

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Sociální geografie a geoinformatika



**Faraz Ahmed Bashir**

**APLIKACE GEOINFORMATIKY V ANTROPOLOGII**  
**GIS APPLICATION METHODS IN ANTHROPOLOGY**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Eva Štefanová, Ph.D.

Praha, 2018

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 9. května 2018

Faraz Ahmed Bashir

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval své vedoucí práce Ing. Evě Štefanové, Ph.D. za veškerou pomoc při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Katedře aplikované geoinformatiky a kartografie za půjčení veškerého vybavení. Můj vděk také patří Katedře antropologie a genetiky člověka za poskytnutí antropologického artefaktu. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým přátelům za podporu při vzniku této práce.

## **APLIKACE GEOINFORMATIKY V ANTROPOLOGII**

### **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá aplikací geoinformačních metod v antropologii. Konkrétně se jedná o metody pozemního laserového skenování a průsekové fotogrammetrie. Teoretická část práce se zaměřuje na popis fungování a využití těchto metod. V praktické části práce je popsán postup sběru dat těmito metodami a následná tvorba 3D modelu antropologického artefaktu, konkrétně se jedná o lidskou lebku. V závěru jsou tyto modely porovnávány s modelem z počítačové tomografie, který byl poskytnut, stejně jako antropologický artefakt, Katedrou antropologie a genetiky člověka Univerzity Karlovy.

### **klíčová slova**

laserové skenování, fotogrammetrie, 3D model, antropologie

## **GIS APPLICATION METHODS IN ANTROPOLOGY**

### **Abstract**

This bachelor thesis aims to use of geoinformatic methods in anthropology. Specifically methods of terrestrial laser scanning and close range photogrammetry. The theoretical part focuses on explaining functioning and usage of those methods. Practical part of this work describes data collecting proces with those methods and following creation of 3D model of anthropological artifact, specifically human skull. In the end those models are compared with model from computed tomography which was provided, same as anthropological artifact, by Department of anthropology and human genetics of Charles University.

### **key words**

laser scanning, photogrammetry, 3D model, anthropology

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
Seznam použitých zkratk .....	9
1. Úvod .....	10
2. Literární rešerše .....	11
3. Laserové skenování .....	15
3.1 Princip laserového skenování.....	15
3.2 Druhy laserových skenerů .....	15
4. Pozemní laserové skenování .....	17
4.1 Registrace .....	17
4.2 Georeferencování.....	20
5. Fotogrammetrie .....	22
5.1 Principy fotogrammetrie .....	23
5.1.1 Středové promítání .....	23
5.1.2 Prvky vnitřní a vnější orientace .....	23
5.1.3 Transformace souřadnic.....	24
5.1.4 Kamery ve fotogrammetrii .....	24
5.1.5 Kalibrace kamery.....	24
5.2 Dělení fotogrammetrie.....	25
6. Pozemní Průseková fotogrammetrie .....	26
6.1 Structure-from-Motion .....	27
7. Sběr dat .....	28
7.1 Fotoaparát.....	28
7.2 Vlastní snímkování .....	28
7.3 Laserový skener .....	30
7.4 Vlastní Skenování .....	30
8. Zpracování dat ze snímkování .....	32
8.1 Agisoft PhotoScan .....	32
8.2 Tvorba modelu .....	33
8.2.1 Maskování .....	33
8.2.2 Orientace snímků .....	35
8.2.3 Husté bodové mračno .....	38
8.2.4 Polygonová síť .....	39
8.2.5 Textura .....	40
8.2.6 Export .....	42

9.	Zpracování dat z Laserového skenování.....	42
9.1	Použité programy .....	42
9.2	Tvorba modelu .....	43
9.2.1	Import skenů .....	44
9.2.2	Registrace .....	45
9.2.3	Příprava pro mesh .....	46
9.2.4	Export .....	48
9.2.5	Tvorba meshe .....	48
10.	Porovnání modelů .....	54
11.	Diskuze .....	58
12.	Závěr.....	61
13.	Zdroje .....	62
	Seznam příloh.....	65

## Seznam obrázků

Obr. 1: Ukázka přístroje na strukturované světlo.....	12
Obr. 2: Ukázka přístrojů na blízké skenování.....	13
Obr. 3: Triangulační skener .....	16
Obr. 4: Registrace pomocí terčů.....	18
Obr. 5: Správné a špatné rozložení bodů.....	19
Obr. 6: Ideální překryt mračen bodů.....	20
Obr. 7: Dvoufázové georeferencování.....	21
Obr. 8: Jednofázové georeferncování.....	22
Obr. 9: Princip středového promítání.....	23
Obr. 10: Vztah mezi objektovými a snímkovými souřadnicemi.....	24
Obr. 11: Snímkování metodou průsekové fotogrammetrie.....	26
Obr. 12: Určení souřadnic X, Y, Z pomocí protínajících se paprsků.....	27
Obr. 13: Metoda Structure-from-Motion.....	27
Obr. 14: Ukázka snímků.....	29
Obr. 15: FARO Focus3D-X130 Laser Scanner.....	30
Obr. 16: Pozice skeneru a terčů při skenování.....	31
Obr. 17: Pozice lebky.....	31
Obr. 18: Nastavení rozsahu skenování.....	32
Obr. 19: Snímek použity pro maskování.....	34
Obr. 20: Ukázka vytvořené masky.....	35
Obr. 21: Dialogové okno nastavení pro zarovnání snímků.....	36
Obr. 22: Bodové mračno.....	36
Obr. 23: Pozice kamer.....	37
Obr. 24: Umístění markers.....	37
Obr. 25: Dialogové okno nastaveni hustého mračna.....	38
Obr. 26: Vytvořené bodové mračno.....	38
Obr. 27: Dialogové okno nastavení polygonové sítě.....	39
Obr. 28: Polygonová síť .....	40
Obr. 29: Výsledný model z první sady snímků.....	41
Obr. 30: Výsledný model z druhé sady snímků.....	42
Obr. 31: Postup práce v programu ReCap.....	43
Obr. 32: Úvodní menu programu ReCap.....	44

Obr. 33: Základní možnosti filtrace skenu.....	44
Obr. 34: Registrace.....	45
Obr. 35: Registrované mračno bodů.....	46
Obr. 36: Limit box.....	46
Obr. 37: Izolovaná lebka.....	47
Obr. 38: Mesh vytvořen v programu ReCap.....	47
Obr. 39: Mračno bodů.....	48
Obr. 40: Odhadnuté normály.....	49
Obr. 41: Model číslo 9.....	52
Obr. 42: Model číslo 8 po aplikování funkcí close holes a depth smooth.....	52
Obr. 43: Modely vytvořeny Poisson Surface Reconstruction.....	53
Obr. 44: Kvalita modelů vytvořených Poisson Surface Reconstruction.....	53
Obr. 45: Špatně identifikované body.....	55
Obr. 46: Barevný Histogram odchylek.....	55
Obr. 47: Porovnání modelů z fotogrammetrie.....	56
Obr. 48: Porovnání modelu z první sady snímků s modelem ze CT.....	57

## Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání běžně dostupných skeneru.....	14
Tab. 2: Časová náročnost skeneru.....	14
Tab. 3: Typy laserových skeneru a jejich využití.....	17
Tab. 4: Možnosti nastavení v různých režimech.....	28
Tab. 5: Nastavení Poisson Surface Reconstruction algoritmu.....	51
Tab. 6: Nastavení Ball-Pivoting algoritmu.....	51
Tab. 7: Porovnání vytvořených modelů.....	56



## Seznam použitých zkratek

3D – Trojdimenzionální

3DS – 3D Studio file format

ASC – ASCII file format

CAD – Computer Aided Design

CT – Computed tomography

DXF – Drawing Exchange Format

FBX – Filmbox

FLS – Fiber Local Storage

GPS – Global Positioning Systém

JPEG – Joint Photographic Experts Group

Laser – Light aplification by stimulated emission of radiation

OBJ – Object file format

PDF – Portable Document Format

PS – Agisoft PhotoScan

PLY – Polygon file format

RAM – Random Access Memory

RGB – Red, Green, Blue

SfM – Structure-from-Motion

TIFF – Tag Image File Format

U3D – Universal 3D

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

VRML – Virtual Reality Modeling Language

VÚGTK – Výzkumný Ústav Geodetický, Topografický a Kartografický

# 1. Úvod

Tato práce se zabývá tvorbou digitální kopie antropologického artefaktu, konkrétně se jedná o lidskou lebku. Moderní antropologie se z reálného světa přesouvá do světa digitálního. To je způsobeno zejména technickým pokrokem. V současnosti je možné tvořit digitální kopie téměř identické s originály. Z mnoha dostupných metod pro tvorbu trojdimenzionálních (3D) modelů byly v této práci vybrány metody dvě. První je metoda pozemního laserového skenování. Jedná se o metodu poměrně novou a ne zcela probádanou. Druhá zvolená metoda je metoda průsekové fotogrammetrie, což je naopak jedna z nejstarších metod pro vytváření 3D modelů. Výsledné modely z obou metod jsou porovnávány s modelem z výpočetní tomografie (CT), který byl vytvořen katedrou antropologie a genetiky člověka na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy.

Hlavní motivací pro zpracování tohoto tématu je možnost vyzkoušet moderní geoinformační metody v praxi a porovnat novou metodu laserového skenování s metodou starší fotogrammetrie. Uplatnění nabytých znalostí k řešení reálných problémů, a to nejen na poli geografie.

Cíle práce jsou:

1. Literární rešerše na téma nepoužívanějších digitalizačních metod v antropologii.
2. Vysvětlení základních principů laserového skenování a fotogrammetrie.
3. Pořízení vhodných dat (laserová data, snímky) daného objektu pro tvorbu 3D modelu
4. Zpracování dat.
5. Tvorba 3D modelu a jeho vizualizace
6. Porovnání a hodnocení přesnosti výsledných 3D modelů

Text práce je rozdělen do dvou částí. Teoretická část se zabývá literární rešerší týkající se virtuální antropologie. Dále jsou zde vysvětleny principy laserového skenování a fotogrammetrie. Praktická část je zaměřena na sběr dat výše zmíněnými metodami, a jejich zpracování v specializovaných softwarech Agisoft photoscan, Autodesk ReCap a Meshlab. Budou podrobně popsány jednotlivé kroky, aby práce mohla být v budoucnu použita jako metodika pro podobné projekty. V závěru práce jsou porovnány výsledky jednotlivých metod v programu CloudCompare a jsou shrnuty získané znalosti.

## 2. Literární rešerše

Antropologie je věda o člověku a jeho původu. Název pochází z řeckého slova *antropos*, což znamená člověk. Antropologie je možné rozdělit na:

- Fyzickou (biologickou) antropologii – studuje biologii a evoluci člověka
- Kulturní a sociální antropologii – studuje kulturu a společnost člověka
- Lingvistika – studuje produkci řeči a textu
- Archeologická antropologie – studuje zaniklé kultury a společnosti (Encyclopædia Britannica 2017)

Od 90. let 20. století se ve fyzické antropologii začal objevovat nový trend zvaný virtuální antropologie. Tento nový poddruh antropologie má za úkol pomocí nových zobrazovacích a záznamových technik vytvářet 3D digitální kopii antropologických artefaktů (Jandová 2015). 3D digitalizace je užitečný nástroj pro pořizování antropologických záznamů. Postupy virtuální antropologie jsou bezkontaktní, neinvazivní a nedestruktivní. Redukuje se potřeba fyzicky manipulovat, zvláště se starými a křehkými předměty. Poskytuje zálohu předmětu v případě ztráty nebo poškození. Tyto metody nejčastěji slouží pro určení pohlaví, věku či velikosti. Dále je možné rekonstrukce chybějících částí fragmentovaných artefaktů (Brzobohatá 2012). Další výhodou je možnost sdílení s výzkumníky ze celého světa po internetu (Mathys 2013). Taktéž je možné využít tyto modely pro virtuální muzea, nebo zobrazovat malé předměty na velká obrazová zařízení pro detailnější prohlížení (Bruno 2010).

V současnosti mezi nejpoužívanější metody v antropologii patří počítačová tomografie (CT), kdy se pomocí rentgenového záření provádí krátké řezy tkání a kostí, a díky tomu vzniká přesný obraz struktury jak vnější, tak vnitřní (Schambach 2010). V současnosti se jedná o jednu z nejpřesnějších metod. Toto potvrzuje i závěry výzkumu, kdy v roce 2015 z univerzitní nemocnice v Marseilli bylo vybráno 106 anonymních CT snímků. Na základě těchto CT snímků a statistické analýzy bylo určeno pohlaví 92.3 % mužů a 97.2 % žen s přesností 100 %. Zároveň chyba měření nepřesáhla 0,8 mm (Mesteková 2015). Ačkoliv se jedná o velice přesnou metodu, často její využití není možné, např. když zkoumaný materiál není možné dopravit k přístroji. Do nedávna použití taktéž komplikovala potřeba specializovaných softwarů pro prohlížení dat z tohoto přístroje. Největší výhoda těchto přístrojů oproti optickým skenerům je možnost skenovat i vnitřní strukturu objektu (Kuzminsky 2012). Nevýhodou této metody je též vysoká pořizovací cena, kterou si většina výzkumných zařízení nemůže dovolit, avšak často je možné si tento přístroj pronajmout. Další nevýhodou je, že není možné zaznamenat texturu skenovaného objektu (Mathys 2013).

Kromě nejpoužívanějšího CT existuje mnoho dalších technologií pro pořízení 3D záznamu. Každý z těchto systému má své výhody a nevýhody a také se liší pořizovací cenou. Výběr těchto

zařízení zaleží na vlastnostech skenovaného objektu a účelu skenování (Georgopoulos 2010). Některá z nejpoužívanějších zařízení ve virtuální antropologii jsou popsána v následujících odstavcích.

Jeden ze způsobů je skenování pomocí strukturovaného světla. Tato metoda je založena na triangulaci. Snímání objekt je umístěn na otáčejícím se podstavci. Projektor vysílá strukturované světlo (obvykle černobílé pruhy) na objekt. Dopadající světlo na povrch skenovaného objektu je snímáno jednou či více kamerami (obr. 1). Skener vyhodnocuje zakřivení hran jednotlivých pruhů vysílaných projektorem a pomocí triangulace vypočítá vzdálenost jednotlivých bodů od skeneru. Nevýhodou těchto zařízení je skenovací plocha, která je velmi malá, a proto je možné skenovat pouze malé objekty. Další slabinou je kalibrace, která je časově velmi náročná, a je potřeba ji provádět před každým měřením. Díky pasivním kamerám je možné zaznamenat i texturu objektu (Stančič 2013). Singh (2017) tvrdí, že i když jsou metody laserového skenování a strukturovaného světla vhodné pro realistickou rekonstrukci kostní struktury, tak metoda strukturovaného světla je přesnější pro měření povrchu a objemu.

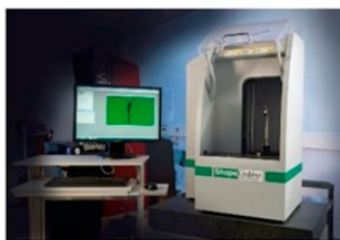


**David Scanner SLS2**

*Obr. 1: Ukázka přístroje na strukturované světlo (Maté-González 2017)*

Další často používané skenery jsou laserové skenery na blízké skenování. Tyto skenery mohou být rozděleny na ruční a stacionární (obr. 2). Při použití ručního skeneru se postupně naskenuje objekt dokola. Při použití stacionárního skeneru se objekt položí na otočný podstavec. Princip obou skenerů je založený na triangulaci, kdy je známá vzdálenost a úhel mezi snímací čočkou a laserovým vysílačem. Tato zařízení nezaznamenávají texturu předmětu přímo, nicméně často obsahují přídavnou kameru, díky které je možné každému bodu přiřadit barvu (Kuzminsky 2012). Porovnání laserového skenování a CT bylo provedeno např. Brzobohatou (2012), kdy pomocí obou metod byla naskenována lidská lebka. Průměrný rozdíl mezi oběma modely byl 0.27 mm pro 90 % dat. Největší rozdíl byl zaznamenán v očních důlcích, což autoři připisují stínu vrhanému ostatními částmi lebky při skenování. Jak autoři uvádí, porovnání s ostatními studiemi je obtížné, protože se často používají jiné metody měření a jiné části kostry. Laserové skenery jsou stále poměrně novou

technologii a nemají standardizovaný návod pro pořízení, zpracování a analyzování 3D modelu. Přesnost těchto modelů je závislá na použité technice, softwaru, algoritmech a zkušenosti osoby obsluhující skener (Kuzminsky 2012).



**ShapeGrabber**



**Creaform EXAscan**

*Obr. 2: Ukázka přístrojů na blízké skenování, (vpravo – stacionární, vlevo – ruční) (Maté-González 2017)*

Fotogrammetrie je nejstarší metoda pro tvorbu 3D modelu. Je to dlouhodobě pevná součást archeologického pořizování digitálních záznamů. Fotogrammetrie se opírá o princip částečně se překrývající fotografie, které jsou pořízeny z několika úhlů. Na těchto snímcích se poté definují spojovací body, díky čemuž vznikne rekonstrukce topologie vnějšího viditelného povrchu snímaného předmětu (Evin 2016). Mezi největší výhody patří nízká cena a snadná přenositelnost. Přesnost vytvořeného modelu závisí na mnoha faktorech např. kalibraci, počtu snímků, rozlišení, i přesto je pomocí fotogrammetrie možné vytvořit velice přesné modely. Fotogrammetrie je technologie pasivního sensoru, a proto je velice náchylná na světelné podmínky při snímání. Další nedostatek je nutnost vytvořit měřítko manuálně (Maté-González 2017). Evin (2016) označuje fotogrammetrii jako dostatečně přesný prostředek pro vytváření 3D modelů pro antropologické účely. Toto tvrzení zakládá na výzkumu, kdy vytvořil pět různých modelů vlní lebky pomocí fotogrammetrie a skeneru na strukturované světlo. Následně tyto modely porovnal. Průměrná vzdálenost povrchu obou modelů byla 0.088 mm se směrodatnou odchylkou 0.53 mm. I přes značné výhody fotogrammetrie, jako např. nízká cena, mobilita, řada výzkumníků preferuje jiné metody měření. To je nejspíš způsobeno faktem, že fotogrammetrie vyžaduje značnou zkušenost a znalost např. kalibrace. Další nevýhodou je časová náročnost oproti dalším druhům skenerů, kdy nejlepší z nich dokáží zhotovit model už za několik hodin (Maté-González 2017, Evin 2016, Friess 2012).

Porovnání nejen přesnosti, ale také ceny a časové náročnosti všech těchto výše zmíněných typů skenování provedl Mathys (2013). Autor porovnává nejčastěji používané přístroje pro tvorbu 3D modelů. Dále zkoumá, zda je možné těmito přístroji získat texturu (tab. 1). Bylo zjištěno, že za ideálních podmínek, se zkušeným operátorem těchto skenovacích zařízení je možné zhotovit model v časech uvedených v tab. 2. Závěrem je, že nejlepší technika pro skenování s texturou je strukturované světlo, CT je vhodné pro vnitřní strukturu a pro lesklé materiály, autor nicméně dodává, že fotogrammetrie je dobrým kompromisem mezi cenou a kvalitou.

Tab. 1: Porovnání běžně dostupných skeneru (Mathys 2013)

	CT Siemens Sensation 64	NextEngine	FARO Scan Arm	MephistoEX- Pro	Agisoft Photoscan standard edition
Texture	No	Yes	No	Yes	Yes
uncertainty ( $\mu\text{m}$ )	460	$\approx$ 100	35	50	Variable Depending camera and lenses
Price €	250 /hour	3000	60 000	30 000	139 (46 education) + 500 (Canon 600D)
Automatic turntable	n.a.	Yes	No	Yes	No
Technology	X-ray	Laser scanner	Laser scanner	Structured light	Photogrammetry

Tab. 2: Časová náročnost skeneru (Mathys 2013)

Technologie (typ přístroje)	Celkový čas (min)	Lidský čas (min-)
Strukturované světlo (EX-Pro)	110	10
Stacionární laserový skener (NextEngine)	405	320
Ruční lasrový skener (FARO ScanARM)	40	20
Fotogrammetrie (program Agisoft photoscan)	270	40
CT (Siemens Sensation 64)	21	15

Moderní antropologie se v současnosti odehrává v digitálním světě. Zvyšuje se potřeba převádět antropologické artefakty do digitálního prostředí, a to zejména pro snadnější sdílení, výzkumné účely, virtuální muzea nebo vytváření záloh cenných a křehkých předmětů. Pro tyto potřeby existuje mnoho skenovacích technologií a zařízení. Výběr přístroje často nezáleží pouze na jeho vhodnosti pro vlastnosti daného objektu a účelu měření, ale mnohem častěji rozhoduje jeho dostupnost a cena.

Pro vlastní digitalizaci byly vybrány metody průsekové fotogrammetrie a pozemního laserového skenování, které jsou podrobně popsány v následujících kapitolách. Zkoumaným předmětem je lidská lebka pocházející z archeologických nalezišť u Mikulčic. Její stáří je odhadováno na 9. století. Tento artefakt byl zapůjčen z archivu národního muzea Katedrou antropologie a genetiky člověka.

### 3. Laserové skenování

Laserové skenování patří mezi nejrozšířenější moderní metody bezkontaktního sběru dat. Jedná se o metodu hojně využívanou při topografickém mapování, ale také při tvorbě 3D záznamu objektu. Samotné slovo laser je anglickým akronymem pro *Light amplification by stimulated emission of radiation*, což se dá do češtiny přeložit jako zesilování světla stimulováním emisí záření. Laserové světlo je silně kolimované, monochromatické a koherentní (Kraus 2007). Laser, jeden z nejdůležitějších technologických vynálezů tohoto století, byl poprvé zkoumán pro tento účel v roce 1988 prof. F. Ackermannem v Institutu fotogrammetrie na univerzitě ve Stuttgartu (Baltsavias 1999).

#### 3.1 Princip laserového skenování

Pospíšil (2009) uvádí, že základem laserového skenování je neselektivní určování prostorových souřadnic objektu a jejich ukládání do paměti. Skenování probíhá pomocí skeneru, který podle předem zadaných parametrů zaznamenává stovky až miliony bodů za sekundu. Výsledkem laserového skenování je množina bodů, která se nazývá mračno bodů a může obsahovat až miliony bodů.

Laserový paprsek je vytvořený skenerem a je vysílán do prostoru pomocí rotujícího zrcadla. Druhý zrcadlo, kolmý na to první lze měnit pomocí pohyblivé mechanické osy nebo dalším rotujícím optickým zařízením. Hodnoty těchto uhlů se používají pro výpočet souřadnic 3D bodů (Boehler 2003).

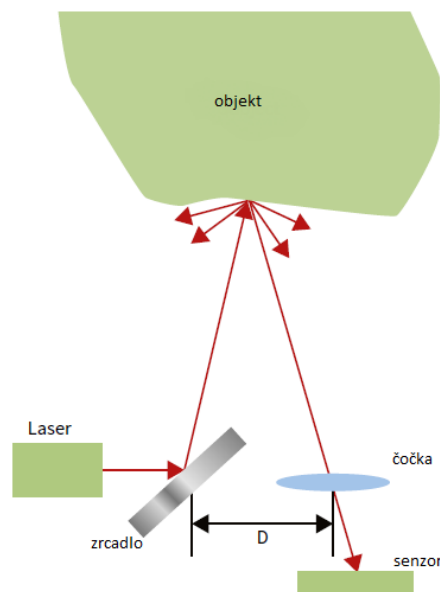
#### 3.2 Druhy laserových skenerů

Laserové skenery se dělí do skupin podle několika kategorií. První kategorie je podle způsobu měření vzdálenosti. Podle Pfeifera (2007) se dají vzdálenosti měřit třemi způsoby, a to dobou letu, fázovým rozdílem a triangulací. Tyto metody se liší přesností a každá z nich je vhodná pro určitou vzdálenost. Přesnost a využití těchto metod pro jednotlivé druhy měření jsou popsány v tab. 3. Jednotlivé metody jsou popsány v textu níže.

- **Pulzní doba letu** – Tento způsob umožňuje skenovat území největšího rozsahu a přesnost se pohybuje v řádech centimetrů. Pro kratší vzdálenosti se přesnost zvyšuje na milimetry. Doba letu se obvykle pohybuje kolem několika nanosekund. Vzdálenost se vypočítá jako doba letu krát rychlost světla, která je přibližně  $3 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup>. Metoda pulzní doby letu se nejčastěji používá při leteckém laserovém skenování. Dříve byla tato metoda považována za pomalou, ale s rozvojem techniky

je nyní možné snímat až milion bodů za sekundu a je možné snímat na vzdálenost až šesti kilometrů (Mills 2011).

- **Fázový rozdíl** – Tato metoda umožňuje měřit s přesností několika milimetrů. Fázový skener neobsahuje časovač jako skener pulzní, a proto nemusí čekat na návrat paprsků, než pošle další. Díky tomu je možné měřit více bodů za sekundu než metodou doba letu. Tento druh skeneru vysílá souvislý paprsek do prostoru a porovnává změnu vlastnosti paprsku odeslaného a paprsku přijatého. Výhodou je značná rychlost i přesnost měření. Nevýhodou je velký objem dat, který vyžaduje značné množství hardwarové kapacity. Skenery porovnávající fázový rozdíl se nejvíce používají při skenování interiéru a exteriéru budov (Mills 2011).
- **Triangulace** – Pro dosažení ještě větší přesnosti než v předchozích metodách nejsou vzdálenosti počítány přímo, ale přes úhly. Na obrázku č. 3 je znázorněn základní princip triangulačního skeneru. Laserový paprsek je vychylován zrcadlem a přes čočku zaznamenán senzorem, přičemž je známa vzdálenost mezi čočkou a zrcadlem. Tento druh skenování je nejpřesnější. Přesnost se pohybuje pod jeden milimetr. Mezi nevýhody patří omezená mobilita těchto zařízení a vzdálenost, na kterou je možné provádět měření. Používá se nejčastěji pro malé objekty, které jsou dopravené ke skeneru a měří se v laboratoři (Mills 2011).



Obr. 3: Triangulační skener (Mills 2011)



Laserové skenování lze také rozdělit podle typu nosiče na letecké, pozemní (terestriální) a blízké. Při leteckém skenování je skener umístěn na spodní straně letadla nebo UAV, přičemž musí být známa dráha letu, a měří se kolmo k dráze nosiče. Při pozemním skenování se skener většinou nachází v statické poloze, ale může být také nesen na zádech či přemísťován pomocí pohyblivého zařízení. Skenery na blízké skenování se většinou nepřemísťují (Mills 2011).

Tab. 3: Typy laserových skeneru a jejich využití (Mills 2011)

TYP SKENERU		VYUŽITÍ	PŘESNOST (mm)	DOPORUČENÁ VZDÁLENOST (m)
Triangulační	Rotační	Malé objekty dopravené ke skeneru. Výroba replik.	0.05	0.1 – 1
	Přípevněné	Malé objekty v laboratoři nebo v terénu. Výroba replik.	0.05	0.1 – 3
	Na stativu	Malé objekty v terénu. Výroba replik.	0.1 – 1	0.1 – 2.5
	Ruční	Malé objekty v laboratoři. Výroba replik.	0.03 – 1	0.2 – 0.3
	Mobilní (ruční, na zádech)	Neobvyklé lokace např. jeskyně.	0.03 – 30	0.3 – 20
Pulzní	Pozemní	Interiéry/exteriéry budov. Výkresy, analýzy, 3D modely.	1 – 6	0.5 – 1000
	Mobilní	Ulice, dálnice, železnice. Výkresy, analýzy, 3D modely.	10 – 50	10 – 200
	Bezpilotní létající prostředky	Střechy budov, archeologická naleziště. Mapování, 3D modely.	20 – 200	10 - 125
	letecký	Průzkum a mapování velkých oblastí.	50 – 300	100 – 3500
Fázový	Pozemní	Interiéry/exteriéry budov. Výkresy, analýzy, 3D modely.	2 – 10	1 – 300

## 4. Pozemní laserové skenování

Jak už bylo zmíněno výše, při pozemním skenování zůstává skener obvykle statický. Přemístění skeneru se odehrává během jednotlivých skenů. Při pozemním skenování je objekt skenován z několika pozic a vždy musí být překryv bodového mračka minimálně mezi dvěma skeny. Pro určení polohy může být použito GPS zařízení. Z každé pozice skeneru jsou získány polární souřadnice.

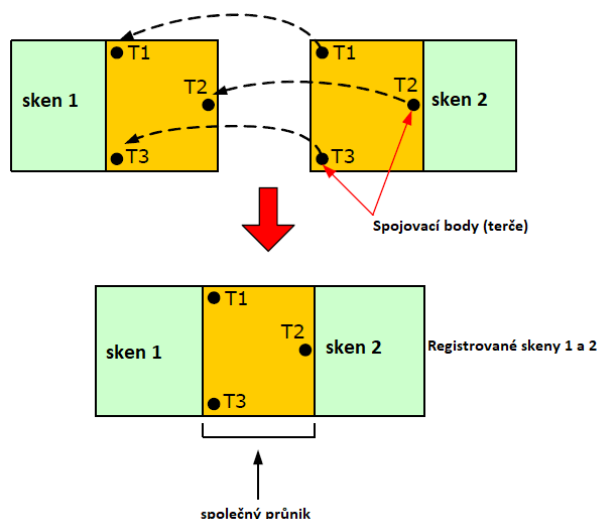
### 4.1 Registrace

Při pozemním laserovém skenování se často skenují objekty, které mají značnou rozlohu a složitou geometrii, a proto je potřeba provést několik skenů. Aby bylo možné prohlížení celého objektu najednou, je potřeba spojit bodová mračka z jednotlivých skenů. Tento krok se nazývá

registrace. Při registraci se transformuje několik skenů do společného souřadnicového systému. Aby bylo možné provést registraci, je potřeba překryvu minimálně dvou mračen. Zjednodušeně řečeno, každé mračno bodů by mělo obsahovat část mračna bodů z předchozího skenu (Reshetyuk 2009).

Způsob registrace se obvykle odvíjí od použité techniky a dostupného softwaru. Registraci je možné provést několika různými způsoby:

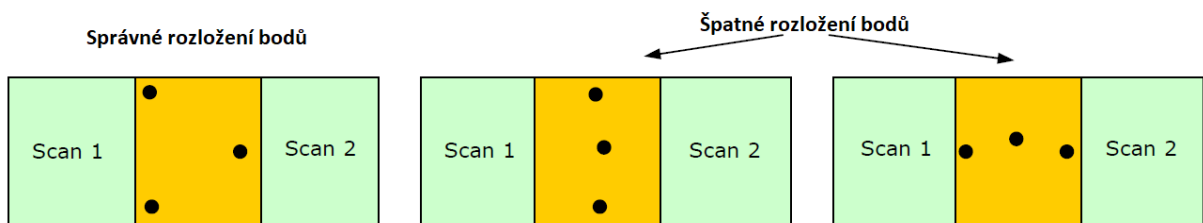
- Registrace pomocí terčů – Jedná se o nejčastěji používaný přístup, kdy se použijí tři a více terčů se známými souřadnicemi. Tyto terče musí být viditelné na obou skenech (obr. 4). Při skenování se používají dva druhy terčů:
  - Ploché terče – Jsou to nejčastěji používané terče. Výhoda těchto terčů je, že se dají často vytisknout i na papír. Nevýhodou je, že je velice obtížné automaticky zaměřit střed terče, pokud se skenuje z velké dálky, anebo je skenovací úhel větší než 45° (Balzani a kol. 2001, cit. v Reshetyuk 2009).
  - Trojrozměrné terče – Nazývané sférické terče. Jedná se o bílé koule, které jsou na rozdíl od plochých terčů snadno identifikovatelné z jakéhokoliv úhlu. Jsou velice vhodné pro propojení skenu interiéru a exteriéru, nebo pro rohy budov. Velikost těchto koulí je definovaná, a proto se dají snadno najít při automatické registraci (Balzani a kol. 2001, cit. v Reshetyuk 2009).



Obr. 4: Registrace pomocí terčů (Reshetyuk 2009)

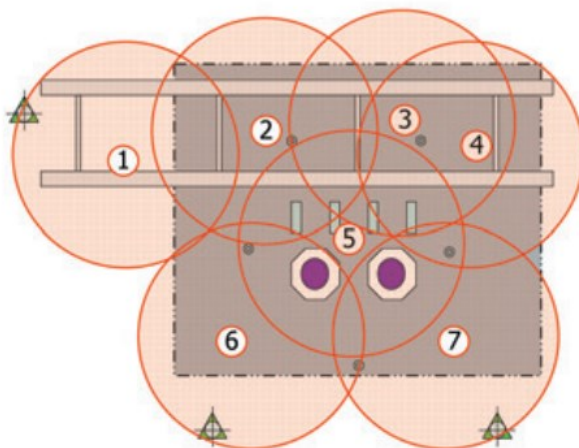
- Registrace pomocí přirozených bodů – Občas není možné umístit dostatečné množství terčů v překrytu dvou skenů, například když se jedná o vysoké budovy.

V takovém případě se při registraci dají použít jako spojovací body přirozené body (rohy budov, hrany kovových konstrukcí, okna atp.) pro spojení mračen bodu. U těchto bodů taktéž platí, že by měly být dobře rozložené v prostoru (obr. 5). Tyto přirozené body je vhodné skenovat s velkou hustotou bodů pro jejich správnou identifikaci. Tyto body se většinou musí identifikovat manuálně. Tato metoda je méně přesná než metoda pomocí terčů, ale nezbytná pro některé projekty (Jacobs 2005). Přidání více než minimálního počet třech požadovaných bodů, může napomoci k zvýšení přesnosti, ale po čtyřech bodech se kvalita zvyšuje jen nepatrně (Gordon 2004).



Obr. 5: Správné a špatné rozložení bodů (Reshetyuk 2009)

- Registrace pomocí mračen bodů – Tato metoda se nazývá obvykle *cloud to cloud*, což se dá přeložit jako mračno na mračno. Při použití této metody není potřeba terčů ani speciálních bodů, namísto toho se mračna zarovnají pomocí čtyř společných bodů. Poté speciální software automaticky zarovná celou plochu překrývajících se skenů (Jacobs 2005). V dnešní době už jsou dostupné softwary, které dokáží zpracovat až desítky skenů automaticky bez zadání spojovacích bodů. Pro úspěch této metody je potřeba dostatečný překryt mračen bodů (obr. 6). Ve správných podmínkách je metoda *cloud to cloud* schopná dosáhnout velké přesnosti. Na rozdíl od předchozích metod se počet spojovacích bodů zvýší z několika desítek na tisíce bodů (Jacobs 2005).



Obr. 6: Ideální překryt mračen bodů (Jacobs 2005)

## 4.2 Georeferencování

Podle slovníku VUGTK je georeferencování proces určení vztahu mezi polohou dat v přístrojovém souřadnicovém systému a geografickou polohou (VUGTK 2018). Existují dvě základní metody Georeferencování v pozemním laserovém skenování.

První metoda se nazývá přímé georeferencování. Podle Krause (2007) je možná přímá georeference, pokud je známa pozice laserového skeneru ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), která se dá získat například z GPS, a je určena orientace ( $\omega, \phi, \kappa$ ) skeneru, pak z těchto parametrů a z polárních souřadnic ( $\alpha, \zeta, s$ ) lze určit polohu bodového mračka v požadovaném souřadnicovém systému pomocí vztahu:

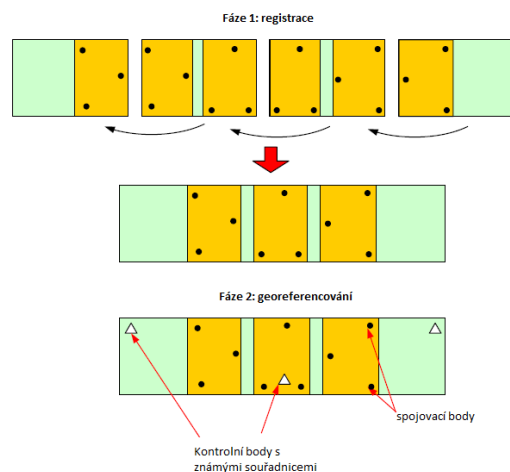
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{pmatrix} + R(\omega, \phi, \kappa) * \begin{pmatrix} s * \sin\zeta * \cos\alpha \\ s * \sin\zeta * \sin\alpha \\ s * \cos\zeta \end{pmatrix}$$

Kde  $X_0, Y_0, Z_0$  je poloha skeneru v požadovaném systému.  $R$  je matice rotace mezi lokálním a globálním souřadnicovým systémem. Pokud je přístroj dobře horizontován a centrován, jsou úhly  $\zeta$  a  $\alpha$  rovny 0.

Druhá metoda se nazývá nepřímé georeferencování. Pokud není známa pozice skeneru a směrové úhly, musí být tyto body určeny nepřímo pomocí kontrolních bodů (Kraus 2007). Poloha těchto bodů je známá v požadovaném souřadnicovém systému. Existují dvě možnosti, jak provést nepřímou georeferenci.

- „Dvoufázové georeferencování“

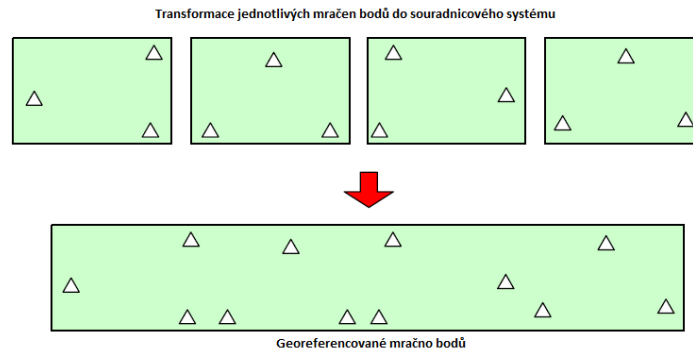
- První krok je registrace těchto skenů do společného souřadnicového systému. Tento krok se obvykle nazývá globální registrace. Registrace probíhá pomocí spojovacích bodů (obr. 7).
- Druhým krokem je převod registrovaného mračna bodů do požadovaného souřadnicového systému. Pro tento krok je potřeba mít minimálně 3 kontrolní body viditelné v mračnu bodů. Tyto kontrolní body by neměly ležet na jedné přímce, ale měly by být dobře rozložené v prostoru (Reshetyuk 2009).



obr. 7: Dvoufázové georeferencování (Reshetyuk 2009)

- „Jednofázové georeferencování“

- Při jednofázovém georeferencování není potřeba provést registraci. K referencování každého skenu dochází individuálně. Aby mohl být tento přístup použit, je potřeba mít na každém skenu minimálně tři kontrolní body, a opět platí, že by měly být dobře rozložené v prostoru a neměly by ležet na jedné přímce. Tato metoda nevyžaduje žádný překryt jednotlivých mračen bodů (Reshetyuk 2009). Princip jednofázového georeferencování je znázorněn na obr. 8.



obr. 8: jednofázové georeferencování (Reshetyuk 2009)

## 5. Fotogrammetrie

Slovo *fotogrammetrie* vzniklo spojením tří řeckých slov: *fotos* – světlo, *gramma* – záznam, *metrie* – měření (Pavelka 2009). Prvně toto slovo použil německý architekt Albrecht Maydenbauer, který mezi roky 1858 a 1909 zaznamenal na 16000 měřičských snímků nejdůležitějších architektonických děl v Prusku (Kraus 2007). Fotogrammetrie může být popsána jako věda a umění měřit a interpretovat snímky za účelem vytvoření 3D nebo 2D modelů měřeného objektu (Lerma 2010).

Fotogrammetrie zahrnuje metody snímkového měření a jejich interpretaci za účelem získat tvar a polohu objektů z jedné nebo více fotografií objektu. Primárním účelem fotogrammetrie je 3D rekonstrukce objektu v digitální (souřadnice a geometrické prvky), nebo v grafické (snímky, výkresy, mapy) formě (Luhmann 2006).

Podle Krause (2007) mohou být výsledkem fotogrammetrické analýzy:

- Čísla – souřadnice jednotlivých bodů ve třídimenzionálním systému souřadnic
- Výkresy (analogicky) – mapy a plány s planimetrickými údaji společně s vrstevnicemi a dalšími grafickými prvky.
- Geometrické modely (digitální) – záznamy v informačních systémech
- Snímky (analogické a digitální) – vše výše zmíněné, ortofota a z nich odvozené mapy, trojrozměrné fotomodely, které jsou texturované CAD modely s texturou získanou z fotografií.

Fotogrammetrie je jedna z hlavních mapovacích technik. Fotogrammetrie se nevyužívá pouze v geodézii a kartografii, ale má daleko širší využití. Mezi nejčastější využití patří stavebnictví,



### 5.1.3 Transformace souřadnic

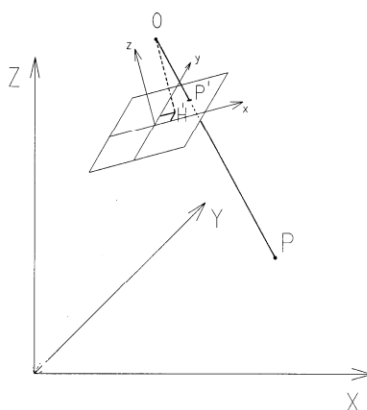
Pokud jsou známy prvky vnitřní a vnější orientace, pak pro bod P a P' platí následující

vztah:

$$\begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{pmatrix} + mR \begin{pmatrix} X_{P'} \\ Y_{P'} \\ Z_{P'} \end{pmatrix}$$

Kde  $X_P, Y_P, Z_P$  jsou souřadnice bodu P v objektovém souřadnicovém systému,  $X_H, Y_H, Z_H$  jsou souřadnice středu promítání,  $X_{P'}, Y_{P'}, Z_{P'}$  jsou souřadnice bodu P' v snímkovém souřadnicovém systému, m je měřítko a R je matice rotace (obr. 10) (Hanzl 2006).

Známe-li prvky vnitřní a vnější orientace, můžeme určit polohu každého bodu, nacházejícím se v prostoru, v souřadnicích obrazové roviny podle výše uvedeného vztahu (Luhmann 2006).



Obr. 10: Vztah mezi objektovými a snímkovými souřadnicemi (Hanzl 2006)

### 5.1.4 Kamery ve fotogrammetrii

Kamery můžeme dělit na měřické, semiměřické a neměřické (Luhmann 2006). Měřické kamery, jak už název napovídá, slouží pro měřické účely. Tyto kamery mají známé prvky vnitřní orientace s vysokou přesností a jsou stabilní. Semiměřické kamery se svojí přesností blíží ke kamerám měřickým. Tyto kamery obsahují mřížku v rovině snímku. Neměřické kamery mají neznámé prvky vnitřní orientace a jsou nestabilní.

### 5.1.5 Kalibrace kamery

Většina fotoaparátů není určena pro měřické účely, a proto mají často neznámé prvky vnitřní orientace. Pro určení vlastností neměřických kamer se používá kalibrace. Podle Pavelky (2007) se při tomto postupu určuje:

- Konstanta kamery.
- Poloha hlavního snímkovacího bodu.



- Radiální a symetrické zkreslení.
- Tangenciální a asymetrické zkreslení.
- Afinita a nekolmost os souřadnicového systému.
- Další přídavné parametry.

Kalibraci kamery je potřeba provádět cyklicky, protože vliv na tyto hodnoty má opotřebování, nárazy či počasí.

## 5.2 Dělení fotogrammetrie

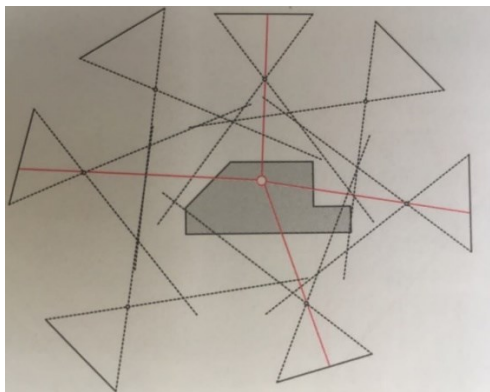
Fotogrammetrii je možné rozdělit pomocí několika způsobů. Podle Luhmanna (2006) je rozdělení následující:

- Podle pozice kamery a vzdálenosti od objektu
  - Satelitní fotogrammetrie – snímkování pomocí satelitu, z výšky větší než 200 kilometrů
  - Letecká fotogrammetrie – snímkování pomocí letadla nebo bezpilotního letadla (UAV)
  - Pozemní fotogrammetrie – měření z fixního stanoviště na zemi
  - Blízká fotogrammetrie – vzdálenost menší než 300 metrů
  - Makrofotogrammetrie – nadživotní velikosti (mikroskopické snímkování)
- Podle počtu snímků
  - Jednosnímková fotogrammetrie – pouze pro rovinné souřadnice
  - Stereofotogrammetrie – měření minimálně z dvou snímků, musí být přibližně rovnoběžné osy snímků
  - Vícesnímková (průseková) fotogrammetrie – počet snímků je větší, každý bod se musí nacházet minimálně na třech snímcích
- Podle metody pořízení a zpracování
  - Rovinná fotogrammetrie – grafické vyhodnocování (cca do 1930)
  - Analogová fotogrammetrie – analogové snímky, opticko-mechanické měřicí systémy
  - Analytická fotogrammetrie – analogové snímky, počítačem řízené měření
  - Digitální fotogrammetrie – digitální snímky, počítačem řízené měření
  - Videogrammetrie – digitální pořízení a měření snímku
  - Panoramatická fotogrammetrie – panoramatické snímky
  - Liniová fotogrammetrie – analytická metoda založená na rovných liniích
- Podle dostupnosti změřených výsledků

- Fotogrammetrie v reálném čase – nahrávání a měření dokončené v určitém časovém intervalu v závislosti na aplikaci
- Off-line fotogrammetrie – rozděleno na sekvence, nahrávání digitálních snímků časem nebo lokací od měření
- On-line fotogrammetrie – současné nahrávání a měření

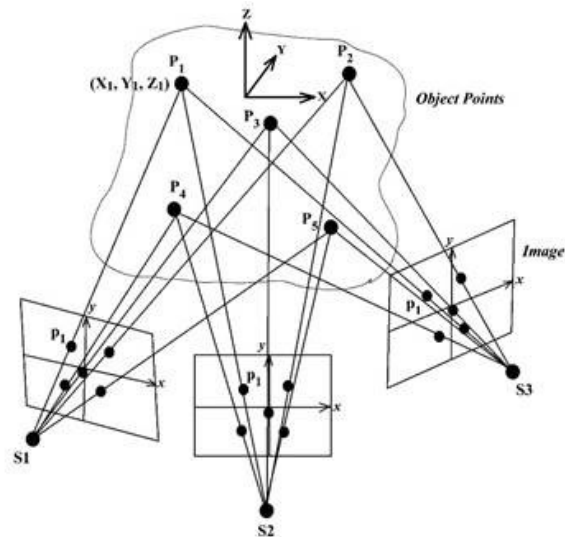
## 6. Pozemní Průseková fotogrammetrie

Jedná se o jednu z nejstarších fotogrammetrických metod. Při této metodě vzniká výsledný obraz objektu pomocí překryvu třech a více snímků (obr. 11). Pro úspěšnou rekonstrukci objektu je nutné, aby každý bod byl zaznamenán minimálně na třech snímcích. V ideálním případě každý následující snímek obsahuje 60 % ze snímku předchozího (Luhmann 2006). Průseková fotogrammetrie se nejčastěji používá pro stavební objekty. (Staněk 2013). Nejčastěji se snímky pořizují na vzdálenost několika metrů, ve výjimečných případech až na vzdálenost stovek metrů. Dle kamery, velikosti objektu a požadované přesnosti určíme vzdálenost snímkování od objektu. Průseková fotogrammetrie není omezena výběrem pozice pro pořízení snímků. V principu je možné pořádit nekonečné množství snímků z jakékoliv pozice, pokud existuje dostatečný překryv mezi jednotlivými snímky.



Obr. 11: Snímkování metodou průsekové fotogrammetrie (Luhmann 2006)

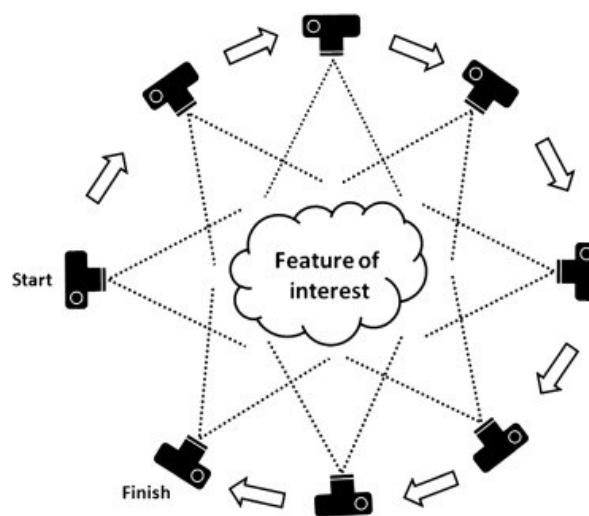
Souřadnice objektů jsou určeny mnohosnímkovou triangulací. Pro určení prostorových souřadnic bodů je nutné mít minimálně tři snímky daného objektu (obr. 12). Souřadnice bodů  $P_1$  až  $P_5$  jsou zaznamenány minimálně na třech snímcích. Paprsky se v daných bodech protínají. Snímkové souřadnice těchto bodů jsou zaznamenány a následně je vypočítána jejich prostorová souřadnice pomocí vztahu uvedeném v kapitole 5.1.3. Je nutné znát prvky vnitřní a vnější orientace (Luhmann 2006).



Obr. 12: Určení souřadnic  $X, Y, Z$  pomocí protínajících se paprsků

## 6.1 Structure-from-Motion

Metoda Structure-from-Motion (SfM) neboli struktura z pohybu pracuje na stejných základních principech jako průseková fotogrammetrie. 3D strukturu snímaného objektu je možné získat ze vzájemně se překrývajících snímků (obr. 13). Nicméně se tato metoda zásadně liší od konvenční fotogrammetrie tím, že geometrie scény, pozice kamery a orientace kamery jsou řešeny automaticky bez potřeby specifikovat body o známých souřadnicích. Pozice kamery a geometrie objektu je vytvořena pomocí automatické identifikace odpovídajících bodů v několika snímcích. SfM postrádá měřítko a orientaci. Vytvořený model se zobrazuje v obrazovém souřadnicovém systému. Převod do globálního systému probíhá pomocí několika známých bodů (Westoby 2012).



Obr. 13: Metoda Structure-from-Motion (Westoby 2012)

## 7. Sběr dat

Tato část je věnována vlastnímu sběru dat. Je zde představeny použité přístroje, nastavení těchto přístrojů a nastavení scény. První část se zabývá použitým fotoaparát a snímkováním s tímto přístrojem. V Druhé části je popsán sběr dat pomocí laserového skeneru a jeho nastavení.

### 7.1 Fotoaparát

Pro pořízení vlastních snímku byl použit fotoaparát Nikon D750 s objektivem AF-S 24-120 f/4G. Fotoaparát byl zapůjčen katedrou aplikované geoinformatiky a kartografie. Digitální zrcadlovka Nikon D750 má obrazový snímač s 24,3 milionu pixelu. Citlivost ISO, která určuje citlivost senzoru, je možné nastavit v rozsahu 100 – 12 800. Nejdelší expoziční čas je 30 s a nejkratší 1/4000 s, čím delší čas je vybrán, tím déle na obrazový senzor dopadá světlo. Objektiv AF-S 24-120 f/4G má minimální ohniskovou vzdálenost 24 mm a maximální je 120 mm, a maximální clonové číslo 22. Díky cloně je možné regulovat množství světla procházejícím objektivem fotoaparátu. Fotoaparát nabízí různé režimy snímkování, které umožňují různé stupně kontroly nad přístrojem (tab. 4) (Nikon 2014). Režim Programová automatika (P) slouží především pro rychlé focení. Clonová automatika (S) pro rozmazání nebo zmrazení pohybu. Časová automatika (A) se hodí pro ostré pozadí i popředí nebo pro rozmazání pozadí. V manuálním expozičním režimu (M) je možné nastavit vše ručně podle vlastních potřeb. V ostatních režimech je vše nastaveno automaticky (Nikon 2014).

Tab. 4: Možnosti nastavení v různých režimech (Nikon 2014)

	Clona	Čas závěrky	Citlivost ISO (☐ 322)	Korekce expozice	Měření expozice
P, S	—	—	—	✓	✓
A	✓	—	—	✓	✓
M	✓	✓	✓	—	✓
SCENE, ☐	—	—	—	✓	—
Ostatní provozní režimy	—	—	—	—	—

### 7.2 Vlastní snímkování

Vlastní snímkování probíhalo dvakrát. Poprvé se snímkovalo v Mapové sbírce UK a podruhé na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie. První snímkování probíhalo s ohniskovou vzdáleností kamery 24 mm a druhé s 120 mm. Obou případech byla lebka umístěna na otočném podstavci do světelného foto stanu a fotoaparát byl uložen na stativu. Snímkování probíhalo ve třech polohách lebky, a to čelisti směrem dolů, čelisti směrem nahoru a na boku (obr. 14).



Obr. 14: Ukázka snímků

Před snímkováním je důležité si ujasnit postup práce. Podle uživatelského návodu Agisoftu (2016) by kamera měla mít více než 5 megapixelů. Ohnisková vzdálenost by se měla pohybovat mezi 20 až 80 mm a snímkovat by se mělo v krajní poloze. Při druhém snímkování byla použita ohnisková vzdálenost 120 mm, protože se nachází v krajní poloze.

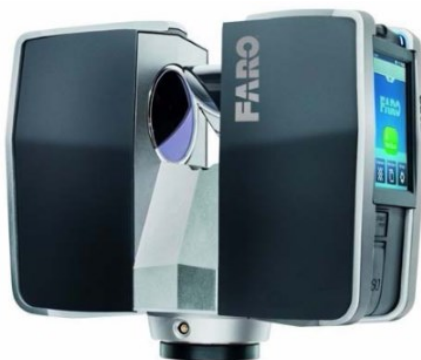
Snímky by se měli pořizovat v maximálním možném rozlišení. Je nutné počítat s kompresí kvality, pokud je vybrán formát JPEG. Bezkompresní formát RAW není ve většině softwarů podporován, a proto je nutné ho konvertovat na TIFF. Hodnota ISO by měla být co nejnižší. Jednou z nejdůležitějších věcí je ostrost snímků. Pokud snímky nejsou ostré, většina fotogrammetrických programů je nedokáže jednoznačně identifikovat vzájemně si odpovídající body. Pokud snímkování probíhá z ruky, je nutné nastavit krátký expoziční čas, jinak může dojít k rozmazání snímku kvůli pohybu ruky. Při snímkování byl zvolen formát JPEG a režim snímkování M, kdy byla snaha o pořízení co nejkvalitnějších snímků s nastavením nízké hodnoty ISO, velkou clonou a delším časem.

Fotogrammetrie se nehodí pro lesklé předměty, transparentní objekty nebo pro objekty bez textury. Dále by se nemělo snímkovat na slunečním světle nebo při jiném ostrém světle. Snímání objekt by měl zabírat minimálně 60 % snímku. Vyhýbat by se mělo také pohybujiícím se předmětům. V případě snímkování ze stativu by měl snímávaný objekt v ideálním případě zabírat 100 % plochy snímku. Pokud tomu tak není je potřeba použít masky, které budou popsány v kapitole č. 8.2.1. Snímkováná lebka měla relativně dobrou texturu. Lesklé části se nacházeli jenom na zubech. Jelikož při obou snímkování byl použit stativ, k oběma sériím byly přidány masky. Podmínka 60 % nebyla u některých poloh fotoaparátu při prvním snímkování, kvůli velikosti podstavce, na kterém se lebka nacházela, ale i tyto snímky bylo možné připojit pomocí maskování.

Při fotogrammetrickém snímkování je doporučováno vytvořit více snímků, než je potřeba. Tímto se předchází vytváření slepých míst v modelu. Celkově bylo pořízeno 333 snímků při prvním snímkování a 199 snímků při snímkování druhém. Takto vysoký počet snímků není potřeba, ale jelikož mnoho snímků bylo neostrých a tudíž nepoužitelných, bylo to žádoucí pro tento případ.

### 7.3 Laserový skener

Lasrové skenování bylo provedeno pomocí laserového skeneru FARO Focus3D-X130 Laser Scanner (obr. 15). Tento laserový skener byl, stejně jako fotoaparát, pro účel této práce zapůjčen katedrou aplikované geoinformatiky a kartografie. Podle výrobce (Faro 2015) slouží tento skener pro rychlé pořízení detailních 3D snímků pro účely měření a dokumentace. Skener pracuje na principu fázového posunu, jehož princip byl detailněji popsán v kapitole 2.2. Výrobce skeneru dále uvádí, že je možné provádět až 976 000 měření za sekundu, výsledkem těchto měření je 3D mračno bodů, které obsahuje miliony bodů. Počet naměřených bodů se odvíjí od nastaveného rozlišení, to je možné nastavit 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20 a 1/32. Kromě rozlišení je také možné nastavit kvalitu skenu, ta může být nastavena od 1 až do 8. Kvalita snímku udává, počet opakovaných měření každého bodu. Dále je možné zapnout barevné snímkování, kde je každému bodu kromě prostorové polohy je také přiřazena RGB hodnota. Doba každého měření se odvíjí od nastaveného rozlišení, kvality a barevného snímkování. Dále přístroj obsahuje altimetr, inklinometr, kompas a GPS. Maximální chyba měření se uvádí 2 mm na 25 m.

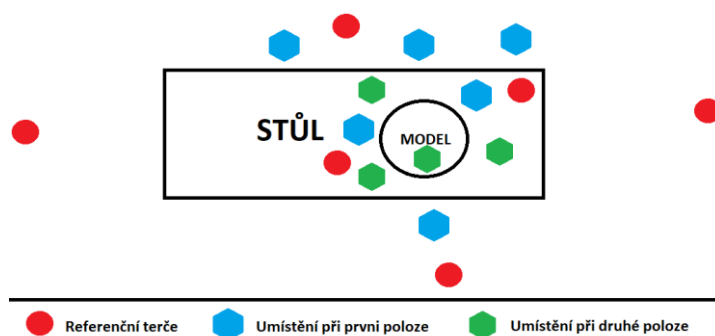


obr. 15: FARO Focus3D-X130 Laser Scanner (Faro 2015)

### 7.4 Vlastní Skenování

Vlastní skenování probíhalo v Mapové sbírce UK. Před skenováním je nutné se ujistit, zdali se ve skenované scéně nachází dostatečný počet referenčních bodů, které umožní snadnou a přesnou registraci jednotlivých skenů. Jako referenční body byly vybrány umělé sférické terče. Terče byly také zapuštěny katedrou aplikované geoinformatiky a kartografie. Tyto sférické terče jsou bílé koule o průměru 139 mm. Sférické terče musí být vždy viditelné celé, zakrytí jakékoliv části naruší jejich správnou identifikaci. Terče byly rozmístěny asymetricky tak, aby tvořili polygon kolem skeneru (obr. 16). Byly též umístěny v různých výškách a vzdálenostech. Žádný dva terče by neměli mít mezi sebou vzdálenost menší než 1 m. Důležitým údajem je také minimální vzdálenost od

skanovaného objektu, která se doporučuje mezi 60–70 cm, v ideálním případě 100 cm. Tímto rozmístěním byly dodržena všechna doporučení pro správné umístění referenčních bodů. Skenování by se nemělo odehrávat v extrémních podmínkách, tj. při vysokých či nízkých teplotách, v dešti apod. Objekt by se též neměl nacházet na přímém slunci. Pro dosažení nejpřesnějších výsledků je nutné „zahřát“ přístroj, tak aby se stabilizovala jeho vnitřní teplota. Skenovat by se taktéž nemělo s nedostatečným osvětlením.



obr. 16: pozice skeneru a terčů při skenování

Po přípravě scény a rozmístění referenčních terčů byla na scénu také umístěna lebka. Lebka se skenovala ve dvou různých polohách. V první poloze byla lebka čelistí směrem dolů a v druhé poloze čelistí nahoru (obr. 17). Celkem bylo pořízeno deset skenů, z toho šest v první poloze a čtyři v poloze druhé.



obr. 17: pozice lebky (vlevo první poloha, vpravo druhá poloha)

Před začátkem samotného skenování je nutné nastavit skener pro konkrétní druh měření. Jako první údaj se vyplňuje název projektu. Pro tento účel byl založen projekt *lebka*.

Skener nabízí možnost nastavit rozsah skenování (obr 18). Tato možnost je velice užitečná, při skenování konkrétních objektů, kde není potřeba zobrazit okolí daného objektu. Tímto vzniká značná úspora datové kapacity. Omezit skenovací území jde jak horizontálně, tak vertikálně. Horizontálně je maximální nastavitelný rozsah 0° až 360°. Jelikož byla lebka položena na stole a skenování probíhalo kolem ní, nebylo potřeba skenovat na plných 360° a proto byl horizontální rozsah omezen na 60° až 320°. Tento rozsah mohl být i menší, ale pro zachycení dostatečného počtu referenčních bodů nedostatečný. Dále je možné omezit i vertikální úhel. Při plném měření jsou

hodnoty nastaveny na  $-60^\circ$  až  $90^\circ$ . Pro možnost umístění referenčních terčů v různých výškách byl tento parametr nastaven  $-60^\circ$  až  $60^\circ$ .



obr. 18: Nastavení rozsahu skenování (Faro 2015)

Dalším krokem je nastavení kvality a rozlišení. V nastavení skeneru je možné si vybrat z předdefinovaných profilů indoor ...10 m, outdoor 10 m... atp. Žádný z těchto profilů nepracuje s nejvyšším rozlišením, a proto bylo pro účel skenování lebky rozhodnuto skenovat s manuálním nastavením, kdy první dva skeny byly pořízeny v největším rozlišení tj. 1/1 a kvalita skenu byla nastavena na 3x. Při této konfiguraci dokáže skener zaznamenat až 710 milionů bodů s rychlostí 122 tisíc bodů za sekundu. Doba pořízení jednoho skenu s tímto nastavením je 52 min. Další čtyři skeny byly pořízeny s rozlišením 1/2 a kvalitou 3x. Doba těchto skenů je přibližně 14,5 minut. Čtyři zbývající skeny v druhé poloze lebky byly pořízeny s rozlišením 1/2 s kvalitou 2x, přičemž skenovací doba jednoho skenu byla 7 minut takto nastavením skenerem může být vzdálenost mezi body 2-5 mm na 10 m.

## 8. Zpracování dat ze snímkování

Tato část je věnována tvorbě 3D modelu ze snímků. Práce probíhala v programu Agisoft Photoscan. Kromě představení programu zde bude také popsán detailní postup práce v tomto programu. Taktéž budou popsány masky a jejich využití.

### 8.1 Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan (PS) je komerční software pro generování 3D prostorových dat z digitálních snímků. Tento program byl vytvořen Ruskou firmou Agisoft LLC. Práce v softwaru probíhala na počítači katedry aplikované geoinformatiky a kartografie, kde se nachází PRO verze softwaru. PS slouží pro tvorbu pokročilých 3D modelů ze statických snímků. Snímky mohou být pořízeny z jakéhokoliv místa za předpokladu, že existuje dostatečný překryt mezi snímky. Potřebné



hardwarové vybavení se odvíjí od počtu zpracovávaných snímků, jejich rozlišení a překrytu. Doporučené základní vybavení je 16 GB paměti RAM. Doporučováno je také použití vícejádrového procesoru s frekvencí vyšší než 3 GHz. PS také vyžaduje extra výkonnou grafickou kartu s minimální pamětí 4 GB. PS je možné spustit na operačních systémech Windows, Linux a Mac OS (Agisoft 2016). Nevýhodou je náročnost na hardwarové vybavení a vysoká cena, kde cena jedné profesionální licence je bezmála 90 000 Kč. Výhodou programu je možnost upravovat snímky a tvořit modely plně automaticky. Další výhodou je uživatelské rozhraní, které je velice intuitivní.

## 8.2 Tvorba modelu

Před samotným spuštěním PS je vhodné projít pořízené snímky a nevyhovující odmazat. Pokud snímkování probíhalo ve více polohách, je vhodné snímky rozdělit do více složek. První krok po spuštění PS je import snímků. Snímky se importují do takzvaných *Chunks*, což se dá přeložit jako kusy. Rozdělení do *Chunks* je vhodné v případě snímkování statickou kamerou, kdy se mění poloha snímaného objektu, nebo v případě velkých projektů, kdy není vhodné zpracovávat snímky dohromady. Snímky byly rozděleny do tří *Chunks* bez nutnosti ručního výběru díky předchozímu rozdělení snímků do různých složek.

### 8.2.1 Maskování

Masky se používají v případě, kdy specifické části snímků mohou být matoucí. Konkrétně se používají v případech, kdy snímaný objekt zabírá pouze malou část snímku, nebo je snímek částečně rozmazan. Masky je nutné použít v případě, kdy se snímkuje objekt na otáčecím podstavci. Masky slouží pro označení části, které mají být vyloučeny z výpočtů. Masky je možné použít v různých fázích zpracování. Poprvé je možné je použít při orientování snímků, dále při budování *dense cloud*, nebo při tvorbě textury.

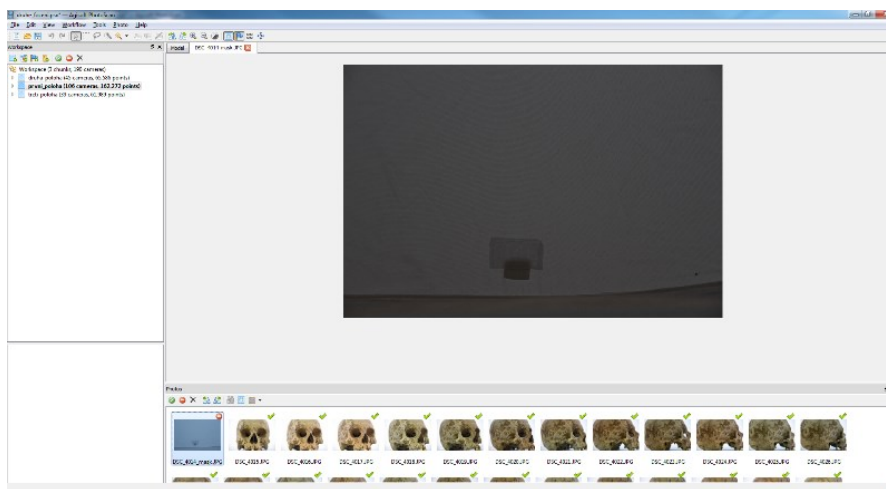
Masky je možné vytvořit několika způsoby. První způsob je tzv. *alpha channel*. Při této metodě se na pozadí snímkaného objektu umístí jednobarevné plátno (obvyklé zelené). Důležité je, aby se na snímkaném objektu nenacházela stejná barva jako je barva plátna. Při zpracování je plátno jednoduše detekováno a odmazáno, díky čemuž zůstane viditelný pouze snímaný objekt.

Další možnost je tzv. možnost *from file*, kde se maska aplikuje na jeden snímek v jiném obrázkovém editoru a je importována pro všechny snímky PS. Tato možnost je vhodná pro objekty, které mají na snímcích stejné umístění a jsou stejně velké.

Třetí možnost je *from background*. Při použití této metody je pořízen snímek scény ještě před umístěním objektu. Tato metoda je podobná metodě *alpha channel* s rozdílem, že je místo plátna snímek porovnáván se snímkem pozadí a jsou odmazány místa, kde je shoda těchto snímků.

Čtvrtá možnost je *from model*. Tuto možnost je možné použít až po vytvoření bodového mračna, kdy se označí ručně plochy modelu, které mají být brány v potaz při dalších výpočtech. Nevhodné jsou plochy kulovitého tvaru, nebo se složitější geometrií.

Poslední možnost je vytvořit masky ručně, kdy se na každém snímku označí nežádoucí plochy. Tato možnost je velice zdouhavá zvláště při velkém počtu snímků. Na druhou stranu se jedná o metodu nejpřesnější. Obvykle je kombinována s výše zmiňovanými možnostmi, kdy jsou vytvořeny automatické masky a poté se pro nedokonalosti upraví ručně (Agisoft 2016).



Obr. 19: Snímek použitý pro maskování

Při prvním snímkování nebyla žádná z automatických možností použita a všechny masky se vytvářely ručně. Při druhém snímkování byla vybrána možnost *from background* (obr. 19).

Masky není možné vytvořit před orientací snímků. Z tohoto důvodu byly snímky nejdříve orientovány pomocí align photos na nejnižší nastavení. Při této operaci se nepodařilo snímky orientovat správně, ale bylo možné vytvořit masky. Všem 347 snímkům byly vytvořeny masky ručně. Kromě nežádoucího pozadí byly odmaskovány i všechny neostré části snímků.

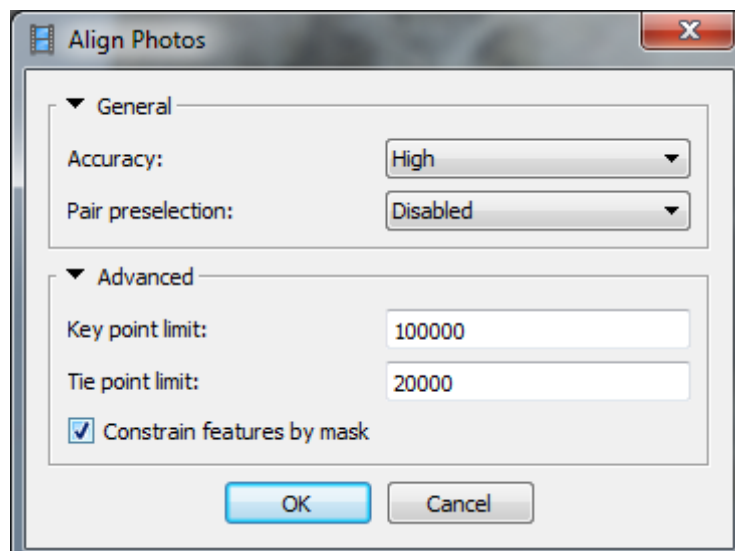
I při druhém snímkování, kdy byla použita metoda *from background*, se tvorba neobešla bez ručních oprav masek. Kromě toho, že se masky aplikovaly na některé části lebky, se také musely odmaskovat všechny neostré části snímků (obr. 20).



Obr. 20: Ukázka vytvořené masky

### 8.2.2 Orientace snímků

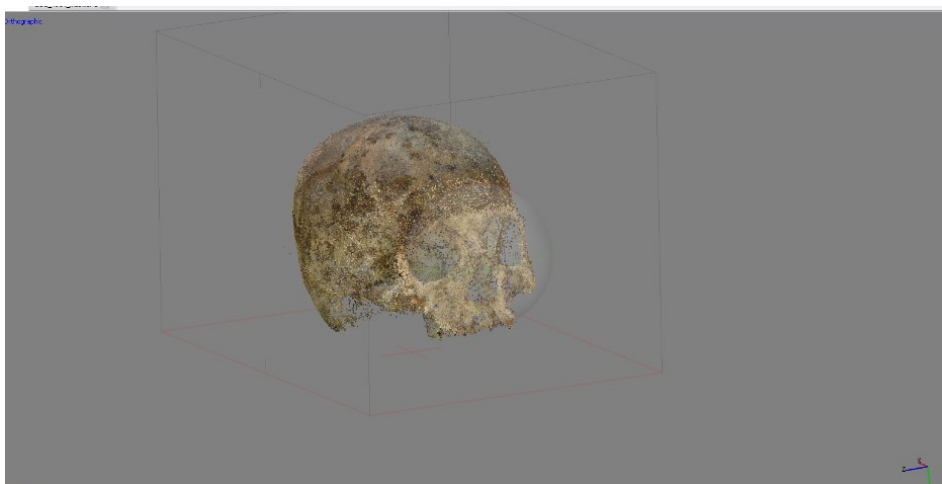
Po vytvoření masek je možné přejít k orientování snímků. K tomu slouží funkce *align photos*. Aby se nemusely funkce spouštět zvlášť pro jednotlivé *chunks*, je možné použít *batch proces*, kde je možné funkce aplikovat na všechny vybrané *chunks* zároveň. Kromě toho je možné nastavit několik po sobě jdoucích funkcí najednou, a tím automatizovat celý proces. Je to vhodné využít při zpracování snímků, kdy není potřeba nic upravovat či odmazávat. Snímky je možné orientovat s následující nastavením od *very low*, přes *low*, *medium*, *high*, až *highest*. V tomto případě byla vždy použita možnost *high*, protože se pracuje s plným rozlišením snímků (obr. 21). Kromě přesnosti je možné nastavit i maximální počet bodů, které by měly být na modelu detekovány a maximální počet bodů, které by měly být shodné s více snímky. V našem modelu byly tyto hodnoty nastaveny na 100 000 a 20 000. Při tomto kroku je důležité zaškrtnout políčko *constrain features by mask*. Díky tomu jsou při výpočtu budou brány v potaz pouze části, které nejsou odmaskovány.



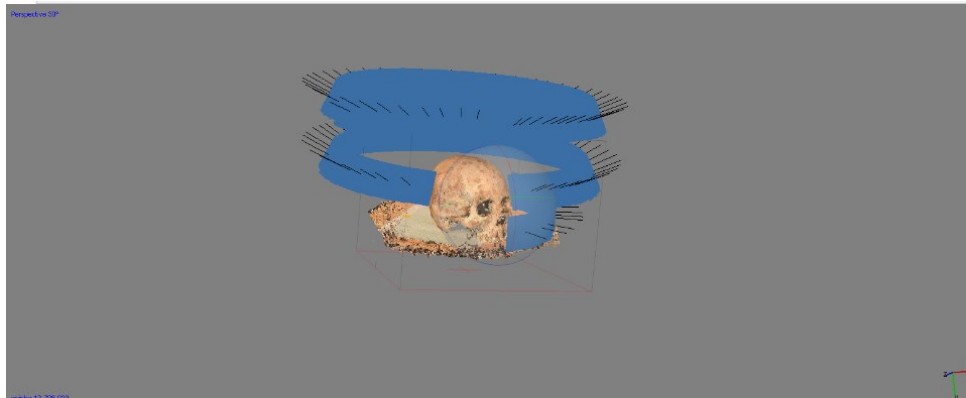
Obr. 21: Dialogové okno nastavení pro orientování snímků

Při orientování snímků se provádí autokalibrace kamery. Parametry kamery je možné najít v menu *tools* pod názvem *camera calibration*. Je zjišťována konstanta kamery, souřadnice hlavního snímkového bodu, radiální a tangenciální distorze a afinita. Distorze čoček by měla odpovídat Brownově distorznímu modelu, proto není doporučováno používat rybí oka nebo širokoúhlé objektivy. Pokud jsou použity, musí se nastavit typ použitého objektivu (Agisoft 2016). Hodnoty obou kalibrací je možné nalézt na cloud disku pod názvy *auto\_kalibrace\_1.xml* a *auto\_kalibrace\_2.xml*.

Po orientování snímků vznikne řídké bodové mračno (obr. 22). V první snímkovací sadě bylo v součtu pro všechny polohy vytvořeno 672 107 bodů. U druhé sady bylo vytvořeno 295 556 bodů. Také je možné si zobrazit pozice kamer (obr. 23). Pokud se snímkování provádí pomocí stativu, pozice snímků by měly vytvořit „dokonalé“ prstence okolo modelu.

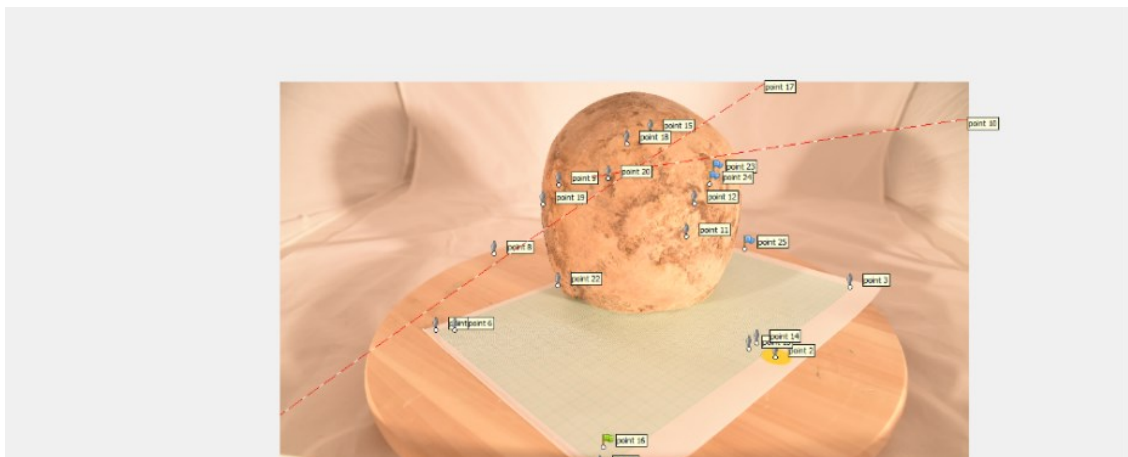


Obr. 22: Bodové mračno



Obr. 23: Pozice kamer

Pokud se všechny snímky neorientují automaticky, je možné je orientovat pomocí *markers*. Pro orientování snímků je nutné určit minimálně čtyři body. Body by měly být umístěny v různých výškách pro lepší výsledek. Tyto body se musí určit minimálně na dvou orientovaných snímcích a následně se určí stejná poloha ve všech neorientovaných snímcích. Při vlastní práci se v druhé sadě snímků podařilo všechny snímky orientovat automaticky. V modelu z prvního snímkování se nepodařilo automaticky orientovat všechny snímky, a proto bylo nutné orientovat cca. 100 snímků. Bylo umístěno celkem dvacet osm *markers* (obr. 24). Vysoký počet bodů je potřeba, aby bylo možné umístit minimálně čtyři viditelné body na všechny neorientované snímky. Některé z těchto bodů byly následně použity pro nastavení měřítka.

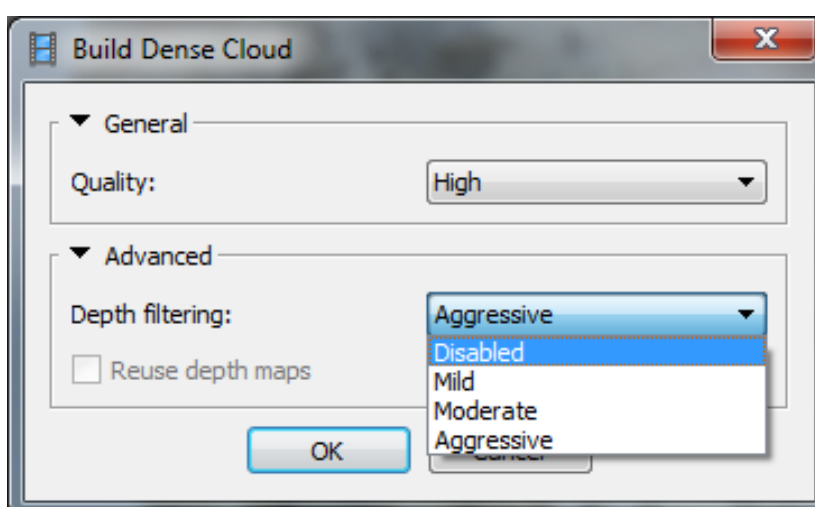


Obr. 24: Umístění markers

Před dalším krokem je nutné smazat nepotřebné body nebo body špatně určené. Většina této práce byla prováděna ručně, kdy se vyberou body pomocí výběrových funkcí a mažou se pomocí *delete*. Určitou pomoc poskytuje funkce *gradual selection*, kde je možné po zvolení možnosti *reconstruction uncertainty* pomocí posuvníku nastavit toleranci pro vybrání bodů u kterých je nejistota správného umístění.

### 8.2.3 Husté bodové mračno

Po očištění bodového mračna je možné použít funkci *build dense cloud*. Jedná se o nejnáročnější operaci pro výpočetní výkon. *Dense cloud*, neboli husté mračno, je nutné vytvořit, protože předchozí vytvořené mračno neobsahuje dostatečný počet bodů pro tvorbu přesného modelu. Stejně jako funkce *align photos* i *build dense cloud* rozlišuje kvalitu *ultra low*, *low*, *medium*, *high* a *ultra high*. Možnost *ultra high* pracuje se snímky v plném rozlišení, každá další možnost snižuje rozlišení o jednu úroveň. Dále je možné zvolit vhodnou funkci *depth filtering*. Tato funkce filtruje odlehlé hodnoty v mračnu bodů. Funkce nabízí čtyři možnosti (obr. 25). Možnost *mild* se využívá pro členité povrchy, *aggressive* pro hladké objekty, *moderate* je kombinací předchozích dvou a *disabled* nefiltruje žádné body. V našem modelu bylo použito nastavení *high* a *aggressive*.



Obr. 25: Dialogové okno nastavení hustého mračna

Po vytvoření hustého bodového mračna se musí z mračna odmazat nežádoucí body. Tento proces probíhá stejně jako u prvního bodového mračna. Na takto vytvořeném mračnu jsou už velice dobře vidět detaily (obr. 26). Před vytvořením polygonové sítě je nutné smazat podstavec.



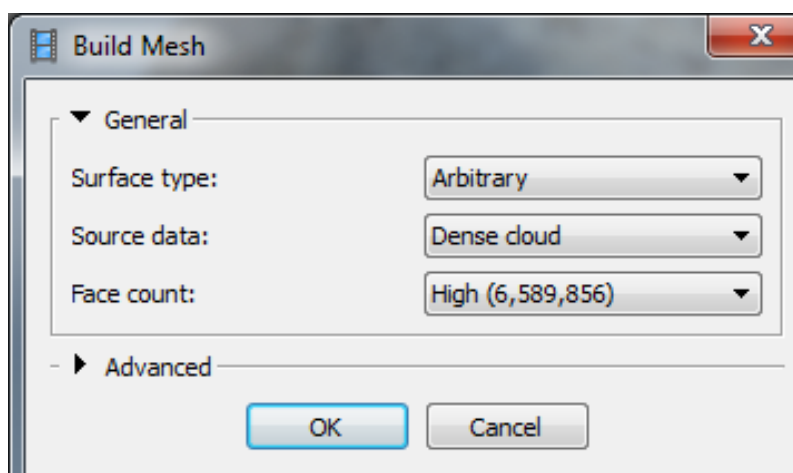
Obr. 26: Vytvořené bodové mračno z první sady snímků

V této fázi bylo také definováno měřítko. Měřítko se pro obě sady snímků definovalo pro polohu lebky čelistí dolů. K tomuto účelu u první sady snímků posloužily značky, které byly vytvořeny při manuálním orientování snímků. U druhé sady tyto body byly nově vytvořeny. Vzdálenosti byly určeny na milimetrovém papíru vloženém pod lebku na podstavci.

Ještě před vytvořením polygonové sítě bylo nutné jednotlivé polohy lebky spojit do jednoho bodového mračna. To je možné pomocí funkcí *align chunks* a *merge chunks*. První zmiňovaná funkce jednotlivé skupiny orientuje a druhá funkce provede spojení. Pokud existuje dostatečný překryv, je orientace provedena automaticky. Pokud se automatická orientace z nějakého důvodu nepovede, je možné také tyto *chunks*, stejně jako snímky, orientovat pomocí *markers*. Funkce také umožňuje vybrat referenční *chunk*, ke kterému jsou ostatní skupiny zarovnány. V našem případě byl vždy zvolen jako referenční *chunk* ten, u kterého bylo vytvořeno měřítko. Spojené husté mračno bodů obsahovalo 13 030 337 bodů v první sadě a 47 852 616 v sadě druhé. Poměr těchto bodů je opačný než u řídkého mračna. Toto je způsobeno tím, že při tvorbě hustého mračna bodů v druhé sadě byl odfiltrován pouze malý počet bodů. Konkrétně bylo použito 227 858 bodů z 295 556 v první sadě. V druhé sadě bylo pro tvorbu hustého mračna použito pouze 159 215 bodů z 672 107.

#### 8.2.4 Polygonová síť

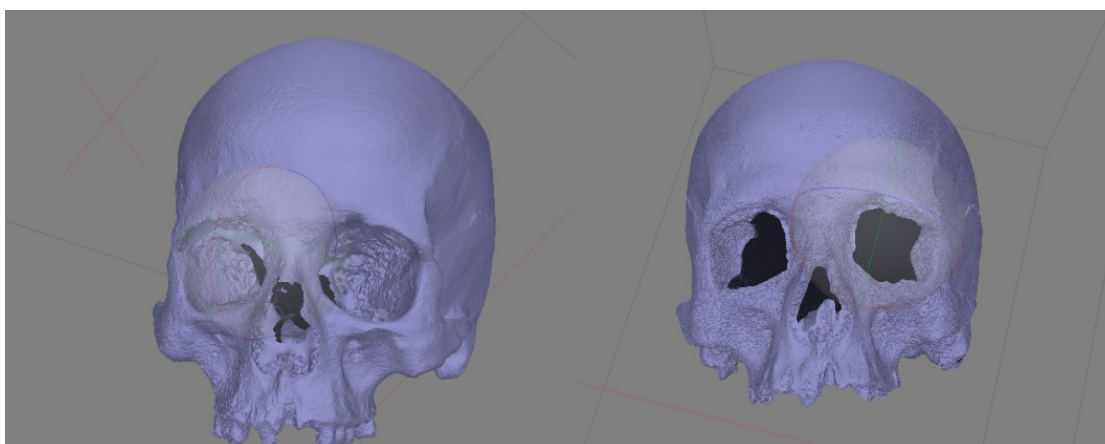
Z takto vytvořeného a spojeného hustého mračna bodů je možné vytvořit polygonovou síť. To se provádí pomocí funkce *build mesh*. Tato funkce nabízí několik možností (obr. 27). První možnost je nastavení typu povrchu. To je možné nastavit na *arbitrary* nebo *height field*. První možnost se může použít pro jakýkoliv typ objektu. Měla by být zvolena pro uzavřené objekty, jako jsou sochy, budovy atp. Druhá možnost je optimalizovaná pro zpracování leteckých snímků. Slouží pro modelování terénu. V našem případě byla zvolena možnost *arbitrary*.



Obr. 27: Dialogové okno nastavení polygonové sítě



Druhá možnost je výběr zdrojových dat. Zde je možné nastavit pomocí *point cloud* nebo *dense cloud*. První možnost vytvoří polygonovou síť z mračna bodů, které vzniklo po orientování snímků. Takto vytvořena síť není většinou moc přesná, ale je nenáročná na výpočetní techniku. Druhá možnost vytvoří polygonovou síť z hustého mračna bodů. V našem případě byla zvolena možnost *Dense cloud*. Poslední možnost umožňuje nastavit maximální počet vytvořených polygonů. Na výběr jsou čtyři možnosti: *high*, *medium*, *low* a *custom*. Počet navržených polygonů je vypočítán z počtu bodů vytvořených funkcí *dense cloud*. Možnost *high* je nastavená na 1/5 bodů. Možnosti *medium* a *low* jsou nastaveny na 1/15 a 1/45. Poslední možnost umožňuje nastavení počtu polygonů uživateli. Příliš malý počet polygonů vytvoří hrubou síť. Moc velký počet polygonů způsobí problém s vizualizací modelu v jiných programech. V obou vytvořených modelech byla vybrána možnost *high*. V první sadě snímků takto vzniklo 2 606 066 polygonů. V druhé sadě vzniklo 9 570 522 polygonů. Díky dobré kvalitě hustého bodového mračna se upravovala polygonová síť minimálně (obr. 28).



Obr. 28: Polygonová síť (vlevo – z první sady snímků, vpravo – z druhé sady snímků)

### 8.2.5 Textura

Tento krok není pro tuto práci nezbytný. Na výsledné polygonové síti je možné provádět veškerá měření a porovnávání. I přesto textura byla vytvořena pro lepší estetický dojem. Textura byla vytvořena pomocí funkce *build texture*. Stejně jako ostatní funkce i tato nabízí několik možností nastavení.

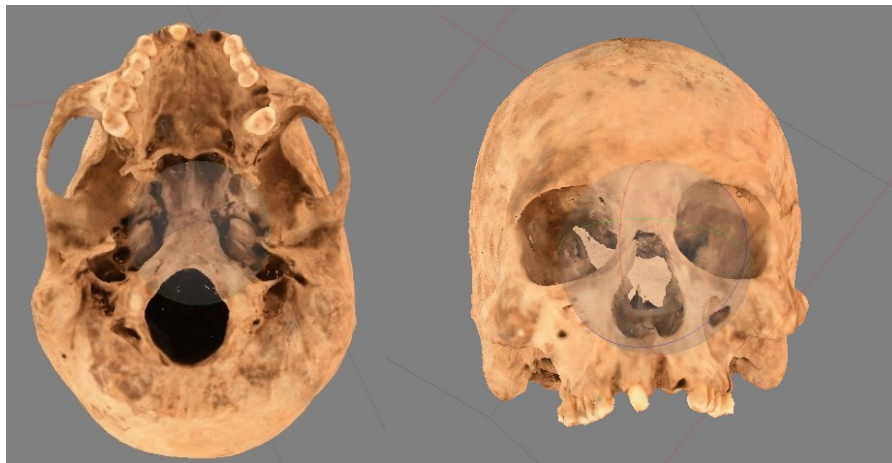
První nastavení je *mapping mode*. Nabízené možnosti jsou *generic*, *adaptive ortophoto*, *ortophoto*, *spherical*, *single photo* a *keep uv*. První možnost slouží pro tvorbu textur modelů libovolné geometrie. Program se snaží vytvořit co nejrovnoměrnější texturu. Tato možnost byla použita pro vytvořené modely. Druhá možnost rozdělí model na plochou část a na vertikální regiony. Ploché části jsou texturovány pomocí ortografické projekce, zatímco vertikální regiony jsou



texturovány zvlášť. Možnost *orthophoto* vytvoří celou texturu pomocí ortografické projekce. Možnost *spherical* se používá pouze pro objekty, které mají kulovitý tvar. *Single photo* umožňuje generování textury z jediného snímku. Poslední možnost *keep uv* zachovává předběžné parametry textury a umožňuje vytvoření textury v jiném softwaru.

Druhé nastavení je *blending mode*. Tímto se určuje, jak hodnoty pixelů z různých snímků budou kombinovány pro finální texturu. Toto nastavení není dostupné, když je textura generována z jediného snímku. První možnost je *mosaic*, která se skládá ze dvou kroků. V prvním kroku se najdou překrývající se snímky a je vypočítána hodnota pixelu pomocí váženého průměru. V druhém kroku je detail pixelu vybrán z jediného snímku, který má nejlepší rozlišení pro danou část. Možnost *average* vypočítá hodnotu pixelu pomocí váženého průměru ze všech snímků. Váhu určuje rozlišení v dané oblasti. Možnost *max intensity* přiřadí hodnotu pixelu ze snímku, která má pro daný pixel největší intenzitu. Opačná možnost je *min intensity*.

Poslední nastavení je *texture size/count*. Tímto se nastavuje výška a šířka pixelů a počet souborů do kterých má být textura exportována. Exportování textury do více souborů umožňuje uchovávat lepší rozlišení výsledného modelu. V našem byla zvolena velikost 4 096 x 4 096 s jedním souborem. Výsledné modely jsou zobrazeny na obr. 29 a obr. 30 a v příloze 2 a 3.



Obr. 29: Výsledný model z první sady snímků



Obr. 30: Výsledný model z druhé sady snímků

### 8.2.6 Export

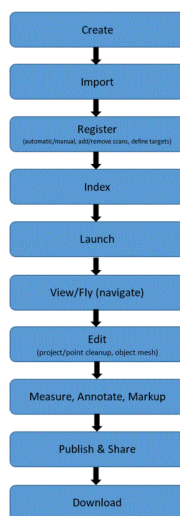
PS nabízí export 3D modelu do následujících formátů: OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, PLY, STL, FBX, DXF, KMZ, U3D a PDF. Vytvořené modely byly exportovány ve formátech OBJ, PLY a PDF. Tyto modely jsou uloženy na přiloženém DVD.

## 9. Zpracování dat z Laserového skenování

Tato kapitola se zabývá tvorbou 3D modelu z dat laserového skenování. V úvodu jsou představeny použité softwary. Poté následuje postup zpracování laserových dat, tvorba 3D modelu a jeho vizualizace.

### 9.1 Použité programy

V první fázi práce byl použit komerční program **ReCap 360**. Tento produkt je vyvíjen a podporován firmou Autodesk, Inc. Plná studentská licence byla získána pomocí přihlášení školním emailem. Program Recap slouží pro zpracování a prohlížení dat z fotogrammetrických a laserových skenovacích projektů. Umožňuje export do různých formátů, které je možné otevřít nejen v programech od společnosti Autodesk. Základní postup práce a možnosti jsou ukázány na obr. 31. Minimální softwarové požadavky jsou Windows 7, 8, 10 (64 bit). Minimální vyžadovaná frekvence procesoru je 2.0 GHz a paměť RAM s kapacitou vyšší než 4 GB. Minimální rozlišení je 1280 x 1024 v pravých barvách. Minimální kapacita grafické karty je 256 MB s nutnou podporou rozhraní OpenGL 3.1. Při těchto minimálních parametrech je program velice pomalý a import jednotlivých skenů může trvat až desítky minut. Výhodou tohoto programu je podpora široké řady formátů a kompatibilita s ostatními programy od společnosti Autodesk. Jako nevýhodu lze označit absence podpory jiných operačních systémů než Microsoft Windows (Autodesk 2018).

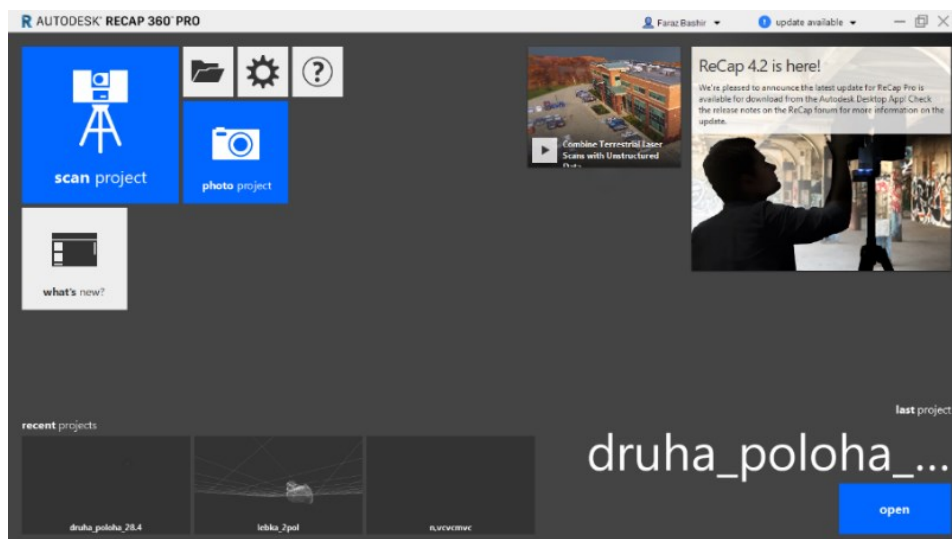


Obr. 31: Postup práce v programu ReCap (Autodesk 2018)

V druhé fázi práce byl použit program **Meshlab**. Je to open source program pro tvorbu a editaci 3D trojúhelníkových sítí. Tento program byl vyvinut vizuálně výpočetní laboratoří v italském národním výzkumném institutu. Meshlab poskytuje nástroje pro vykreslování, editaci, kontrolu, čištění a porovnávání trojúhelníkových sítí (Cignoni 2008). Program je možné spustit na operačním systému Windows XP a novějším. Minimální požadovaná paměť RAM je 1 GB. Velikost na pevném disku je 500 MB. Minimální rozlišení je 1280 x 800. Výhodou programu je podpora i jiných operačních systémů než Windows, jeho malá náročnost na hardware počítače a široká řada podporovaných formátů. Nevýhodou je, že je možné zpracovávat pouze malé projekty.

## 9.2 Tvorba modelu

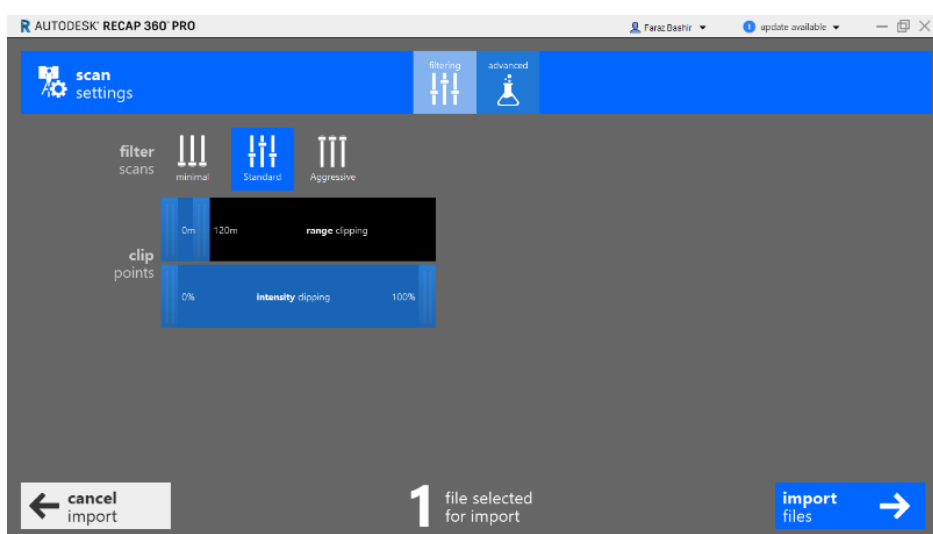
Tvorba modelu probíhala na vlastním domácím notebooku Lenovo G50. Tento notebook splňuje minimální požadavky pro spuštění programu ReCap. Nejprve je nutné zvolit, zda projekt bude založen na fotografiích či na skenech (obr. 32). Po zvolení možnosti *scan project* je možné importovat jednotlivé skeny. Ještě před samotným importem skenu je nutné založit nový projekt. Tento projekt je ve formátu RCP, což je výchozí formát pro všechny projekty v programu ReCap. Vedle souboru RCP také vznikne k tomu přidružená složka, kde se ukládají všechna data z daného projektu.



Obr. č. 32: Úvodní menu programu ReCap

### 9.2.1 Import skenů

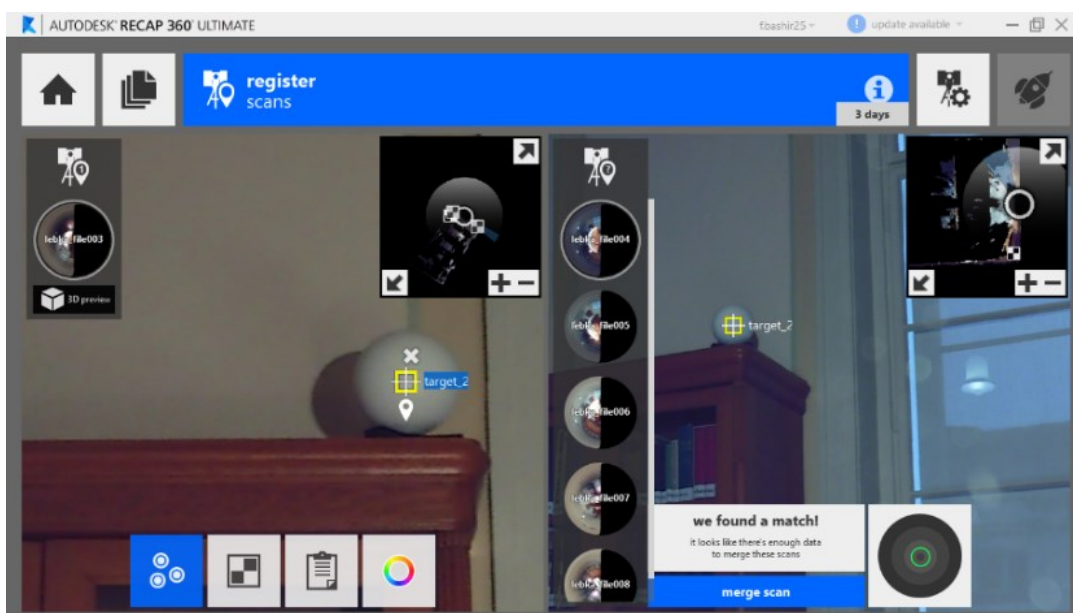
Importovat skeny je možné buď jednotlivě, nebo je možné importovat celou složku. Importovat lze taktéž přetažením složky skenu do ReCapu. V tomto případě byla zvolena možnost importu jednotlivých skenů, protože se skeny ze skeneru Faro nachází v různých složkách. Už při importu skenu je možné provést některé úpravy. Například je možné nastavit maximální vzdálenost importovaných bodů od skeneru (obr. 33). Pro import vlastních skenů nebyly tyto hodnoty nijak upravovány, protože při skenování byl omezen zorný úhel skeneru. Doba nahrání skenů se odvíjí od počtu skenů a hardwarového vybavení počítače. Na osobním notebooku, který splňuje pouze minimální požadavky, byla doba nahrání šesti skenů okolo dvaceti minut, přičemž na počítači neprobíhala žádná jiná činnost.



Obr. č. 33: Základní možnosti filtrace skenu

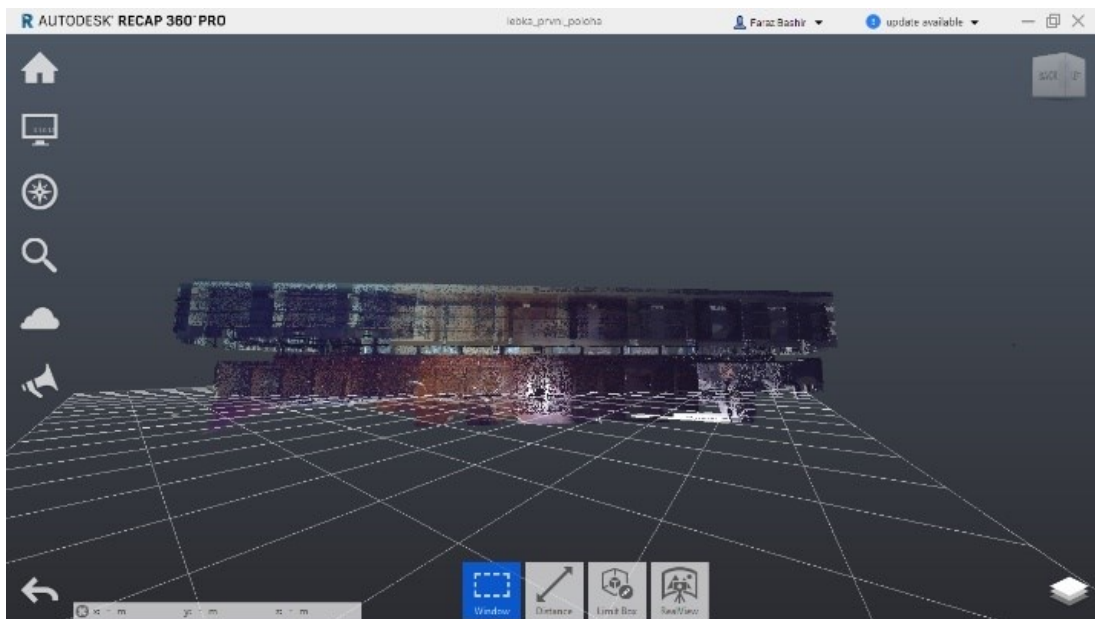
## 9.2.2 Registrace

Po dokončení importu všech skenů je možné zahájit registraci. ReCap nabízí možnost automatické nebo manuální registrace. Při zvolení možnosti automatické registrace proběhne registrace pomocí metody *cloud to cloud*, která je popsána v kapitole 4.1. Možnost manuální registrace umožňuje rozdělit skeny do různých skupin. Rozdělení do skupin napomáhá k větší přehlednosti větších projektů, které často obsahují desítky až stovky skenů. Pro účel této práce byla vytvořena pouze jediná skupina. Manuální registraci je možné provést pomocí terčů nebo společných bodů. Tyto možnosti lze také kombinovat. V tomto případě byla provedena registrace manuální, v kombinaci terčů a společných bodů. Jako první krok je nutné vybrat jeden sken, který slouží jako referenční. Další skeny jsou polohovány podle referenčního skenu. Nejdříve se vyberou terče nebo spojovací body na skenu referenčním a poté na skenech ostatních (obr. 34). Velikost sférických terčů není nutné definovat, jsou rozpoznány automaticky. Po nalezení dostatečné shody se na spojovaném skenu zobrazí možnost *merge scan*, která skeny spojí. Po tomto spojení se sken z levé sekce přesune do pravé a stává se skenem referenčním. Takto se postupuje u všech skenů.



Obr. č. 34: Registrace

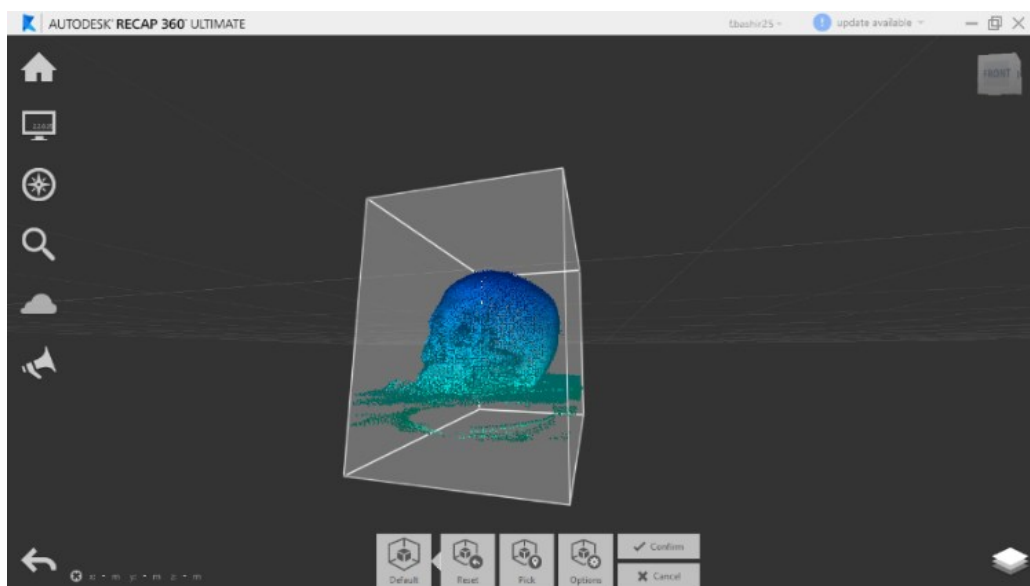
Po dokončení registrace se provádí indexování. Tento krok je velice časově náročný. Dochází při něm k přepisování struktury dat. Ukládají se data o poloze, klasifikaci, intenzitě atp. pro každý jednotlivý bod do jednodušší struktury než předtím. Také se redukuje počet bodů ve výsledném mračnu. Je zde snaha o zmenšení objemu dat pro snadnější manipulaci (Vo 2016). Po dokončení indexování je možné začít bodové mračno prohlížet nebo upravovat (obr. 35). Mračno je možné zobrazit několika způsoby např. v pravých barvách, intenzitě, nebo elevace. Také je možné provádět různá měření.



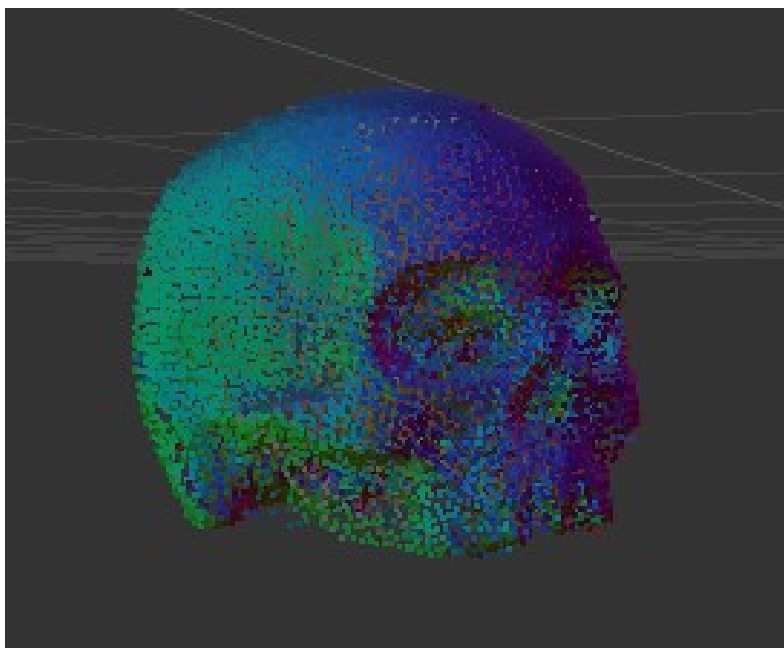
Obr. 35: Registrované mračno bodů

### 9.2.3 Příprava pro mesh

Ještě před vytvořením polygonové sítě (mesh) je nutné extrahovat pouze lebku. Celé mračno tvoří 40,5 mil. bodů. Na samotnou lebku připadalo necelých 20 tisíc bodů v první poloze a 9 tisíc v druhé poloze. K tomuto účelu slouží funkce *limit box*, kterou se ohraničí pouze potřebná část mračna (obr. 36). Toto slouží pouze pro hrubé očištění mračna. Díky větší přehlednosti v limitboxu je možné mračno důkladněji očistit pomocí nástrojů pro výběr mračna. Izolovaná lebka je zobrazena na obr. 37.



Obr. 36: Limit box



Obr. 37: Izolovaná lebka

ReCap nabízí svojí vlastní funkci pro tvorbu polygonové sítě. Funkce mesh pracuje na cloudové jednotce a díky tomu neklade velké nároky na výpočetní výkon. Nevýhodou je, že nabízí pouze tři možnosti pro tvorbu polygonové sítě, a to *low*, *medium*, *high*. Tyto možnosti nejsou nijak popsány, a proto není možné určit konečný počet trojúhelníků. Mesh je možné vytvářet pro objekty s maximálním rozměrem 30 x 30 m. Mesh vytvořený pro první polohu lebky je zobrazen na obr. 38.



Obr. 38: Mesh vytvořen v programu ReCap



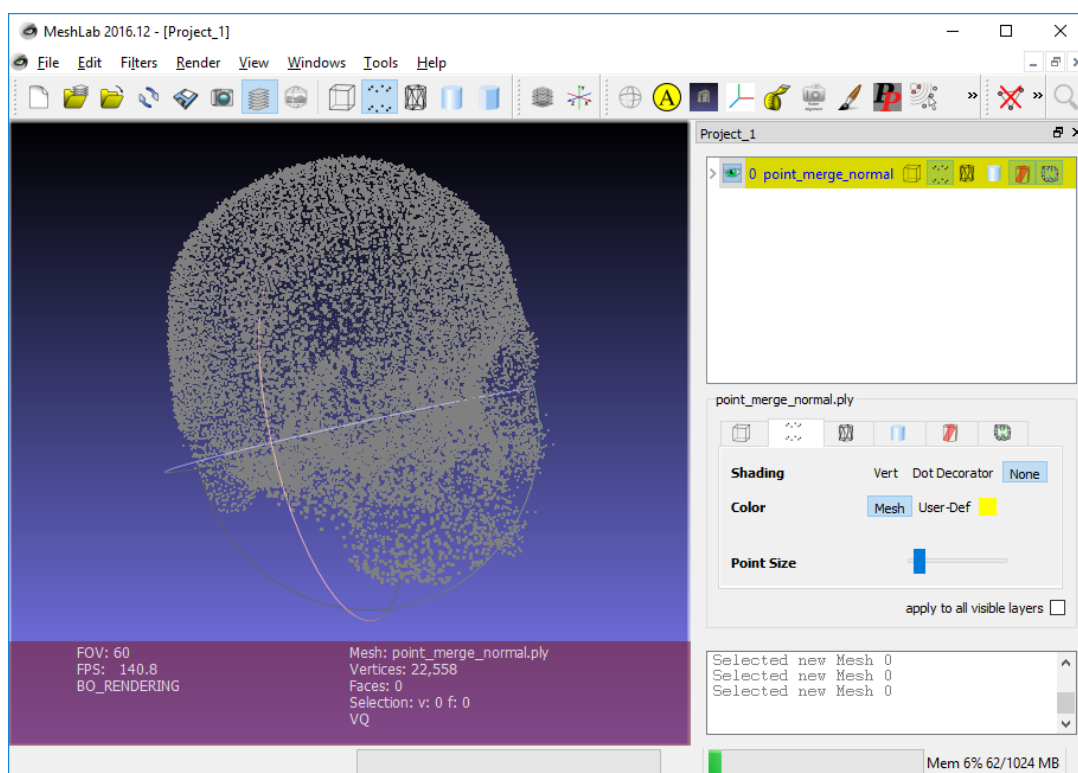
Polygonová síť vytvořená v programu ReCap je velice hrubá. ReCap se nehodí pro malé objekty se složitou geometrií. Také nenabízí možnost dalších úprav vytvořené polygonové sítě.

#### 9.2.4 Export

Výsledný mesh je vytvořen v programu meshlab, a proto je nutné bodové mračno exportovat ve vhodném formátu. Meshlab nabízí import několika formátů napr. OBJ, TXT, PLY, ASC. Z ReCap nabízí export ve formátech RCP, RCS, PTS, E57 a PCG. Většina těchto formátů není programem Meshlab podporována. Bodové mračno bylo exportováno ve formátu PTS, což je formát podobný k ASC, který je meshlabem podporován. Aby tento soubor bylo možné nahrát do programu Meshlab, byla změněna jeho koncovka na ASC.

#### 9.2.5 Tvorba meshe

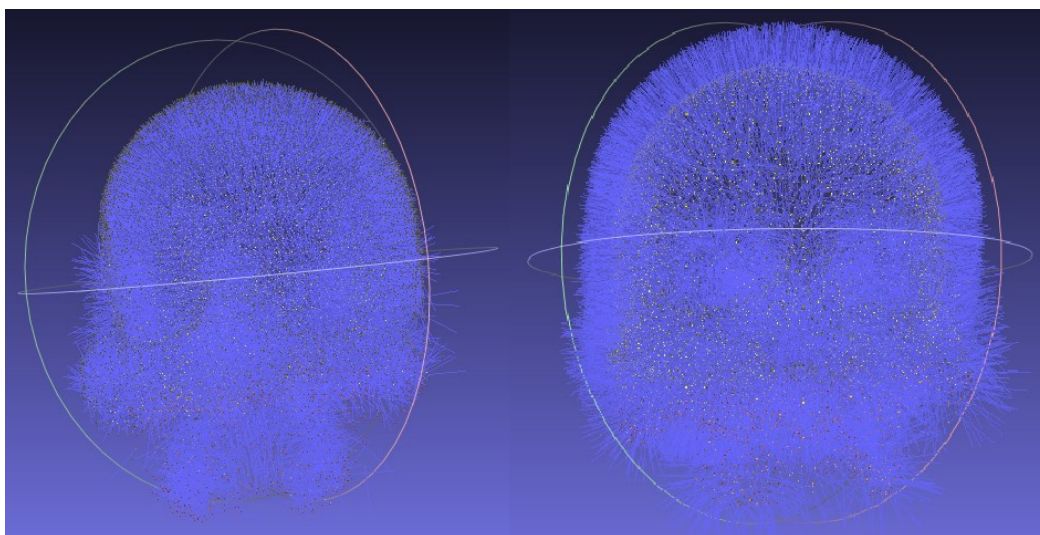
Do programu Meshlab byly importovány obě polohy lebky. Jako první je nutné obě bodová mračna správně zarovnat a spojit do jednoho. K tomu prvnímu slouží funkce *align*. Na výběr jsou 2 způsoby jak mračna zarovnat, a to pomocí čtyř společných bodů nebo pomocí ručního zarovnání. V tomto modelu byla mračna spojena pomocí společných bodů. Po orientování mračen do správné polohy je možné je spojit do jednoho. To je možné pomocí funkce *flatten visible layers*. Spojené mračno bylo ještě naposledy ručně očištěno od nepřesných bodů. Konečný počet bodů pro tvorbu polygonové sítě je 22 558 (obr. 39).



Obr. 39: Mračno bodů



Dalším krokem je výpočet normál pro všechny body. K tomu slouží funkce *compute normals for point sets*. První nastavení *neighbour num* je počet sousedních bodů, ze kterých bude odhadnuta normála pro daný bod. *Smooth iteration* udává počet opakování. Pokud je známa pozice kamery nebo laserového skeneru je možné nastavit výpočet z daného místa. Program ne vždy odhadne normály správně, a proto je nutné akci několikrát opakovat. V tomto modelu se podařilo dosáhnout nejlepšího výsledku pomocí nastavení 13 sousedních bodů a dvou iterací (obr. 40).



Obr. 40: Odhadnuté normály (vlevo – nesprávné, vpravo – správné)

Meshlab nabízí dva základní algoritmy pro tvorbu polygonové sítě. Každý z těchto algoritmů má své výhody a nevýhody a je určen pro rekonstrukci jiného druhu povrchu.

První z nich je **Ball-Pivoting** algoritmus. Jedná se o interpolační triangulační filtr, který vytváří povrch objektu ze všech dostupných bodů (Cignoni 2008). Princip algoritmu je velmi jednoduchý. Na začátku se vytvoří trojúhelník, dokud se koule, jejíž poloměr je definován uživatelem, nedotýká tři bodů a neobsahuje žádný jiný. Od tohoto počátečního trojúhelníku se začne koule otáčet kolem dvou hran, dokud se nedotkne dalšího bodu a nevytvoří tak další trojúhelník. Proces pokračuje, dokud nejsou vyzkoušeny všechny dosažitelné hrany (Bernardini 1999). Algoritmus se nehodí pro data, která obsahují velké odchylky. V nastavení algoritmu je možné nastavit tři základní parametry. První je poloměr otáčející se koule, další je klastrový rádius, který se odvíjí od poloměru koule. Toto nastavení brání vytváření příliš malých trojúhelníků. Pokud se v zadaném rádiu nachází více bodů, jsou sloučeny do jednoho. Poslední nastavení je maximální úhel otočení koule.

Druhý algoritmus je **Poisson Surface Reconstruction**. Tento algoritmus vytváří vodotěsné povrchy bez děr, kde jsou chybějící části interpolovány z okolních bodů. Rekonstrukce povrchu

probíhá ve čtyř krocích. Jako první krok algoritmus vyžaduje, aby všechny body byly orientovány. Proto je nutné před spuštěním vypočítat normály. Pokud jsou všechny body orientovány, algoritmus vypočítá gradient indikátorové funkce. Jedná se o vektorové pole, které má skoro všude nulovou hodnotu, kromě blízkosti povrchů, kde je hodnota rovna normálám. Ve třetím kroku je vypočítána indikátorová funkce, která je inverzní ke gradientu. V posledním kroku je vytvořen hladký model povrchu (Kazhdan 2006). Nevýhodou je snaha vždy model celý uzavřít a s tím související ztráta některých detailů. I v tomto algoritmu je možné upravit tři základní nastavení. První nastavení je hloubka octree. Octree je způsob rozdělení 3D prostoru, kde na první úrovni je celý prostor. V druhé úrovni je tento prostor rozdělen na osm částí a ve třetím je každá z těchto osmi částí rozdělena na další osm částí. Pokud je hodnota příliš nízká, výsledný model má mnoho hran. Pokud je naopak příliš vysoká, výsledný model je příliš zaoblený. Tento proces se opakuje podle zadané hodnoty. Druhé nastavení je minimální počet bodů, které by se měly nacházet v nejvyšší úrovni octree. Pokud se stanovený počet bodů v této úrovni nenachází, posune se algoritmus o úroveň níž. Poslední nastavení je interpolační váha bodů v rovnici rekonstrukce.

Pro zjištění ideálního nastavení bylo vytvořeno celkem devět modelů. Šest z těchto modelů bylo vytvořeno pomocí Poisson Surface Reconstruction algoritmu (Tab. 5). Zbývající tři pak pomocí Ball-Pivoting algoritmu (Tab. 6).

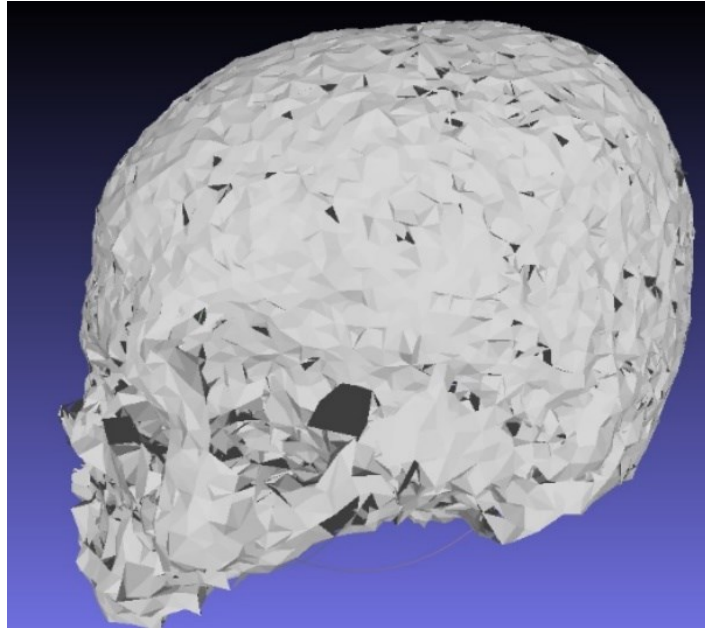
Tab. 5: Nastavení Poisson Surface Reconstruction algoritmu

Číslo modelu	Reconstruction depth	Number of samples	Interpolation weight
1	8	1,5	4
2	12	1,5	4
3	12	5	4
4	12	10	4
5	12	2	2
6	12	10	2

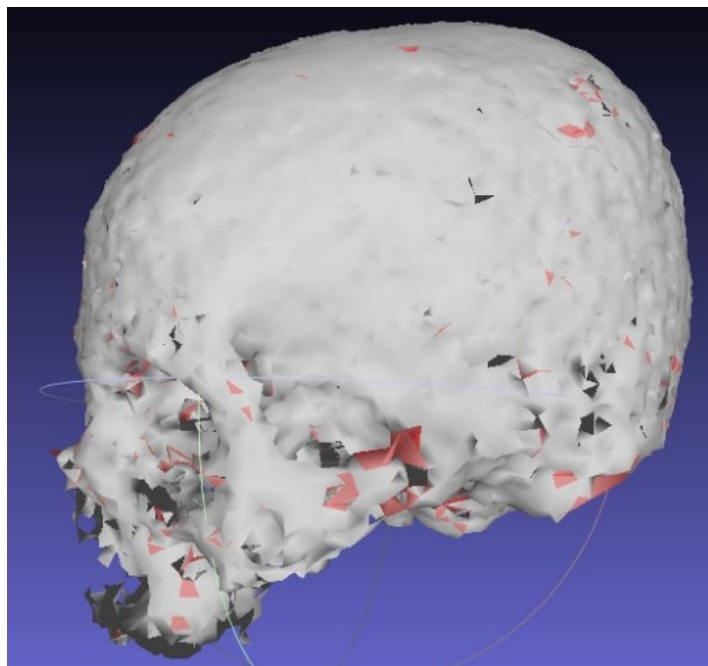
Tab. 6: Nastavení Ball-Pivoting algoritmu

Číslo modelu	Radius	Clustering radius	Angle threshold
7	0,30	20	90
8	1	20	90
9	2	20	90

Modely vytvořené pomocí Ball-pivoting algoritmu obsahují mnoho děr a ostrých hran (obr. 41). K odstranění děr byla použita funkce *close holes*, ani však s touto funkcí se nepodařilo všechny díry uzavřít. Pro redukování ostrých hran byla použita funkce *depth smooth* (obr. 42). Tento algoritmus není vhodný pro tvorbu složitějších tvarů.

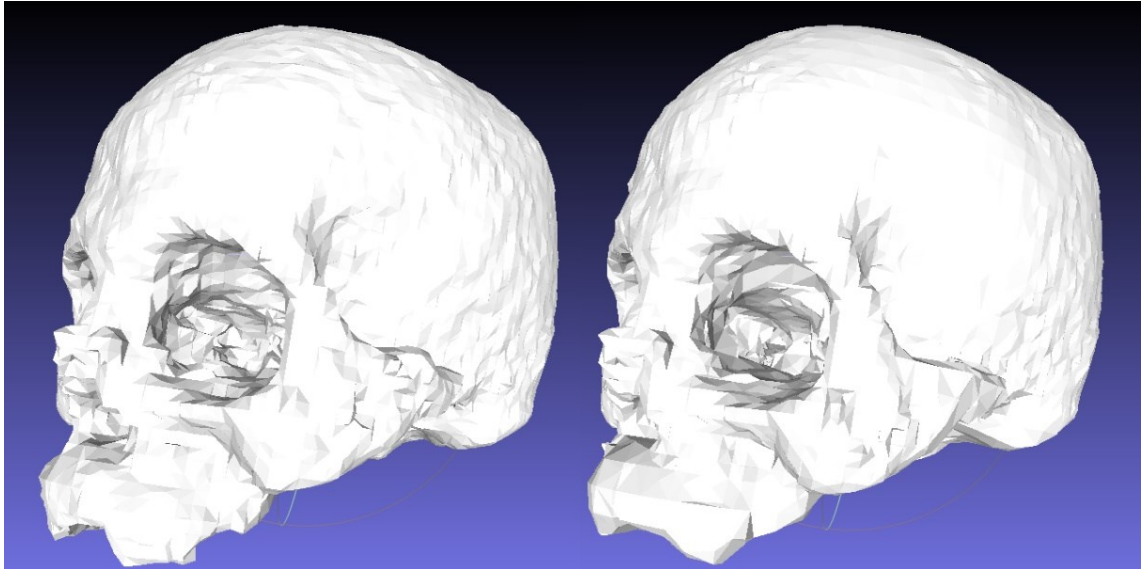


Obr. 41: model číslo 9 vytvoření algoritmem Ball-Pivoting

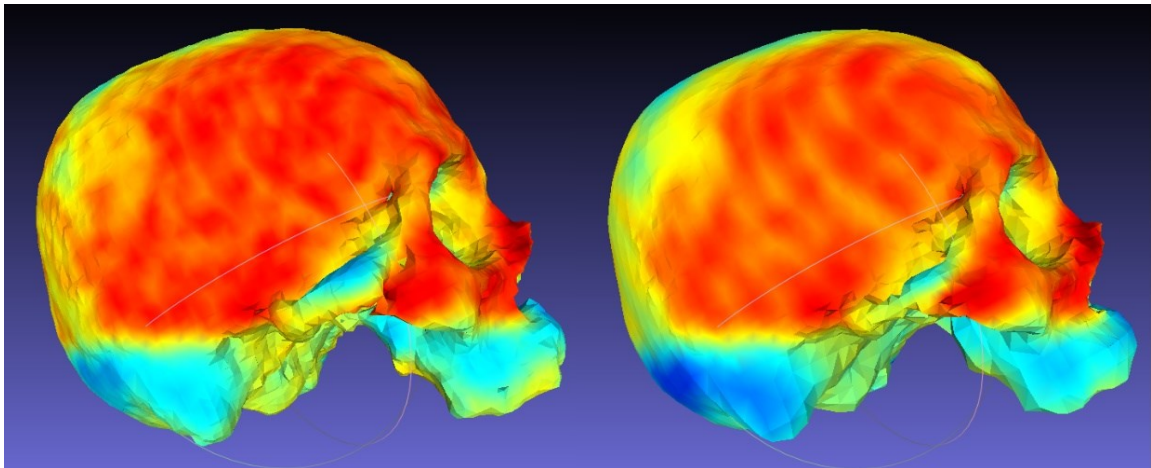


Obr. 42: Model číslo 8 po aplikování funkcí close holes a depth smooth

Modely vytvořeny Poisson Surface Reconstruction algoritmem jsou už na první pohled znatelně hladší (obr. 43). Neobsahují žádné díry a ani příliš ostré hrany. Kvalitu výsledných modelů je možné si zobrazit pomocí funkce *quality mapper*. Tato funkce vytvoří histogram a obarví jednotlivé polygony podle jejich kvality. Červená místa zobrazují nejkvalitnější části a modrá místa nejméně přesné oblasti. Jak lze vidět na obr. 44, nejpřesnější části modelu se nachází na horní části lebky.



Obr. 43: Modely vytvořeny Poisson Surface Reconstruction (vlevo – model 3, vpravo – model 6)



Obr. 44: Kvalita modelů vytvořených Poisson Surface Reconstruction (vlevo – model 3, vpravo – model 6)

## 10. Porovnání modelů

Pro porovnání modelů z dat laserového skenování, fotogrammetrie s CT modelem byl použit program CloudCompare. Tento open source software slouží pro zpracování 3D mračen bodů. Kromě mračna bodů je možné také porovnávat trojúhelníkové sítě a kalibrované snímky. Původní program byl vytvořen ve spolupráci s Telecom ParisTech a Électricité de France S.A. Původně byl vytvořen pouze pro porovnání dvou mračen bodů nebo pro porovnání mračna bodů s trojúhelníkovou sítí. Po změně licence na open source jsou do softwaru přidávány další funkce jako např. registrace, statistické porovnávání, segmentace, tvorba trojúhelníkové sítě. CloudCompare je dostupný pro Windows, Linux a Mac OS X (CloudCompare 2016).

Modely byly importovány ve formátu PLY. Jedinou výjimkou byl model ze CT, který byl importován ve formátu OBJ. Jako první po importu jednotlivých modelů byla aplikována funkce *sample points on mesh*, která vytvoří vzorek z původního modelu. Velikost vzorku je zadávána uživatelem. V našem případě byla zvolena hodnota 1 milion bodů. Tato hodnota je dostatečně velká pro kvalitní porovnání.

Program CloudCompare nemá jednotky. Vzdálenosti jsou počítány pomocí souřadnic. Aby bylo možné modely porovnávat, musí mít stejnou velikost. Na jednotlivých modelech bylo změřeno vždy deset stejných vzdáleností a byla provedena transformace. Poté bylo nutné modely zarovnat na sebe. Toho bylo dosaženo pomocí funkce *align two clouds by picking*. Jako první je nutné definovat referenční model. V našem případě se vždy jednalo o model ze CT. Dále se na obou modelech vyberou minimálně čtyři body, díky kterým dojde k orientování snímků. Po dokončení orientování je konečně možné modely porovnat pomocí funkce *compute cloud/cloud distance*.

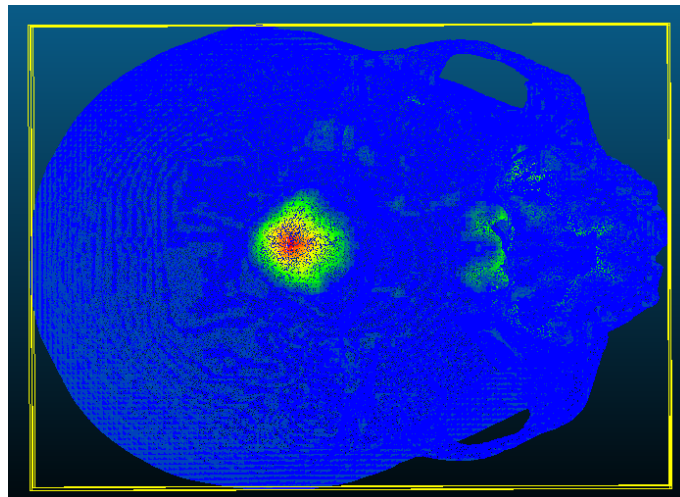
Celkem bylo provedeno dvanáct porovnání. Devět porovnaní bylo provedeno mezi modelem ze CT a modely z laserového skenování. Dvě porovnání byla mezi modelem ze CT a modely vytvořenými pomocí fotogrammetrie. Poslední porovnání bylo pak mezi oběma modely z fotogrammetrie. Kompletní přehled lze vidět v tab. 7. Hodnoty uvedené v tabulce jsou vypočítány programem CloudCompare.

Maximální vzdálenost u všech modelů byla naměřena v týlním otvoru na spodní straně lebky. To je u modelů z laserového skenování způsobeno tím, že se algoritmy pro tvorbu trojúhelníkové sítě snažily tento otvor uzavřít. U modelů ze snímků je to způsobeno nedostatečným osvětlením vnitřní části lebky, kdy na snímcích byly vnitřní body špatně identifikovány (obr. 45).



*Obr. 45: Špatně identifikované body*

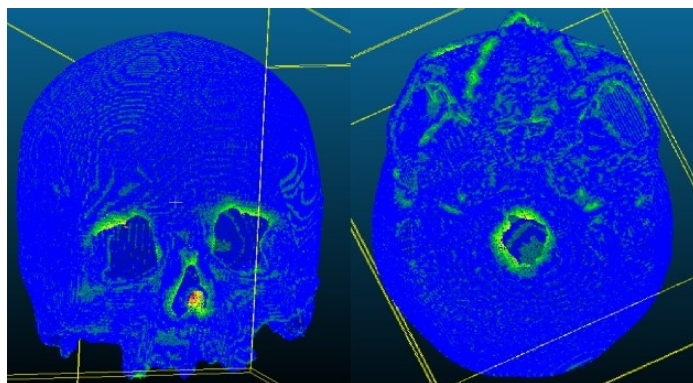
Jako nejpřesnější model z hlediska průměrných hodnot se dá označit model z první sady snímků, kde jeho průměrná vzdálenost od modelu ze CT je 0,57 mm. Tuto hodnotu je možné ještě snížit pomocí očištění nepřesných bodů v týlním otvoru. Obr. 46 zobrazuje barevný histogram odchylek modelu s porovnáním s modelem ze CT. Modré hodnoty zobrazují nepřesnější části a červené hodnoty naopak nejméně přesné.



*Obr. 46: Barevný Histogram odchylek*

Nejmenší rozdíly byly zaznamenány mezi modely ze snímků, kdy průměrná vzdálenost je 0,02 mm. Největší rozdíly mezi těmito modely jsou v oblasti očních důlku a nosu (obr. 47). Rozdíly jsou také patrné v oblasti lících kostí a zubů. Dalším rozdílem je textura obou modelů, která je způsobena přsvícením při prvním snímkování.





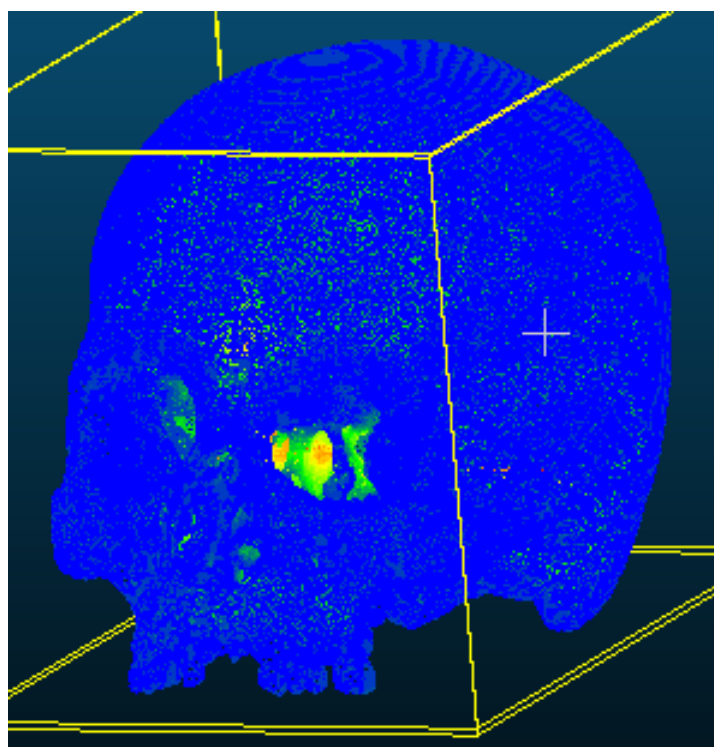
Obr. 47: Porovnání modelů z fotogrammetrie

tab. 7: Porovnání vytvořených modelů

Porovnávané modely	Maximální vzdálenost (mm)	Průměrná vzdálenost (mm)	Směrodatná odchylka (mm)
CT vs Laser 1	33,37	2,87	2,96
CT vs laser 2	33,36	3,06	2,08
CT vs laser 3	17,26	1,79	2,25
CT vs laser 4	18,41	2,24	2,48
CT vs laser 5	24,73	1,90	2,27
CT vs laser 6	18,36	1,92	2,23
CT vs laser 7	21,27	2,12	2,21
CT vs laser 8	30,88	1,85	2,25
CT vs laser 9	33,54	2,66	2,95
CT vs snímky 1	18,28	0,57	1,28
CT vs snímky 2	9,64	1,11	0,94
snímky 1 vs snímky 2	0,44	0,02	0,03



K těmto výsledkům je nutné přistupovat kriticky. V programu CloudCompare je velice důležité, který z modelů je referenční. Jelikož byl vždy jako referenční model nastaven model ze CT, porovnávaly se jenom body, které byly nalezeny na druhém modelu. Např. když se nastavil model č. 6 jako referenční a porovnával se k němu model z CT, byly výsledky o poznání horší. Maximální vzdálenost stoupla na 27,75 mm a průměrná vzdálenost byla 3,54 mm. Většině modelů chybí některé části. Všechny modely z laserového skenování jsou bez zubů. Model vytvořený z druhé sady snímků postrádá některé vnitřní části lícních kostí. Jediný model, který je možné označit jako kompletní, je model z první sady snímků. Jediné části, které v tomto modelu chybí, jsou za nosní kostí (obr. 48).



*Obr. 48: Porovnání modelu z první sady snímků s modelem ze CT*

## 11. Diskuze

Hlavním cílem virtuální antropologie je vytvářet co nepřesnější 3D digitální kopie antropologických artefaktů. Kromě samotné přesnosti často o výběru metody pro pořízení 3D záznamu rozhoduje jeho cena a dostupnost. Důležitým aspektem při výběru metody jsou také vlastnosti daného objektu a účel měření. Použití průsekové fotogrammetrie se ukázalo být vhodnější metodou než pozemní laserové skenování.

Sběr dat u fotogrammetrie je o malinko náročnější než u laserového skenování. Volba vhodného nasvícení scény je pro účely fotogrammetrie důležitější než u laserového skenování. Laserový skener dokáže zaznamenat předmět i v horších světelných podmínkách. Naopak kamera je pasivní senzor a kvalita výsledných snímků je přímo závislá na světle dopadajícím na obrazový senzor. Důležité je připravit scénu tak, aby byly všechny části dostatečně nasvíceny, ale také aby světla nebylo naopak moc. Předměty, které je možné přenášet, je vhodné snímkovat ve foto stanu. Světla by měla být umístěná u vnějších stěn foto stanu v dostatečné vzdálenosti, aby dopadající světlo bylo všude přibližně stejné. Při vlastním snímkování byly u první sady světla umístěna vedle kamery, což vedlo k přesvícení, a proto je textura prvního modelu o poznání světlejší a méně přirozená než textura druhého modelu. Výhodou takového nasvícení byla možnost lépe zaznamenat vnitřní části lebky jako např. oční důlky. V tomto kroku se také ukázalo, že je nutné mít značné znalosti fotografických zařízení pro pořízení vhodných snímků pro účel fotogrammetrie. Mnou vytvořené snímky mají často rozmazané okraje, které se musí ručně maskovat. Pro usnadnění celé práce je důležité myslet na maskování již při snímkování, kdy je vhodné snímkovat se zeleným plátnem v pozadí. Další možností pro automatické maskování je pořízení snímků scény bez snímaného předmětu. Celý proces je možné urychlit, automatizovat a zpřesnit díky několika menším změnám. Prvních dvou zmiňovaných věcí lze dosáhnout pomocí automatického otočného podstavce, kde je možné nastavit rychlost otáčení a k tomu přizpůsobit automatickou sekvenci pořizování snímků. Zpřesnění výsledků lze dosáhnout výběrem objektivu s ohniskovou vzdáleností 35 mm, což je doporučovaná vzdálenost pro PS, a lepším umístěním kamery.

Získání dat Laserovým skenerem je naopak jednodušší. Je pouze potřeba vhodně umístit referenční terče a nastavit vhodné rozlišení a kvalitu skenů. Nevýhodou je časová náročnost skenu v největším rozlišení a kvalitě, která je bezmála dvě hodiny. Naopak na místech, kde nedochází k žádnému pohybu nebo otřesům, není nutné nastavovat nejvyšší kvalitu. Velký rozdíl není ani v nejvyšším a druhým nejvyšším rozlišení. Výhodou také je, že po spuštění skeneru není nutná osobní přítomnost operátora.

Rychlost a přesnost zpracování dat je závislá na výpočetním výkonu počítače a na zvoleném softwaru. V tomto případě pro zpracování snímků byl zvolen program Agisoft PhotoScan. Jedná se o nejlepší software pro zpracování snímků na trhu. Nevýhodou je poměrně vysoká cena a náročnost na hardwarové vybavení počítače. Nevýhodou je také časová náročnost, kdy například tvorba hustého bodového mračna v nejvyšší kvalitě může trvat až desítky hodin. PS nabízí celou řadu nastavení, díky kterým je možné tvorbu modelu přizpůsobit potřebám uživatele. Snímky je také možné zpracovat v programu ReCap. Nevýhodou programu je, že je plně automatický a není možné upravovat nastavení v průběhu zpracování.

Pro zpracování dat laserového skenování byly použity softwary ReCap a Meshlab. ReCap byl zvolen hlavně pro jeho dostupnost díky studentské licenci. Výsledky registrace v tomto softwaru byly vyhovující. Všechny referenční body byly rozpoznány s přesností vyšší než 1 mm. Výhodou je plně automatická registrace, která funguje velice dobře. V režimu manuální registrace je možné kombinovat referenční terče a body, což je výhodou v případě, kdy na skenu není vidět dostatečný počet terčů. V programu je také možné vytvářet polygonové sítě, jejichž tvorba probíhá přes cloud, a proto neklade vysoké nároky na výpočetní výkon. Tato funkce není vhodná pro malé objekty jako je lebka. Nevýhodou je také plně automatická tvorba, kde není možné nastavit parametry pro tvorbu. Nejlepší volbou pro tvorbu polygonové sítě je open source program Meshlab. Tento program nabízí několik algoritmů pro tvorbu polygonové sítě, u kterých je možné upravovat různé parametry. Kromě toho nabízí i další funkce pro úpravu vytvořené sítě.

Modely vytvořeny pozemním laserovým skenováním nejsou vhodné pro antropologické účely. Jejich struktura je často deformovaná a neúplná. To je hlavně způsobeno tím, že pozemním laserovým skenerem není možné pořídit dostatečně husté bodové mračno na tak malé ploše. V našem případě to bylo 22 558 bodů, ze kterých se vytvářela polygonová síť. I přes přizpůsobení nastavení skeneru, aby byla lebka vždy středem skenované oblasti a byla co nejpřesněji zaměřena, na povrch lebky, připadá pouze zlomek bodů z celkového mračna, které obsahovalo 40,5 mil bodů. Pomocí pozemního laserového skeneru se podařilo vytvořit model s přesností na milimetry, a tím se plně naplnil potenciál tohoto druhu skenování. Tímto byl potvrzen názor, který se často objevuje v literatuře (Mathys 2013, Remondino 2011), že pozemní laserové skenery nejsou vhodné pro antropologické účely.

Fotogrammetrie se naopak ukázala být vhodnou metodou pro tvorbu 3D modelů pro antropologické účely. Nevýhodou je značná časová náročnost, kterou je však možné snížit získáním zkušeností, vhodnou přípravou scény a pořízením vhodné výbavy. Nejlepší výsledek byl získán při snímkování s ohniskovou vzdáleností 24 mm, kdy průměrná vzdálenost od modelu z CT byla 0,57

mm. Tento výsledek je možné ještě vylepšit výše zmíněnými faktory. Fotogrammetrické výsledky jsou srovnatelné s výsledky CT. Obrovskou výhodou oproti CT je poměrně nízká cena a značná mobilita.

## 12. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo prozkoumání vhodnosti metod laserového skenování a fotogrammetrie pro antropologické účely. Dílčími cíly byly literární rešerše na téma nejpoužívanější digitalizační metody používané v antropologii, vysvětlení základních principů laserového skenování a fotogrammetrie, pořízení vhodných dat těmito metodami pro tvorbu 3D modelu daného objektu, zpracování těchto dat, tvorba 3D modelů a jeho vizualizace a na závěr porovnání a hodnocení těchto metod.

V teoretické části byly představeny používané digitalizační metody používané v antropologii jak u nás, tak i ve světě. V praktické části práce byly výše zmíněné metody použity pro tvorbu 3D modelu lidské lebky. V kapitole sběr dat byla podrobně popsána vhodná metoda sběru dat a následně byly pořízeny snímky a skeny pro tvorbu 3D modelu lebky. Poté bylo zhotoveno několik modelů lebky. Tvorba těchto modelů v programech Agisoft PhotoScan, Autodesk ReCap a Meshlab je podrobně popsána, aby tato práce mohla sloužit v budoucnu jako metodika pro podobné projekty.

V závěru práce jsou vytvořené modely porovnávány s modelem z CT. Modely vytvořené laserovým skenováním jsou o poznání horší než modely vytvořené pomocí fotogrammetrie. Průměrná vzdálenost těchto modelů od modelů CT se pohybuje od 1,79 mm do 3,06 mm. Nutné je však zdůraznit, že tyto modely nejsou kompletní a jsou značně deformované. Z dvou použitých algoritmů pro tvorbu polygonové sítě se ukázalo, že algoritmus Poisson Surface Reconstruction je lepší volba pro podobné účely než Ball-Pivoting algoritmus. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo s modelem z první sady snímků, kdy bylo pořízeno více snímků než v druhé sadě. Ohnisková vzdálenost 24 mm je pro tvorbu 3D modelů lepší variantou než 120 mm. Díky přímému svícení na model v první sadě se podařilo lépe zmapovat i některé vnitřní části lebky. V druhé sadě tyto části chybí, ale tento model má lepší texturu. Průměrná vzdálenost modelu z druhé sady snímků je 1,11 mm. Průměrná vzdálenost modelu z první sady snímků je 0,57 mm. Výběr metody záleží na účelu, za kterým se model tvoří. Pokud se model tvoří pro výzkumné účely, není textura tak podstatná. Pokud je však model zhotoven pro ukázkové účely, např. virtuální muzea, je nutné k tomu přizpůsobit sběr dat.

## 13. Zdroje

AGISOFT LLC (2016): Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2. [cit. 2018-04-29]. [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf)

AUTODESK INC. (2018): Autodesk Knowledge Network. [cit. 2018-05-02].

<https://knowledge.autodesk.com/support/recap>

BALTSAVIAS, E. P. (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing. 54, č. 2-3, s. 83-94.

BERNARDINI, F. et al. (1999): The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 5, č.4, s. 349-359.

BOEHLER, W. et al. (2003): Investigating laser scanner accuracy. The International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, č. 5, s. 696-701.

BÖHM, J. (2002): Fotogrammetrie. vydavatelství VŠB - TUO, Ostrava, 16 s.

BRUNO, F. et al. (2010): From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. Journal of Cultural Heritage, 11, č. 1, s. 42-49.

BRZOBOHATÁ, H. et al. (2012): Accuracy and benefits of 3D bone surface modelling: a comparison of two methods of surface data acquisition reconstructed by laser scanning and computed tomography outputs. Collegium antropologicum. 36, č. 3, s. 801-806.

CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F., RANZUGLIA G. (2008):

MESHLAB: An open-source mesh processing tool. Sixth Eurographics Italian Chapter Conference. s. 129-136.

CloudCompare (2016): User's Manual. [cit. 2018-05-05]. <http://www.danielgm.net/cc/>

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA (2017): Anthropology.

<https://www.britannica.com/science/anthropology> (cit. 2018-04-29).

EVIN, A. et al. (2016): The use of close-range photogrammetry in zooarchaeology: Creating accurate 3D models of wolf crania to study dog domestication. Journal of Archaeological Science: Reports. 9, s. 87-93.

- FARO TECHNOLOGIES INC. (2014): FARO Laser Scanner Focus3D X 130 Manual.  
[https://knowledge.faro.com/Hardware/Laser\\_Scanner/Focus/User\\_Manuals\\_for\\_the\\_Focus3D\\_X\\_130\\_or\\_130\\_HDR](https://knowledge.faro.com/Hardware/Laser_Scanner/Focus/User_Manuals_for_the_Focus3D_X_130_or_130_HDR) (cit. 2018-04-29).
- FRIESS, M. (2012): Scratching the surface? The use of surface scanning in physical and paleoanthropology. *Journal of Anthropological Sciences*. 90, s. 1-25.
- GEORGOPOULOS, A., IOANNIDIS, Ch., VALANIS, A. (2010): Assessing the performance of a structured light scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 38. č. 5, s. 251-255.
- GORDON, S., J., LICHTI, D., D. (2004): Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: the effect on 3D resection solutions, *Survey Review*, 37(292), s. 448-468.
- HANZL, V. (1999): Neměřické a semiměřické kamery v blízké fotogrammetrii. Teze habilitační práce. Ústav geodezie FS VUTUM, Brno, 21 s.
- HANZL V. (2006): Teoretické základy fotogrammetrie. vydavatelství Brno - VUT, Brno, 101 s.
- JACOBS, G. (2005): Registration and Geo-referencing. *Professional Surveyor Magazine*, s. 30-37.
- JANDOVÁ, M., ŠPLÍCHALOVÁ, I., URBANOVÁ, P. (2015): Aplikace metod virtuální antropologie při určování pohlaví u fragmentárních kosterních nálezů. *Studia archaeologica Brunensia*. 20, č. 1, s. 153-173.
- KAZHDAN, M., BOLITHO, M., HOPPE, Hugues. (2006): Poisson surface reconstruction. *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*. Eurographics Association. s. 61-70.
- KRAUS, K. (2007): *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter, Berlin, 459 s.
- KUZMINSKY, S. C., GARDINER, M. S. (2012): Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research. *Journal of Archaeological Science*. 39, č. 8, s. 2744-2751.
- LERMA, J. L. et al. (2010): Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, č. 3, s. 499-507.

- LUHMANN, T. et al. (2006): Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. Whittles Publishing, Dunbeath, 510 s.
- MATÉ-GONZÁLEZ, M. Á. et al. (2017): Statistical Comparison between Low-Cost Methods for 3D Characterization of Cut-Marks on Bones. *Remote Sensing*. 9, č. 9, s. 873.
- MATHYS, A., BRECKO, J., SEMAL, P. (2013): Comparing 3D digitizing technologies: what are the differences?. *Digital Heritage International Congress IEEE*, s. 201-204.
- MESTEKOVA, S. et al. (2015): A test of the DSP sexing method on CT images from a modern French sample. *Journal of forensic sciences*. 60, č. 5, s. 1295-1299.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J. C. (2001) Introduction to modern photogrammetry. Wiley, New York, 496 s.
- MILLS, J., ANDREWS, D. (2011): 3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture. [cit. 2018-04-08].
- NIKON CORPORATION (2014): Návod k obsluze Nikon D750. [<http://www.nikonclub.cz/files/clanky/manualy/D750.pdf> (cit. 2018-04-29)].
- PAVELKA, K. (2009): Fotogrammetrie 1. 1. Nakladatelství ČVUT, Praha, 200 s.
- PFEIFER, N., BRIESE, C. (2007): Laser scanning—principles and applications. *GeoSiberia 2007 International Exhibition and Scientific Congress*.
- POSPÍŠIL, J. (2009): Laserové skenování [online – prezentace]. ČVUT, Praha. Katedra speciální geodezie. Fakulta stavební. <http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie/lisk.php> (cit. 2018-03-22).
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S. (2006): Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*. 21, č. 115, s. 269-291.
- REMONDINO, F. (2011): Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*. 3, č. 6, s. 1104-1138.
- RESHETYUK, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. PhD dissertation. KTH, Stockholm. 162 s.
- SCHAMBACH, S. J. et al. (2010): Application of micro-CT in small animal imaging. *Methods*. 50, č. 1, s. 2-13.



SINGH, R. et al. (2016): Comparison of laser and structured light scanning techniques for neurosurgery applications. Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). s. 301-305.

STANČIĆ, I., MUSIĆ, J., ZANCHI, V. (2013): Improved structured light 3D scanner with application to anthropometric parameter estimation. Measurement. 46, č. 1, s. 716-726.

VO, A., LAEFER, D. F., BERTOLOTTI, M. (2016): Airborne laser scanning data storage and indexing: state-of-the-art review. International Journal of Remote Sensing. 37, č. 24, s. 6187-6204.

VÚGTK (2018): Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. Online aplikace, ČÚZK. <https://www.vugtk.cz/slovník/> (cit. 2018-03-28).

WESTOBY, M. J. et al. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 179, s. 300-314.

WOLF, P. R., DEWITT, B. A. (2000): Elements of photogrammetry: with applications in GIS. McGraw-Hill, New York, 608 s.

## Seznam příloh

Příloha 1: Modely vytvořené laserovým skenováním

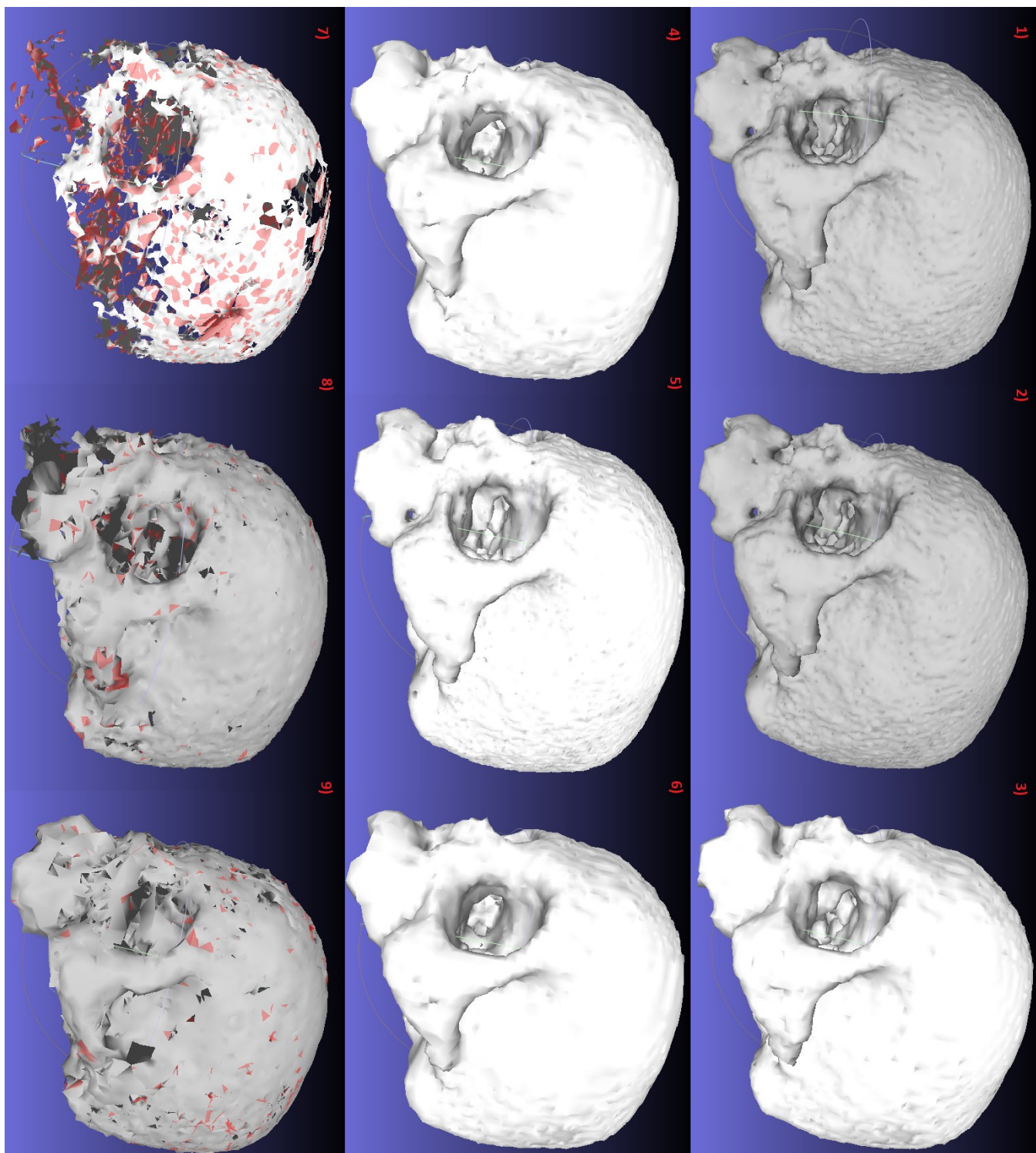
Příloha 2: Model vytvořený z první sady snímků

Příloha 3: Model vytvořený z druhé sady snímků

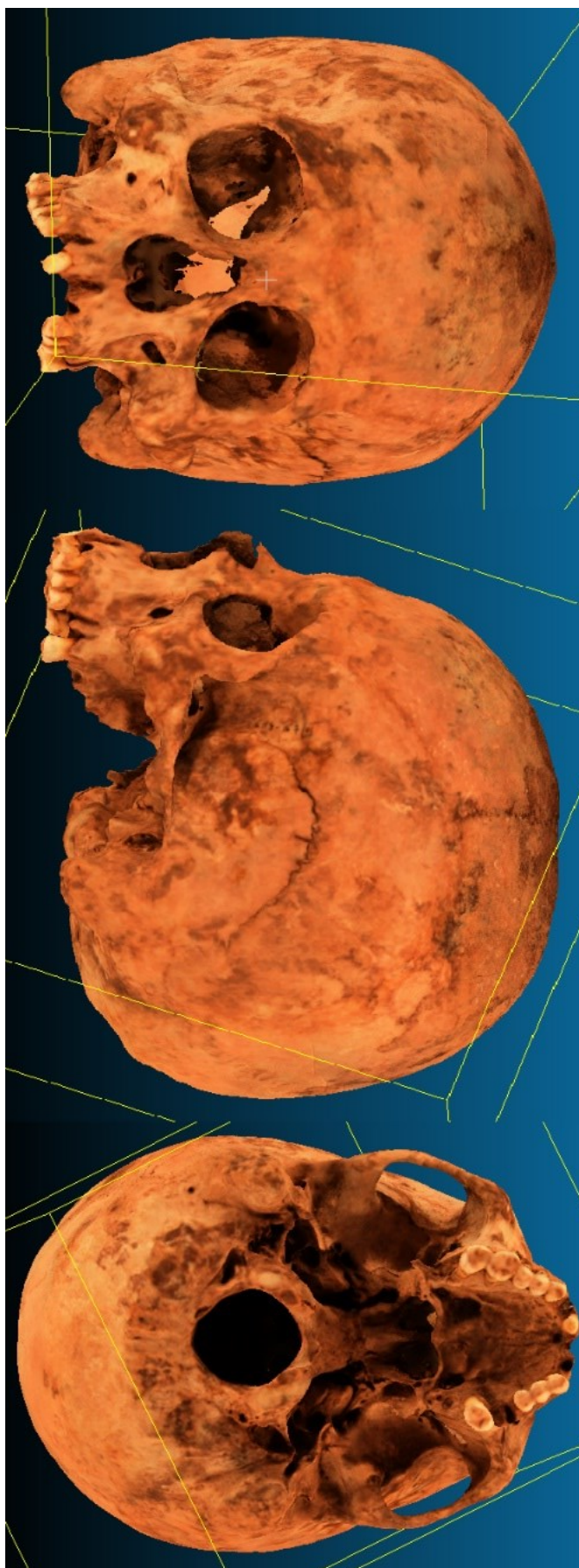
Příloha 4: Cloud disk:

- Webová adresa: <https://mega.nz/>
- Email: BP-lebka@gmail.com
- Heslo: Priloha4\_lebka
- struktura – Data z laserového skenování, Snímky z prvního snímkování, Snímky z druhého snímkování, Projekty v Agisoft PhotoScan, Projekt v ReCap, Vytvořené modely, vizualizace

Příloha 1: Modely vytvořeny laserovým skenováním



Příloha 2: Model vytvořeny z první sady snímků





Příloha 3: Model vytvořený z druhé sady snímků

