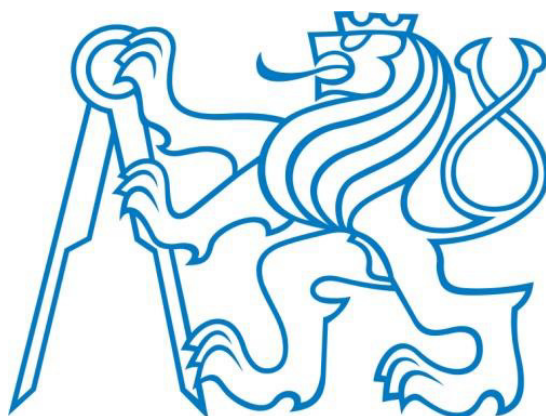


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE

STUDIJNÍ OBOR GEOINFORMATIKA



Diplomová práce

**MOŽNOSTI KOMBINACE DAT 3D SKENERŮ A  
IBMR**

Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Katedra geomatiky

2018

Bc. Jiří Carda



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Carda	Jméno: Jiří	Osobní číslo: 410888
Zadávací katedra: katedra geomatiky		
Studijní program: geodézie a kartografie		
Studijní obor: geomatika		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Možnosti kombinace dat ze 3D skenerů a IBMR	
Název diplomové práce anglicky: Data combining possibility from 3D scanner and IBMR technology	
Pokyny pro vypracování: Vypracujte rešerši ohledně dokumentace objektů a předmětů pomocí 3D skenerů a IBMR (image based modeling and rendering). Pomocí vhodného software zkombinujte data z obou technologií a proveďte testování možností (z hlediska kvality výsledků, kvality snímků a skeneru, nastavení parametrů software, doby zpracování). Zhodnoťte užité postupy a proveďte analýzu výsledků, definujte doporučení pro klasické objekty (sochy, stavební objekty aj.).	
Seznam doporučené literatury: Štroner, M.; Pospíšil, J.; Koska, B.; Křemen, T.; Urban, R.; Smítka, V.; Třasák, P. 3D skenovací systémy. ČVUT v Praze, 2013. vol. 1. ISBN 978-80-01-05371-3.	
Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka	
Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018
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“.*

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## ABSTRAKT

Tématem této diplomové práce bylo využitím technologií IBMR (image-based modeling and rendering), pozemního laserového skenování a jejich kombinace pro vytváření 3D modelů v oblasti dokumentace historických objektů. Práce je rozdělena do tří tematických částí. První část se zabývá historií, vývojem a příklady zpracování uvedených metod. V druhé části práce jsou realizovány testy za účelem zjištění maximálního možného propojení pořízených dat pro technologii IBMR. V poslední části jsou zpracovány a porovnány modely jednotlivými metodami. Výsledkem práce jsou hranice maximálního propojení snímků pro metodu IBMR a dále pak tři zpracované modely spolu s hodnocením přesnosti modelů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

IBMR, laserové skenování, 3D model, Reality Capture, RPAS

## ABSTRACT

The topic of this thesis is about IBMR (image-based modeling and rendering), terrestrial laser scanning and their combination for creation 3D models of historical objects. The thesis is further divided into three parts. The first part explains the history, evolution, and examples of utilization of methods. Experiments to determine the maximal interconnection of the data acquired for IBMR method are described in the second part. The final part contains original models and their comparison using each method presented. Results of this thesis are limits of maximal interconnection of images for the IBMR method, and three original models together with the evaluation of their accuracy.

## KEY WORDS

IBMR, laser scanning, 3D model, Reality Capture, RPAS

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Možnosti kombinace dat 3D skenerů a IBMR “ vypracoval samostatně. Veškeré podklady, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne.....

.....  
Bc. Jiří Carda

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto způsobem bych rád poděkoval Prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za jeho čas při konzultacích a za rady při řešení daného úkolu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Šedinovi a Ing. Karlu Pavelkovi za pomoc se zpracováním. Velkou měrou bych chtěl poděkovat i mé přítelkyni a rodině.

## Seznam použitých zkratek

DMR	Digitální model reliéfu
DMP	Digitální model povrchu
IBMR	Image Based Modeling and Rendering
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Navigation Unit
LIDAR	Light Detection And Ranging
SIFT	Scale Invariant Feature Transformation

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Technologie 3D laserového skenování a IBMR</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>3D laserové skenování</b> .....	<b>2</b>
2.1.1	Historie .....	3
2.1.2	Metody snímání.....	4
2.1.3	Typy skenerů .....	5
2.1.4	Příkladové studie - dokumentace historické klenby Břevnovského kláštera [8].....	6
<b>2.2</b>	<b>IMBR</b> .....	<b>8</b>
2.2.1	Příkladová studie - Madona mistra z Fabriana [10] .....	9
<b>2.3</b>	<b>Kombinace metod laserového skenování a IBMR</b> .....	<b>11</b>
2.3.1	Příkladová studie - projekt kombinace metod laserového skenování a IBMR [11] .....	12
<b>3</b>	<b>Vlastní práce - použité přístroje a vybavení</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Laserový skenery</b> .....	<b>15</b>
3.1.1	Surphaser 25HSX .....	15
<b>3.2</b>	<b>Neměřické kamery</b> .....	<b>16</b>
3.2.1	Neměřická kamera Canon EOS 5D Mark II .....	16
3.2.2	Neměřická kamera Canon EOS 450D.....	17
<b>3.3</b>	<b>RPAS</b> .....	<b>17</b>
3.3.1	DJI Mavic Pro Platinum .....	18
<b>4</b>	<b>Použitý software</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Agisoft PhotoScan</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>3D software GeoMagic Studio</b> .....	<b>20</b>
<b>4.3</b>	<b>CloudCompare</b> .....	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>RealityCapture</b> .....	<b>21</b>

<b>5</b>	<b>Test rozlišení .....</b>	<b>22</b>
5.1	Sběr a popis dat.....	22
5.2	Testování hranice spojení snímků.....	25
<b>6</b>	<b>Test horizontálního překryvu snímků .....</b>	<b>29</b>
6.1	Sběr a popis dat.....	29
6.2	Testování hranice spojení snímků.....	31
<b>7</b>	<b>Test vertikálního překryvu snímků.....</b>	<b>36</b>
7.1	Sběr a popis dat.....	36
7.2	Testování hranice spojení snímků.....	38
<b>8</b>	<b>Porovnání 3D modelů .....</b>	<b>40</b>
8.1	Sběr a popis dat.....	41
8.1.1	Data pro model IBMR.....	41
8.1.1	Data pro model z laserového skenování.....	41
8.2	Zpracování modelu IBMR.....	42
8.2	Zpracování modelu z laserového skenování .....	45
8.3	Zpracování modelu v RealityCapture .....	48
6.1.3	RealityCapture a kombinace laserového skenování a IBMR.....	48
8.4	Porovnání mračen v CloudCompare .....	52
8.4	Porovnání metod zpracování.....	55
<b>9</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>57</b>
<b>10</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>58</b>
	<b>Použité zdroje.....</b>	<b>59</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam Příloh .....</b>	<b>64</b>





# 1 Úvod

Oblast vytváření 3D modelů je v poslední době velmi zajímavý a rozvíjející se obor. Postupem času se na poli vytváření reálných 3D modelů za pomoci čím dál tím výkonnější počítačové techniky a přístrojů, umožňující kvalitnější a přesnější sběr dat, objevují nové technologie zpracování. Díky tomuto posunu se oblast modelování začala aktivně využívat pro mnoho dříve neobjevených aplikací. Jedním velice pozoruhodným příkladem může dokonce být i filmový průmysl, který využívá modelování pro zobrazení reálných objektů v digitálním zpracování svých filmových efektů. Nové aplikace využívající těchto modelů se stále objevují, a to hlavně díky snadnému pořízení dat či automatickému zpracování, pro které není potřeba zásadních znalostí z oboru. Další vývoj v oblasti pořízení dat také přináší zásadní změnu pro vytváření větších modelů, a to především díky dnes již značně dostupnějším RPAS (dronům) nesoucích kameru. Na rozdíl od pozemních metod představuje relativně rychlý, kvalitní a bezkontaktní způsob získání nových informací pro nepoměrně větší oblasti zájmu při řádově levnějším pořízení dat z leteckého laserového skenování. Tyto systémy dnes nazýváme RPAS. Termín RPAS je zkratkou anglických slov *Remotely piloted aircraft system*, což v překladu označuje dálkově řízený letecký systém (vlastní letecký prostředek a pozemní segment k jeho ovládnutí). Tyto systémy jsou vhodnou alternativou pro vytváření DMP menší oblasti.

Cílem této diplomové práce je v první části zjištění hranice pro úspěšné spojení pořízených testovacích snímků v programu Agisoft. Pro účel nalezení hranice, kdy ještě dojde ke spojení dat, byly navrženy tři testy. Jedná se o test odlišných snímkovacích vzdáleností. Dalším testem bylo nalezení odpovídající hranice pro horizontální překryv snímků, a jako poslední pro vertikální překryv snímků. V druhé části se poté zabýváme vytvářením modelu z dat pořízených fotoaparátem a RPAS, dále pak modelu z laserového skenování a v neposlední řadě kombinací obou metod, která je v oblasti modelování jednou z nejmodernějších. Cílem je poté porovnání vytvořených modelů a zhodnocení, která z metod je pro vytváření obdobných modelů nejvhodnější. Ve významu posouzení ceny a doby strávené pořízením dat či doby zpracování ve vhodném softwaru.



## 2 Technologie 3D laserového skenování a IBMR

Technologie 3D laserového skenování a IBMR můžeme obecně popsat jako metody, které nám umožňují v poměrně krátké době za použití laserové skeneru nebo fotoaparátu, případně obou přístrojů najednou, a poté odpovídajícího softwaru vytvářet věrné 3D modely stavebních a památkových objektů či půdních tvarů (DMT). Může se jednat jak o pozemní, tak letecké skenování a snímkování. Principem obou metod je vytváření takzvaných mračen bodů (*point cloud*), z kterých se dále modeluje daný předmět zájmu.

### 2.1 3D laserové skenování

Jako 3D laserové skenování jsou považovány metody hromadného určování podrobných bodů neselektivní metodou, za použití laserového skeneru. Jedním z hlavních principů je měření vzdálenosti, jakou urazí laserový paprsek od zdroje záření a měřeným objektem, spolu s měřením úhlů jsou následně tyto hodnoty použity pro výpočet prostorové polohy bodu pomocí prostorové polární metody. Vzdálenost je určena jako čas mezi vysláním paprsku zdrojem a zaznamenáním odraženého paprsku od objektu zpět v přístroji nebo pomocí fázového rozdílu přijaté vlny. Po vypočtení polární metody je vytvořeno tzv. mračno bodů, ze kterého se poté vytvoří třírozměrný digitální model. Metoda laserového skenování je velmi často využívána, ale musíme vzít v potaz i finanční stránku věci. Pořizovací náklady skeneru a další překážky, které jsou transportní problémy či velikost skeneru způsobují, že se tato metoda stává velmi často nákladnou a při použití např. ve vzdálených destinacích i nepoužitelnou. 3D laserové skenování je poměrně mladá a v dnešní době stále se rozvíjející technologie. Hlavní výhodou spočívá v pořízení obrovského neselektivního množství bodů popisujících tvar daného objektu, bez jakéhokoliv kontaktu se skenovaným objektem, za relativně krátký časový úsek. S touto moderní metodou dokážeme velmi detailně popsat tvary a povrchy objektů z vytvořeného mračna bodů, a dále také můžeme jejich povrch popsat pomocí odrazivosti povrchu objektů. Hlavním produktem skenování je tedy mračno bodů obsahující prostorové souřadnice a hodnoty pro vytvoření 3D modelu. Toto vše dává dohromady výborný nástroj pro dokumentaci interiérů, exteriérů rozsáhlých objektů, historických objektů, památek, a dokonce i přírodních útvarů.

### 2.1.1 Historie

Ačkoliv jsme se již v šedesátých letech mohli setkat s počátky laserového skenování, první výrazné použití této technologie proniklo na pole fotogrammetrie a geodézie až na konci devadesátých let. Firma Cyra Technologies byla roku 1993 první, která vyvinula laserový skener pro geodetické účely. Právě tuto firmu později po roce 2000 zakoupila firma Leica Geosystems, která je dodnes lídrem na poli laserových skenerů. Laserové skenování byla velmi dlouho drahá a náročná metoda, zejména kvůli obrovskému objemu naskenovaných dat. Díky rychlému vývoji v oblasti ukládání a zpracování dat se tato metoda stala levnější a daleko dostupnější, zejména s výkonem a cenou výpočetní techniky. Přesto stále ještě dnes musíme často pořízená data ukládat na externí disky či jiná velká úložiště. V dnešní době již laserové skenování využívají geodeti, stavební inženýři a architekti v praxi na práci při běžných komerčních projektech. Další oblasti využití budou zcela určitě rychle následovat. Jeden z nejzajímavějších oborů využití laserového skenování je také virtuální realita. [1]



obr. 1: Cyrax model 2500 [2]

## 2.1.2 Metody snímání

Rozdělit 3D skenování lze na základě místa snímání na pozemní a mobilní (letecké či na pozemních dopravních prostředcích).

**Pozemní** - klasická metoda, kde je 3D skener umístěn na stativu. Skener se případně natáčí na stativu pomocí integrovaných pohyblivých ústrojí tak, aby snímal celou zvolenou oblast.



obr. 2: pozemní laserový skener Leica [3]

**Mobilní (letecká)** – během provádění této metody se přístroje po dobu měření pohybují, někdy je označujeme jako kinematické systémy. U těchto senzorů je nutné znát okamžitou reálnou polohu a orientaci v prostoru, tudíž jsou tyto systémy vybaveny navigačními systémy GNSS (Global Navigation Satellite System) a IMU. Často se tyto metody využívají pro letecké laserové skenování, jehož produktem jsou většinou DMR a DMP. [4] Mobilní systémy jsou ale dnes často umísťovány i na automobily, lodě či železniční systémy.



obr. 1: Mobilní laserový skener – Lidar [5]

### 2.1.3 Typy skenerů

Rozdělení podle principu získání vzdálenostní složky bodu od skeneru na pulsní a fázové.

**Pulsní** - měří čas doby letu paprsku od jeho vyslání a po odrazu od objektu zpět k přístroji. Mají větší dosah (stovky metrů až kilometry), ale menší přesnost (milimetry a centimetry). [4]



obr.4: Pulsní skener Riegl VZ-400i [6]

**Fázové** - měří fázový rozdíl amplitudové modulace nebo frekvenční modulaci s fázovou frekvencí. Větší přesnost (pod milimetr), dosah 5 - 50 metrů. [4]



obr. 5: Fázový skener FARO Focus3D-X130 [7]



#### 2.1.4 Příkladové studie - dokumentace historické klenby Břevnovského kláštera [8]

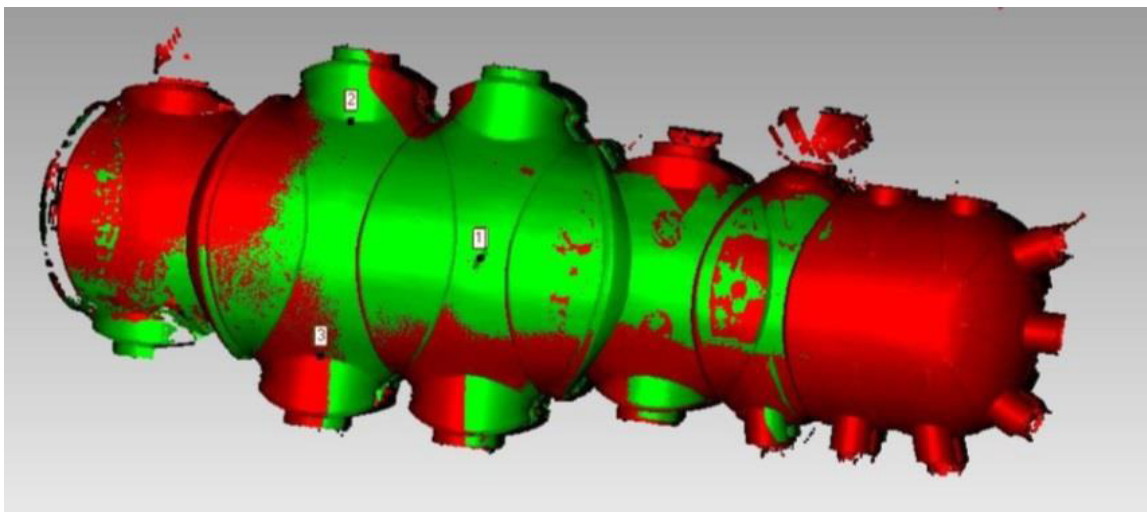
Jako ukázka využití laserového skenování a následného zpracování 3D modelu byl zvolen projekt dokumentace historické klenby Břevnovského kláštera, který byl součástí bakalářské práce studentky stavební fakulty ČVUT v Praze Bc. Zuzany Šlaufové v roce 2017.

Pro skenování Břevnovského kostela byl využit laserový skener Surphaser 25HSX, který je majetkem FSv, ČVUT v Praze a je využit i pro tuto diplomovou práci. Skenování probíhalo z 12 stanovisek tak, aby byly zaměřeny všechny části klenby včetně bočních oltářů. Všechna měřená data byla exportována do formy výměnného formátu mračna bodů, dále pak probíhalo zpracování v programu Geomagic, který umožňuje práci s mračny bodů.



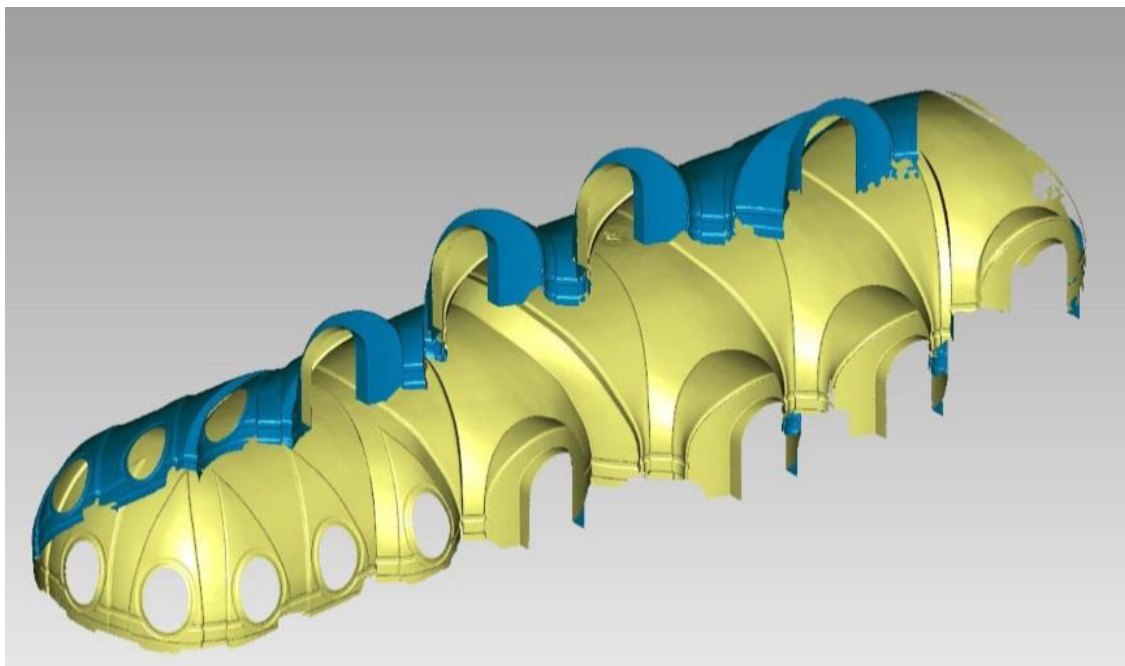
obr. 6: Pohled na surová data ze skeneru [8]

Dále pak za použití programu Geomagic došlo ke snížení objemu dat v místech s malou křivostí. Tento krok nemá v důsledku vliv na další kvalitu výsledku a umožní rychlejší práci s daty a odlehčí hardwarovým nárokům. V následující části zpracování bylo provedeno sloučení všech 12 skenů do jednoho celku viz. obr 7.



obr. 7: sloučená data v programu Geomagic [8]

Po sloučení všech skenů byly odstraněny veškeré nadbytečné body a za pomoci dalších funkcí programu byla vytvořena trojúhelníková síť, ve které následně byly vyplněny díry v nedokonale vytvořených oblastech klenby. Výsledný 3D model projektu, historické klenby Břevnovského kláštera, můžete vidět na obr. 8.



obr. 8: 3D model klenby Břevnovského kláštera – pohled zdola [8]



## 2.2 IMBR

Jedná se o moderní technologii, která slouží k extrakci prostorové informace na principu obrazové korelace ze snímků téhož objektu pořízených z různých stanovisek. Primárně je používána pro tvorbu 3D modelu fotografovaného objektu a vžil se pro ni název IBMR (Image Based Modeling and Rendering). Metoda se zakládá na předpokladu, že každé jedno blízké okolí pixelu je jedinečné. Příslušný software postupně vyhodnotí identické body na dalších snímcích na základě nejbližšího okolí. Může se dokonce jednat i o rozdílné světelné podmínky na jednotlivých snímcích. Takové snímky jsou vyhodnoceny pomocí metody SIFT (Scale Invariant Feature Transformation).

Hlavní výhodou technologie IBMR jsou podstatně nižší náklady na techniku. Pro fotografování objektu zájmu stačí jen kvalitnější fotoaparát. Dnes takový fotoaparát můžeme najít i v mobilních telefonech vyšší kvality. Další výhodou je i kalibrace fotoaparátu, která je provedena automaticky při výpočtu v daném softwaru, proto není potřeba výpočet kalibrace řešit jako další úlohu tak, jako u jiných fotogrammetrických metod. To přináší další zrychlení a zlevnění prací. Největší výhodou je však, že výstupem je barevné mračno bodů díky textuře z originálních snímků. Z takto obarveného mračna můžeme poté vytvořit síť s barevnou texturou a natočením do požadované roviny vytvářet věrná ortofota.

Jednou z hlavních nevýhod je, že na částech budoucího modelu a tedy i ortofota se mohou objevovat chyby a tzv. prázdná místa. To je zapříčiněno ve většině případech lesklými či skleněnými povrchy nebo zakrytými oblastmi. Tyto místa nelze vyhodnotit. Zpracování a vyhodnocení modelů převážně probíhá zcela automatizovaně a téměř bez zásahu zpracovatele. Další z nevýhod mračna bodů z IBMR je, že model nemá měřítko a musíme ho tedy definovat a to alespoň jednou naměřenou vzdáleností při měření. Vzdálenost poté přeneseme na vypočtený model.

Tato technologie je dnes jednou z nejpoužívanějších v oblasti dokumentace památek a tvorby věrných ortofot. Dále se pak využívá ve filmovém průmyslu, například pro vykreslování masových scén s velkým počtem postav. [9]



### 2.2.1 Příkladová studie - Madona mistra z Fabriana [10]

Projekt se zabývá modelováním sošky dřevěné Madony neznámého mistra z Fabriana ze 14-tého století, který chtěl především poukázat na možnosti využití této technologie k získání detailních informací o struktuře a stavbě sošky. Celý projekt byl vyhotoven na maďarské univerzitě technické a ekonomické v Budapešti.



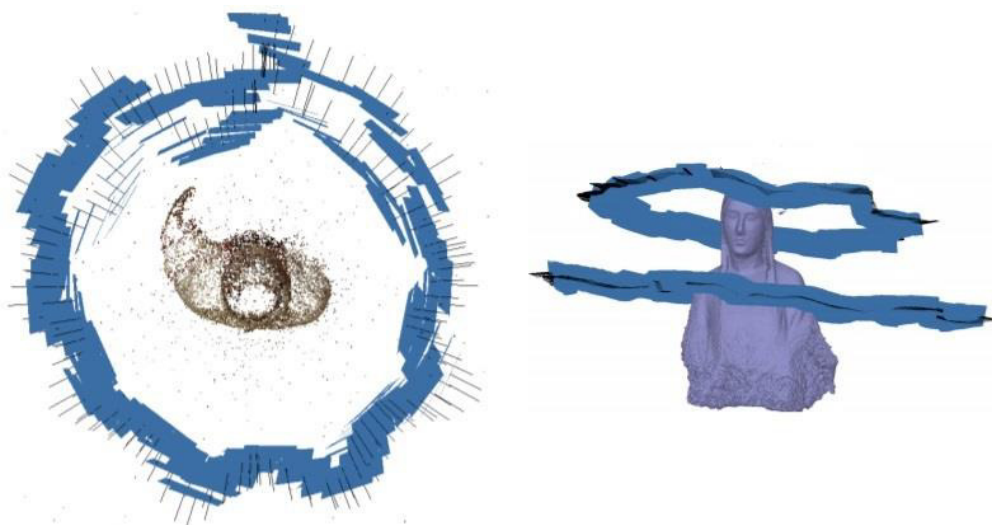
obr. 9: Madona mistra z Fabriana [10]

Soška Madony byla nasnímana jednoduchou a levnou kamerou, která byla integrovaná v telefonu Samsung Galaxy S5. Kamera byla vybavena 16-megapixelovým senzorem s  $f/2.2$  objektivem s ekvivalentní ohniskovou vzdáleností 31 mm. Tento projekt je zajímavý tím, že nebyly pořízeny jednotlivé fotografie, ale snímání probíhalo natáčením videa. Během snímání byl mobilní telefon několikrát pootočen tak, aby se eliminovaly případné nedokonalosti kamery. Celé výsledné video mělo nakonec délku 34 sekund a obsahovalo přes 1900 jednotlivých snímků. Nicméně takto pořízená data mají své nevýhody, neboť při natáčení videa nejsou jednotlivé snímky zcela zaostřené, proto mají menší rozlišení (dle možnosti kamery) a snímků je nepoměrně více.

Image set	Aligned image count	1804
	Image resolution	1080 × 1920
Sparse point cloud	Point number	39 079
	Matching and alignment time*	14 h 47 min and 1 h 23 min
	Optimization time	10 min
Dense point cloud	Point number	2 667 782
	Processing time**	9 h 38 min
3D model	Faces of model	533 556
	Processing time	2 min
	Texturing time	2 min

obr. 10: Tabulka technických parametrů projektu [10]

Další zpracování projektu probíhalo v komerčním programu Agisoft Photoscan, který vytváří na základě pořízených fotografií mračno bodů, a dále pak celé mračno bodů pospojuje do sítě. Z této sítě byl poté již vytvořen netexturovaný model sošky Madony. viz Obr.11.



obr. 11: Pohled na konfiguraci snímků a mračno bodů (vlevo) zasít'ovaný 3D model [10]

Následně byl vytvořen finální reálně texturovaný produkt Madony, který si lze prohlédnout na obrázku 12. Dále pak byla z výsledného 3D modelu zhotovena soška pomocí 3D tiskárny.



obr. 12: Výsledný 3D model Madony [10]

### 2.3 Kombinace metod laserového skenování a IBMR

Kombinace metod laserového skenování a IBMR je poměrně mladá a nadále se vyvíjí. Každá z obou zmíněných metod, jak již bylo řečeno v předcházejících kapitolách, má svá pozitiva a negativa při vytváření 3D modelů, a proto je v dnešní době snaha obě metody navzájem propojit a získat ještě kvalitnější a daleko komplexnější výsledky. Laserové skenování přináší velmi přesné určení tvaru objektů zájmu, ale na úkor delšího sběru dat či neúměrně dražší techniky. Naopak IBMR nám poskytuje možnost vytváření kvalitních modelů za použití levnějších přístrojů a značně kratší doby pořízení. Hlavní výhodou spojení obou metod je tedy vzájemné doplnění se v nedostatcích. Příkladem může být skenování historického domu, u kterého nám půjde spíše více o interiér. Uvnitř lze vše nasnímat laserovým skenerem pro větší přesnost či komplexnost prostorových dat, dále pak objekt lze fotografovat pro následné přidání textury laserovým skenům, poté lze objekt fotografovat fotoaparátem či RPAS (dronem) z venku tak, abychom získali data pro celek. Takto získaná data se zpracují a vytvořená mračna bodů s texturou lze spojit do reálného modelu stavby.

### 2.3.1 Příkladová studie - projekt kombinace metod laserového skenování a IBMR [11]

Projekt byl zaměřen na možnosti využití pozemního laserového a IBMR skenování pro mapování lesů. Záměrem bylo zjistit, zda kombinace metod přinese dobrý výsledek a mohla by se tak více používat namísto velmi drahého leteckého laserového skenování. Projekt byl prováděn v oblasti severozápadní Itálie s názvem Beaulard Piedmont.

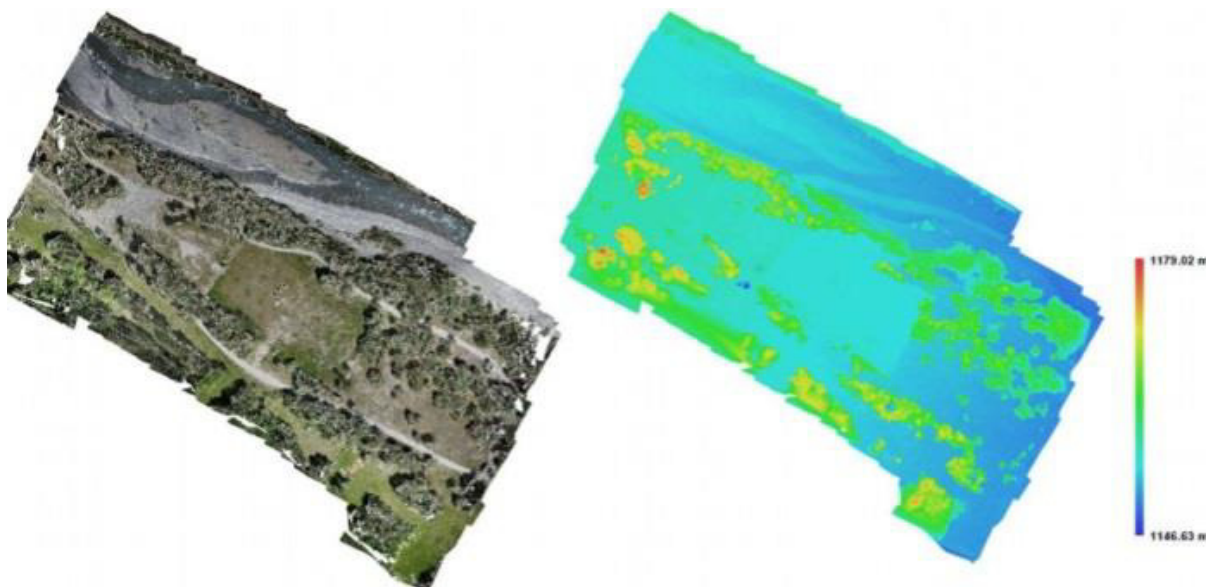
Nejprve byla celá zájmová oblast fotografována systémem RPAS. Pro tento let byl vytvořen speciální letový plán, který udával, jak bude celé snímkování probíhat. Dále pak musely být geodeticky zaměřeny body, na kterých byl poté umístěn laserový skener. Takových bodů bylo celkem 8. Na těchto stanovištích byly pořízeny skeny lesního porostu. Jednotlivé skeny, již spojené do celku, můžete vidět na obr. 13.



obr. 12: obarvený laserový sken (nahore), spojené mačna bodů (dole) [11]

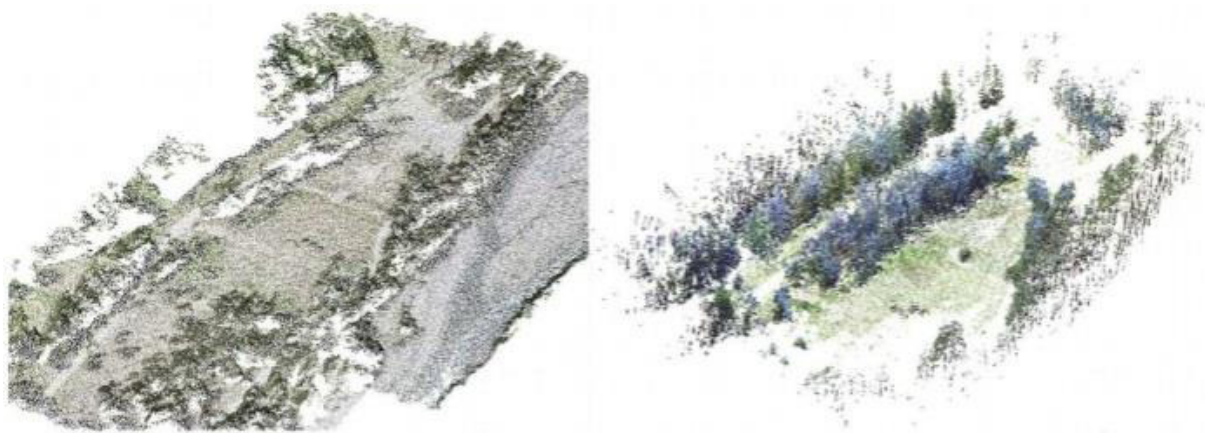


Dále pak byly snímky z leteckého snímkování zpracovány v programu Agisoft Photoscan. Nejprve se snímky urovnají pomocí funkce *align photos*, poté se vytvoří tzv. husté mračno bodů. Zde v případě lesních porostů bylo rozhodnuto, že urovnání proběhne na malou přesnost, ale následné husté mračno bodů se vytvoří s vysokým rozlišením (v tomto případě 17,2 milionů bodů). Dalším krokem je vytvoření modelu pomocí spojení hustého mračna do polygonové sítě a přidáním textury. Jako poslední krok muselo být modelu přiděleno měřítko a georeferencování. Tedy přidělení správného referenčního systému souřadnic pro následné spojení jednotlivých modelů. Výsledky modelu mohou být ve formě ortofota (přesnost 5 cm) nebo DMP.

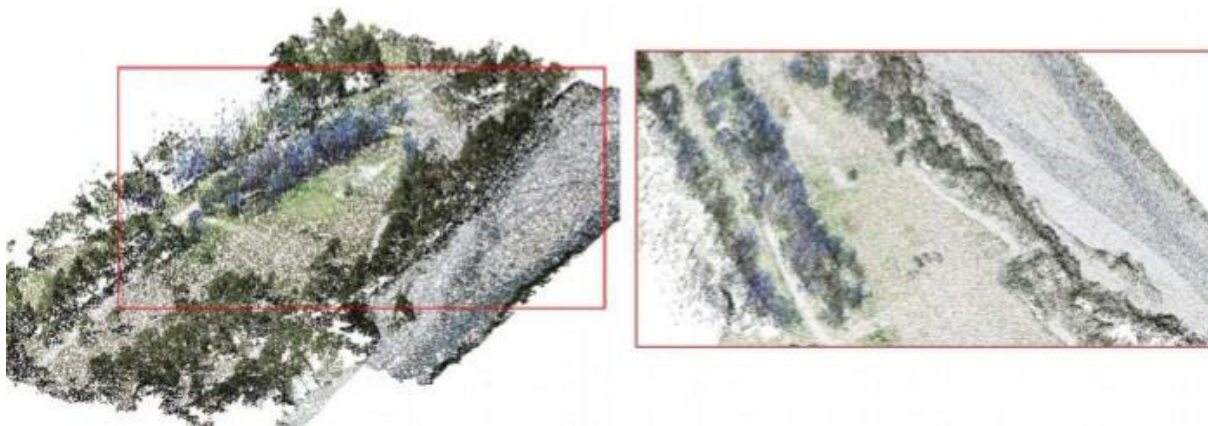


obr. 14: Ortofoto a DMP [11]

Na konci celého procesu bylo jedno generované (IBMR) a jedno naskenované mračno bodů (laserové skenování). Obě mračna musela být převedena do stejného referenčního systému, a dále pak v programu 3D Reshaper spojena do jednoho celku. Spojení proběhlo v pořádku, i přestože mračno z laserového skenování mělo mnohem větší hustotu než z IBMR. Výsledný model měl rozlišení 5 cm a přesnost určení bodů se pohybovala okolo 3 cm.



obr. 15: Mračna bodů: IBMR (vlevo), laserové skenování (vpravo) [11]



obr. 16: Výsledek spojení mračen bodů (vpravo detail) [11]

## 3 Vlastní práce - použité přístroje a vybavení

### 3.1 Laserový skenery

Pro tuto diplomovou práci byl využit pouze jeden laserový skener katedry geomatiky na Stavební fakultě ČVUT v Praze, a to Surphaser 25HSX. Skenování objektu sochy, kardinála Berana, proběhlo již dříve v rámci předmětu Projekt – fotogrammetrie na Stavební fakultě, a tak nebylo třeba objekt znovu skenovat. Data z měření byla přejata za účelem zrychlení prací. Jakožto student oboru jsem se této práci účastnil v pracovní skupině.

#### 3.1.1 Surphaser 25HSX

Laserový skener Surphaser 25HSX s konfigurací IR\_X e řadí mezi panoramatické fázové skenery. Tento skener za optimálních podmínek dosahuje přesnosti lepší než 1 mm při doporučené pracovní vzdálenosti 0.4–30 m. Teoretická maximální vzdálenost pro měření je 70 m, užitná cca 30 m. Přístroj skenuje obě hemisféry současně a měří 216 tisíc až 1,2 mil. bodů/s. Rozsah zorného pole skeneru je 360 x 270. Přístroj tedy nedokáže skenovat oblast přímo pod sebou. [12]



obr. 17: Surphaser 25HSX [12]

## 3.2 Neměřické kamery

### 3.2.1 Neměřická kamera Canon EOS 5D Mark II

V diplomové práci byly použity kamery (digitální fotoaparáty) typu Canon. Jednalo se o profesionální digitální zrcadlovku, která obsahuje nový snímač CMOS s rozlišením 21,1 Mpix, a dále vylepšený integrovaný čistící systém EOS. Fotoaparát dále obsahuje výkonný procesor DIGIC 4, který zaručuje špičkovou kvalitu obrazu. Fotografie mohou být ukládány jak ve formátu JPEG, tak ve formátu RAW v rozlišení až 5616 x 3744 bodů. Citlivost se pohybuje v mezích 50 - 25600 ISO. Rozsah expozičních časů je 30 - 1/8000 s. [13]



obr. 38: Canon EOS 5D Mark II [13]



### 3.2.2 Neměřická kamera Canon EOS 450D

Canon EOS 450D je digitální zrcadlovka s 12,1 Mpix snímačem CMOS. Rovněž obsahuje integrovaný čistící systém EOS. Zrcadlovka dále obsahuje procesor DIGIC III. Fotografie mohou být taktéž ukládány ve formátu JPEG a RAW v rozlišení 4272 x 2848 bodů. Citlivost se pohybuje v intervalu 100 - 1600 ISO. Rozsah expozičních časů je 30 - 1/4000 s. [13]



obr. 19: Canon EOS 450D [13]

### 3.3 RPAS

RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), je dálkově pilotovaný letecký systém. V současné době je ve fotogrammetrii nejvíce používán v oblasti mapování či vytváření 3D modelů. Jedná se o moderní a velmi užitečnou technologii pro bezkontaktní mapování a sledování malých či středně velkých ploch a objektů. Tyto systémy mohou poskytovat různé typy dat, např. data z oblasti viditelného spektra, infračervené, multispektrální nebo hyperspektrální data. [14]

### 3.3.1 DJI Mavic Pro Platinum

Mavic Pro Platinum je malý RPAS vážící 743 gramů a je schopný stoupat rychlostí 5 m/s. Klesání je pak možné rychlostí 3 m/s. Pokud jde o rychlost letu, tak Mavic Pro Platinum může dosáhnout až 65 km/h. Používat jej můžete do nadmořské výšky 5000 metrů a dolet má maximálně 15 kilometrů bez větru. O určení polohy se stará GNSS (GPS, GLONASS) a vizuální systém. Dálkový ovladač lze použít na vzdálenost až 4 kilometrů. Mavic Pro Platinum je vybaven kamerou s 1/2,3" CMOS senzorem a celkovým rozlišením 12,71 MPx (efektivně 12,35 MPx). Má širokoúhlý objektiv s přepočtenou 28 mm ohniskovou vzdáleností (úhel záběru 78,8°) a světelností F2,2. Jeho zkreslení dosahuje 1,5 %. Expoziční časy mohou být od 1/1600 sekundy do 8 sekund, citlivosti pak od ISO 100 do ISO 1600. [15]

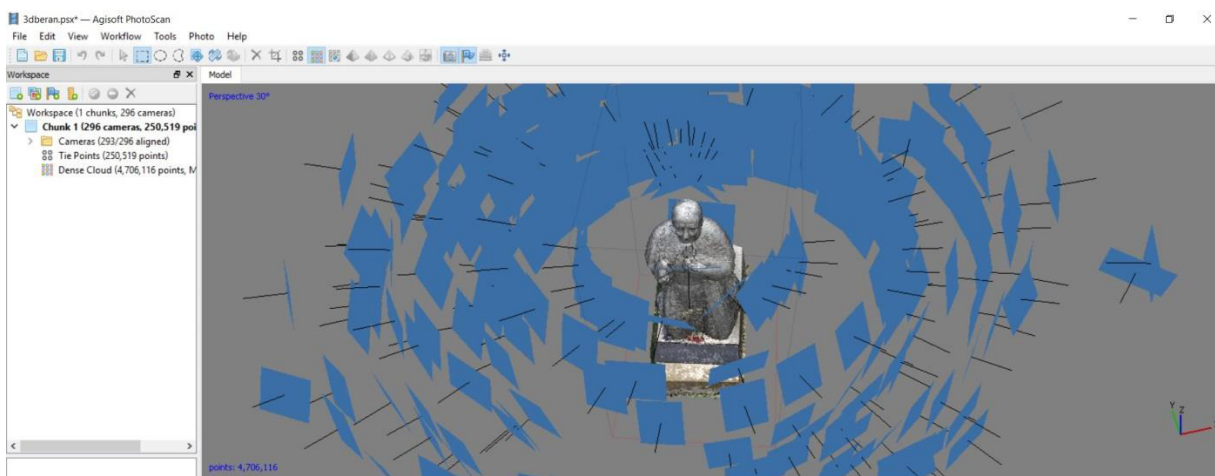


obr. 20: DJI Mavic Pro Platinum [15]

## 4 Použitý software

### 4.1 Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan je software, který umožňuje tvorbu digitálních modelů terénu, ortofotomap a obecně polygonálních modelů s texturami ve velmi vysokém rozlišení. Jeho uživatelské prostředí je pro obsluhu jednoduché a má velkou míru automatizace. Lze tak pohodlně zpracovávat i několik tisíc snímků v pár krocích. Zpracovávaná data je možné i georeferencovat. Tento program si pro tuto úlohu postačí buď s GNSS souřadnicemi odpovídajícími času a místu pořízení jednotlivého snímku, nebo se souřadnicemi identických bodů (GCP – Ground Control Points). Podle kvality vložených souřadnic lze získat digitální model povrchu s přesností v řádech centimetrů. [16]

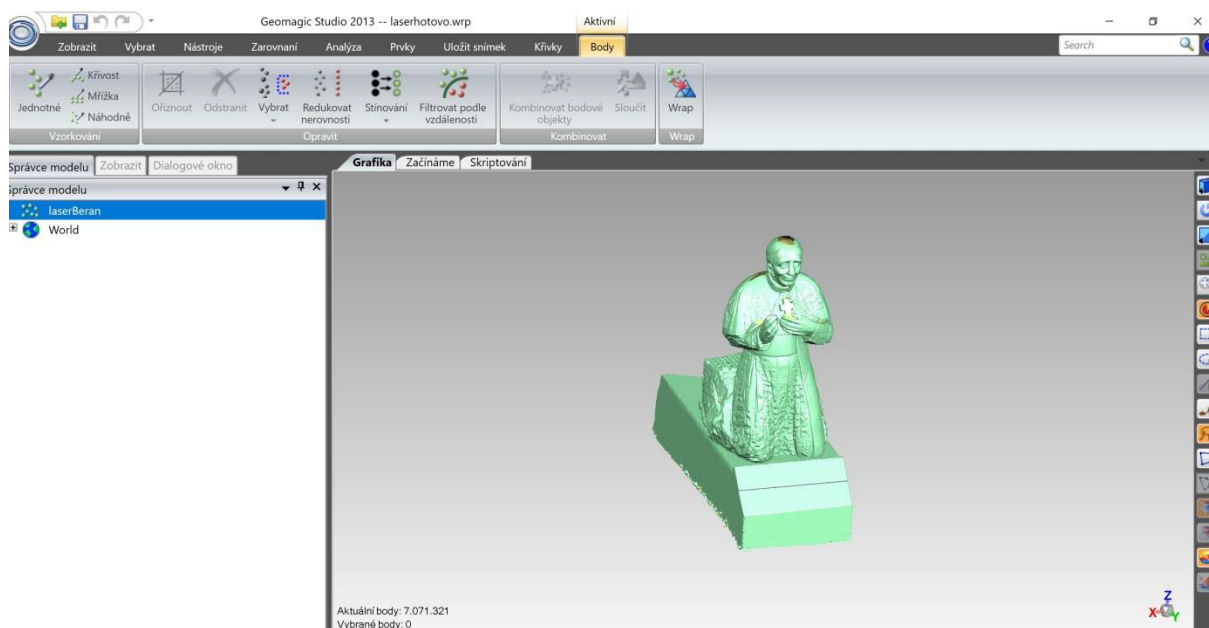


obr. 24: Ukázka programu Agisoft

..

## 4.2 3D software GeoMagic Studio

Jedná se o jeden z produktů společnosti 3D systems, která vznikla v roce 1986 ve Valencii (Kalifornie, USA). Společnost byla založena vynálezcem 3D tisku Charlesem Hullem, jež jako první v roce 1983 vytiskl 3D součástku. O rok později, roku 1984, si nechal tento vynález patentovat. Jde o první společnost na světě, zabývající se 3D tiskem. V roce 1987 vydala první komerční verzi 3D tiskárny. V současné době nabízí široké portfolio produktů zabývajících se digitalizací a replikací prostorového vjemu. Produkt GeoMagic Studio je primárně určen pro práci s mračny bodů a modely tvořenými polygony. Software nabízí širokou škálu funkcí pro práci s mračny bodů a pro obousměrný převod bodů do polygonových modelů a naopak. Dále se specializuje na následnou replikaci modelů pomocí 3D tisku. Nesmírnou výhodou tohoto softwaru je široká kompatibilita s produkty CAD systémů. [18]



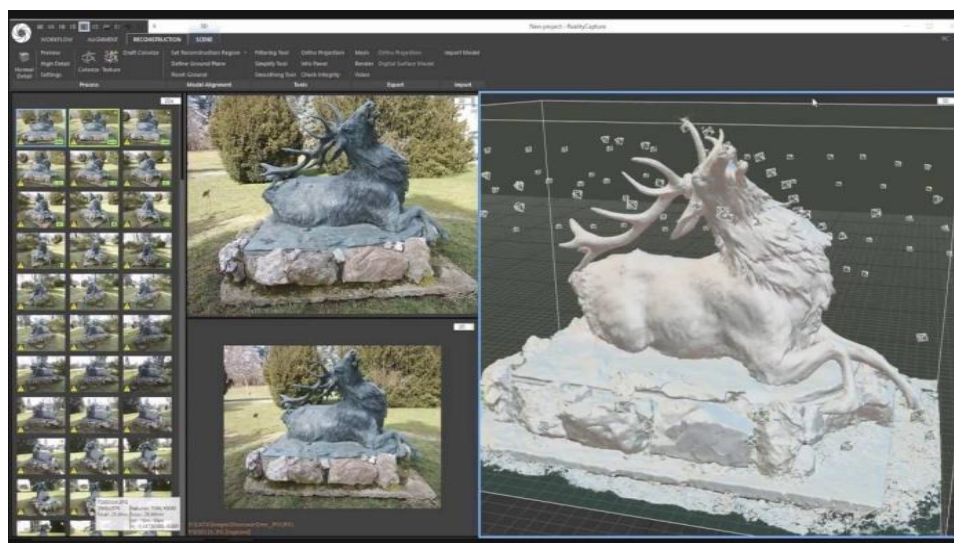
obr. 22: Ukázka programu Geomagic

### 4.3 CloudCompare

Pro porovnání vytvořených mračen bodů byl použit software Cloud Compare, který ze dvou na sebe referencovaných mračen vypočte jejich rozdl.. CloudCompare je volně dostupný software, primárně určený pro srovnávání dvou bodových mračen nebo zasítovaných mračen (modelů). Pro účely porovnání je založen na speciální *octree* struktuře (je typ stromové struktury dat, kde každý uzel má právě osm potomků). Software dokáže běžně pracovat s mračny o více než 10 milionech bodů. V současnosti jej lze využít též k různorodým operacím s 3D daty jako jsou: registrace, převzorkování, statistické výpočty apod. [16]

### 4.4 RealityCapture

RealityCapture je moderní fotogrammetrický systém, který dokáže automaticky a velice rychle zpracovávat data z laserového skenování, fotogrammetrických snímků, fotografií z RPAS či synchronizovaných kamer. Tento software jako jeden z mála dokáže spojit všechna takto pořízená data do jednoho celku a tak vytvářet zcela unikátní 3D modely. Hlavní devízou softwaru je jeho rychlost a nevysoké hardwarové nároky. To se však odráží na pořizovací ceně, která se pohybuje od 3 000 až po 15 000 Euro. Pro tuto diplomovou práci byla zakoupena zkušební verze na 3 měsíce za 100 Euro. [17]



obr. 23: Ukázka RealityCapture [17]

## 5 Test rozlišení

V této části diplomové práce byla za pomoci naměřených dat z terénu hledána hraniční vzdálenost spojení snímků při snímkování zájmového objektu. Nejprve musel být navrhnout optimální test, který slouží jako simulace pro další část experimentu. Rozvržení testu a sběr dat je popsán blíže v následující kapitole. Dále se pak v programu Agisoft Photoscan je popsán experiment spojení snímků z odlišných vzdáleností pro určení hraniční vzdálenosti možného spojení. Test byl navržen tak, aby se postupně s dvojnásobnou vzdáleností snímkování dvojnásobně zvětšovala i oblast zabraná jedním pixelem snímků na daném objektu.

### 5.1 Sběr a popis dat

Pro tento test byla zvolena lokalita blízko stavební fakulty ČVUT a to přesně u křížení ulic Salabova a Thákurova, na začátku parku I. Gándhiové. Jako objekt zájmu, na kterém byl proveden test, byl zvolen severozápadní roh budovy České biskupské konference.



obr. 24: Ukázka vybraného rohu budovy České biskupské konference



Snímkování budovy proběhlo dne 2. 5. 2018 za slunečného počasí a teploty okolo 20 stupňů Celsia. Data byla pořízena fotoaparátem Canon EOS 450D v nastavení viz tab.1.

Rychlost ISO	ISO - 100
Závěrka clony	f/5
Délka expozice	1/250 sec
Ohnisková vzdálenost	18 mm

tab. 1: Nastavení Canon EOS 450D

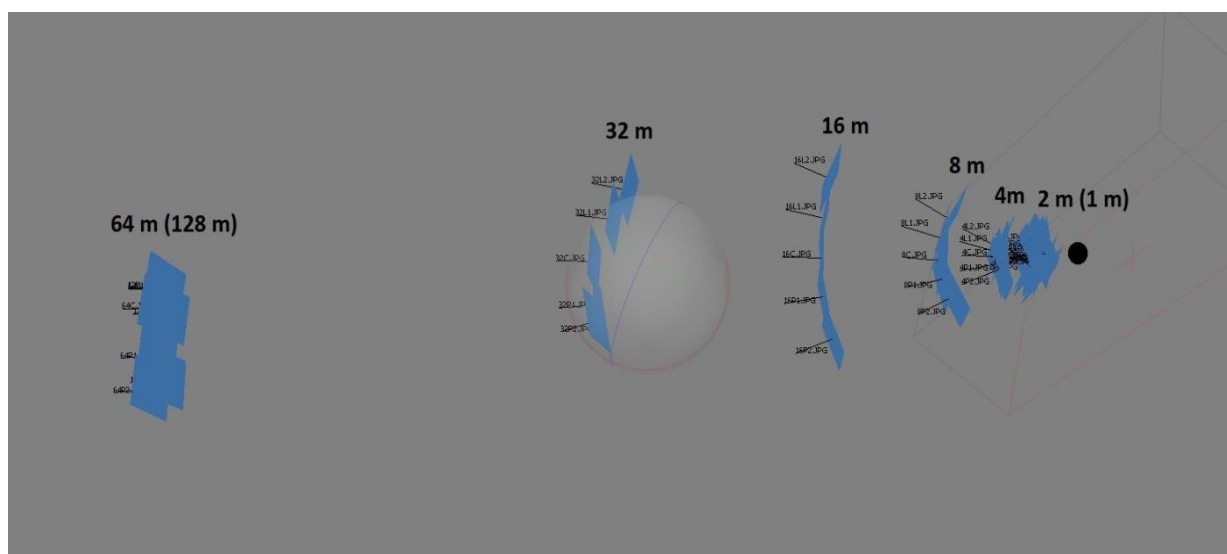
Pro účel testu byla data pořízena ze 7 různých vzdáleností a to z 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 metrů od vybraného rohu budovy. Tyto vzdálenosti byly rozměřeny pásmem pro větší přesnost. Na obrázku můžeme vidět, jak byla stanoviště rozmístěna na pohledu Google maps, viz obr. 10.



obr. 25: Ukázka rozložení míst měření



Poté musely být vytvořeny další snímky na jednotlivých stanoviskách tak, aby byl daný roh nasnímován jak z pravé, tak z levé strany, od každého stanoviska dvakrát. Na prvním stanovisku byla vzdálenost mezi jednotlivými snímky asi 30 centimetrů. Tato vzdálenost se od cíle postupně po stanovisku zdvojnásobovala. Na všech stanoviskách bylo tedy pořízeno 5 snímků. Pouze na stanovisku 32 a 64 metrů od cíle byly pořízeny jen 4 fotografie, respektive 3, a to z důvodu omezení viditelnosti na cíl. Dále pak na posledním stanovisku byly pořízeny další 3 snímky s jiným nastavením fotoaparátu pro simulaci dalšího stupně, tedy 128 metrů. Rozmístění snímků je znázorněno na obr. 26. Snímky jsou pojmenovány jako vzdálenost od cíle, následovaná písmenem určující stranu záběru a pořadí. Tedy název snímku ze stanoviště vzdáleného 4 metry a druhý vlevo od středového bude 4L2. Středové snímky mají název podle vzdálenosti a písmeno C. Např. 8C. Dohromady tedy bylo pořízeno 37 snímků. Všechna data jsou dále přiřazena v přílohách diplomové práce.



obr. 26: Ukázka rozložení snímku



## 5.2 Testování hranice spojení snímků

Celý experiment hledání hranice možného spojení snímků na základě odlišné snímkovací vzdálenosti, se dá také popsat, jako hledání co nejvíce možného rozdílného rozlišení bodů na objektu z rozdílných snímků. Představme si, že objekt budeme snímkovat z dvou metrů a jeden pixel bude na snímku zabírat plochu 1x1 cm. Tento test bude poté hledat hranici spojení snímků, které budou pořízeny ze vzdálenosti čtyř, osmi, šestnácti atd. metrů. Pixely na těchto snímcích, budou poté na objektu zabírat postupně větší plochu (2x2, 4x4, 8x8, 16x16 atd. cm).

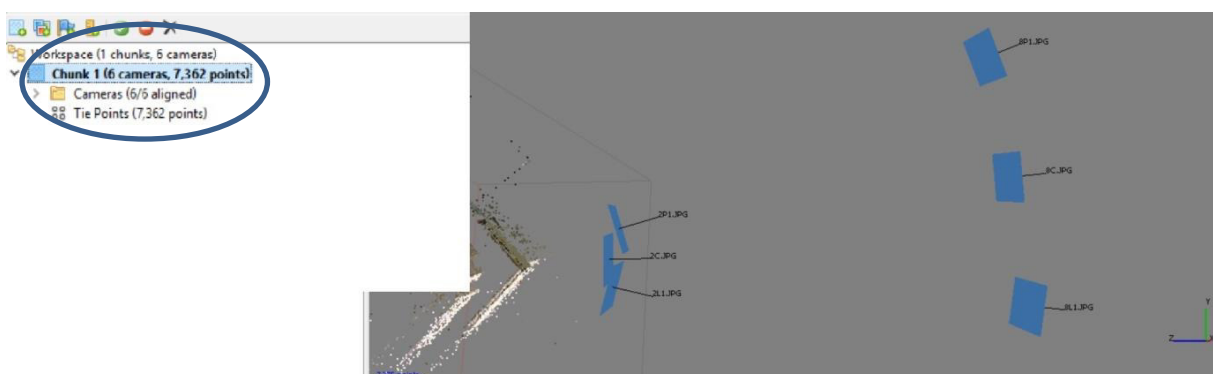
Po pořízení a roztřídění dat popsaných v předcházející kapitole, bylo přistoupeno k samotnému testování. Do softwaru Agisoft Photoscan byla nahrána všechna data. Nejprve bylo zkušebně provedeno spojení všech snímků pomocí funkce *Process - Align Photos* s nastavenou přesností *High*. Snímky ze všech úrovní se úspěšně spojily, a tak bylo přistoupeno k testování.



obr. 27: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno

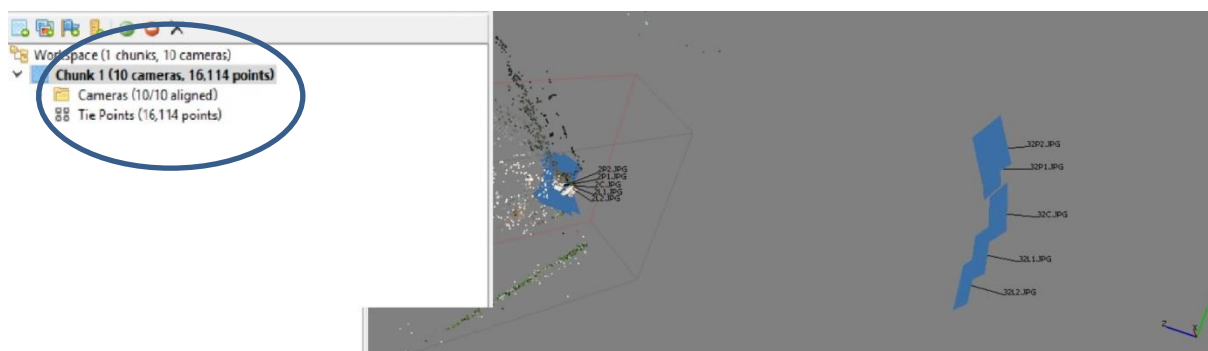
Pro účel testu byla jako základní úroveň zvolena vzdálenost dvou metrů od cíle. Nejprve byl pro testování vybrán jen centrální snímek 2C a k němu snímek 4C. Na vybrané snímky byla spuštěna znovu funkce *Process - Align Photos* s nastavenou přesností *High*. Výsledek procesu urovnání snímků byl úspěšný a došlo ke kvalitnímu spojení. Po předchozím úspěšném testu se mohlo dále postoupit na další úroveň, tudíž na snímky 2C a 8C. Poté se opakoval proces urovnání. Snímky se v programu spojily a jejich pozice byly vypočítány, avšak oproti předcházejícímu testu došlo při vytváření řídkého mračna, které je součástí

procesu výpočtu, k vytvoření pouze minimálního počtu bodů. O jaké hodnoty se jedná, a výsledky všech následujících testů můžete pro porovnání vidět v tab. 2. Z důvodu příliš malého počtu bodů, byl pro následující test zvolen větší počet snímků ze stejné vzdálenosti, jako u předcházejícího testu a to snímky s označením 2C,L,P spolu s 8C,L,P. Po ukončení procesu se snímky spojily s mnohem větším počtem bodů v mračnu a můžeme tak prohlásit, že výpočet proběhl úspěšně.



obr. 28: Test snímků 2C,P,L a 8C,P,L

Test tedy mohl postoupit o úroveň výše. Testování snímků 2C a 16C mělo očekávaný výsledek a to nepropojení snímků. Dále byl zpracován test mezi šesticí snímků 2C,L,P a 16C,L,P. Snímky se spojily velmi dobře a to s podobným výsledkem jako snímky z předchozího testu. Další úrovní byly snímky ve vzdálenosti 32 metrů. Pro ilustraci pixel fotografie z 32 metrů od cíle zabírá vůči pixelu fotografie z 2 metrů přibližně 16 krát větší plochu cíle, a tedy lze již předpokládat, že spojení bude pro program velmi obtížné, jelikož program postupně hledá podobná okolí jednotlivých pixelů. Po proběhnutí funkce při konfiguraci 2C,L,P, a 32 C,L,P došlo pouze ke spojení tří snímků ze vzdálenosti 2 metrů. Výsledek tedy dopadl dle očekávání a program nedokázal rozeznat stejné části cíle na snímcích z 32 metrů, proto bylo rozhodnuto o přidání dalších dvou snímků z obou testovaných vzdáleností. Konfigurace následujícího testu tedy byla 2C,L,L,P,P (všechny snímky) a 32 C,L,L,P,P a díky maximálnímu počtu použitých snímků, došlo k požadovanému spojení, viz obr. 29.



obr. 29: Test snímků 2C,P,P,L,L a 32C,P,P,L,L

Jelikož se v předešlém testu snímky spojily, byl proveden další z testů to se snímky z dvojnásobné vzdálenosti. Pro test byly využity snímky 2C,P,P,L,L a 64C,P,P,L. Po provedení spojení snímků si můžeme v tab. 2. a na obr. 30. všimnout, že došlo pouze ke spojení snímků ze vzdálenosti 2 metry a všechny zbylé snímky ze vzdálenosti 64 metrů se nám s ostatními nespojily. Příčinou nespojení je skutečnost, že jeden pixel fotografie z takovéto vzdálenosti od cíle zabírá vůči fotografii základny z 2 metrů již více jak 64 krát větší plochu dané snímkové budovy, a proto software nedokáže tyto snímky připojit k ostatním.



obr. 30: Test snímků 2C,P,P,L,L a 64C,P,P,L

Dále pak pro ověření výsledků byly zpracovány další kombinace snímků tak, abychom mohli s jistotou říci, kde se nachází hledaná hranice možného propojení snímků. Všechny kombinace jsou obsaženy v tab. 2. Z předchozích testů lze usoudit, že pro jednotlivé snímky postupně využitých vzdáleností je hranice spojení čtyřnásobek vzdálenosti, od základního snímku. Pro skupinu tří snímků se jedná o osminásobek a pro skupinu pět snímků šestnáctinásobek vzdálenosti původních snímků.



Použité snímky	Urovnané snímky	Počet bodů v mračnu	Ano / Ne
2C – 4C	2/2	1 300	Ano
2C – 8C	0/2	118	Ne
2CLP – 8CLP	6/6	7 300	Ano
2CLP – 16CLP	6/6	7 400	Ano
2CLP – 32CLP	3/6	4 800	Ne
2 CLLPP – 32CLLPP	10/10	15 400	Ano
2CLP – 64CLLPP	5/9	11 800	Ne
4C – 16C	0/2	184	Ne
4C – 32C	0/2	37	Ne
4CLP – 32CLP	6/6	6 800	Ano
4CLP – 64CLP	6/6	5 500	Ano
4CLP – 128CLP*	6/6	5000	Ano
1C – 2C	2/2	1 900	Ano
1C – 4C	0/2	185	Ne
1CLP – 4CLP	6/6	9 100	Ano
1CLP – 8CLP	6/6	6 800	Ano
1CLP – 16CLP	3/6	4 500	Ne
1CLLPP – 16CLLPP	5/10	12 200	Ne
1CLP – 32CLLPP	10/10	11 800	Ne
8C – 32C	0/2	169	Ne
8CLP – 32CLP	6/6	5 000	Ano
8CLP – 64CLP	6/6	3 300	Ano
16C – 64C	0/2	48	Ne

tab. 2: Výsledky funkce *Align Photos*

## 6 Test horizontálního překryvu snímků

Stejně tak jako v předešlé kapitole, byla v této části diplomové práce z naměřených dat z terénu hledána hraniční hodnota jakožto parametr fotografování. Tentokrát se jednalo o úhel horizontálního spojení snímků při snímkování zájmového objektu. Pro test byla nejprve pořízena experimentální data. Rozvržení testu a sběr dat je popsán blíže v následující kapitole. Další zpracování testu bylo provedeno v softwaru Agisoft Photoscan. Zde se v experimentu provádělo spojení snímků z odlišných úhlů a určovaly se hranice možného spojení.

### 6.1 Sběr a popis dat

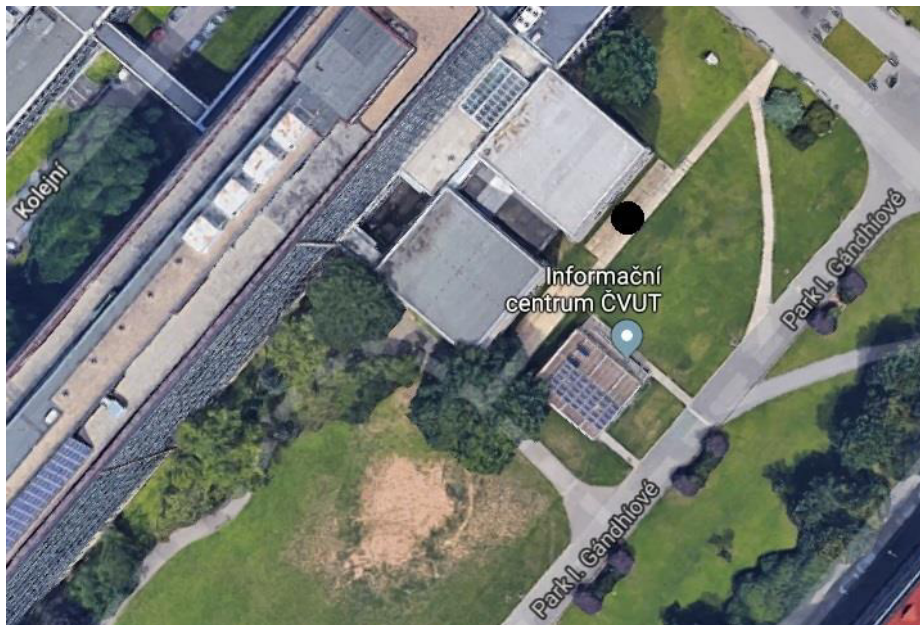
Pro další test byly pořízeny snímky u budovy Stavební fakulty ČVUT. Jako vhodné místo byla zvolena mozaikovitá fasáda, na jihozápadní straně budovy fakulty, směřující do parku I. Gándhiové.



obr. 51: Ukázka vybraného fasády Fsv ČVUT

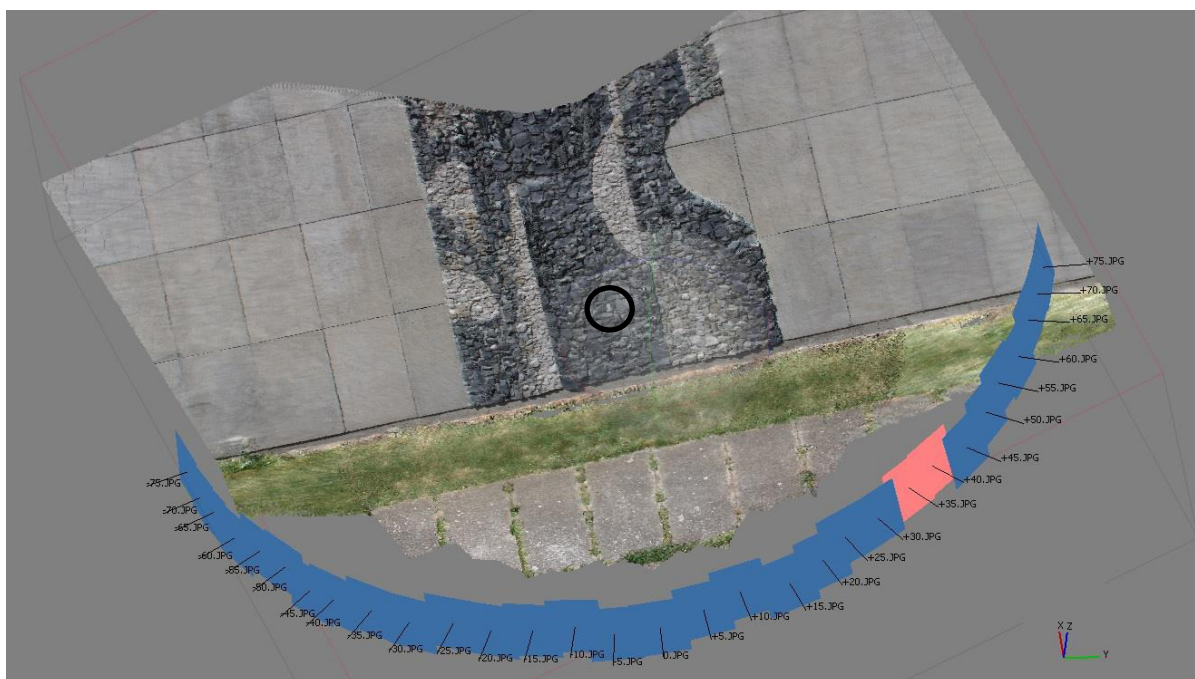


Snímkování budovy proběhlo stejně jako v předcházející kapitole fotoaparátem Canon EOS 450D se stejným nastavením viz tab.1. dne 2. 5. 2018.



obr. 62: Mapa s vyznačeným místem snímkování

Nejdříve musela být rozměřena jednotlivá stanoviška, odkud následně probíhalo snímkování. Pro daný test byla nejdříve vytyčena pomocí dřevěných kolíků a pásma základní půlkružnice o poloměru 6 metrů. Jako střed půlkružnice byl vybrán výrazný bod na fasádě (světlý prvek mozaiky, viz obr. 33). Dále pak pro účel testu musela být daná půlkružnice rozdělena na další stanoviška a to tak, že každé další stanoviško bylo vytyčeno jako rameno úhlu od středu o velikosti 5 stupňů. Takto se postupovalo dále od každého následujícího stanoviška. Tyto úhly byly odměřeny pomocí azimutu a přesného kompasu. Následně na kružnici byly body stabilizovány kolíkem. Jak byla stanoviška rozmístěna je vidět na následujícím obrázku, zobrazující stanoviško na 3D modelu z programu Agisoft, viz obr. 33. Poté byly pořízeny snímky na jednotlivých stanoviškách. Každý snímek měl jako střed zvolen právě středový bod mozaiky. Z každého stanoviška byl tedy na střed mozaiky nasnímán jeden snímek. Rozmístění snímků je znázorněno na obr. 33. Snímky jsou pojmenovány jako úhel od středového snímku, který má název 0. Znaménko před označením značí stranu od středového snímku. Mínus jako levý snímek s daným úhlem a plus jako pravý. Tedy název snímku ze stanoviška vzdáleného 30 stupňů vlevo od středu půlkružnice bude -30.



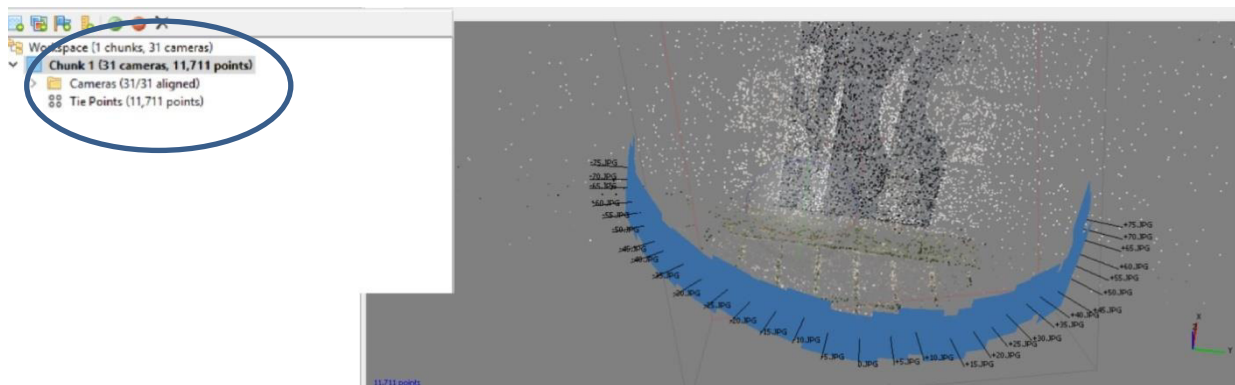
obr. 73: Ukázka rozložení snímku (vyznačen cíl)

## 6.2 Testování hranice spojení snímků

Experiment hledání hranice možného spojení snímků na základě odlišného snímkovacího úhlu se dá také popsat jako hledání co největšího možného úhlu spojení dvou snímků pořízených pod jiným úhlem.

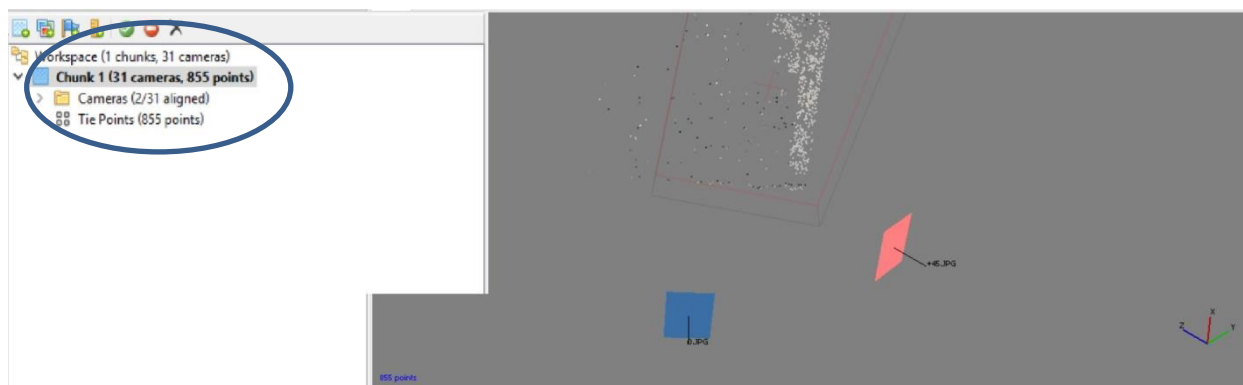
Po nasbírání a nahrání dat popsaných v předcházející kapitole bylo možné začít s testováním. Do softwaru Agisoft Photoscan byla nahrána všechna data. Prvním krokem bylo zkušební spojení všech snímků pomocí funkce *Process - Align Photos* s nastavenou přesností *High*. Snímky z veškerých úhlů se úspěšně propojily a mohlo se tak přistoupit k samotnému testování. Výsledkem je 31 propojených snímků a řídké mračno s 11 700 body. Viz obr. 34.

Další postup testu probíhal obdobně jako u předešlého testu hranice rozlišení. Postupně byly přidávány jednotlivé snímky po 5-ti stupňových intervalech. Jelikož se předpokládalo, že program bude nejlépe spojovat snímky, které jsou fotografovány kolmo na zájmový objekt, bylo postupováno nejprve od středového snímku. Zde se jedná o snímek s názvem 0.



obr. 34: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno

Postupně tedy bylo prováděno pomocí funkce *Align Photos* spojování dvojic snímků. Počáteční dvojice byla 0 a +5. Ta se podle očekávání spojila a mohlo se dále pokročit na další úhel a dvojici 0, +10. Tímto způsobem se snímky spojily až po úhel +45, kde se stále podařilo programu správně urovnat snímky a vytvořit řídké mračno o 855 bodech. Na obr. 35 je vidět i následné správné postavení kamer. Pro ověření byl také proveden test spojení snímků 0 a -45 a i tento test měl podobně kladný výsledek.

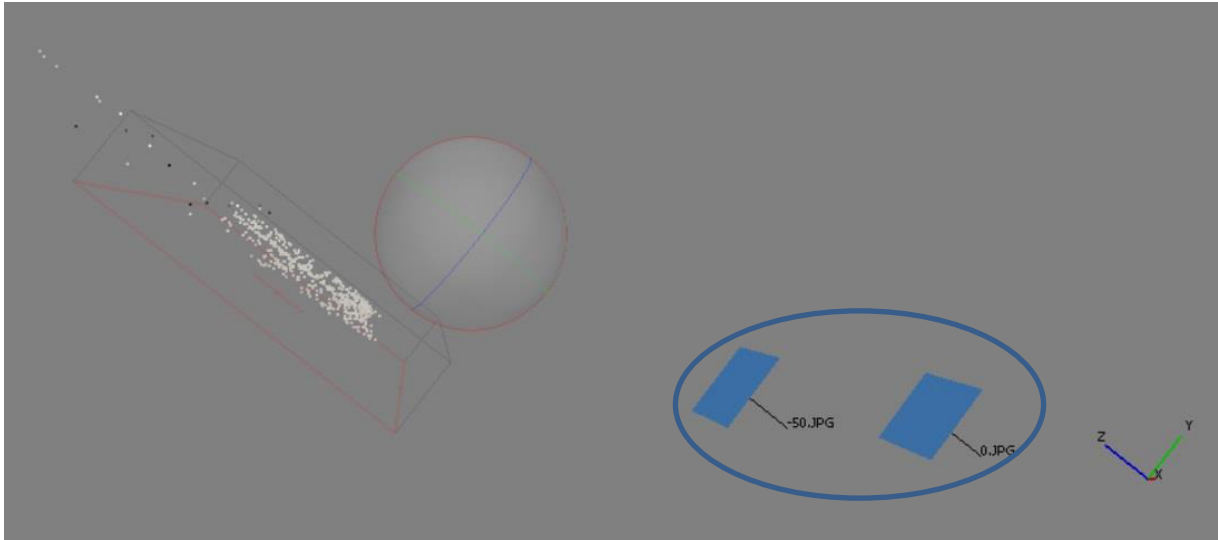


obr. 35: Test snímků 0 a +45

V dalším kroku byly využity snímky 0 a +50. Snímky se v programu spojily, ale odhadované umístění kamer bylo zcela nepřesné, proto lze usoudit, že při této konfiguraci nelze již brát spojení a urovnání snímků za úspěšné. Stejně tak jako u předcházejícího testu, byl pro ověření proveden i test konfigurace se snímky 0 a -50. Test měl totožný výsledek a lze tedy prohlásit, že maximální úhel spojení dvou snímků kolmého (snímek 0) a k němu

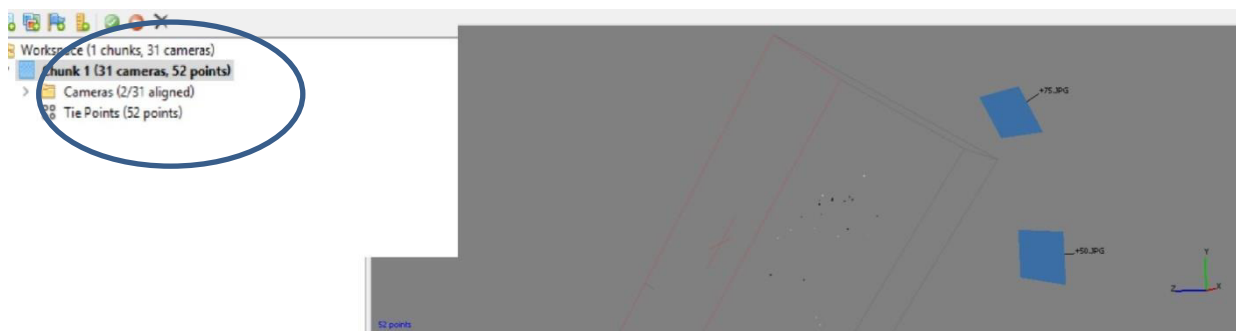


odpovídajícímu snímku z úhlu (snímek 45) je 45 stupňů. Pro ilustraci špatného urovnění kamer je přiložen obr. 36.



obr. 36: Test snímků 0 a -50

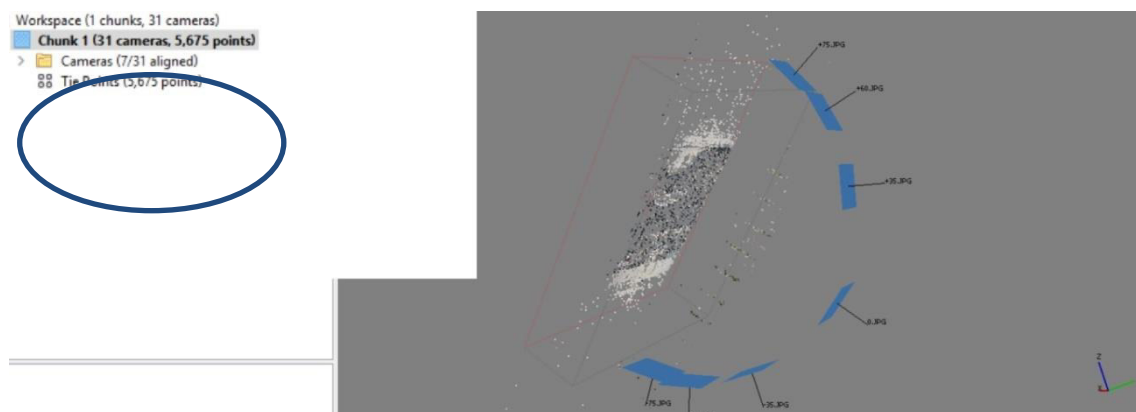
Tímto závěrem test nekončí a dále se určovalo, zda je tento úhel stejný i pro snímky, které nejsou kolmé a byly foceny z obou konců půlkružnice. Oproti předchozím testům, byl na místo snímku 0 vložen jako testovaný snímek +75 případně -75 a od něj se postupně testovalo, zda se spojí s dalšími snímky. První dvojicí tvořil tedy snímek +75 a +70. Výsledkem bylo kvalitní propojení snímků a urovnění kamer. Další postup probíhal obdobně jako u předcházejícího testování. Postupně tak byly prověřeny všechny dvojice z obou konců půlkružnice. Pro ověření výsledků, až do úhlu +55 a -55, kde ještě došlo ke spojení na takové úrovni, že ji lze prohlásit za správnou. Při konfiguraci snímků +75 a +50 sice došlo k urovnění, ale vytvořené mračno obsahovalo jen minimální počet bodů a nelze tak s jistotou říci, že došlo ke správnému spojení. Pro takto malý počet bodů v mračnu nelze následně vytvořit husté mračno a 3D model. Výsledkem tohoto testu je tedy maximální hodnota 20 stupňů. Můžeme si všimnout, že úhel je více jak dvakrát menší než u předchozího testu. To je především zapříčiněno tím, že software nedokáže rozeznat stejná okolí pixelů na obou spojovaných snímcích.



obr. 37: Test snímků +75 a +50

Pro následné testování byly zvoleny snímky mezi hodnotami 0 a 75. Tedy úhly +35 a -35 a zjištěnou hraniční hodnotou úhlu +65 a -65 ve směru k okrajům půlkružnice. V opačném směru spojení proběhlo velmi dobře, až po úhel 45 na opačných stranách půlkružnice. To je zapříčiněno tím, že program velice dobře rozezná stejná jedinečná okolí jednotlivých pixelů.

Z testu je patrné, že pro správné spojení snímků je potřeba daný objekt snímkovat při stejném cílení nanejvýše ze stanoviska o 45 stupňů od kolmého centrálního snímku. Pro snímky, které jsou zabrány z velkého úhlu je spojení velmi obtížné a je potřeba mnohem větší hustota snímkování, jelikož maximální úhel spojení se pohybuje mezi 15 až 25 stupni. Obecně lze tedy doporučit snímkovat daný objekt tak, aby snímky byly kolmé na objekt. Poté můžeme předpokládat správné propojení snímků v následném zpracování. Pro ilustraci je zde prezentováno kvalitní propojení mezi snímky +75, +60, +35, 0, -35, -60 a -75 s výsledným mračnem bodů. V tab. 3 jsou znázorněny všechny kombinace provedených testů s jejich výsledky.



obr. 38: Test snímků +75, +60, +35, 0, -35, -60 a -75



Použité snímky	Urovnané snímky	Počet bodů v mračnu	Ano / Ne
0 až 40	2/2	Přes 1000	Ano
0 – (-)45	2/2	850	Ano
0 – (-)50	0/2	500	Ne
(-)75 – (-)55	2/2	130	Ano
(-)75 – (-)50	0/2	53	Ne
30 – 70	0/2	0	Ne
30 – 65	0/2	15	Ne
30 – 60	2/2	340	Ano
(-)30 – (-)65	0/2	107	Ne
(-)30 – (-)60	2/2	631	Ano
30 – (-)30	2/2	215	Ano
35 – (-)35	0/2	69	Ne
(-)70 – (-)35 – 0 – 35 – 70	4/5	1500	Ano/Ne
(-)70 – (-)30 – 10 – 50	3/4	800	Ano/Ne
(-)50 – (-)10 – 30 – 70	3/4	850	Ano/Ne
(-)75 – (-)35 – 0 – 35 – 75	3/5	700	Ano/Ne
(-)45 – 0 – 45	3/3	1200	Ano
(-)75 – (-)50 – (-)30 – 25 – 0 – 25 – 50 – 75	7/7	1500	Ano

tab. 3: Výsledky funkce *Align Photos*

## 7 Test vertikálního překryvu snímků

Stejně tak, jako v předešlých dvou kapitolách, byla v této části diplomové práce z naměřených dat z terénu hledána hranice spojení, respektive nespojení snímků. Tentokrát se jednalo o úhel vertikálního spojení snímků při snímkování zájmového objektu. Pro test byla nejprve pořízena experimentální data technologií RPAS. Rozvržení testu a sběr dat je popsán blíže v následující kapitole. Stejně jako v kapitole 5 a 6, bylo zpracování testu provedeno v softwaru Agisoft Photoscan, tak i zde se budeme pokoušet o spojení snímků z odlišných úhlů, tentokrát vertikálních.

### 7.1 Sběr a popis dat

Opět byla zvolena lokalita blízko Stavební fakulty ČVUT. Objektem zájmu byla socha kardinála Berana, před budovou České biskupské konference.



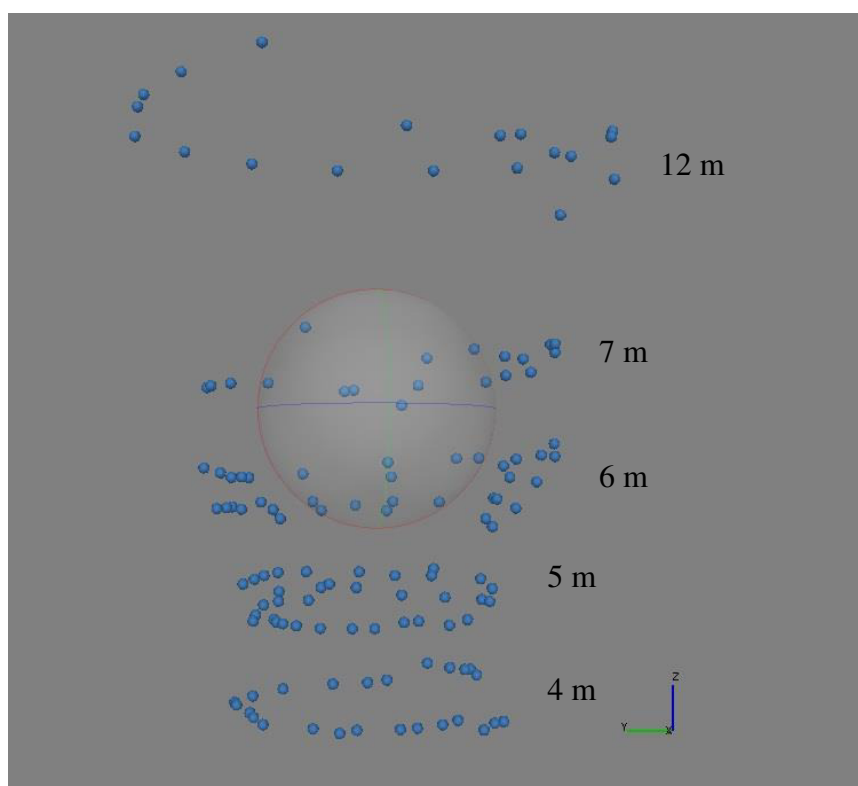
obr. 89: Ukázka sochy kardinála Berana

Snímkování sochy bylo provedeno dne 7. 5. 2018 za slunečného počasí a teploty okolo 15 stupňů Celsia. Data byla pořízena fotoaparátem FC220, který je součástí RPAS Mavic Pro Premium. Nastavení fotoaparátu je uvedeno v tab. 4.

Rychlost ISO	ISO – 100
Závěrka clony	f/2.2
Délka expozice	Proměnlivá
Ohnisková vzdálenost	5 mm

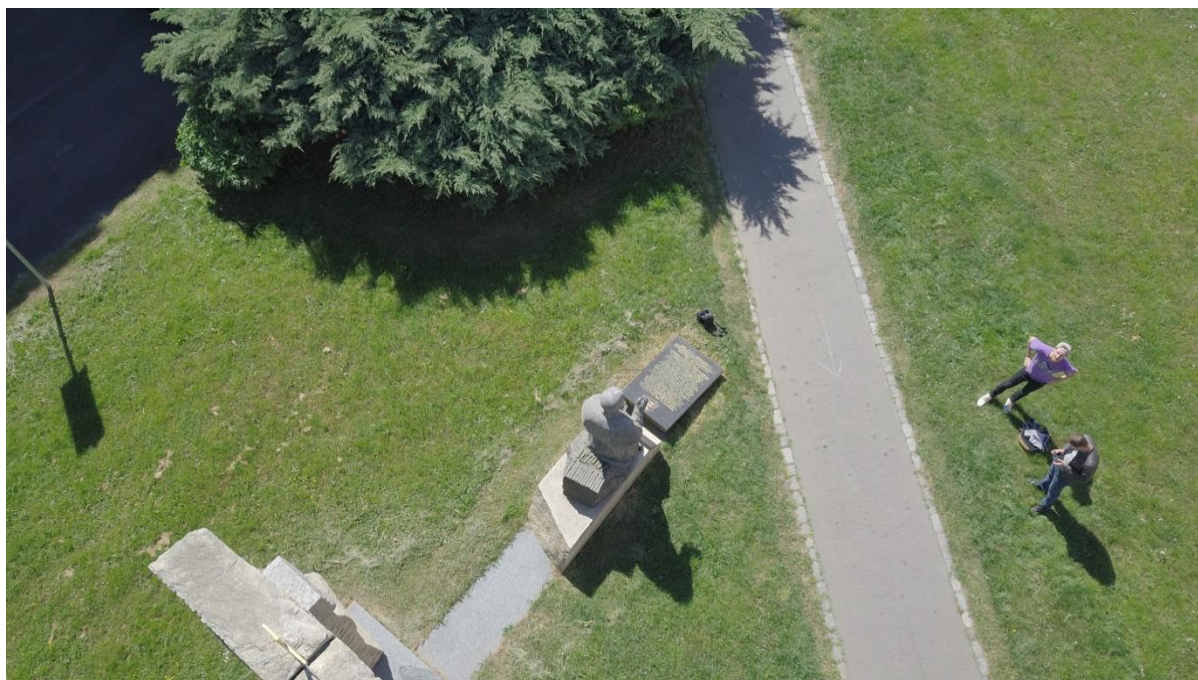
tab. 4: FC220 Mavic Pro Premium

Za účelem testu byla data postupně pořízena z 5-ti různých letových hladin a to z 4, 5, 6, 7 a 12 metrů od povrchu země. viz obr. 40. Z těchto různých letových hladin byla poté snímkována socha kardinála Berana. Postupně se zvyšováním letové hladiny byla kamera na nosiči nakláněna tak, aby socha byla stále cílem snímkování ( obr. 41).



obr. 40: Ukázka rozložení jednotlivých letových hladin





obr. 41: Ukázka snímků z letové hladiny 12 metrů

Všechny pořízené snímky byly uloženy ve formátu JPEG do interní paměti dronu. Pro lepší přehlednost další práce s daty byly jednotlivé snímky pojmenovány podle letové hladiny a dále pak očíslovány dle pořadí snímkování.

## 7.2 Testování hranice spojení snímků

Tento experiment hledání hranice možného spojení snímků na základě odlišného vertikálního snímkovacího úhlu, můžeme popsat jako hledání co největšího úhlu spojení dvou snímků pořízených pod jiným vertikálním úhlem.

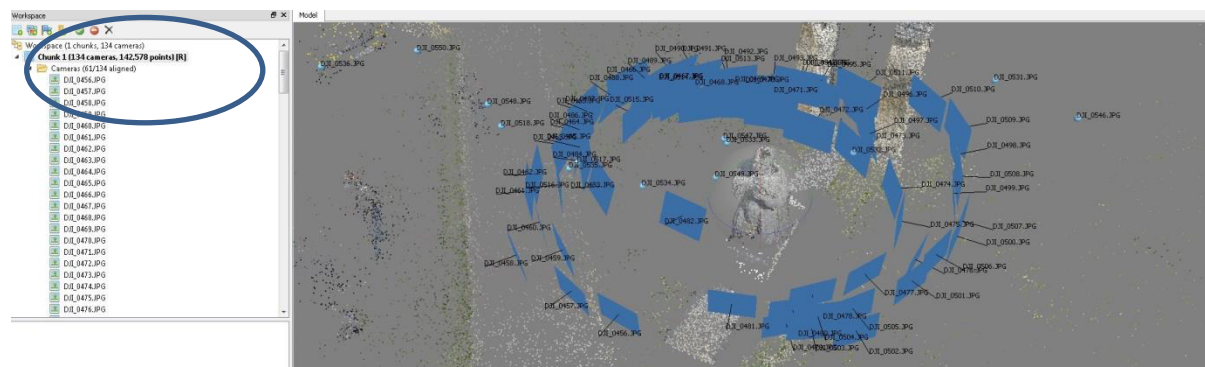
Obdobně jako v předcházejících kapitolách byly do softwaru Agisoft Photoscan nahrány všechny snímky a prvním krokem bylo spojení všech snímků pomocí funkce *Process - Align Photos* s nastavenou přesností *High*. Snímky ze všech letových hladin se úspěšně spojily s výsledkem 134 propojených snímků a ořezané řídké mračno obsahovalo 75 000 bodů. viz obr. 42.





obr. 42: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno

Pro tento test byla jako základní letová hladina zvolena hladina 4 metrů od země. V prvním testu byly tedy využity snímky z výšky 4 a 5 metrů. Oba prstence snímků okolo objektu se propojily s kvalitním výsledkem a více jak 100 000 body v mračnu. Následujícím testem bylo propojení prstence snímků z 4 a 6 metrů. Test měl obdobný výsledek. Dalším testovaným prstencem byly snímky z letové hladiny 7 metrů. Výsledkem znovu bylo kvalitní propojení všech snímků a vytvoření velkého množství bodů v řídkém mračnu. Viz obr. 43.



obr. 43: Test hladin 4 a 5

Takto byly provedeny testy pro všechny letové hladiny a bylo zjištěno, že při takto hustém rozmístění snímků ve všech letových hladinách, dojde k propojení pro každý z prstenců. Jelikož došlo k propojení nejnižší hladiny s tou nejvyšší, lze prohlásit, že dojde k propojení všech možných kombinací, při použití všech snímků v jednotlivých letových hladinách. V tomto testu bylo především dokázáno, že program Agisoft potřebuje na kvalitní propojení zejména větší množství snímků s pravidelným rozmístěním stanovišť okolo objektu. Provedené testy a jejich výsledky jsou popsány v tab. 5.



Použité snímky	Urovnané snímky	Počet bodů v mračnu	Ano / Ne
4 m – 5 m	61/61	143 000	Ano
4 m – 6 m	61/61	119 000	Ano
4 m – 7 m	45/45	110 000	Ano
4 m – 12 m	45/45	116 000	Ano
5 m – 6 m	70/70	152 000	Ano
5 m – 7 m	54/54	137 000	Ano
5 m – 12 m	54/54	149 000	Ano
6 m – 7 m	54/54	113 000	Ano
6 m – 12 m	54/54	127 000	Ano
7 m – 12 m	38/38	116 000	Ano

tab. 5: Výsledky funkce *Align Photos*

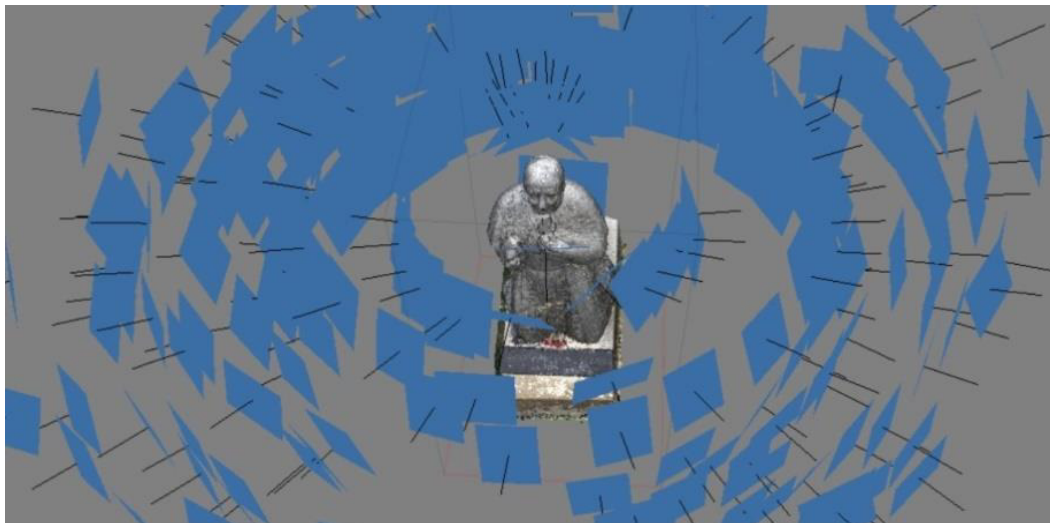
## 8 Porovnání 3D modelů

V této kapitole je popsáno porovnání vytvořených 3D modelů různými metodami. Jedná se o model z IBMR za použití dat z pozemní fotogrammetrie spolu se snímky z RPAS. Další model byl vytvořen z laserového skenování. Poslední model byl poté zhotoven z obou metod současně, za pomoci software na zpracování mračen bodů RealityCapture. Hlavním produktem jsou tři zpracované modely a jejich porovnání v programu CloudCompare. Dalším výstupem je zhodnocení programu RealityCapture, který je vhodným softwarem pro zpracování těchto dat.

## 8.1 Sběr a popis dat

### 8.1.1 Data pro model IBMR

Pro tuto část diplomové práce byla vybrána data z předešlé kapitoly, test vertikálního překryvu snímků, tj. pořízené snímky dronem Mavic Pro Premium. Jako další dostupná data sochy kardinála Berana byly využity snímky z dvou předcházejících let (2016,2017) z předmětu Fotogrammetrie 4 – Projekt. Tyto snímky byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS 5D Mark II. Pro model bylo nakonec využito celkem 293 snímků. Velmi husté rozložení snímků znázorňuje následující obr. 44.



obr. 44: Ukázka rozložení snímku

### 8.1.1 Data pro model z laserového skenování

Pro model generovaný technologií IBMR byla data laserového skenování opět využita z předchozích let z výuky. Tentokrát však bylo použito pouze laserové skenování z roku 2017. Skenování probíhal postupně na 7 stanovištích. Data obsahují 7 různých mračen bodů. Všechny skeny byly pořízeny skenerem Surphaser 25HSX. Skenování probíhalo postupně po stanoviskách dokola celé sochy tak, aby byla zabráněna co nejlépe ze všech úhlů a mohlo dojít k následnému spojení skenů při zpracování.

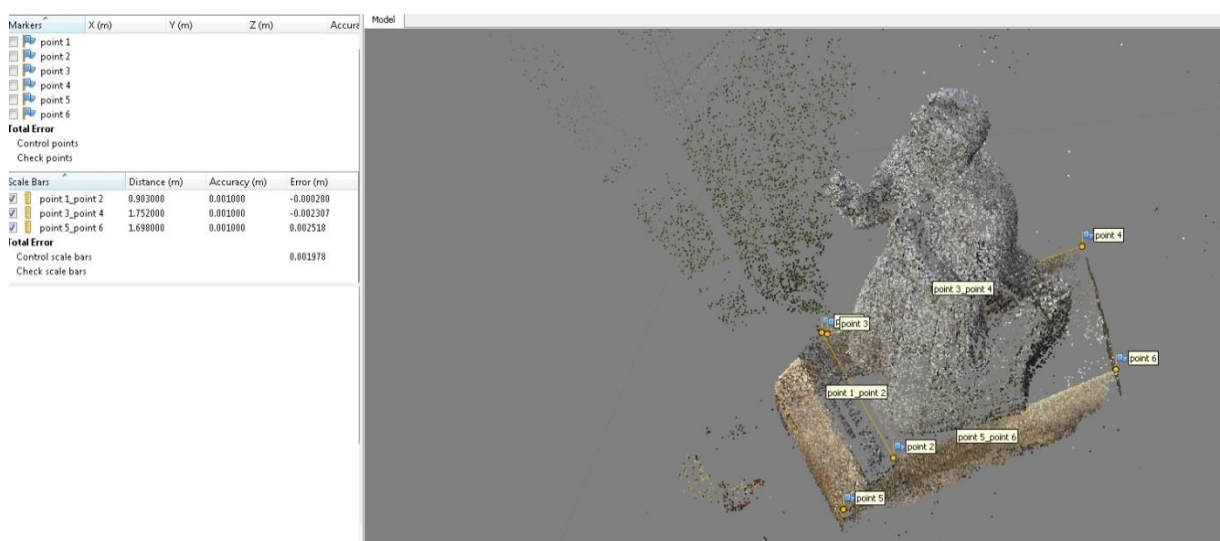


obr. 45: Ukázka pořízení dat laserového sledování

## 8.2 Zpracování modelu IBMR

3D model pomocí metody IBMR byl zpracován programem Agisoft PhotoScan, ve kterém probíhala většina prací. Tento program je v podstatě plně automatický a práce na obdobných projektech je popsána v mnoha publikacích, proto není třeba se zabývat příliš podrobně postupem zpracování. Hlavním výstupem bylo poté obarvené mračno bodů, které bylo použito pro porovnání s dalšími modely vytvořenými odlišnými metodami.

Prvním krokem je samozřejmě nahrání všech dat do programu a vytvoření tzv. *Chunk* do tohoto souboru nahrajeme pořízená data pomocí funkce *Add photos*. Následně v roletovém menu souboru se snímkem vybereme možnost *Process - Align photos*. S nastavenou přesností *High* a zbylými základními hodnotami, dostaneme po určité době urovnané pozice snímku a tzv. řídké mračno bodů. Výsledných urovnaných snímků bylo 290 z 290 a následně pak hrubě ořezané řídké mračno obsahovalo přes 250 tisíc bodů.



obr. 46: Řídké mračno s vlčovacími body

Dalším krokem je nahrání vlčovacích bodů a délek do programu pro určení rozměrů a měřítka celého modelu. Na snímcích se v programu postupně vyberou body, od kterých byla v terénu změřena vzdálenost a ta je poté aplikována do vytvářeného modelu. Body a vložené délky lze vidět na obr. 46. Po vložení bodů se provedlo svazkové vyrovnaní a pomocí funkcí na práci s mračny bylo mračno zbaveno nežádoucích bodů.

Předposledním krokem pro dokončení modelu je vytvoření tzv. hustého mračna bodů, a to pomocí funkce *Build Dense Cloud*. V následném dialogovém okně byla zvolena hodnota *Medium* za účelem možného zpracování na osobním počítači (8 GB RAM). Režim filtrace byl nastaven na hodnotu *Moderate*. Toto husté mračno bodů je zároveň námi požadovaným výsledkem pro další porovnávání. Takto vytvořené mračno mělo na konci 4.7 milionů bodů.





obr. 47: Husté mračno bodů IBMR

Jako poslední krok bylo provedeno generování polygonové sítě funkcí *Build Mesh*. Jelikož se jedná o uzavřený objekt, bylo použito pro generování sítě sochy nastavení *Surface type - Arbitrary*. Takto vygenerovaná síť měla 240 tisíc polygonových obrazců. Mračno bodů i výsledný texturovaný model byly vyexportovány do formátu PLY respektive OBJ.



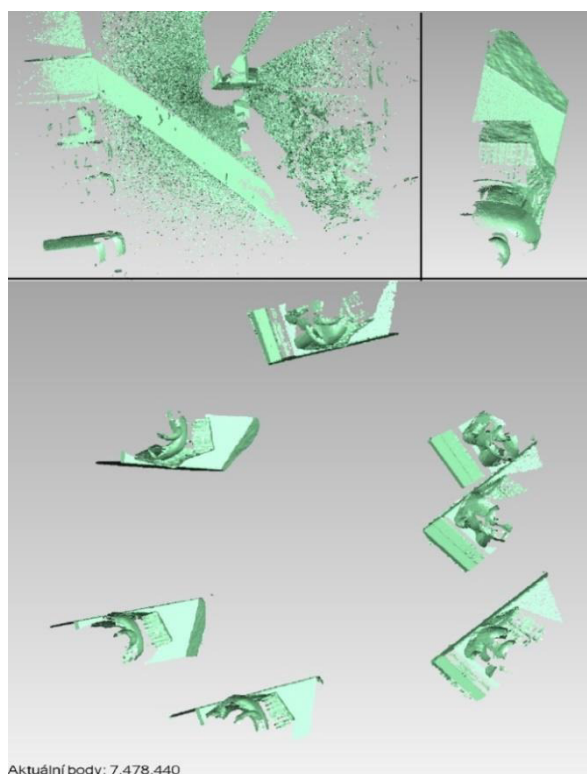
obr. 48: Detail hustého mračna IBMR



## 8.2 Zpracování modelu z laserového skenování

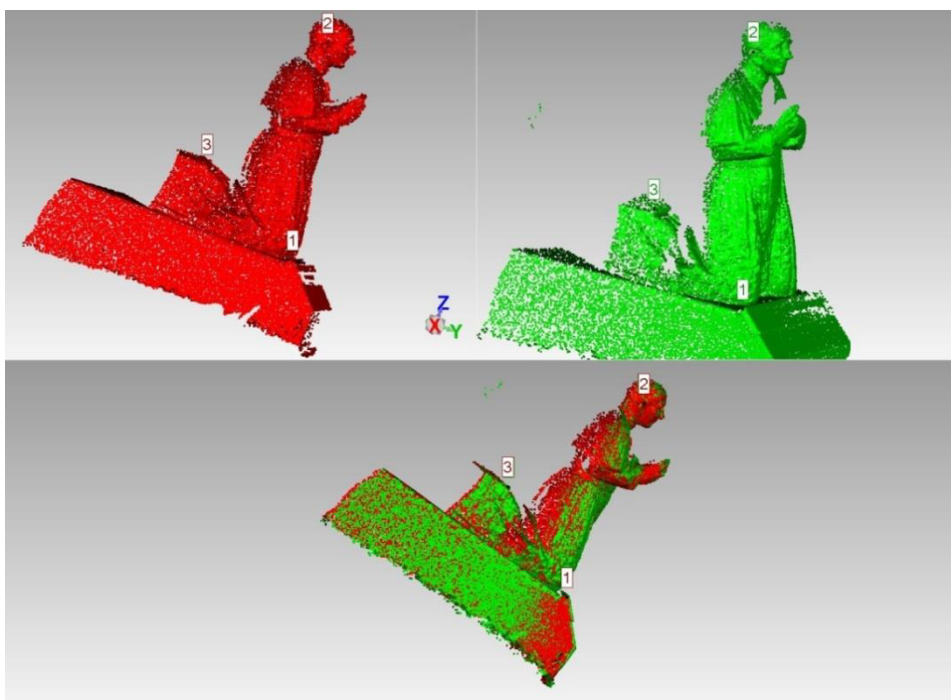
Ke zpracování 3D modelu z laserového skenování byl použit program Geomagic Studio. V tomto programu probíhaly práce s naskenovanými mračny. Příkladem může být ořezání mračna bodů nebo velmi důležité spojení všech skenů do jednoho kompaktního celku, ze kterého poté dostaneme výsledek. V programu musí být provedeny manuální úpravy mračen, ale zároveň v mnoha krocích také pracuje plně automaticky. V následující části je nastíněn velmi stručně postup prací při vytváření modelu.

Nejprve tedy do programu byly nahrány všechny pořízené skeny ve formátu \*.xyz. Všech 7 skenů se poté zobrazí ve svém vlastním souřadnicovém systému a celé zobrazení je velmi zmatečné. Postupně se tedy musí každý sken manuálně ořezat okolo zájmové oblasti. Pro lepší přehlednost skenu je dobré využít funkce *Shading – Shade Points*. Neořezaná mračna bodů měla celkově 111.5 milionů naskenovaných bodů. Po ořezání dat se počet bodů zredukoval na 7.5 mil.



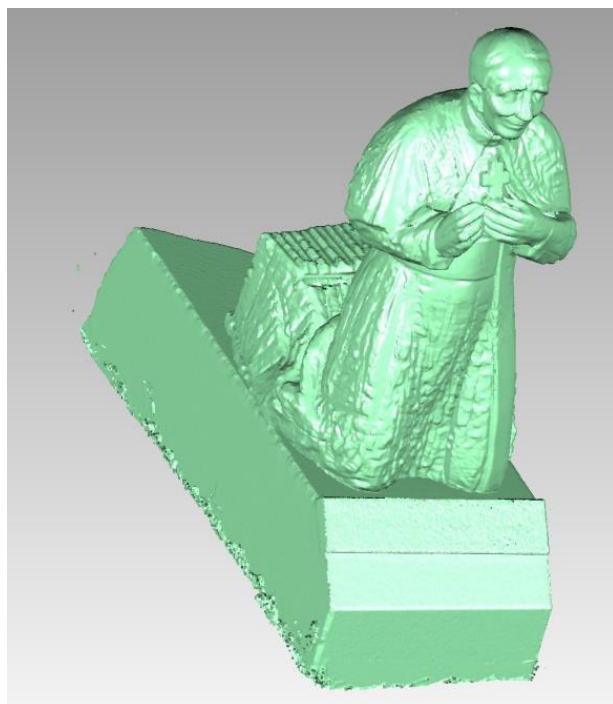
obr. 49: Ořezané nerovnané skeny v Geomagic

Jedním ze zásadních kroků pro vytvoření modelu je spojení všech skenů do jednoho celku. Než je toto možné provést, je nutno všechny skeny převést do stejného systému souřadnic. Tento postup byl proveden pomocí funkce *Alignment - Manual Registration*. Nejprve je nutno zvolit jedno z mračen jako fixní a další jako upravované. Operace vyžaduje, aby na fixním a upravovaném mračnu byly manuálně, co s největší přesností, zvoleny alespoň tři identické body. Program poté sám upravovaný sken natočí. Operace musela být provedena pro celkem šest upravovaných skenů.



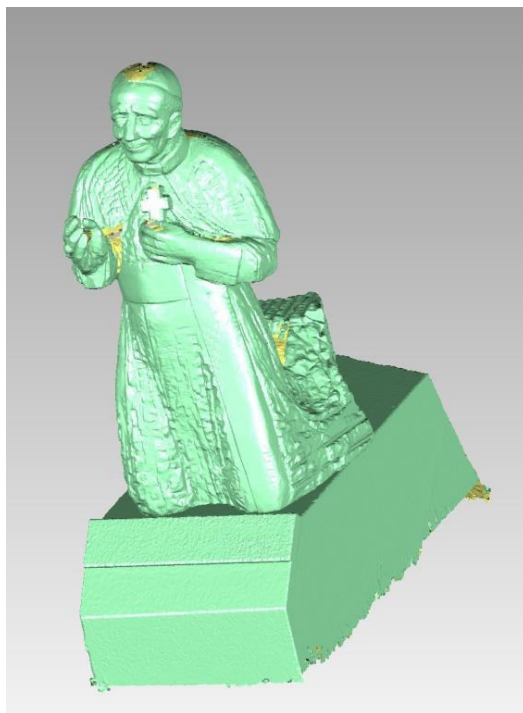
obr. 50: Manuální registrace

Po úspěšném spojení pomocí manuální registrace, byla jako další krok provedena registrace globální. *Alignment - Global Registration* je automatický iterační nástroj, který mračna dodatečně, na základě minimální vzdálenosti mezi sebou vyrovná. Následně je možné již provést spojení mračen do jednoho mračna, a to funkcí *Combine Point Objects*. Celý proces je zakončen úpravou dat, za účelem odstranění odlehlých bodů a redukci šumu v datech. Odstranění odlehlých bodů a shluků se provedlo *Select – Disconnected Components* s nastavením *Low* a *Select – Outliers* s hodnotou 85. Pro redukci šumu byla použita funkce *Reduce Noise* s nastavením *Prismatic shapes(aggressive)* s počtem iterací 2. Výsledné mračno bodů je vidět na obr. 51.



obr. 51: Husté mračno po spojení všech bodů

Za účelem vytvoření hotového 3D modelu bylo provedeno generování polygonové sítě funkcí *Wrap*. Kompletně zpracovaný model z laserového skenování je na obr. 52.



obr. 52: Výsledný zasítovaný model



## 8.3 Zpracování modelu v RealityCapture

V softwaru RealityCapture, který je nyní jedním z předních softwarů na vytváření kvalitních 3D modelů, byl v této části zhotoven model kombinací laserového skenování a IBMR. Výsledný model byl použit pro porovnání výsledků s modely z předešlých kapitol. Software RealityCapture je z větší části plně automatický, přesto však je postup popsán podrobněji, jelikož se jedná o inovativní technologii, která není v oblasti vytváření 3D modelů natolik známa, jako předcházející postupy. Pro tuto část zpracování musel být použit hardware a software vlastněný katedrou geomatiky, jelikož RealityCapture je placený software a je potřeba větší výpočetní kapacita.

### 6.1.3 RealityCapture a kombinace laserového skenování a IBMR

První krokem bylo nahrání dat do programu ve formátu JPEG a PTX. Celkově bylo využito 290 snímků a 7 skenů. Jedním z nejzásadnějších kroků celého zpracování, je urovnání snímků a skenů. V RealityCapture se tento krok provede pomocí funkce v menu *Aligment – Align Photos*. Výhodou je, že můžeme pustit urovnání společně pro skeny, ale zároveň také pro snímky dohromady. Popřípadě nejdůležitější funkce jsou také v menu *Workflow* a zde taktéž *Align Photos*. Po spuštění se snímky a skeny začnou urovnávat automaticky. Jednou ze zásadních výhod programu je, že můžeme i při probíháních výpočtech nadále s programem pracovat. Další z výhod se projeví hned při výpočtu pozic snímků a skenů, a to je rychlost výpočtů. Program pracuje řádově mnohem rychleji než program Agisoft, avšak i zde je hardwarová náročnost vysoká a odvíjí se od počtu zpracovávaných snímků a laserových skenů vstupujících do výpočtu. Především se jedná o paměť RAM při zpracování větších projektů. Dále pak o rychlost procesoru, která rozhoduje o rychlosti výpočtů. Výsledek funkce *Align Photos* můžeme vidět na následujícím obr. 53.

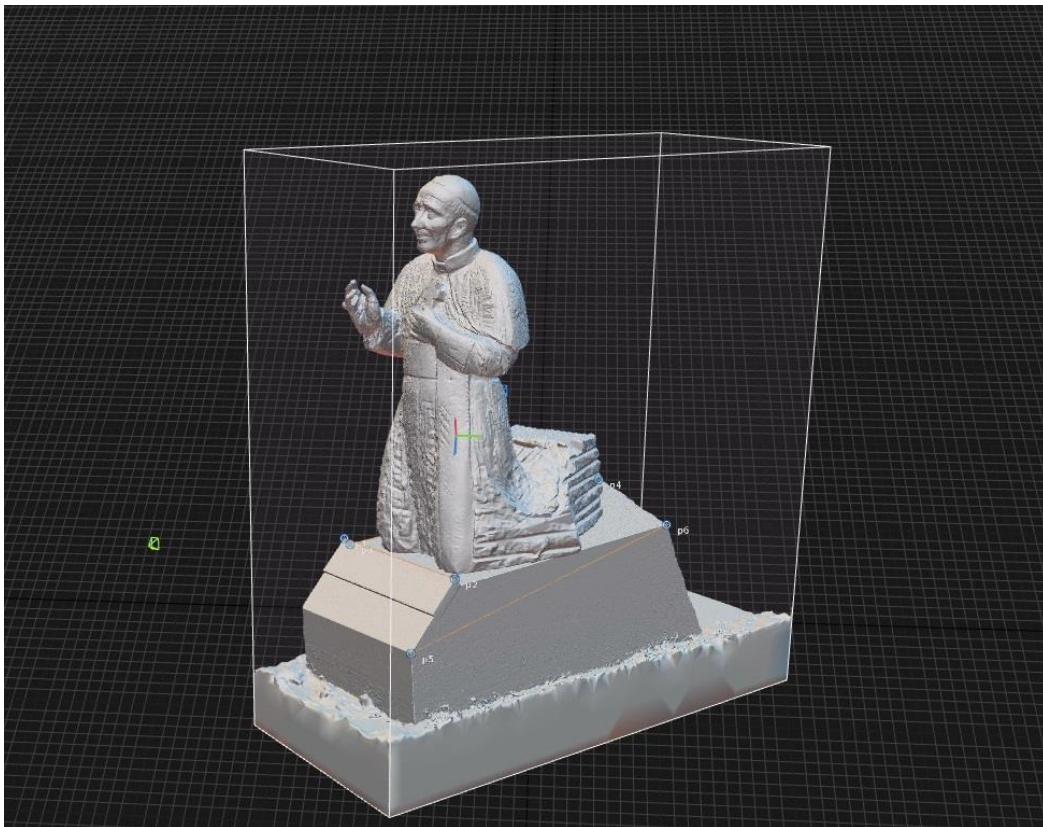


obr. 59: Řídké mračno RealityCapture

Jelikož zde byla použita pro výpočet kombinace fotogrammetrické metody IBMR a laserové skenování, již vytvořené řídké mračno bodů má po urovnání své měřítko a nemusíme dále vkládat do programu vlicovací body po případě využít naměřené hodnoty vzdáleností z terénu. Toto je jedna z hlavních výhod spojení obou metod. Dále pak je tato skutečnost velice důležitá pro následné porovnání mračen bodů, které bude provedeno v následující kapitole. Pro případné vložení vlicovacích bodů a orientaci modelu do vybraného systému souřadnic, můžeme využít funkci *Create Control Point*. Následně pak můžeme na fotografiích označit body, které dané souřadnice přísluší. V RealityCapture je zadávání tzv. *Control Points* příjemné, jelikož při umístění bodu na správnou pozici na snímku se nám obraz automaticky přiblíží a zobrazí se záměrný kříž.



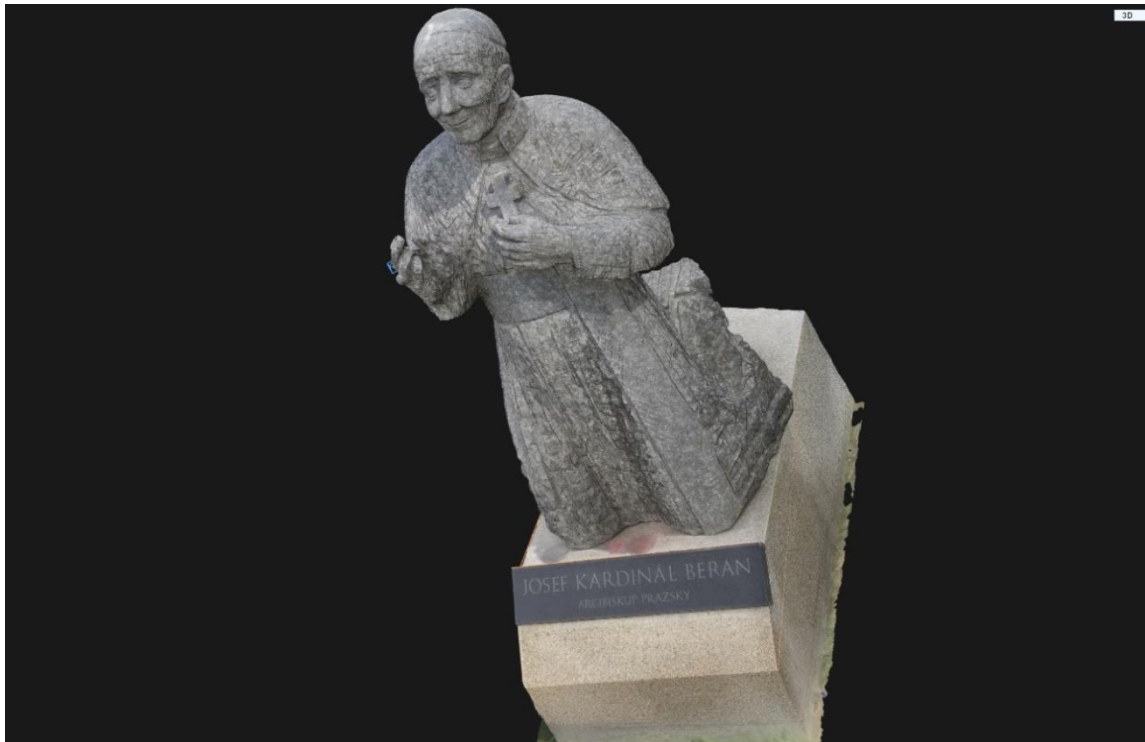
Dalším krokem je vytvoření hustého mračka bodů. Zde v RealityCapture dochází již při vytváření hustého mračka také k vytvoření modelu. Myšleno polygonové síť tzv. *Mesh*. Tento krok bývá ve většině případů oddělen. Zpracování modelu bylo nastaveno na přesnost *Normal Detail* a to z důvodu, že model z programu Agisoft byl vytvořen na kvalitu *Medium*, díky tomu by si měly přibližně oba modely odpovídat. Cílem tedy bylo vytvořit model, který bude porovnatelný s předešlými výsledky (obr. 54).



obr. 54: Zasítovaný model RealityCapture

Jak je vidět na předešlém obrázku, model se vytvoří bez obarvení a textury. Tyto další dva nezbytné kroky se vypočítají funkcí *Colorize* a *Texture*. Výsledek provedení těchto kroků je na obr. 55. Pro účel porovnání mraček bodů je nutno z programu vyexportovat pouze husté mračko bodů. To se provede voláním funkce *Mesh* v menu *Reconstruction* a sub-menu *Export* a zde se nastaví jako výchozí formát *.XYZ point cloud*. Toto je jediná možnost, jak z programu RealityCapture vyexportovat pouze obarvené husté mračko bodů. Všechny další možnosti a formáty nám vyexportují již zasítovaný model tzv. *Mesh*.





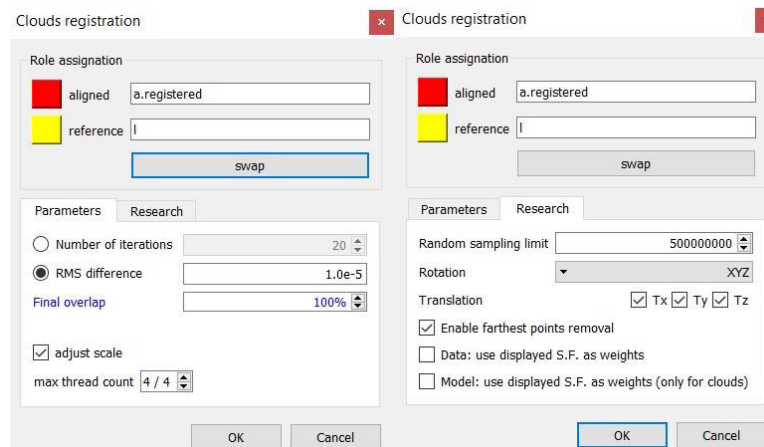
obr. 55: Model s texturou



obr. 56: Detail modelu RealityCapture

## 8.4 Porovnání mračen v CloudCompare

K geometrickému porovnání mračen bodů byl použit program CloudCompare. Prvním krokem je otevření všech mračen ve formátu \*.OBJ v záložce *File - Open*. Následně byly modely ztotožněny (transformace) jednotlivých mračen bodů. Jako referenční model byl použit model z laserového skenování a zbylé dva byly transformovány. Na obr. 57 je vidět nastavení funkce *Finely register (roughly) aligned entitites* (Přesné zarovnání modelů). Parametr *RMS Difference* (Root Mean Square neboli kvadratický průměr) byl nastaven na hodnotu desetiny milimetru. Dále byla zaškrtnuta možnost *Adjust scale* – pro přesnější výsledky transformace, a *Enable farthest points removal*, která během výpočtu vyloučí odlehlých body mračen. Poslední parametr *Random sampling limit* byl nastaven na 500 000 000 bodů.



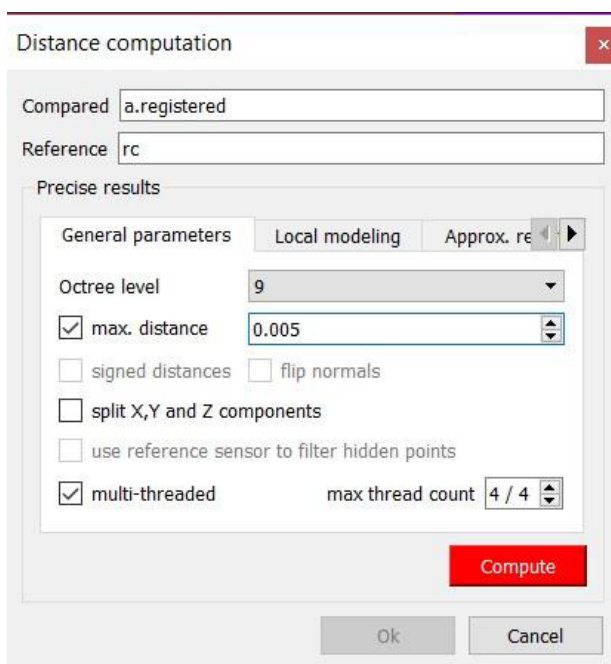
obr. 57: Nastavení funkce *Finely register*

Tímto způsobem byly postupně vypočteny transformace pro všechny modely. Dosažené odchylky byly v řádu milimetrů pro porovnávaná mračna s laserovým skenováním. Transformace mezi mračny s RealityCapture a IMBR byly odchylky v řádu centimetrů a jsou uvedeny na obr. 58. Dalším krokem byl statistický výpočet odlehlostí jednotlivých modelů. Pro tento výpočet byla použita funkce *Compute cloud/mesh distance*, která slouží pro výpočet vzdáleností mezi dvěma mračny. Jako referenční model byl zvolen model z laserového skenování. Na obr. 59 jsou vyobrazeny parametry pro výpočet vzdáleností v dialogovém okně funkce. Parametr *Octree level* byl nastavena na hodnotu 9 a parametr *Maximal distance* byl z důvodu prokazatelnějších výsledků nastaven na hodnotu 5 mm a pro rozdíl mezi mračny z RealityCapture a IMBR na 25 mm.



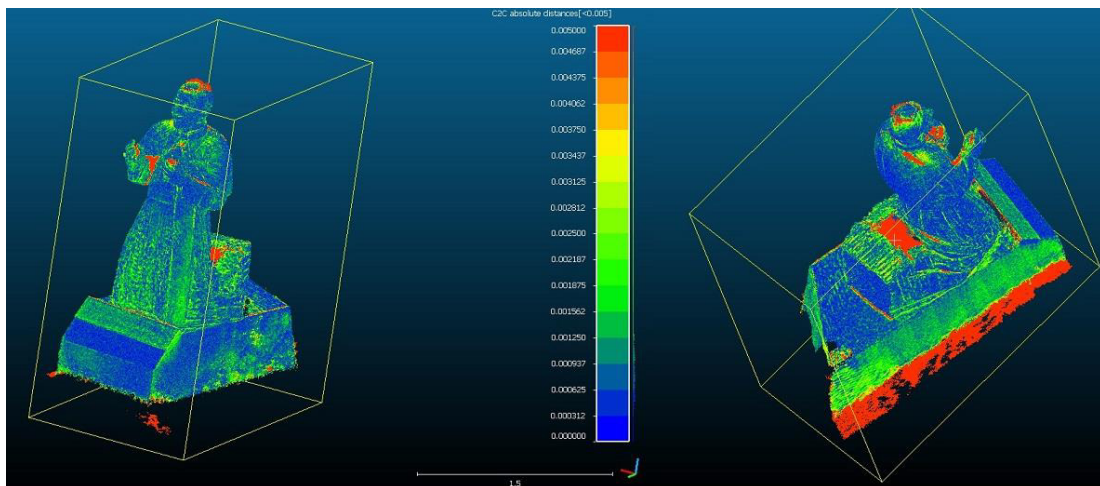
Final RMS: 0.000932547 (computed on 842312 points)	Final RMS: 0.000761737 (computed on 1160056 points)	Final RMS: 0.0205312 (computed on 1017754 points)
----- Transformation matrix 0.999 -0.001 0.020 5.632 0.001 0.999 -0.011 -0.495 -0.020 0.011 0.999 -63.893 0.000 0.000 0.000 1.000 -----	----- Transformation matrix 1.003 -0.005 0.015 12.863 0.005 1.003 -0.013 16.580 -0.015 0.013 1.003 -43.126 0.000 0.000 0.000 1.000 -----	----- Transformation matrix 0.979 0.008 0.006 -69.673 -0.008 0.979 0.004 -47.224 -0.006 -0.004 0.979 -36.085 0.000 0.000 0.000 1.000 -----
Scale: 0.999558 (already integrated in above matrix!)	Scale: 1.00295 (already integrated in above matrix!)	Scale: 0.978643 (already integrated in above matrix!)
----- Theoretical overlap: 100% -----	----- Theoretical overlap: 100% -----	----- Theoretical overlap: 100% -----

obr. 58: Výsledky transformací zprava ( laser-IMBR, laser-RC, RC-IBMR)

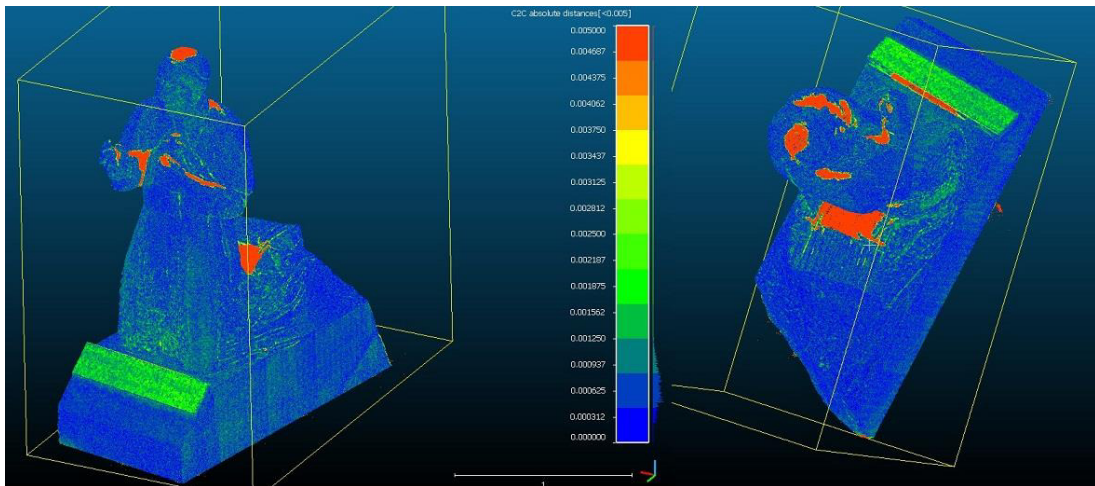


obr. 59: Nastavení funkce compute cloud distance

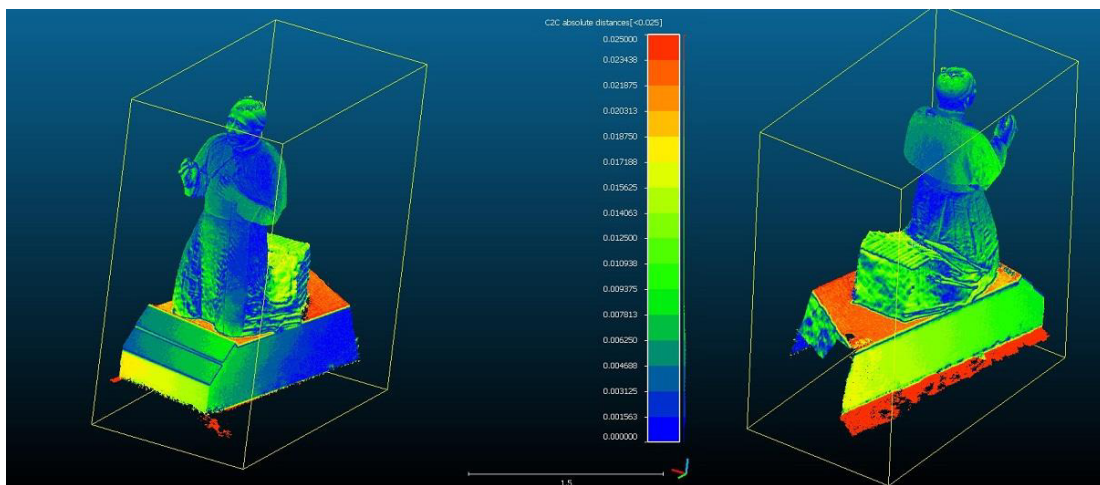
Vypočtené rozdíly mračen jsou vyobrazeny na dalších přiložených obrázcích a dále pak také histogramy těchto vypočtených rozdílů, v kterých můžeme pozorovat procentuální rozmístění jednotlivých rozdílů od referenčních mračen. U prvního a druhého výpočtu bylo referenční mračno z laserového skenování. Pro zhodnocení výsledků mezi mračnem vytvořeným metodou IBMR a kombinací metod laserové skenování a IBMR byl obdobně vypočten rozdíl těchto dvou mračen, kde referenčním mračnem bylo mračno z programu RealityCapture.



obr. 60: Rozdíl mračen laserového skenování - IBMR



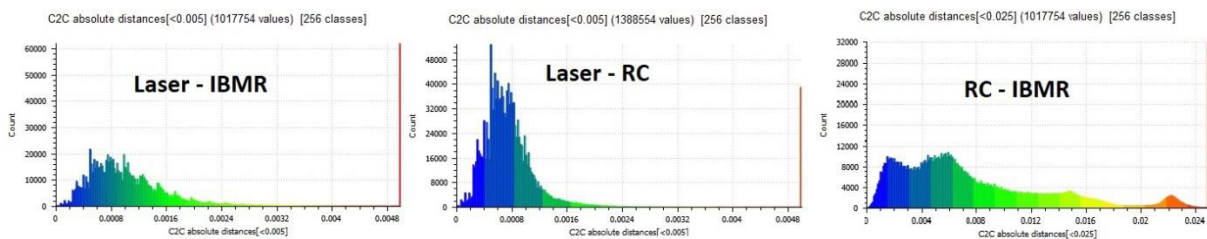
obr. 61: Rozdíl mračen laserového skenování - RealityCapture



obr. 62: Rozdíl mračen RealityCapture - IBMR



Jak je vidět na předcházejících rozdílech mračen a histogramech, nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití kombinace metod v programu RealityCapture. V oblasti našeho zájmu, kterým je socha kardinála Berana nedosahuje rozdíl mračen ve více jak 70 procentech bodů mračna hodnot 1 milimetru, a to je především zapříčiněno tím, že program pro výpočet mračna použil také laserové skenování. Tyto odchylky v řádech setin milimetrů jsou v podstatě zanedbatelné a výsledné mračno bodů se liší od laserového skenování jen v místech, kde socha díky zákrytu některých částí není zcela zabrána skenerem. Příkladem může být temeno hlavy sochy, případně část mezi vzpřímeným tělem a koncem sochy. Na obr. 61. vyobrazeno červenou barvou. Stejně je tomu tak i u mračna z programu Agisoft. Rozdíl u mračna metody IBMR dosahuje také velice dobrých výsledků a rozmístění hodnot rozdílu si můžeme především všimnout na histogramu z obr. 63. Více jak 80 procent hodnot je do vzdálenosti 2 mm od referenčního laserového skenování. Porovnání mračen z RealityCapture a programu Agisoft, již nepřináší tak značně přesné výsledky. Pro účel testu, jak již bylo zmíněno, musela být stupnice a maximální možný rozdíl modelů poupraven na hodnotu 25 mm. Přesto však více jak 70 procent všech bodů vypočtených pouze metodou IBMR je maximálně vzdáleno 10 mm od referenčního mračna z RealityCapture.



obr. 63: Rozdíl mračen – histogramy

## 8.4 Porovnání metod zpracování

Tato kapitola je zaměřena na závěrečné shrnutí všech výše uvedených metod na základě výsledků získaných během zpracování této práce. Metody byly hodnoceny především na základě časové a finanční náročnosti a kvality výstupu. Závěr je věnován zhodnocení programu RealityCapture.



V následující tabulce jsou přiřazeny hodnoty 1-3, které udávají pořadí metod v jednotlivých kritériích (1 nejlepší – 3 nejhorší).

IMBR	Laserové skenování	Kombinace metod		
1	2	3	sběr dat	časová náročnost
3	2	1	zpracování	
3	2	1	kvalita výstupu	
2	1	3	hardwarová náročnost	
2	2	1	náročnost zpracování	
1	2	3	finanční náročnost	

tab. 6: Zhodnocení metod

Sběr dat je nejobtížnější pro kombinaci obou metod, jelikož musíme pořídit laserové skeny i fotografie pro následné zpracování, především pro určení textury a barvy modelu. Zpracování naopak trvá při kombinaci metod nejkratší dobu, přestože máme k dispozici nejvíce dat. Při využití programu RealityCapture dojde k automatickému propojení, jak laserových skenů a pořízených fotografií. Zároveň také odpadá manuální vkládání vličovacích bodů a v neposlední řadě také program provádí výpočty rychleji. Kvalitou výstupu můžeme označit kombinaci metod jako nejlepší, a to především v případech, kdy náš výstup má být reálně obarven. Popřípadě když se jedná o komplexní projekt s využitím spojení obou metod sběru dat. Hardwarová náročnost stoupá ve všech případech s množstvím dat, proto je kombinace skenování a obrazové korelace na posledním místě, přestože program RealityCapture je výborně odladěný a pracuje velmi rychle. V náročnosti zpracování je znovu nejlepší kombinace metod, a to především díky programu RealityCapture. Zpracování zde probíhá intuitivně a velmi rychle. I proto je kombinace metod v RealityCapture na posledním místě z hlediska finanční náročnosti, jelikož je program velice drahý. Dalším faktem je, že musíme pro sběr dat využít laserový skener i fotoaparát. Program pracuje spolehlivě a vytvořený model byl na kvalitnější úrovni přesnosti viz předcházející kapitola. Taktéž při porovnání detailu vzhledu modelu na obr. 56 a obr. 48 lze říci, že vytvořený model má velmi pěkný vzhled a vypadá velice reálně.





## 9 Diskuze

V diplomové práci jsme se zabývali především zjištěním hranice spojení snímků z pozemní fotogrammetrie, jen v případě vertikálního přeryvu byly snímky pořízené systémem RPAS, a proto pro další ověření výsledků by bylo následně v dalších pracích zajímavé ověřit, zda zjištěné maximální hodnoty pro spojení snímků jsou stejné i pro další metody sběru dat, jako jsou letecké snímky ze systémů RPAS. Dalším z testů by mohl být pokus o spojení rozdílných kvalit a typů dat. Například zda na propojení dat má vliv rozdílný rozměr a rozlišení pořízených snímků. Pro testy by mohli být pořízeny snímky v rozdílných formátech 16:9 a 4:3 stejným fotoaparátem, popřípadě dvěma či více fotoaparáty.

Jedním z hlavních faktorů propojení či nepropojení snímků bylo také použité softwarové vybavení, kterým byl program Agisoft. Proto by pro další testování mohl být zvolen jiný software a bylo možné sledovat a zjistit, zda jsou výsledky testů podobné či se od sebe výrazně liší. Pro tyto testy by mohl být použit i velmi moderní program RealityCapture, s kterým bylo pracováno i v této diplomové práci. Eventuálně i jiný fotogrammetrický program, který se využívá pro zpracování metody IBMR.

V druhé části práce jsme se zaměřily na zpracování, tvorbu a porovnání hustého mračna bodů, které je dále využíváno na tvorbu 3D modelů, a to především na tři hlavní metody tvorby mračen, kterými jsou laserové skenování, metoda IBMR a jejich kombinace. Pro další porovnání výsledných mračen by mohly být vytvořeny mračna v programu RealityCapture, jen metodou IBMR nebo jen spojením laserových skenů. Mračno vytvořené metodou IBMR bychom dále porovnávali pouze s mračnem vytvořeným v programu Agisoft, zde by bylo zajímavé sledovat, zda jsou oba modely ve správném měřítku. Jelikož v návodu programu RealityCapture výrobci doporučují při zadávání vlíčovacích bodů spíše menší počet fotografií pro správné určení polohy bodu. Naopak v programu Agisoft je doporučeno označení totožných bodů na pokud možno všech fotografiích, kde je zadávaný bod vidět. Následně poté porovnat spojená mračna z laserového skenování z programu Geomagic, kde spojení probíhá částečně manuálně, a spojení mračen z programu RealityCapture, kde dojde ke spojení plně automaticky. Dále porovnání výsledků zpracovaných modelů, jejich kvality rozlišení a textury, ze všech zpracovaných mračen bodů, kde kvalita zasítovaných modelů v návaznosti na počet bodů v hustém mračnu, která je základem pro výpočet 3D modelů.



## 10 Závěr

Touto diplomovou prací jsem se pokusil popsat problematiku propojení snímků v kontextu pozemní a letecké fotogrammetrie. Hlavním cílem bylo nalezení hraničních pásem, při kterých se fotografované snímky spojí a my můžeme dále s těmito daty pracovat a vytvářet kvalitní 3D modely metodou optické korelace. Tyto poznatky nám také mohou pomoci při optimalizaci sběru dat. S využitím poznatků z této práce lze navrhnout nejvýhodnější, rychlejší a ve výsledku lepší sběr dat, který poté nebude obsahovat snímky, které se při následném zpracování v softwaru nepodaří propojit a tak budou nadbytečné. Dalším s hlavních cílů práce bylo porovnání vytvořených hustých mračen bodů odlišnými metodami a různými softwarovými prostředky.

Práce je rozvržena tak, aby byl čtenář na začátku seznámen s jednotlivými metodami sběru dat. Spolu s nimi jsou také představeny tři metody jejich následného využití pro tvorbu 3D modelů společně s příkladovými studii z tuzemska i zahraničí. Pro účely testování a hledání příslušných hranic spojení byly dle navržených testů pořízeny snímky vybraných objektů, které byly vhodné k nalezení výsledků jednotlivých testů. Dále pak byly zapůjčeny laserové skeny a snímky pro následné zpracování a tvorbu hustých mračen.

Jedním z primárních výsledků této práce je výpočet a sestavení hustých mračen bodů a jejich vzájemné porovnání. Toto srovnání mělo za úkol zjistit, zda vytváření hustého mračna kombinací metod laserového skenování a IBMR v moderním programu RealityCapture je pro účely vytváření 3D modelů výhodnější a zároveň objasnit kvality programu RealityCapture.

Další z hlavních výsledků jsou hranice možného spojení snímků z odlišných vzdáleností a tedy maximální možný násobek vzdálenosti, při které dojde ke kvalitnímu propojení jednoho či více snímků z obou posuzovaných vzdáleností. Dále pak hraniční vertikální úhel spojení dvou, popřípadě více snímků se stejným středem záběru a posledním výsledkem je pokus o nalezení hraničního horizontálního úhlu spojení posuzovaných snímků z odlišných letových hladin.

V závěru práce je poté shrnuta časová a finanční náročnost jednotlivých metod vytváření hustých mračen bodů. Součástí je rovněž závěrečné zhodnocení jednotlivých metod na základě výsledné kvality mračen a náročnosti postupu zpracování.



## Použité zdroje

- [1] *SurvTech Solutions* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:  
<http://floridalaserscanning.com/3d-laser-scanning/history-of-laser-scanning>
- [2] *The Building Conservation* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:  
<http://www.buildingconservation.com/articles/measuredbsurveys/measured1.jpg>
- [3] 3B Lazer Ölçüm (3D Laser Scanner). *Mipatek* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:  
<http://www.mipatek.com/services/get/53#prettyPhoto/0/>
- [4] PAVELKA, Karel, Martina FALTÝNOVÁ, Zdeněk ŠVEC a Petr DUŠÁNEK. *Mobilní laserové skenování* [online]. Praha, 2014 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70787>. ČVUT Praha, Katedra Geomatiky.
- [5] Informed Infrastructure. *Exploring Reality Computing for Civil Infrastructure* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:  
<https://informedinfrastructure.com/12620/reality-computing-for-civil-infrastructure/>
- [6] *Riegl* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:  
<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>
- [7] *Faro* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://faro.com/>
- [8] *Dokumentace historické klenby moderními geodetickými metodami* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70787>. Bakalářská práce. ČVUT Praha, Katedra Geomatiky. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.
- [9] VESELÝ, Jan. *Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči*. Praha: Národní památkový ústav, 2014. ISBN 978-80-8651679-0.



- [10] K. KAPITANY, A. BARSÍ a A. SOMOGYI. *Inspection of a medieval wood sculpture using computer tomography* [online]. [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-287-2016. Dostupné z: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B5/287/2016/>
- [11] Integration between TLS and UAV photogrammetry techniques for forestry applications. *I-forest: Biogeosciences and Forestry*[online]. (10), 41-47 [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.3832/ifor1780-009. Dostupné z: <http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor1780-009>
- [12] *3D Scanner Surphaser® 25HSX* [online]. Surphaser [cit. 22.4.2017] dostupné z <http://www.surphaser.com/25hsxscanner.html>
- [13] *Canon* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.canon.cz/>
- [14] HOUSAROVÁ, Eliška, Jaroslav ŠEDINA a Karel PAVELKA. *První zkušenosti s RPAS pro katastr nemovitostí* [online]. In: . s. 6 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://lfgm.fsv.cvut.cz/telc/2015/texty/Housarova\\_text.pdf](http://lfgm.fsv.cvut.cz/telc/2015/texty/Housarova_text.pdf)
- [15] *DJI* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [dji.com](http://dji.com)
- [16] ŘEHÁK, Martin. *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii*. Praha, 2012. Diplomová práce.
- [17] *Capturing Reality* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [www.capturingreality.com](http://www.capturingreality.com)
- [18] KOTSKA Bronislav KŘEMEN Tomáš POSPÍŠIL Jirí: Možnosti využití technologie laserového skenování k dokumentaci stavebních památek [online] ČVUT, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie. [cit. 28.4.2017] Dostupné z [http://k154.fsv.cvut.cz/~koska/publikace/soubory/2010\\_so\\_koska.pdf](http://k154.fsv.cvut.cz/~koska/publikace/soubory/2010_so_koska.pdf)



## Seznam obrázků

obr. 1: Cyrax model 2500 [2] .....	3
obr. 2: Pozemní laserový skener Leica [3] .....	4
obr. 3: Mobilní laserový skener – Lidar [5] .....	4
obr. 4: Pulsní skener Riegl VZ-400i [6] .....	5
obr. 5: Fázový skener FARO Focus3D X130 [7] .....	5
obr. 6: Pohled na surová data ze skeneru [8] .....	6
obr. 7: Sloučená data v programu Geomagic [8] .....	7
obr. 8: 3D model klendy Břevnoského kláštera – pohled zdola [8] .....	7
obr. 9: Madonna mistra z Fabriana [10] .....	9
obr. 10: Tabulka technických parametrů projektu [10] .....	10
obr. 11: Pohled na konfiguraci snímků a mračno bodů (vlevo) zasíťovaný 3D model vprav	10
obr. 12: Výsledný 3D model Madonny [10] .....	11
obr. 13: Barvený laserový sken (nahore), spojené mačra bodů (dole) [11] .....	12
obr. 14: Ortofoto a DMP [11] .....	13
obr. 15: Mračna bodů: IBMR(vlevo), laserové skenování(vpravo) [11] .....	14
obr. 16: Výsledek spojení mračen bodů (vpravo detail) [11] .....	14
obr. 17: Surphaser 25HSX [12] .....	15
obr. 18: Canon EOS 5D Mark II [13] .....	16
obr. 19: Canon EOS 450D [13] .....	17
obr. 20: DJI Mavic Pro Platinum [15] .....	18
obr. 21: Ukázka programu Agisoft .....	19
obr. 22: Ukázka programu Geomagic] .....	20
obr. 23: Ukázka RealityCapture [17] .....	21
obr. 24: Ukázka vybraného rohu budovy České biskupské konference .....	22
obr. 25: Ukázka rozložení stanovišť .....	23
obr. 26: Ukázka rozložení snímku .....	24
obr. 27: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno .....	25
obr. 28: Test snímků 2C,P,L a 8C,P,L .....	26
obr. 29: Test snímků 2C,P,P,L,L a 32C,P,P,L,L .....	27
obr. 30: Test snímků 2C,P,P,L,L a 64C,P,P,L .....	27
obr. 31: Ukázka vybraného fasády Fsv ČVUT .....	29
obr. 32: Mapa s vyznačeným místem snímkování .....	30
obr. 33: Ukázka rozložení snímku (vyznačen cíl) .....	31
obr. 34: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno .....	32
obr. 35: Test snímků 0 a +45 .....	32
obr. 36: Test snímků 0 a -50 .....	33
obr. 37: Test snímků +75 a +50 .....	34
obr. 38: Test snímků +75, +60, +35, 0, -35, -60 a -75 .....	34
obr. 39: Ukázka sochy kardinála Berana .....	36
obr. 40: Ukázka rozložení jednotlivých letových hladin .....	37





obr. 41: Ukázka snímků z letové haldiny 12 metrů.....	38
obr. 42: Spojení všech snímků a vytvořené řídké mračno .....	39
obr. 43: Test hladin 2 a 4.....	39
obr. 44: Ukázka rozložení snímku.....	41
obr. 45: Ukázka pořízení dat laserového sledování.....	42
obr. 46: Řídké mračno s vlíčovacími body.....	43
obr. 47: Husté mračno bodů IBMR.....	44
obr. 48: Detail hustého mračna IBMR .....	44
obr. 49: Ořezané nerovnané skeny v Geomagic.....	45
obr. 50: Manualní registrace.....	46
obr. 51: Husté mračno po spojení všech bodů .....	47
obr. 52: Výsledný zasítovaný model .....	47
obr. 53: Řídké mračno RealityCapture.....	49
obr. 54: Zasítovaný model RealityCapture.....	50
obr. 55: Model s texturou .....	51
obr. 56: Detail modelu RealityCapture .....	51
obr. 57: Nastavení funkce Finely register .....	52
obr. 58: Výsledky transformací zprava ( laser-IMBR, laser-RC, RC-IBMR) .....	53
obr. 59: Nastavení funkce compute cloud distance .....	53
obr. 60: Rozdíl mračen laserového skenování - IBMR .....	54
obr. 61: Rozdíl mračen laserového skenování - RealityCapture .....	54
obr. 62: Rozdíl mračen RealityCapture - IBMR .....	54
obr. 63: Rozdíl mračen - histogramy .....	55

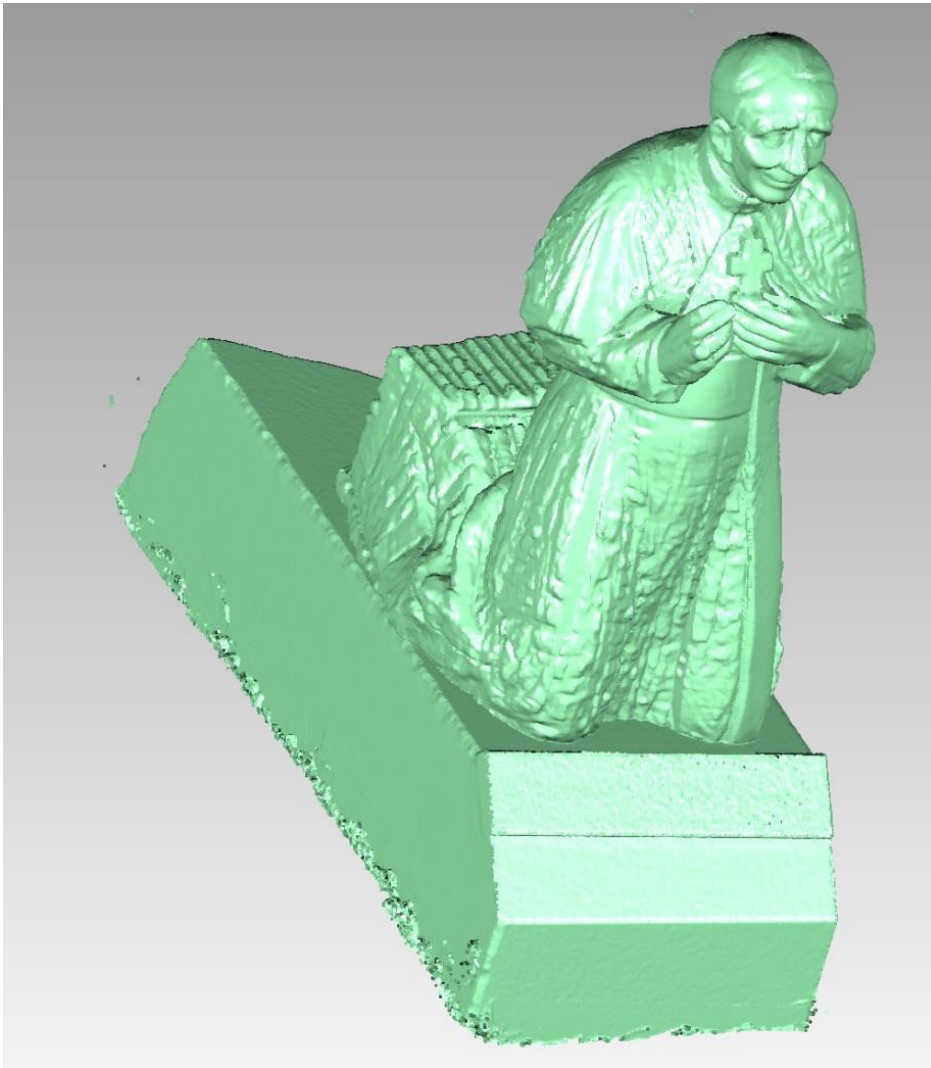


## Seznam tabulek

tab. 1: Nastavení Canon EOS 450D .....	23
tab. 2: Výsledky funkce Align Photos .....	28
tab. 3: Výsledky funkce Align Photos .....	35
tab. 4: FC220 Mavic Pro Premium.....	37
tab. 5: Výsledky funkce Align Photos.....	40
tab. 6: Zhodnocení metod .....	56

## Seznam Příloh

1. DVD:
  - 1.1 Všechny použitá data
  - 1.2 Vytvořená hustá mračna bodů ve formátu obj
  - 1.3 Výsledky výpočtů CloudCompare
  - 1.4 Vytvořená mračna - ilustrace
  
2. Vytvořené hustá mračna
  - 2.1. Laserové skenování



## 2.2. Metoda IBMR



### 2.2.1. Detail



## 2.3. RealityCapture



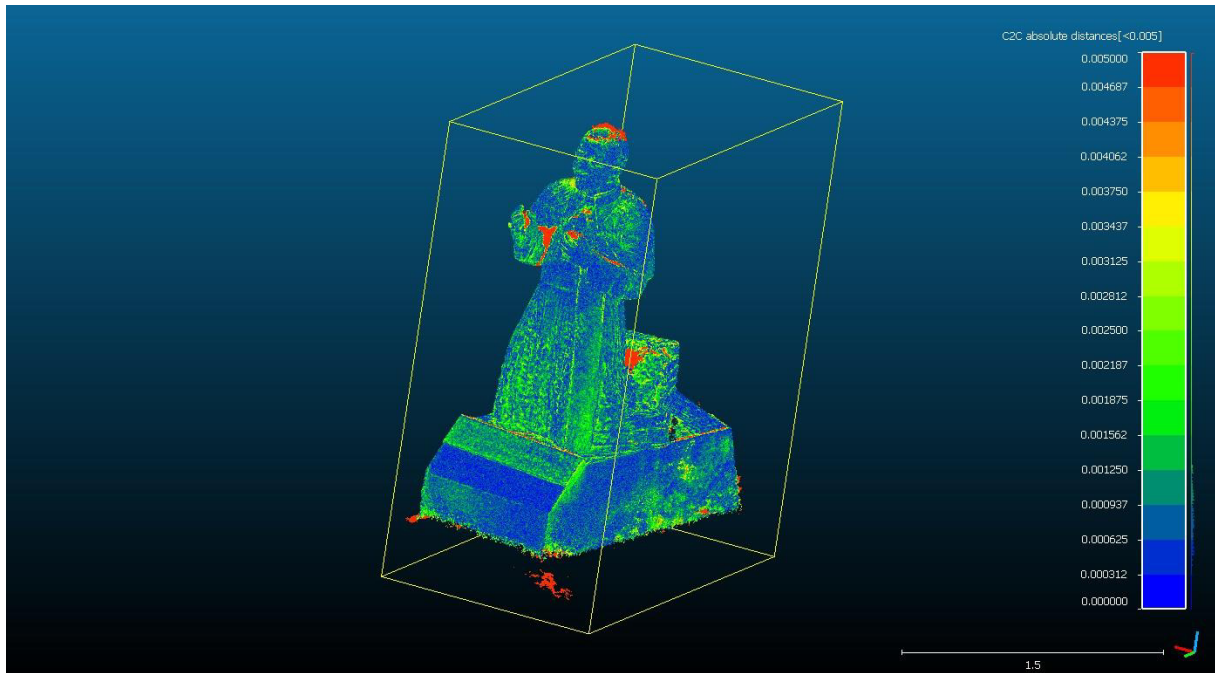
### 2.3.1. Detail



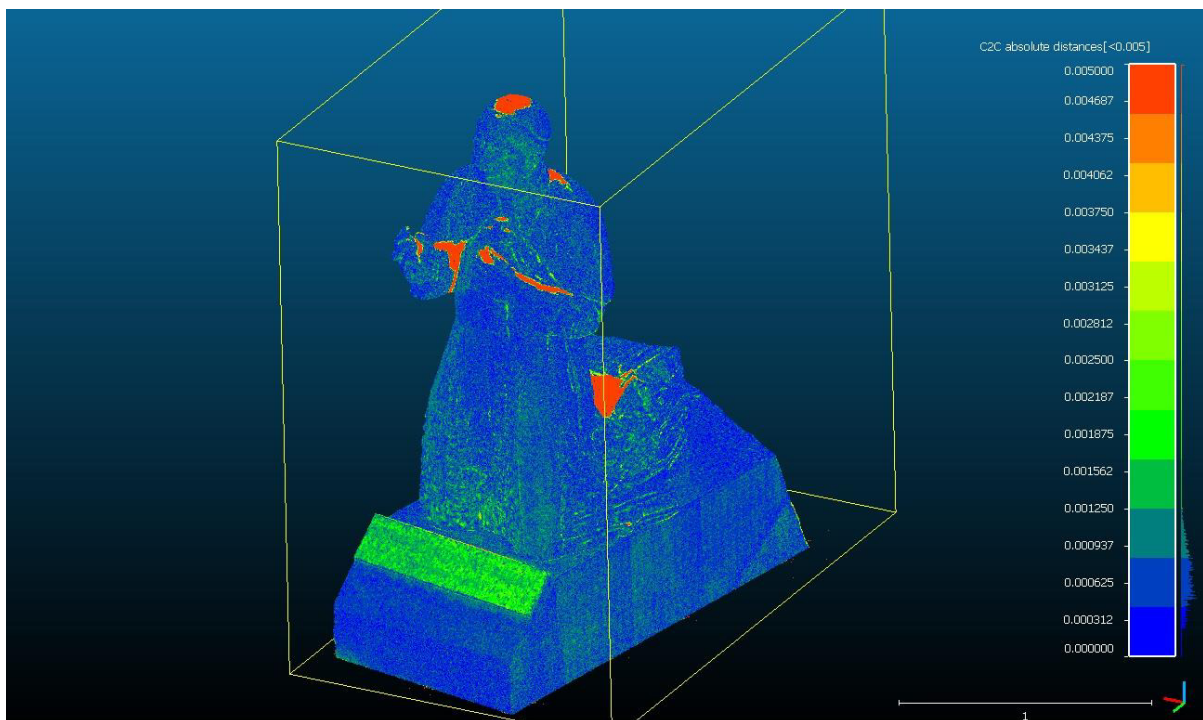


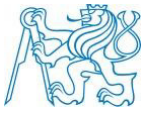
### 3. Výsledky CloudCompare

#### 3.1. Laserové skenování a IBMR



#### 3.2. Laserové skenování a RC





### 3.3. RC a IMBR

