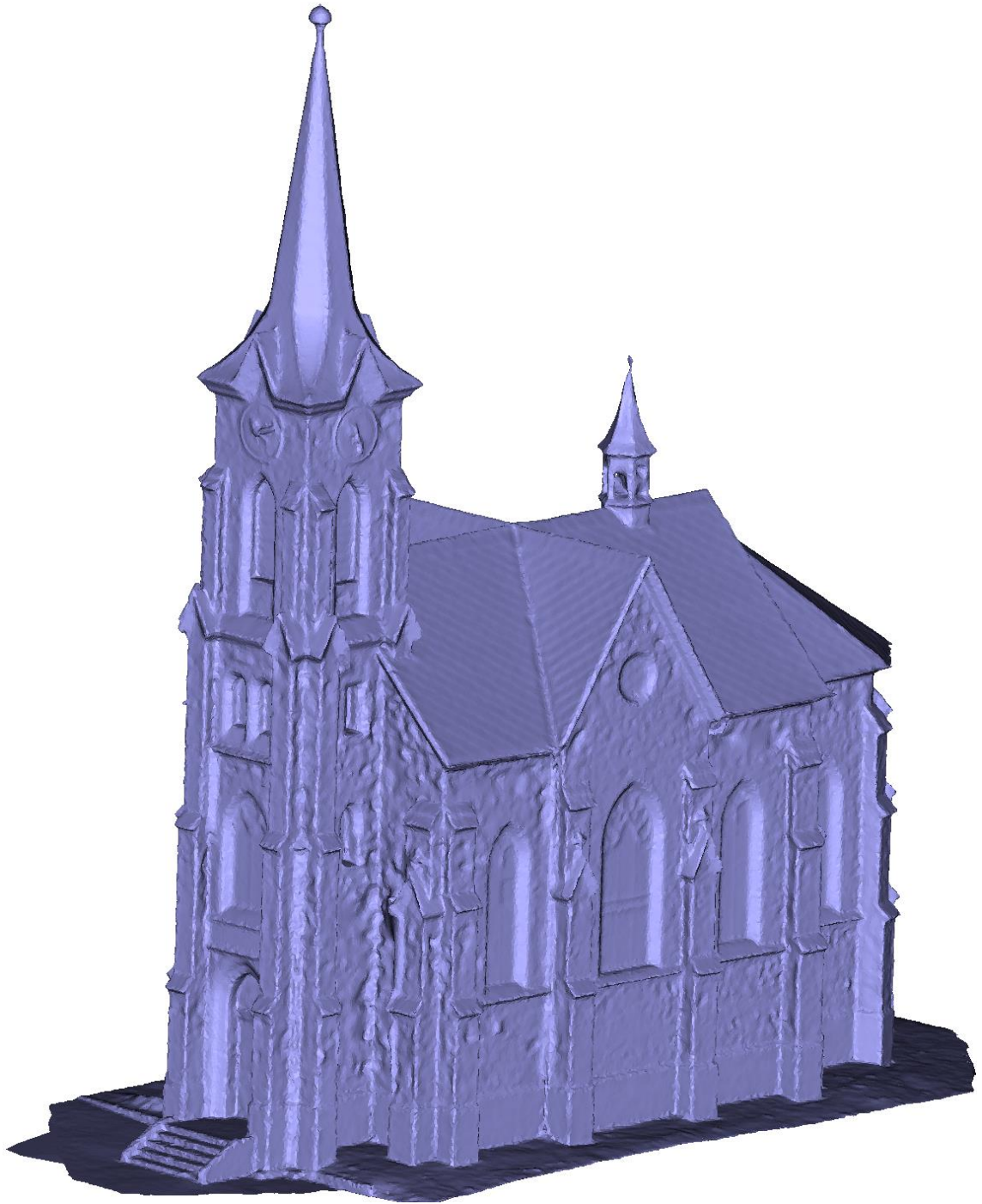
bod	Agisoft PhotoScan					Reality Capture					Pix4Dmapper						
	x	y	z	xyz	error [mm]	error [pix]	x	y	z	xyz	error [mm]	error [pix]	x	y	z	xyz	error [pix]
1	1	-1	1	1,73	0,11	0,11	0	0	0	0,00	0,56	0,56	-2	2	-2	3,46	0,22
2	-1	-1	0	1,41	0,17	0,17	0	0	0	0,00	0,52	0,52	2	2	0	2,83	0,30
3	2	-2	4	4,90	0,19	0,19	1	0	1	1,41	1,10	1,10	-5	5	-5	8,66	0,49
4	2	-2	0	2,83	0,16	0,16	0	1	0	1,00	0,58	0,58	-1	2	1	2,45	0,24
5	-3	0	-2	3,61	0,16	0,16	-1	1	-1	1,73	0,76	0,76	3	-1	4	5,10	0,32
6	-2	0	-2	2,83	0,10	0,10	0	0	0	0,00	1,41	1,41	1	1	0	1,41	0,34
7	-1	4	-1	4,24	0,15	0,15	-1	-1	0	1,41	0,65	0,65	3	-5	2	6,16	0,30
8	-1	5	2	5,48	0,11	0,11	0	1	1	1,41	1,25	1,25	2	-5	-2	5,74	0,35
9	1	0	1	1,41	0,17	0,17	-1	0	-2	2,24	0,59	0,59	-1	1	1	1,73	0,27
11	-4	-1	-3	5,10	0,09	0,09	0	1	-1	1,41	0,54	0,54	3	-1	3	4,36	0,27
12	1	-4	0	4,12	0,23	0,23	0	-2	-1	2,24	0,62	0,62	0	5	2	5,39	0,30
13	1	1	0	1,41	0,19	0,19	0	0	0	0,00	0,85	0,85	-4	0	-1	4,12	0,29
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-4	2	9,17	0,32
15	2	0	2	2,83	0,16	0,16	0	0	0	0,00	0,64	0,64	-6	1	-3	6,78	0,31
16	1	2	0	2,24	0,15	0,15	0	0	0	0,00	0,66	0,66	-1	4	0	4,12	0,28
\sqrt{RMS}	1,87	2,28	1,77	3,44	0,16	0,16	0,53	0,80	0,80	1,25	0,81	0,81	3,50	3,15	2,34	5,26	0,31



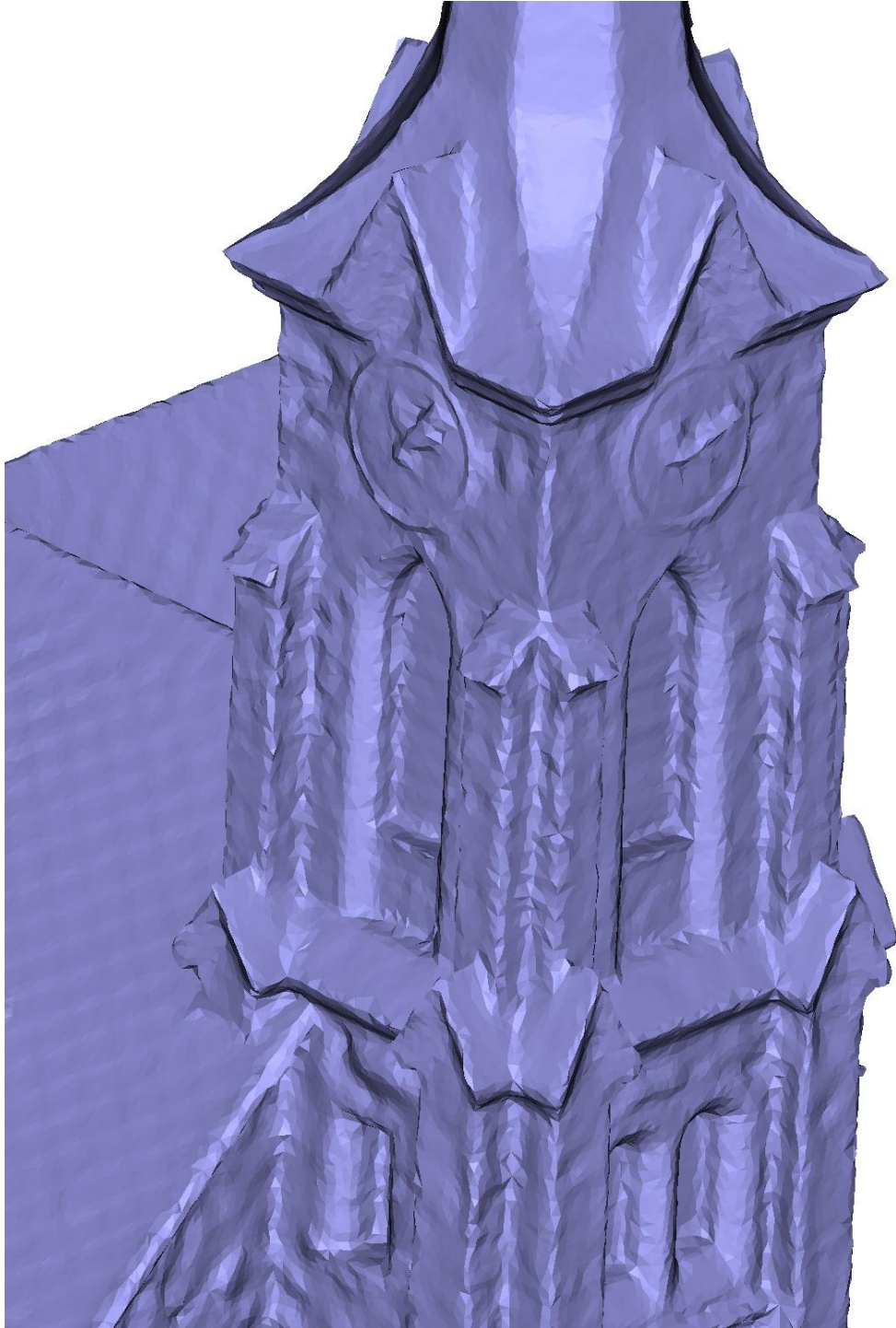
Shrnutí vřícovacích bodů

bod	Agisoft PhotoScan						Reality Capture						Pix4Dmapper					
	x	y	z	xyz	error [mm]	pix	x	y	z	xyz	error [mm]	pix	x	y	z	xyz	error [mm]	pix
K0	-	-	-	-	-	-	0	-1	3	3,16	1,24	11	3	2	11,58	0,464		
K1	-	-	-	-	-	-	0	1	-3	3,16	1,75	5	-1	15	15,84	0,519		
K2	-5	-2	-13	14,07	0,52	0	0	-1	1,00	0,75	-1	-1	2	-1	2,45	0,55		
K3	4	1	12	12,69	0,48	-1	0	0	1,00	0,36	1	2	1	2,45	0,46			
K4	-	-	-	-	-	1	1	-2	2,45	0,58	-10	-4	-10	-4	14,70	0,69		
O1	6	2	8	10,20	0,56	1	0	2	2,24	0,80	-6	0	-4	7,21	0,53			
O2	-	-	-	-	-	1	3	-1	3,32	2,36	-4	-6	-1	7,28	0,53			
okno1	-	-	-	-	-	-2	0	-1	2,24	1,28	0	0	-1	1,00	0,58			
okno2	-	-	-	-	-	-2	-2	-3	4,12	2,45	-1	-1	0	1,41	0,37			
R1	5	-2	-2	5,74	0,96	0	0	0	0,00	1,81	-2	2	0	2,83	0,98			
R2	9	5	2	10,49	0,86	1	-1	1	1,73	1,60	-5	-1	-4	6,48	0,54			
R4	-2	8	-2	8,49	0,57	0	0	0	0,00	2,15	0	-4	0	4,00	1,77			
R5	-8	-10	-3	13,15	0,57	-1	1	-1	1,73	0,87	3	4	1	5,10	1,14			
R7	-	-	-	-	-	0	0	0	0,00	1,77	9	-1	1	9,11	1,18			
R8	-17	-2	7	18,49	0,42	0	0	0	0,00	1,04	11	1	0	11,05	1,07			
V01	0	3	6	6,71	0,61	2	0	2	2,83	1,24	-6	-1	-7	9,27	0,52			
V02	-6	-6	2	8,72	0,47	0	-1	0	1,00	1,23	-1	2	-2	3,00	0,40			
V1	-1	4	-1	4,24	0,46	0	0	0	0,00	0,92	0	-1	0	1,00	0,50			
V2	3	-5	0	5,83	0,38	0	-1	-1	1,41	0,82	-1	2	-2	3,00	0,49			
V3	3	6	6	9,00	0,47	1	2	-1	2,45	0,75	-1	-2	-4	4,58	0,47			
V4	3	0	1	3,16	0,58	0	0	-1	1,00	2,16	2	-2	0	2,83	0,75			
V10	6	0	1	6,08	0,49	0	0	0	0,00	2,05	-1	2	-2	3,00	0,88			
√RMS	6,53	4,68	5,92	9,98	0,58	0,93	1,00	1,15	1,78	1,42	5,16	2,45	4,49	7,26	0,77			

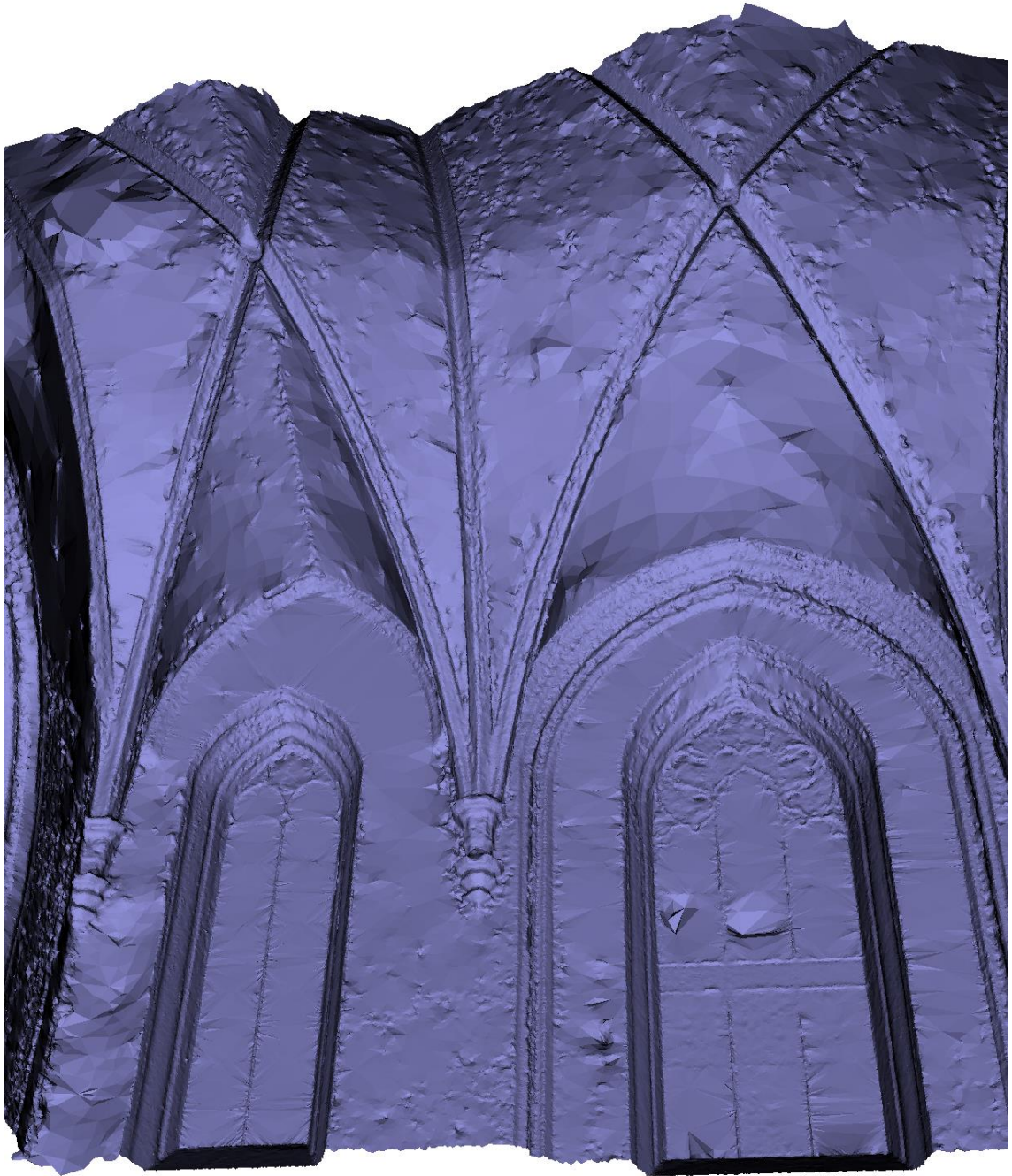
Grafické výstupy













Struktura přiloženého disku

Výsledné modely s realistickými texturami a mračna bodů jsou nahrány ve složce CloudCompare a jsou uloženy v binárních souborech tohoto programu. Zpracované výsledky z části exteriéru jsou uloženy v souboru Komplet_EX.bin a výsledné modely a mračna z interiéru jsou uloženy v souboru Komplet_IN.bin.

