

Analýza a porovnání atributů 3D modelů uměleckých děl

Jiří Placek



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav počítačových a komunikačních systémů

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Jiří Placek
Osobní číslo: A21373
Studijní program: B0688A140008 Informační technologie v administrativě
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Analýza a porovnání atributů 3D modelů uměleckých děl
Téma práce anglicky: Analysis and Comparison of Attributes of 3D Models of Artworks

Zásady pro vypracování

- Vypracování literární rešerše na dané téma.
- Analýza a výběr postupů 3D modelování metodou fotogrammetrie.
- Tvorba 3D digitálních modelů vybraných uměleckých objektů.
- Analýza a porovnání vybraných atributů 3D digitálních modelů.
- Vyhodnocení a možnosti potenciálního zvýšení kvality realistických 3D modelů.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. GONZALEZ, R. C. a R. E. WOODS. *Digital Image Processing*. 4th Edition. Pearson, 2018. ISBN 9780133356724.
2. ŽÁRA, J., B. BENEŠ, J. SOCHOR a P. FELKEL. *Moderní počítačová grafika*. 2. vydání. Computer Press, 2010. ISBN 80-251-0454-0.
3. PANÁK, J., M. ČEPPAN, V. DVONKA, L. KARPINSKÝ, P. KORDOŠ, M. MIKULA a S. JAKUCEWICZ. *Polygrafické minimum*. Svaz polygrafie na Slovensku. Bratislava: TypoSet, 2008. ISBN 978-80-970069-0-7.
4. HUGHES, J. F. *Computer graphics: principles and practice*. 3rd Edition. New Jersey: Addison-Wesley, 2014. ISBN 0-321-39952-6.
5. KAPLANOVÁ, M. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Irena Drofová**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **4. prosince 2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2025**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Miroslav Matýsek, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje na tvorbě a analýze 3D digitálních modelů vybraných uměleckých děl. Cílem je porovnání základních atributů modelů a zhodnocení možnosti zvýšení jejich vizuální kvality. Teoretická část popisuje principy fotogrammetrie a metody 3D rekonstrukce. V praktické části bylo nasnímáno šest objektů různého charakteru a převedeno do 3D podoby pomocí softwaru COLMAP. Následné úpravy probíhaly v programu MeshLab za využití nástrojů pro čištění, zjednodušení a vyhlazení geometrie. U každého modelu byly sledovány parametry jako počet vrcholů, plošek či zachování tvarových detailů. Výstupy byly porovnány s původními fotografiemi a hodnoceny z hlediska kvality. Práce rovněž identifikuje faktory ovlivňující výsledek rekonstrukce.

Klíčová slova: 3D modelování, fotogrammetrie, COLMAP, MeshLab, digitalizace, umělecké dílo, vizualizace, optimalizace

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the creation and analysis of 3D digital models of selected artworks. The goal was to compare the basic attributes of the models and evaluate options for improving their visual quality. The theoretical part describes the principles of photogrammetry and 3D reconstruction methods. In the practical part, six objects of various types were captured and transformed into 3D using COLMAP software. Subsequent adjustments were made in MeshLab using tools for cleaning, simplification, and smoothing of geometry. For each model, parameters such as the number of vertices, faces, and the preservation of shape details were monitored. The outputs were compared with original photographs and evaluated in terms of quality. The thesis also identifies factors influencing the reconstruction results.

Keywords: 3D modeling, photogrammetry, COLMAP, MeshLab, digitization, artwork, visualization, optimization

Rád bych poděkoval své vedoucí bakalářské práce Ing. Ireně Drofové za odborné vedení, cenné rady a ochotu při konzultacích během celého zpracování práce.
Dále děkuji své rodině za trpělivost, podporu a motivaci, kterou mi po celou dobu studia poskytovala.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 ZÁKLADNÍ SEZNÁMENÍ S 3D	15
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY TROJROZMĚRNOSTI	15
1.2 ROZDÍL MEZI 2D A 3D ZOBRAZENÍM	15
1.3 ZÁKLADY TROJROZMĚRNÉHO PROSTORU	16
1.3.1 Perspektiva a hloubka prostoru	16
1.3.2 Souřadnicový systém v 3D.....	16
1.4 DIGITÁLNÍ ZOBRAZENÍ 3D OBJEKTŮ	17
1.4.1 Rastrová grafika	17
1.4.2 Vektorová grafika.....	18
1.4.3 3D grafika.....	19
1.5 VYUŽITÍ 3D.....	19
1.5.1 Herní průmysl.....	19
1.5.2 Architektura a stavebnictví	20
1.5.3 Filmová a reklamní tvorba	20
1.5.4 Zdravotnictví	21
1.5.5 Průmysl	22
1.5.6 Rozšířená a virtuální realita	24
1.5.7 Využití rozšířené a virtuální reality.....	24
1.6 SHRNUTÍ KAPITOLY 1. ZÁKLADNÍ SEZNÁMENÍ S 3D	26
2 HISTORIE 3D MODELOVÁNÍ.....	27
2.1 POČÁTKY TROJROZMĚRNÉ GRAFIKY	27
2.2 VÝVOJ A SOUČASNOST 3D.....	28
2.3 BUDOUCNOST 3D MODELOVÁNÍ.....	28
2.3.1 Umělá inteligence.....	29
2.3.2 3D tisk	29
2.3.3 Holografie	30
2.4 ZÁKLADNÍ METODY 3D MODELOVÁNÍ.....	30
2.4.1 Polygonální modelování.....	30
2.4.2 Sochařské modelování (sculpting)	31
2.4.3 NURBS	31
2.4.4 Procedurální modelování	32
2.5 SHRNUTÍ KAPITOLY 2. HISTORIE 3D MODELOVÁNÍ.....	32
3 FOTOGRAMMETRIE.....	33
3.1 HISTORIE A VÝVOJ FOTOGRAMMETRIE	33
3.2 PRINCIP FUNGOVÁNÍ FOTOGRAMMETRIE	35
3.3 METODY FOTOGRAMMETRIE	35

3.4	VÝHODY A NEVÝHODY FOTOGRAMMETRIE.....	37
3.5	PROCES FOTOGRAMMETRIE – SNÍMÁNÍ 3D MODELŮ	38
3.6	APLIKACE FOTOGRAMMETRIE V DIGITALIZACI UMĚNÍ.....	39
3.7	SHRNUTÍ KAPITOLY 3. FOTOGRAMMETRIE.....	40
4	HLAVNÍ ATRIBUTY V 3D GRAFICE.....	41
4.1	TVAR.....	41
4.2	BARVA	41
4.3	TEXTURA.....	42
4.4	SVĚTELNÉ ZDROJE	43
4.5	VLASTNOSTI A FORMÁTY GRAFIKY	43
4.5.1	Grafické vlastnosti.....	44
4.5.2	Grafické formáty	45
4.6	SHRNUTÍ KAPITOLY 4. Hlavní atributy v 3D grafice.....	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	PŘEDSTAVENÍ MODELŮ.....	47
5.1	POPIS UMĚLECKÝCH OBJEKTŮ	47
5.1.1	Dřevěná loď.....	47
5.1.2	Lebka zvířete	48
5.1.3	Socha krále	48
5.1.4	Olejomalba krajiny	49
5.1.5	Bronzová socha želvy.....	50
5.1.6	Olejomalba lidské lebky	51
5.1.7	Omezení při focení uměleckých děl.....	52
5.1.8	Popis místnosti a světelných podmínek při snímání	52
5.2	REKONSTRUKCE UMĚLECKÝCH DĚL V PROGRAMU COLMAP.....	53
5.2.1	Dřevěná loď.....	53
5.2.2	Lebka zvířete	54
5.2.3	Socha krále	55
5.2.4	Olejomalba krajiny	56
5.2.5	Bronzová socha želvy.....	57
5.2.6	Olejomalba lidské lebky	58
5.3	ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVY MODELU V PROGRAMU MESHLAB.....	59
5.3.1	Dřevěná loď.....	59
5.3.2	Lebka zvířete	66
5.3.3	Socha krále	70
5.3.4	Olejomalba krajiny	74
5.3.5	Bronzová socha želvy.....	78
5.3.6	Olejomalba lidské lebky	82
5.4	POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH 3D MODELŮ.....	86
5.4.1	Dřevěná loď.....	86
5.4.2	Lebka zvířete	87

5.4.3	Socha krále	87
5.4.4	Olejomalba krajiny	88
5.4.5	Bronzová socha želvy	88
5.4.6	Olejomalba lidské lebky	89
5.4.7	Porovnání atributů 3D modelů	90
5.5	MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ KVALITY 3D REPRODUKCE	91
5.6	SHRNUTÍ KAPITOLY 5. PŘEDSTAVENÍ MODELŮ	92
ZÁVĚR		93
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		95
SEZNAM OBRÁZKŮ		106
SEZNAM TABULEK		109
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		110
SEZNAM PŘÍLOH		112

ÚVOD

Počítačová grafika a 3D modelování jsou již součástí našeho běžného života. Jejich rozšíření souvisí s prudkým rozvojem počítačových technologií a v tomto případě i se zvyšujícími se požadavky na jejich využití. Uplatnění nachází ve stále více oborech souvisejících se stavebnictvím, strojírenstvím, zdravotnictvím, architekturou, uměním nebo herním a zábavním průmyslem.

Bakalářská práce se zabývá analýzou a porovnáním atributů 3D modelů uměleckých děl. V teoretické části jsou uvedeny základní informace související s počítačovou grafikou, 2D a 3D zobrazováním, fotogrammetrií, 3D modelováním. Teoretická část je rozdělená do čtyř samostatných kapitol. V úvodní kapitole jsou popsány základní principy trojrozměrného prostoru, základní rozdělení grafiky a využití trojrozměrných objektů v oborech lidské činnosti. Druhá kapitola se zabývá historií a vývojem 3D modelování včetně uvedení klíčových osobností a milníků. Součástí kapitoly jsou i popisy hlavních technik modelování. Třetí kapitola se věnuje problematice fotogrammetrie, jejímu vývoji, rozdělení fotogrammetrie dle kritérií. Jsou zde uvedeny její výhody a nevýhody a možné využití. Poslední kapitola teoretické části bakalářské práce je zaměřena na základní 3D atributy v grafice, světelné zdroje a používané grafické formáty.

Praktická část se zabývá výběrem vhodných objektů a jejich následným zpracováním pomocí programů COLMAP a MeshLab. Vstupními daty jsou fotografie jednotlivých objektů. Pomocí COLMAPu, na základě těchto fotografií, je provedena rekonstrukce jednotlivých objektů s uvedením výchozích a konečných hodnot. Následně takto zrekonstruované objekty jsou dále upravovány v programu MeshLab. Cílem je dosáhnout co nejvěrnějšího 3D modelu pro jednotlivé objekty. V praktické části je uveden i postup při vytváření 3D modelů. V poslední části je uvedeno finální vyhodnocení a případné návrhy, jak a pomocí čeho je možné generování 3D modelů zlepšit tak, aby co nejvíce odpovídaly reálným předlohám. Součástí praktické části je obrazová dokumentace, pomocí které je možné vidět, jak objekty v průběhu vytváření 3D modelů vypadaly a souhrnná tabulka s výpisem hodnot atributů u jednotlivých digitalizovaných uměleckých objektů.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ SEZNÁMENÍ S 3D

Trojrozměrný, trojdimenzionální neboli 3D označuje jakýkoliv prostor, který jde popsat třemi rozměry – šířkou, výškou a hloubkou. Tyto tři rozměry pomáhají vnímat objekty v prostoru realisticky.

1.1 Základní principy trojrozměrnosti

Prostor, který chápeme a vnímáme je vymezen třemi dimenzemi výška, šířka, hloubka. Naše vidění nám umožňuje vnímat vše kolem nás trojrozměrně což je způsobeno tím, že každým okem vidíme realitu odlišným zorným úhlem. Odlišný zorný úhel pozorování a vyhodnocování předmětu je způsoben vzdáleností očí mezi sebou a pozorovaným předmětem. [103]

Trojrozměrné vnímání prostoru je výsledkem procesu, při kterém mozek interpretuje vjem, trojrozměrný obraz sledovaného objektu, přenášený přes sítnici oka pomocí zrakového nervu. [102]

1.2 Rozdíl mezi 2D a 3D zobrazením

Rozdíl mezi 2D a 3D je vnímání a zobrazení objektů. Při 2D se pohybujeme pouze ve dvourozměrném prostoru – délka, šířka, při 3D se přidává i třetí rozměr – hloubka. 2D objekty působí ploše bez ohledu na úhel pohledu, pohled na 3D objekty se mění díky hloubce a prostoru. 2D se nejčastěji používá v souvislosti s obrazovými daty (fotografie, kresby, malby), technickým kreslením (půdorysy, plány, náčrty), počítačovou grafikou (animace, statické obrázky). Elektronickou podobu mohou získávat již při samotném vzniku (digitální fotografie) nebo převodem z analogové podoby (skenování). Při skenování neboli digitalizaci se světlo vysílané ze skeneru odrazí od skenovaného materiálu a dopadne na senzory skeneru, které je převedou na elektrický signál. Zpracováním těchto signálů pak vznikají digitální data. Skenery je možné využít i na vytěžování textu z obrazové předlohy, v tomto případě se pak jedná o systém OCR. 3D našlo využití v počítačové grafice (hry, animace, film), 3D tisku (vytváření fyzických objektů), zdravotnictví (implantáty, modely orgánů), letecký a automobilový průmysl (modely částí dílů, vizualizace), strojírenství nebo stavebnictví (modely nástrojů, spotřebičů, vizualizace budov, inženýrských sítí). [1][2][3][5]

1.3 Základy trojrozměrného prostoru

Trojrozměrný prostor je možné zobrazit pomocí lineární perspektivy a popsat pomocí poloh jednotlivých bodů v prostoru. Lineární perspektiva pak na základě těchto informací dokáže vytvořit jeho věrné zobrazení.

1.3.1 Perspektiva a hloubka prostoru

Lineární perspektiva je středové promítání, u kterého se nezachovává velikost zobrazených předmětů, jejich poměr délek a rovnoběžnost. Názorným příkladem lineární perspektivy je například fotografie. [4]



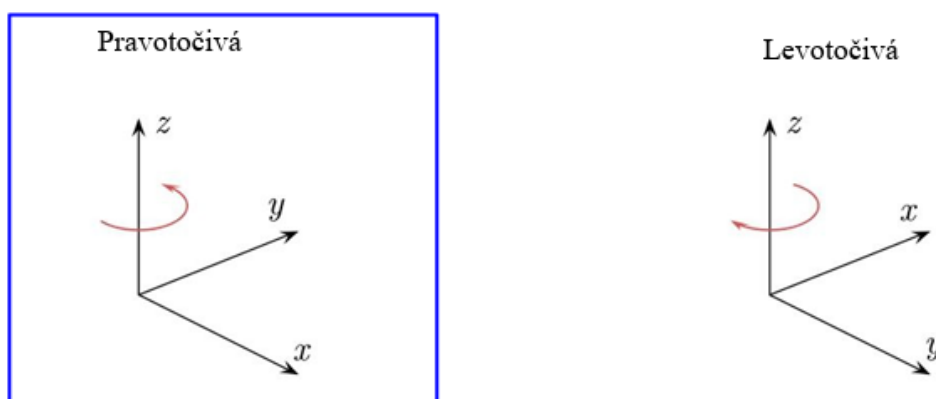
Obrázek 1 Sbíhající se kolejnice [4]

1.3.2 Souřadnicový systém v 3D

3D souřadnicový systém je základní nástroj pro popis polohy bodů a objektů ve třech dimenzích: šířce (x), výšce (y) a hloubce (z). Systém tak jednoznačně umožňuje určit každý bod, který se nachází v prostoru pomocí těchto 3 souřadnic. Tyto tři osy se protínají v bodě zvaný jako počátek na souřadnicích (0,0,0). [88]

Kartézský souřadnicový systém je nejpoužívanější systém pro určení polohy bodu. Jedná se o jednorozměrný, dvourozměrný nebo třírozměrný souřadnicového systému. Při jednorozměrném systému je umístění bodu definováno číslem na ose. Ve dvourozměrném souřadnicovém systému je poloha bodu definována pomocí souřadnic dvou na sebe kolmých

os. Při trojrozměrném souřadnicovém systému se pro přesné stanovení polohy bodu určují souřadnice tří na sebe kolmých os. Pro jejich označení se používají písmena x , y , z . Z hlediska označení jednotlivých os neexistuje jednoznačné pravidlo pro označení jednotlivých os. Většinou vodorovná osa označuje „ x “, svislá osa „ y “ a kolmá osa „ z “. Pro lepší pochopení se Kartézský souřadnicový systém vizualizuje jako mřížka, u které každá souřadnice odpovídá vzdálenosti bodu od počátku jednotlivých os. Kartézská třírozměrná soustava souřadnic může být pravotočivá nebo levotočivá. [6][88]



Obrázek 2 Pravotočivý a levotočivý kartézský systém [100]

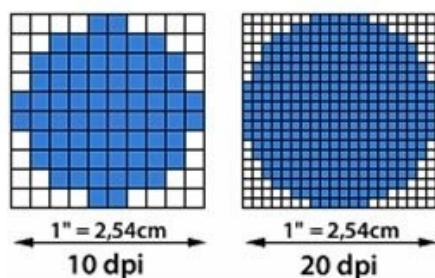
1.4 Digitální zobrazení 3D objektů

Digitální zobrazení 3D objektů umožňuje převedení a zobrazování obrazu fyzických objektů do elektronické podoby.

1.4.1 Rastrová grafika

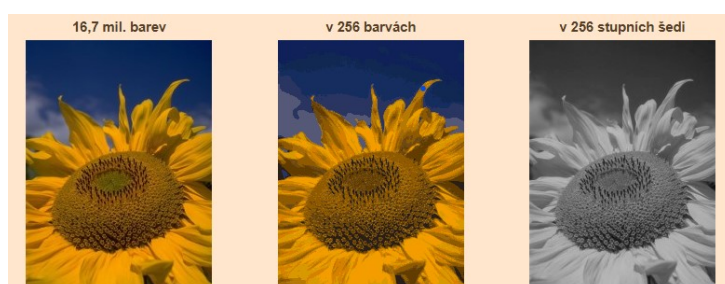
Rastrová grafika podporuje širokou škálu barev a umožňuje tak zobrazení barevných přechodů, které jsou vhodné například pro realistické zobrazování fotografií, digitalizaci, skenování. Rastrová grafika, známá také pod názvem bitmapová grafika, vytváří rastrový obraz, který je reprezentován body (pixely) uspořádanými do mřížky. Jednotlivé body, ze kterých se výsledný obraz skládá obsahují informaci o své poloze a barvě. [7]

Každý pixel tak obsahuje jeden či více bitů informací v závislosti na podrobnosti obrazu, například černobílý obraz obsahuje jeden bit na jednu barvu tedy bílou nebo černou. Parametry rastrové grafiky jsou rozlišení a barevná hloubka. Rozlišení je udáváno v DPI, tzv. kolik pixelů se vejde na délku jednoho palce – 2,54 cm. [94]



Obrázek 3 Počet obrázkových bodů na ploše o velikosti jednoho palce [74]

Barevná hloubka určuje kvalitu zobrazení a udává počet bitů použitých pro zobrazení jednoho pixelu.

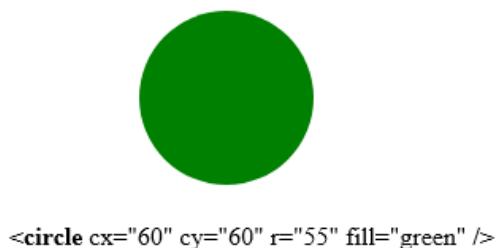


Obrázek 4 Porovnání barevné hloubky [75]

Rastrová grafika je vhodná pro pořizování fotografií nebo skenování. Nevýhodou je zhoršení kvality obrázků při změně jeho velikosti. Z hlediska formátů jsou nejběžnější BMP, GIF, JPEG, TIFF, PNG. Nejvíce používaným programem pro tvorbu a práci s rastrovými obrázky je Adobe Photoshop. [7]

1.4.2 Vektorová grafika

Vektorová grafika je vhodná pro tvorbu log, ilustrace, počítačové animace nebo pro tisk. Vektorová grafika vytváří obrázek, který je složen z řady bodů, které jsou spojeny do přímk, křivek a mnohoúhelníků. Každý z těchto geometrických útvarů má nadefinovanou polohu a vlastnosti, jako například barvu, tvar nebo výplň a je pak přesně definován textovým popisem. [8]



Obrázek 5 Textová reprezentace jednoduchého tvaru ve formátu SVG [76]

U vektorového obrázku je snadné provádění úprav pomocí jednotlivých bodů nebo editací nastavených parametrů v rámci textového popisu. Při provádění úprav vektorový obrázek neztrácí kvalitu a zůstává tak obrázek bez zkreslení. Pomocí vektorové grafiky mohou uživatelé vytvářet téměř cokoliv od jednoduchých grafických návrhů, až po umělecká díla. Soubory vektorových obrázků jsou datově mnohem menší než soubory rastrové grafiky. Na rozdíl od rastrové grafiky je pořízení vektorových obrázků mnohem delší a složitější. Z hlediska formátů je nejběžnější SVG. [8]

Nejrozšířenějšími programy pro tvorbu a práci s vektorovými obrázky jsou Adobe Illustrator, Gimp, Inkscape a Corel Draw. [8]

1.4.3 3D grafika

3D grafika vychází z vektorové grafiky přidáním třetího rozměru, hloubky. Slouží k vytváření a znázorňování trojrozměrných objektů a animací v prostoru. Pomocí počítačové 3D grafiky je možné vytvářet jak jednoduché, tak i složité a extrémně přesné geometrické tvary, které je možné natáčet a zobrazovat z libovolných úhlů. Objekty vytvářené pomocí počítačové 3D grafiky mohou vycházet z reálných objektů a prostředí, v tomto případě hovoříme o 3D skenování nebo přímou modelací daného objektu. Počítačová 3D grafika se neustále vyvíjí a stává se v některých odvětvích nepostradatelným pomocníkem. Pro práci s 3D grafikou se používají specializované software (SW), pomocí kterých je možné objekt vymodelovat, nastavit mu povrch, barvu a texturu, zasadit jej do prostoru, doplnit osvětlení a stíny, případně jej i rozpohybovat. Mezi nejpoužívanější SW pro 3D grafiku patří Blender, SketchUp, Autodesk Maya nebo TinkerCAD. [3][9][10]

1.5 Využití 3D

Tvorba a práce s trojrozměrnými objekty dnes představuje běžnou a praktickou součást celé řady oborů. Díky dostupnosti moderních softwarových nástrojů a zvyšujícímu se výkonu počítačové techniky lze vytvářet detailní modely, které nacházejí uplatnění nejen při vizualizaci, ale i při návrhu, simulaci nebo prezentaci složitých struktur procesů. Stejně tak se 3D využívá při samotné výrobě modelů, prototypů nebo již prakticky využitelných předmětů. [11][12]

1.5.1 Herní průmysl

Herní průmysl je jedním z nevýznamnějších odvětví, kde se využívá technologie 3D modelování a vizualizace. Díky 3D grafice se herní svět stává realističtější a

interaktivnějším. Vývojářům umožňuje vytvářet reálné herní postavy, rekvizity a předměty, které používají, stejně tak i herní prostředí, ve kterém se hra odehrává. Součástí hry je pohyb postav i objektů, tento pohyb již odpovídá reálné skutečnosti. To vše napomáhá vytvářet poutavý a dynamický herní svět, který je zároveň i vizuálně atraktivní a věrohodný. [13]

Základním prvkem 3D her je tvorba modelů. Modely postav, objektů a prostředí jsou navrhovány v 3D SW a následně importovány do programů (engine), ve kterých se přímo hra vytváří. Moderní hry využívají techniky jako mapování textur, techniku stínování nebo renderování, aby zvýšily vizuální realismus bez výrazného navýšení výpočetní náročnosti. [14][15]

Technologie 3D také výrazně přispívají k zjednodušení vytváření herních prostředí a světů pomocí procedurálního modelování bez nutnosti manuální tvorby každého prvku. To ušetří čas i náklady při vývoji hry. [14]

1.5.2 Architektura a stavebnictví

3D modelování v architektuře a stavebnictví umožňují detailní zobrazení a prezentaci návrhů před zahájením výstavby, čímž přispívají k lepšímu plánování a rozhodování. Díky architektonické vizualizaci je možné potenciálním klientům prezentovat realistické vizualizace budov a interiérů, čímž je možné z větší míry eliminovat případná nedorozumění. Stejně tak je tato vizualizace využívána přímo při plánování projektu. Takový způsob vizualizace může odhalit problémy ještě před samotnou výstavbou, znatelně urychlit schvalovací procesy a zlevnit výstavbu. Pomocí modelování je možné vytvořit různé varianty uspořádání prostorů, materiálových řešení i světelných podmínek. Realistické 3D návrhy navíc zvyšují důvěru investorů a usnadňují marketing projektů. [16][17]

Velkým přínosem je také možnost provádět simulace osvětlení, proudění vzduchu nebo energetické náročnosti budov. Tyto analýzy napomáhají architektům navrhovat budovy, které jsou nejen vizuálně působivé, ale i funkčně efektivní a energeticky úsporné. [16][17]

V oblasti softwarového vybavení využitelného pro architekturu a stavebnictví můžeme zmínit SW SketchUp, AutoCAD, Revit nebo ArCON. [17][18]

1.5.3 Filmová a reklamní tvorba

V současné době je filmový průmysl závislý na 3D modelování, je možné tvrdit, že bez podpory 3D malování se již filmy netočí. V menším měřítku to platí také i pro reklamní tvorbu.

3D modelování se prolíná celým filmem od jeho návrhu až po poslední klapku a následné finální zpracování. Pomocí 3D modelování je možné vytvářet realistická prostředí, speciální efekty. Pomocí 3D modelování je možné do filmu vsazovat nereálné postavy nebo například objekty. Tvorba speciálních efektů umožňuje do filmu zakomponovat věci, které by v reálném světě třeba nebyly ani proveditelné. 3D modelování také nemalou měrou podílí na scénografii. Tedy na vytváření scén, kulis, dobových předmětů a rekvizit. Dalším využitím 3D modelování je příprava budoucích scén tak, aby se mohlo ověřit, že scéna odpovídá požadavkům režiséra a bude možné ji následně natočit i ve skutečnosti. [19]

V reklamním průmyslu se 3D modelování stává stále významnějším nástrojem pro vizualizaci produktů. Inzerenti a marketéři mohou pomocí 3D modelů prezentovat produkty ze všech úhlů pohledu, zdůraznit klíčové vlastnosti a vytvářet scénáře, které by byly v reálném světě příliš drahé nebo obtížně realizovatelné. Pro zákazníka se takto nabízené produkty stávají srozumitelnější a lépe na takovou reklamu reaguje. Mezi výhody 3D reklamy je možnost si nabízené předměty konfigurovat, nastavovat barvy, prohlížet jednotlivé detaily. [20]

1.5.4 Zdravotnictví

Pro zdravotnictví z hlediska trojrozměrné grafiky je využíván 3D tisk a 3D modelování a zobrazování. 3D tisk se využívá ve více oborech zdravotnictví, například stomatologie, chirurgie, ortopedie, kardiologie, neurochirurgie nebo traumatologie. Pomocí 3D tiskáren se tisknou zubní protézy, implantáty, modely orgánů před transplantací, kloubní náhrady, kardiostimulátory, protézy nebo učební pomůcky pro studenty. [21][22]



Obrázek 6 3D model srdce jako příprava před transplantací [77]



Obrázek 7 Kotníkové ortézy pro děti [78]

Novým směrem z hlediska 3D tisku je možnost pomocí biotiskáren tisknout biologické tkáně. To by umožnilo nahrazování nemocných nebo poškozených orgánů, náhradními orgány vytištěnými tiskárnou. [23]

1.5.5 Průmysl

V oblasti průmyslového designu se stalo 3D modelování zásadním nástrojem pro vytváření virtuálních modelů výrobku ještě před jejich samotnou výrobou. Vytvořené modely jsou následně podrobovány zkoumání nejen z hlediska funkčnosti, ale i vzhledu nebo konstrukce. V případě nalezení nedostatků je možné takové modely bez větších nákladů upravit a předložit k opětovnému posouzení. Stejně tak je možné u modelu měnit materiál, povrch nebo jednotlivé komponenty, pokud je z nich daný model složen. Výsledný odsouhlasený model pak slouží jako předloha pro vytvoření fyzického prototypu. [24][25]

V případě výrobku ve fázi 3D modelu je možné získat ještě před samotným spuštěním výroby zpětnou vazbu od odběratele nebo finálních spotřebitelů. Tím je možné zajistit, že finální výrobek bude odpovídat všem nadefinovaným požadavkům. [26]

Mezi odvětví, které plnohodnotně využívají 3D modelování můžeme zařadit například automobilový a letecký průmysl, výrobci spotřební elektroniky nebo nábytku. [26]

Mimo využití 3D v oblasti designu se v průmyslu stále více využívá i 3D tisk. Zřejmě nejrozšířenější je v automobilovém a leteckém průmyslu nebo stavebnictví. Dnes je již běžné, že výrobci automobilů využívají 3D tisk nejen pro vytváření prototypů, ale i pro výrobu některých komponentů. Obdobně platí i pro letecký průmysl. [27][28]

V případě stavebnictví 3D tisk umožňuje rychlejší a efektivnější výstavbu s nižšími náklady. Pomocí 3D tisku je možné vytvářet prefabrikované dílce nebo „stavět“ i celé domy. [29]

Přesné digitální návrhy umožňují detailně vyjádřit vzhled i technické parametry produktu ještě před samotnou výrobou. Tato vizualizace usnadňuje komunikaci mezi týmy, ale také zajišťuje kvalitní dokumentaci, která provází návrh od konceptu až po finální realizaci. [25]

Zavedení 3D modelování v průmyslovém designu proměnilo podobu z hlediska efektivity, ale také kreativity. Tato technologie poskytuje nástroje pro zkoušení různých variant, optimalizaci konstrukcí a rychlejší reakci na zpětnou vazbu od klientů nebo trhu. [26]



Obrázek 8 Zed' z 3D tiskárny [79]

3D tisk snižuje spotřebu energie a odpadů nebo četnosti pracovních úrazů. Používané materiály mají pozitivní vliv na životní prostředí, stavba pomocí 3D tiskárny má nižší celkovou spotřebu energie než při klasickém stavění, 3D tiskárna využívá přírodní materiály s minimálním množstvím škodlivých příměsí. [30]

1.5.6 Rozšířená a virtuální realita

Rozšířená realita (AR) je vytváření 3D modelů objektů a jejich vkládání do reálného prostředí. Pozorování takto zpracovaného objektu v reálném prostředí je možné pomocí chytrého mobilu, tabletu nebo speciálních brýlí. [31]



Obrázek 9 AR umístění sedačky do pokoje [80]

Pomocí AR si můžeme přiblížit a prohlédnout jakýkoliv objekt, který byl zpracován do trojrozměrného modelu z 2D zdroje nejen zvnějšku, ale i jeho vnitřek. [32]

AR je možné využít v různých oblastech průmyslové výroby, ve zdravotnictví, herním průmyslu, designu nebo maloobchodě. [32]

Virtuální realita (VR) umožňuje pohyb ve třírozměrném virtuálním prostředí, které se nezakládá na skutečnosti. Prostředí je vytvářené počítačem, k jeho zprostředkování potřebujeme speciální zařízení, jako jsou VR headset, sluchátka, rukavice nebo ovladače. VR umožňuje realistické vnímání a manipulaci s virtuálními objekty. VR nachází uplatnění v různých oblastech, včetně herního průmyslu, vzdělání, zdravotnictví a architektury. [33]

1.5.7 Využití rozšířené a virtuální reality

- *Architektonická vizualizace*

AR umožňuje prezentovat přímo v intravilánu stavby nebo v již existujících budovách prostorové uspořádání a návrhy interiéru.

VR možnost pohybu v plnohodnotném 3D modelu ještě neexistuje. [34]

- ***Zdravotnictví***

AR umožňuje pomoc při operačních zákrocích zobrazováním aktuálních informací o pacientovi, například radiologickým snímkům, lékařský výcvik pomocí simulací, navigaci po zdravotnickém zařízení se zobrazováním pokynů a informací o daném místě, detekci a zpětné zobrazení žil přímo na kůži pacienta. [35]

VR umožňuje simulaci postupů a řešení krizových situací bez nutnosti přítomnosti pacienta, propojení VR a fyzických simulátorů, simulaci operačních výkonů, vzdělávání zdravotnického personálu, výcvik záchranářů. [36]

- ***Vzdělání***

Možné využití pro všechny věkové skupiny i typy škol. Doplnění výuky o nové prvky, možnost praktického vyzkoušení, což má za následek snazší zapamatování učiva. [37]

AR možnost zobrazování 3D modelů a dostupných informací. VR poskytuje studentům možnost interaktivního učení pomocí virtuálních simulací. [37]

- ***Armáda***

AR umožňuje v reálném prostoru a čase předávat a zobrazovat potřebné informace na základě vyhodnocování snímaného obrazu. Jedním z nejvyspělejších systémů pro získávání a zobrazování informací je přilba pilota. [38][39]

VR umožňuje provádět výcvik pilotů, řidičů bojových vozidel, obsluhy zbraňových systémů. Simulaci bojových scénářů v různorodém prostředí. Simulaci velení, řešení krizových situací, válečnou medicínu. [39][40]



Obrázek 10 VR simulace [81]

1.6 Shrnutí kapitoly 1. Základní seznámení s 3D

Úvodní kapitola slouží k základnímu seznámení s problematikou trojrozměrného prostoru a jeho digitálního zobrazení. Vysvětluje základní principy 3D, především pojem třídímenzionálního prostoru. Popisuje, jak lidské oko vnímá hloubku díky rozdílnému pohledu každého oka (binokulární vidění), což umožňuje přirozené prostorové vnímání. Rozdíl mezi 2D a 3D zobrazením je přiblížen z hlediska vnímání a technické reprezentace dat. Kapitola se dále věnuje konstrukci 3D prostoru pomocí souřadnicových systémů a perspektivy. Jsou zde také vysvětleny pojmy jako je rastrová a vektorová grafika a jejich využití ve 3D zobrazení. Významná část kapitoly se věnuje praktickému využití 3D modelů v různých oblastech, jako jsou hry, architektura, film, zdravotnictví, průmysl či virtuální realita.

2 HISTORIE 3D MODELOVÁNÍ

3D modelování souvisí s rozmachem výpočetní techniky. V následujících podkapitolách jsou uvedeny osobnosti a události, které přispěly k rozvoji počítačové grafiky, a tedy i k 3D modelování.

2.1 Počátky trojrozměrné grafiky

Počátky počítačové grafiky lze vystopovat až do 50. let 20. století, kdy Benjamin Laponsky pomocí osciloskopu vytvořil první grafické obrázky. V roce 1957 počítačový vědec a elektrotechnický inženýr Russel Kirsch jako první na světě naskenoval černobílou digitální fotografii svého syna pomocí bubnového skeneru. [41]



Obrázek 11 První naskenovaná fotografie [82]

Další z významných kroků z hlediska počítačové grafiky učinil William Fetter v roce 1961, kdy pracoval na vizualizaci lidských postav pro letecký simulátor Boeing, tzv. „Boeing Man“. Tento krok je považován za první praktické využití počítačového modelování k vytvoření vizuálních reprezentací komplexních objektů. Technologie byla tehdy velmi jednoduchá a položila základy pro pozdější rozvoj v oblasti počítačové grafiky. William Fetter je také autorem termínu „počítačová grafika“, termín použil v souvislosti s prací při návrhu kokpitu pro leteckou společnost Boeing. [42]

Jedním z nejvýznamnějších center zabývajících se grafikou byla Utažská univerzita v Salt Lake City. Vedoucím katedry informatiky byl David Evans, kterému se podařilo vytvořit skupinu studentů a odborníků zabývajících se nejen výzkumem grafiky, ale obecně

rozvojem informatiky. Jedním z jeho kolegů byl i Ivan Sutherland, který v roce 1963 vyvinul Sketchpad, jenž umožnil interaktivní kreslení na obrazovce počítače pomocí světelné tužky. Tento nástroj umožnil vizualizaci a interaktivní modelování, což byly klíčové momenty pro budoucí vývoj CAD (Computer-Aided Design) systémů a celkově pro vývoj 3D modelování. [43][44][45][46]

2.2 Vývoj a současnost 3D

V 70. letech 20. století se 3D modelování začalo vyvíjet díky pokrokům v oblasti výpočetní techniky. Počítače začaly být dostatečně výkonné na to, aby umožnily práci s 3D objekty pomocí grafických systémů. Toto období se vyznačovalo vývojem základních algoritmů pro 3D modelování, jako jsou algoritmy pro renderování, vykreslování stínů, texturování a detekci kolizí mezi 3D objekty, metodu zaoblení povrchu tělesa rozdělením na menší polygony. V tomto období začíná pronikat počítačová animace i do filmové tvorby a počítačových her. [46][47]

Postupným vývojem se začíná přecházet od vektorových displejů (základním prvkem jsou jednoduché geometrické prvky) k displejům rastrovým (bitmapová grafika tvořená pixely). Počítače se stávají dostupnějšími i běžným uživatelům, zvyšuje se jejich výkonnost a s tím i možnost využívání stále lepší počítačové grafiky. Vyvíjí se také nové programy pro počítačovou grafiku (MS Paint, AutoCAD), úpravu obrázků (Adobe Photoshop). [46][48]

V roce 1989 založil v Nizozemsku Tom Roosendaal animační studio „NeoGeo“ a od roku 1994 začal vyvíjet SW pro 3D grafiku „Blender“. [49]

Koncem 20. století se 3D grafika stále více prosazuje v herním a filmovém průmyslu. Začátkem 21. století se osobní počítače začínají masivně rozšiřovat i pro běžné mimopracovní činnosti. Součástí těchto počítačů jsou již i výkonné grafické karty umožňující nejen práci s grafikou, ale i přehrávání videí, hraní her, současné využívání více monitorů a podobně. Rozvoj 3D grafiky se týká i oborů jako je zdravotnictví (ortopedie, chirurgie), architektura (modely budov), životní prostředí (geomorfologické změny), školství (výukové pomůcky) nebo nanotechnologie (biomedicína, strojírenství, kosmický průmysl) produktový a bytový design. [2][50][51]

2.3 Budoucnost 3D modelování

3D modelování se dynamicky rozvíjí díky novým technologiím, požadavkům na využívání nových materiálů a rostoucím nárokům na využití 3D modelů napříč různými odvětvími.

2.3.1 Umělá inteligence

Umělá inteligence proniká i do oblasti 3D modelování. Na základě „učení“ dokáže lépe a rychleji provádět analýzy předloh a vytvářet přesnější modely, v herním průmyslu pomáhat vývojářům při tvorbě časově náročných úkolů. Na základě analýzy předloh a strojového učení dokáže navrhnout nové prostupy, objekty, scény. [50]

AI proniká i do umění. Na základě zadání, nadefinování pravidel a parametrů dokáže vygenerovat zcela nové nebo přetvořit již existující umělecké dílo. Umožňuje experimentovat s technikami, tvary nebo barvami. AI funguje jako pomocník, který je schopen na základě jednoho zadání vygenerovat desítky různých návrhů a ty následně dále upravovat nebo přetvářet. [107]

2.3.2 3D tisk

Jednou z neprogresivnějších novinek v oblasti 3D tisku je technologie označovaná jako 4D tisk. Umožňuje vytvářet objekty, které jsou schopny po vytištění měnit svůj tvar – například se roztahovat, stáčet nebo jinak přizpůsobovat v reakci na vnější podněty. Tento směr vývoje má potenciál zásadně ovlivnit široké spektrum oborů, od architektury a medicíny až po automobilový průmysl. [52]

3D tisk je dostupnější a bude využíván ve stále více odvětvích, nově se zkoumá i možnost využití 3D tisku z kovových materiálů. Postupně se začíná využívat ve stavebnictví. Veliký rozvoj 3D tisku se očekává ve zdravotnictví nejen v souvislosti s tištěním implantátů nebo modelů orgánů, ale biotisk (využívá živé buňky) umožňující vytvářet biologické struktury a tkáně nebo i orgány. [53]

3D tisk proniká i do sochařské tvorby, kdy výsledné dílo je vytištěné v celku nebo jako jednotlivé části, které se následně slepí a dotvoří. Pomocí 3D tiskáren je možné vytvářet umělecká díla, které by klasickými postupy nemohly vzniknout. Umožňují vytvářet díla s proměnlivou vnitřní strukturou, vysokou mírou detailu a téměř libovolnou velikostí. [108]



Obrázek 12 3D tisk cévního systému mozku [83]

2.3.3 Holografie

V případě kombinace holografie s AI se otevírá možnost, kdy by hologram bylo možné ovládat pomocí pohybu nebo řeči. To by umožňovalo pomocí rukou možnosti, které má pro manipulaci s 3D geometrií rukama. [54]

2.4 Základní metody 3D modelování

3D modelování slouží k vytváření 3D objektů pomocí výpočetní techniky. Takto vytvářené objekty mohou mít reálný základ nebo být vytvářeny na základě představivosti tvůrce.

2.4.1 Polygonální modelování

Polygonální modelování je nejběžnější technika vytváření 3D objektů. Základním kameny polygonálních modelů jsou vrcholy, hrany a plochy. Plochy bývají na základě propojení bodů ve tvaru trojúhelníku nebo čtyřúhelníku. Tyto polygony jsou propojeny a vytváří polygonální síť, které definují tvar 3D objektu. Se zvětšujícím se počtem polygonů se zvětšuje i přesnost vytvářeného modelu. [55]

Při polygonálním modelování se používají různé techniky, jako například „Box Modeling“. Základem tohoto modelování jsou geometrické tvary, jako například koule, válec, krychle nebo kvádr. Tyto tvary se následně postupně tvarují až do výsledného tvaru. Dalším způsobem polygonálního modelování je „Plane modeling“. Základem tohoto způsobu modelování je plocha, kterou upravujeme dle potřeby. Takto upravené polygony umísťujeme a spojujeme pro dosažení finálního tvaru objektu. [55]

Polygonální modelování umožňuje vysokou úroveň kontroly nad geometrií a je ideální pro objekty, které budou animovány nebo integrovat v reálném čase. Pro dosažení hladkých křivek může být potřeba použít vysoký počet polygonů, což může zvýšit nároky na výpočetní výkon. [48][55][56]

2.4.2 Sochařské modelování (sculpting)

Sochařské modelování je digitální ekvivalent tradičního sochařství, kde umělec manipuluje s virtuálním materiálem, podobně jako s hlinou, pomocí různých nástrojů a štětců. Při vytváření modelu se používají funkce umožňující model natahovat, vyhlazovat, stlačovat nebo třeba uchopovat. Tento přístup umožňuje vytvářet organické a detailní tvary s vysokou úrovní detailu. Z hlediska technologie se pro modelování využívá síť polygonů nebo technologie založená na voxlech – trojrozměrná geometrie a objem. [57]

Mezi SW, které se využívají pro 3D sochařství, modelování a malování patří například ZBrush nebo Blender. Tyto SW poskytují širokou škálu nástrojů pro sochařské modelování, včetně štětců pro tvarování, texturování a malování přímo 3D modelu. Tyto nástroje umožňují umělcům pracovat s vysokým počtem polygonů, což je ideální pro vytváření složitých a realistických detailů. V případě ZBrush je možné jej používat nejen na počítačích, ale i v iPadu. [57]

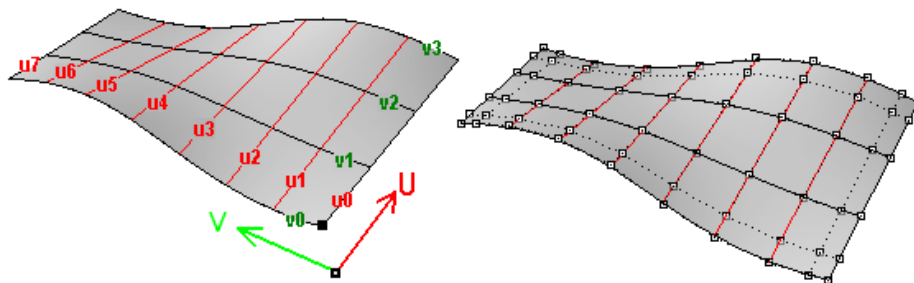
Sochařské modelování je obzvláště užitečné pro tvorbu postav, zvířat a dalších organických tvarů, kde je důležitá jemná kontrola nad tvarem a texturou. Tento přístup je široce využíván v herním průmyslu, filmu a 3D tisku. [57]

2.4.3 NURBS

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) jsou 3D matematické prezentace používané v počítačové grafice. Pomocí NURBS je možné přesně popisovat a modelovat tvary od jednoduchých linek a ploch ve 2D až po prostorové objekty ve 3D. Tato metoda je využitelná zvláště v oblastech, kde je vyžadována vysoká přesnost a hladkost povrchů, jako je automobilový a letecký průmysl nebo strojírenství. [58][59]

NURBS používá pro modelování plošných a prostorových objektů složité matematické rovnice. NURBS modely jsou definovány řídicími body, které mohou mít různou váhu. Každý řídicí bod má svůj uzlový vektor, který svými nastavenými parametry určuje, jakým způsobem je řídicími body ovlivněná křivka NURBS. Tyto modely jsou nezávislé na

rozlišení a umožňují vytvářet hladké a přesné tvary, které lze snadno upravovat a manipulovat s nimi. [60]



Obrázek 13 Geometrie povrchu NURBS [84]

I když NURBS poskytují vysokou úroveň přesnosti, mohou být složitější na manipulaci a vyžadují pokročilé dovednosti v modelování. Nicméně pro aplikace, kde je kladen důraz na přesnost a hladkost povrchů, jsou NURBS ideální volbou. [60][61]

2.4.4 Procedurální modelování

Procedurální modelování je technika tvorby 3D modelů pomocí algoritmů a nadefinovaných parametrů. Jedná se o automatizované generování modelů. Úpravou parametrů je možné dosáhnout automatizované generování obdobných modelů, což se ve velké míře využívá při tvorbě rozsáhlých prostředí, jako jsou městské krajiny nebo přírodní scenérie. Procedurální modelování nabízí flexibilitu a efektivitu při tvorbě rozsáhlých a detailních 3D prostředí. Nicméně, vyžaduje hluboké porozumění algoritmům a pravidlům. [62]

2.5 Shrnutí kapitoly 2. Historie 3D modelování

Kapitola se zaměřuje na historii a vývoj 3D modelování v souvislosti s rozmachem výpočetní techniky. Popisuje zásadní osobnosti a milníky související s jejím rozvojem, jako byl například Benjamin Laposnky, který pomocí osciloskopu vytvořil první grafické výstupy, nebo Russel Kirsch, jenž jako první naskenoval digitální fotografii. Dále zmiňuje Williama Fetterea, který jako první použil termín „počítačová grafika“. Samostatný odstavec je věnován Utažské univerzitě, kde Ivan Sutherland vytvořil přelomový nástroj Sketchpad. Součástí kapitoly je i popis vývoje 3D v 2. pol. 20. století a jejímu budoucímu rozvoji. Dále se kapitola věnuje technikám 3D modelování jako je polygonální modelování, digitální sochařství, NURBS a procedurální modelování. Závěr kapitoly je věnován novým trendům jako využití umělé inteligence a pokroku ve 3D i 4D tisku.

3 FOTOGRAMMETRIE

Jedná se o vědní disciplínu jejíž název vznikl složením tří řeckých slov: fós – světlo / gamma – záznam, písmeno / metrie – měření. Fotogrammetrie analyzuje fotografické snímky (analogové nebo digitální) pro možnost získání prostorových informací o zkoumaných objektech. Umožňuje 3D modelování s využitím 2D snímků, zabývá se rekonstrukcí tvaru, velikosti polohy předmětů z jejich fotografických snímků. [63][64][65]

Fotogrammetrie se využívá v mnoha různých oblastech, jako je geodézie, kartografie, architektura, stavebnictví, archeologie, medicína, umění.



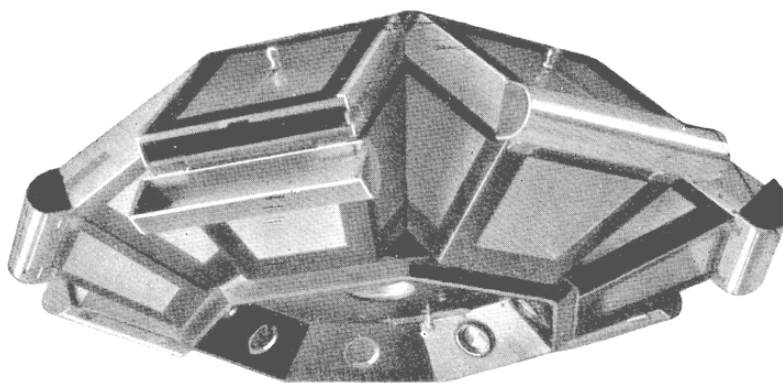
Obrázek 14 Fotogrammetrie skladu pomocí dronu [85]

Informace o objektech zpracovaných pomocí fotogrammetrie se nezískávají jejich přímým měřením, ale pomocí měření jejich 2D obrazů – fotografických snímků. Zpracovávaný snímek je středovým průmětem objektu. Fotogrammetrie slouží k převedení tohoto středového průmětu na průmět pravoúhlý – vstupem je fotografický snímek a výstupem 3D model. [66]

3.1 Historie a vývoj fotogrammetrie

- V roce 1032 Abu'Ali al-Hasan z Basry (965-1039) ve své vědecké práci popsal princip temné komory pro pozorování obrazu zatmění Slunce.

- Leonadro da Vinci (1452-1519) začal používat dírkovou komoru pomocí které obkresloval středové průměty, z nichž rekonstruoval mapové obrazy.
- V roce 1726 M. A. Cappeler pomocí průsekové metody vytvořil mapu horského masivu Pilatus v Alpách.
- Francouzský plukovník Langlois v průběhu krymské války 1853-1856 při obléhání Sevastopolu zhotovil plán opevnění města ze snímků pořízených z věže (poprvé aplikoval metodu pozemní fotogrammetrie).
- V roce 1861 vojenský důstojník Aime Laussedat (1819-1907) fotografoval Paříž z balónu a pro vojenské účely nechává zkonstruovat první fototeodolit (fotografická komora, dalekohled, vodorovný kruh, třínožka, stativ).
- V roce 1862 prof. Karel František Edvard Kořistka poprvé aplikoval pozemní průsekovou fotogrammetrii; Snímkování prováděl z Hradčan a Petřína a vyhodnocením pražských věží získal polohopisný plán Prahy.
- V roce 1867 Albrecht Meydenbauer (1834-1921) poprvé úspěšně použil pozemní fotogrammetrii pro mapování Freyburgu a zaměření městského chrámu a jako první použil název oboru Fotogrammetrie.
- 1893-1897 provedeno první zaměření Tater v měřítku 1:25 000.
- V roce 1903 voják Theodor Scheimpflug zkonstruoval první vyhodnocovací přístroj pro leteckou fotogrammetrii (překreslovač).



Obrázek 15 Panoramatická kamera [86]

- V roce 1915 Oskar Messeter z Berlína sestavil první plně automatickou leteckou komoru, která umožňovala nastavit interval expozic.

- V průběhu 1923-1931 proběhlo mapování skalnatého údolí Vltavy.
- V roce 1931 je pro arktickou fotoexpedici na vzducholodi Graf Zeppelin umístěna vícenásobná komora.
- Před 2. světovou válkou bylo téměř celé území České republiky zmapováno leteckou a pozemní fotogrammetrií.
- V roce 1962 byla vypuštěna první geodetická družice ANNA I B (USA-NASA) určená pro budování globálních geodetických sítí.
- Po druhé světové válce došlo k rozvoji stereofotogrammetrie, která umožnila přesnější 3D rekonstrukce pomocí dvojice fotografií pořízených z různých úhlů.

V průběhu 20. století fotogrammetrie prošla významným vývojem. S rozvojem letecké techniky v první polovině 20. století začaly být pořizovány letecké snímky, které umožnily efektivní mapování rozsáhlých oblastí. [67][68]

3.2 Princip fungování fotogrammetrie

Základním principem fotogrammetrie je triangulace, což je metoda umožňující měření vzdálenosti pomocí úhlů. Tato metoda využívá fotografie objektu pořízené z různých úhlů. Pokud je objekt vyfocen z více úhlů je možné na základě analýzy těchto snímků získat pozice jednotlivých bodů objektu v trojrozměrném prostoru. Následným porovnáním a propojením jednotlivých bodů do trojúhelníkové sítě vznikne 3D model objektu. [67]

Kalibrace kamery je nezbytná pro dosažení přesných výsledků. Umožňuje přesně definovat 3D body v prostoru a jejich obraz v obrazové rovině. Přesnost kalibrace je klíčová pro zpracování dat a následné generování 3D modelů. [67]

Pro fotografování objekt je nutno navrhnout optimální konfigurace snímků. Objekt, který bude následně převáděn do 3D by měl být nafocen ze všech stran a z různých úhlů tak, aby bylo možné vytvořit trojúhelníkovou síť fotografovaného objektu. Překryv fotografií by měl být více než 50 %. Během snímkování nesmí být používán zoom – přiblížení. U kamer se zoom objektivem musí být nastaven do krajní širokoúhlé polohy (označováno písmenem W) a ostření nastaveno na nekonečno a použito u všech snímků. [69]

3.3 Metody fotogrammetrie

Fotogrammetrii můžeme dělit podle níže uvedených kritérií.

Poloha snímacího zařízení:

- **Pozemní**

Fotografie pořízené z nosiče, který je umístěn na zemi. Nosič může být statický nebo se pohybovat po zemi. Tato metoda je vhodná pro detailní dokumentaci objektů, jako jsou budovy, sochy, archeologické nálezy, dále je například využívána v kriminalistice nebo zdravotnictví.

- **Letecká**

Fotografie pořízené z nosiče (letadlo, dron), který se vznáší nebo pohybuje vzduchem. Umožňuje mapování rozsáhlých prostor jako jsou lesy, zemědělské plochy, městské oblasti nebo infrastruktura. Zpracování takto pořízených snímků je složitější (není známa přesná prostorová poloha v okamžiku expozice).

- **Družicová**

Fotografie pořízené z pohybujícího se nosiče (satelit). Využití pro zemědělství, lesnictví, životní prostředí (změny krajiny, pohyby ledovců, ...), vojenství.

Počet snímků:

- **Jednosnímková**

Jsou vyhodnocovány jednotlivé snímky, je možné zaměřit pouze rovinné souřadnice (2D). Není využitelné u prostorově členitých objektů nebo ploch s větším sklonem.

- **Vícesnímková**

Fotografovaný objekt se nachází na více zpracovávaných snímcích. Tímto způsobem je možné určit 3D souřadnice. Vyhodnocování pomocí průsekové fotogrammetrie nebo stereofotogrammetrie.

Způsob zpracování:

- **Analogová**

Pro vyhodnocení se používají složité opticko-mechanické přístroje. V současné době se již téměř nepoužívá.

- **Digitální**

Vstupem je přímo digitální obraz, snímkové souřadnice se měří přímo na obrazovce, k následnému zpracování je nutný speciální SW a hardware (HW). [70]

- *Analytická*

Snímkové souřadnice se měří pomocí komparátorů, další analytické vyhodnocení obsahu snímku (transformace do geodetického souřadnicového systému) již probíhá na počítači.

3.4 Výhody a nevýhody fotogrammetrie

Výhody fotogrammetrie

- *Rychlost a nákladová efektivita*

Fotogrammetrie je rychlý a cenově efektivní způsob, jak vytvořit 3D modely snímaných objektů. Na rozdíl od tradičních měřících metod vyžaduje fotogrammetrie pouze fotoaparát, počítač a SW, což výrazně snižuje náklady na pořízení výsledného modelu snímaného objektu.

- *Vysoká přesnost*

Fotogrammetrie dokáže poskytnout vysoce přesné prostorové údaje, často až na úrovni milimetrů. Tato vysoká přesnost je ideální pro aplikace ve zdravotnictví, geodézii, architektuře

- *Možnost mapování rozsáhlých oblastí*

Fotogrammetrie je ideální pro mapování a analýzu rozsáhlých objektů (krajina). Pomocí leteckých snímků nebo snímků z dronů je možné pokrýt velké plochy a získat podrobné 3D modely

- *Sledování změn*

Fotogrammetrie je ideální k získávání přehledu o změnách snímaných objektů v čase.

Nevýhody fotogrammetrie

- *Náročnost zpracování*

Pořízení snímků objektu není časově náročné, jejich samotné zpracování však již bývá časově náročné. S tím souvisí i pořízení počítače s výkonným HW a speciálních SW

- *Počasí a povětrnostní podmínky*

Fotogrammetrie je citlivá na povětrnostní podmínky. Deštivé počasí, mlha nebo silný vítr mohou ovlivnit kvalitu snímků a ztížit sběr dat.

- ***Závislost na kvalitě snímků***

Přesnost a kvalita fotogrammetrických modelů závisí na kvalitě a množství vstupních snímků. Špatné světelné podmínky, nízké rozlišení, malé množství snímků mohou negativně ovlivnit výsledný model.

- ***Obtížnost při nízkém kontrastu povrchů***

Pokud snímané objekty nemají dostatečný kontrast (například hladké nebo lesklé povrchy), nastává problém s párováním stejných bodů na různých snímcích. Taktéž různé povrchy, jako je voda nebo jemný písek, mohou ztížit rozpoznání bodů potřebných pro vytvoření 3D modelu. To může negativně ovlivnit výsledný model. [71]

3.5 Proces fotogrammetrie – snímání 3D modelů

Fotogrammetrie se využívá k vytvoření 3D modelů ze snímků v 2D. Převod 2D zdrojových snímků do výsledného 3D modelu zahrnuje následující postup:

- ***Příprava objektu a prostředí***

Před pořízením snímků je důležité připravit objekt, který bude snímán. Důležité je zajistit dostatečné osvětlení, které eliminuje stíny a zajistí rovnoměrné pokrytí povrchů. Objekt, pokud je to možné umístit do dostatečné výšky, aby bylo možné jej snímat z více úhlů. Objekt umístit na matný povrch, pro lepší výsledky je také doporučeno zajistit, aby objekt byl stabilní a pevně umístěný. Pro samotné focení využít fotoaparát nebo mobilní telefon, který použije snímky ve formátu pro další softwarové zpracování.

- ***Pořízení fotografií***

Pro dosažení kvalitního 3D modelu daného objektu je potřeba dostatečné množství snímků z různých úhlů. Pro optimální výsledky by mělo být zachyceno minimálně 50 snímků (záleží na velikosti a složitosti snímaného objektu) z různých pozic, přičemž každý snímek by měl mít určitou míru překrytí s předchozím (optimální překrytí je kolem 50 %). Fotografie je vhodné pořídit v dostatečně vysokém rozlišení, aby byly detaily povrchu dobře zachyceny. Při samotném focení se nesmí používat zoom, neměnit zaostření, nijak neupravovat výsledný snímek. Také v případě fotografování v otevřeném prostoru není vhodné, aby se kolem objektu někdo pohyboval.

- ***Zpracování snímků***

Po pořízení přichází na řadu výběr vhodných snímků jejich následní zpracování pomocí specializovaného fotogrammetrického SW. Tento SW identifikuje shodné body na jednotlivých snímcích a získává jejich souřadnice v trojrozměrném prostoru. K identifikovaným bodům se dopočítají zbylé chybějící body pro možnost vytvoření trojúhelníkové sítě 3D modelu. SW následně vytvoří 3D mračno bodů, které tvoří základní tvar objektu. Toto mračno bodů je poté přetvořeno na 3D mesh – síť, která definuje povrch objektu. Takto vytvořený objekt je následně překryt texturou odpovídající barvám získaných z pořízených snímků objektu.

- ***Finální úprava modelu***

Po vygenerování základního 3D modelu je možné pomocí SW provádět úpravy související například s odstraněním podstavce na kterém byl objekt fotografován, snížit počet bodů, upravit kvalitu vygenerovaného objektu. [72]



Obrázek 16 Vývojový diagram

(zdroj: vlastní)

3.6 Aplikace fotogrammetrie v digitalizaci umění

Fotogrammetrie se stala klíčovým nástrojem v oblasti digitalizace uměleckých děl a kulturního dědictví. Hlavní výhodou fotogrammetrie v digitalizaci uměleckých děl je schopnost zachytit i nejjemnější detaily povrchu. Fotogrammetrie umožňuje tvorbu virtuálních modelů s vysokou přesností, aniž by došlo k jejich poškození. Pomocí fotogrammetrie je možné z dobových fotografií vytvořit virtuální modely objektů, které umožní restaurátorům provádět záchranu a odbornou opravu uměleckých děl. Trojrozměrné modely děl přidávají hodnotu výzkumu prováděnému konzervátory a kurátory, usnadňují jejich zkoumání a pohlížení, aniž by bylo nutné s nimi manipulovat fyzicky. [105][106]



Obrázek 17 3D model Smuteční host z hrobky Filipa Smělého [87]

Převedením uměleckých děl pomocí fotogrammetrie do 3D umožňuje návštěvníkům muzeí a galerií zpřístupnit návštěvníkům i díla, která není možné vystavovat fyzicky, stejně tak v případě muzeí je možné jednotlivým předmětům podávat informace o prováděných rekonstrukčních a restaurátorských pracích pro možnost srovnání stavu před a po realizaci. [104]

3.7 Shrnutí kapitoly 3. Fotogrammetrie

Kapitola se zabývá vědní disciplínou fotogrammetrie, která umožňuje získávat prostorové informace z fotografií, a to jak analogových, tak digitálních. Principem fotogrammetrie je triangulace, kdy se z více snímků pořízených z různých úhlů rekonstruuje 3D modely objektů. Součástí kapitoly je i popis historického vývoje fotogrammetrie a její využití v oborech, jako je například geodézie, archeologie, architektura nebo umění. Důležité je zmínit i její využití při digitalizaci kulturního dědictví. Jednotlivé podkapitoly se věnují popisu druhů fotogrammetrie dle polohy, počtu snímků a způsobu zpracování, výhodám a nevýhodám fotogrammetrie nebo postupu při vytváření 3D modelů na základě pořízených snímků.

4 HLAVNÍ ATRIBUTY V 3D GRAFICE

Atributy ve 3D grafice představují vlastnosti určující vzhled, chování nebo vzájemné působení objektů. Tyto atributy umožňují vytvářet realističtější a detailnější propracované 3D modely.

4.1 Tvar

Každý předmět a je jedno, jestli se jedná o plošný nebo prostorový má tvar, který se dá popsat nebo vyčíslit. Tvar předmětu určuje jeho vizuální podobu a je definován body, které mají své souřadnice. V případě 2D je tvar objektu definován souřadnicovými body (x, y), u 3D objektu potřebujeme k definování tvaru přidat k souřadnicovým bodům ještě hloubku (x, y, z). [88]

Aby předmět mohl mít tvar, musí být ohraničen uzavřenou křivkou. Z hlediska tvarů pak rozlišujeme, jestli se jedná o tvar pravidelný nebo nepravidelný. [46]

4.2 Barva

Sítnice lidského oka obsahuje tyčinky a čípky. Z hlediska vnímání barev jsou nejdůležitější čípky. Čípky obsahují fotopigmenty, které dle citlivosti na vlnové délky dokážou vnímat tři barevné vjemy – červenou, zelenou a modrou.

Veškeré barvy, které vnímáme jsou výsledkem kombinace červené, zelené a modré barvy doplněné o faktory jako jas, sytost a odstín. Souhrnně se tyto kombinace dají pojmenovat jako barevné modely.

V praxi se můžeme setkat s modely:

RGB(A) – používá se v počítačové grafice, jedná se o nejběžnější používaný model, zkratka je odvozena z anglického pojmenování základních barev (červená – **R**ed, zelená – **G**reen, modrá – **B**lue). Každou z barevných složek je možné vyjádřit kombinací 3 čísel v rozsahu 0-255, kde 0 značí, že daná barva zastoupená není. Se zvětšujícím se číslem se zvětšuje i její intenzita. V případě RGB(A) je geometricky znázorněn jako hranol.

CMY(K) – používá se při tisku. Zkratka je odvozena z anglického pojmenování základních barev (tyrkysová – **C**yan, fialová – **M**agenta a žlutá – **Y**ellow). V případě CMYK je model doplněn ještě o černou barvu (**K**ontrast).

HSV – v tomto případě se nejedná o samotné barvy, ale o jejich faktory. Zkratka je odvozena od anglického pojmenování parametrů (barevný tón – **H**ue, sytost – **S**aturation a jasová hodnota – **V**alue). Faktory umožňují měnit vnímání jednotlivých barev, aniž by tím bylo nutné měnit barvy jiné. Parametry *s* a *v* mohou nabývat hodnot 0-1, parametr *H* je v rozmezí hodnot 0-360°. Využívá se v grafických aplikacích. Model HSV je geometricky znázorněn jako jehlan.

HSL – stejně jako u předchozího modelu jde o faktory barev (barevný tón – **H**ue, světlost – **L**ightness a sytost – **S**aturation). Faktory umožňují měnit vnímání jednotlivých barev, aniž by tím bylo nutné měnit barvy jiné. Parametry *L* a *S* mohou nabývat hodnot 0-1, parametr *H* je v rozmezí hodnot 0-360°. Využívá se v grafických aplikacích. Model HSL je geometricky znázorněn dvojicí kuželů. [89]

4.3 Textura

Texturování je metoda používaná v počítačové grafice, která umožňuje realistické vykreslování trojrozměrných objektů tím, že na jejich povrchu nanáší rastrové obrazce – textury. Pomocí textur je možné na objektu simulovat jeho strukturu, barvu nebo vzory. Texturování nemění tvar objektu, ale pouze jeho vizuální zobrazení. [90]

Textury se vytváří pomocí rastrových obrázků na základě fotografie, skenu nebo přímým namalováním. Druhou variantou jsou tzv. procedurální textury generované pomocí algoritmů vycházejících z fraktálních technik – opakující se geometrické tvary v různých velikostech. [90]

Texturování je ideální pro objekty s vizuálně složitým, ale geometricky jednoduchým povrchem bez nutnosti modelovat každý detail. Texturování je technika pro zvýšení vizuální věrohodnosti 3D scén. Správně zvolené a optimalizované textury výrazně zlepší výsledný vzhled objektu. [90]

Textura na 3D modelu neslouží jen k tomu, aby objekt měl nějaký povrch. V oblasti zobrazení objektu se na ni nahlíží jako na důležitou vlastnost, podle které lze popsat jeho povrch. Vzhled povrchu – například jestli je hladký, hrubý nebo má nějaký vzor – lze měřit a porovnávat. [101]

4.4 Světelné zdroje

Světelný zdroj je objekt, který vyzařuje elektromagnetické záření, které je schopno vnímat lidské oko. Světelné zdroje dělíme na přírodní a umělé, vlastní a nevlastní a bodové nebo plošné. [91]

V počítačové grafice se světelné zdroje zpravidla rozdělují na bodové a plošné. Ve skutečnosti však žádný dokonale bodový zdroj neexistuje – všechny světelné zdroje mají nějakou plochu. Díky tomu se přechod mezi osvětlenými a neosvětlenými částmi objektu jeví jako plynulý. Tento přechod je ovlivněn řadou faktorů, například typem světelného zdroje, jeho intenzitou nebo vzdáleností od objektu. Stejně tak je tento přechod ovlivněn i vlastnosti samotného tělesa, které může světlo částečně propouštět, nebo ho zcela pohlcovat případně odrážet a pak objekt funguje jako sekundární zdroj světla. [91]

Mezi základní parametry světelných zdrojů patří „Světelný tok“ udávající množství světla, které je světelný zdroj schopen vyzařit za jednotku času. „Teplota barvy“ popisující barevný dojem bílého světla. „Index podání barev“ vyjadřuje, jak věrně daný světelný zdroj dokáže reprodukovat barvy osvětlených objektů. „Směr světla“ udává směr, jakým světelný zdroj svítí. „Poloha“ umístění zdroje světla k danému objektu. [92]

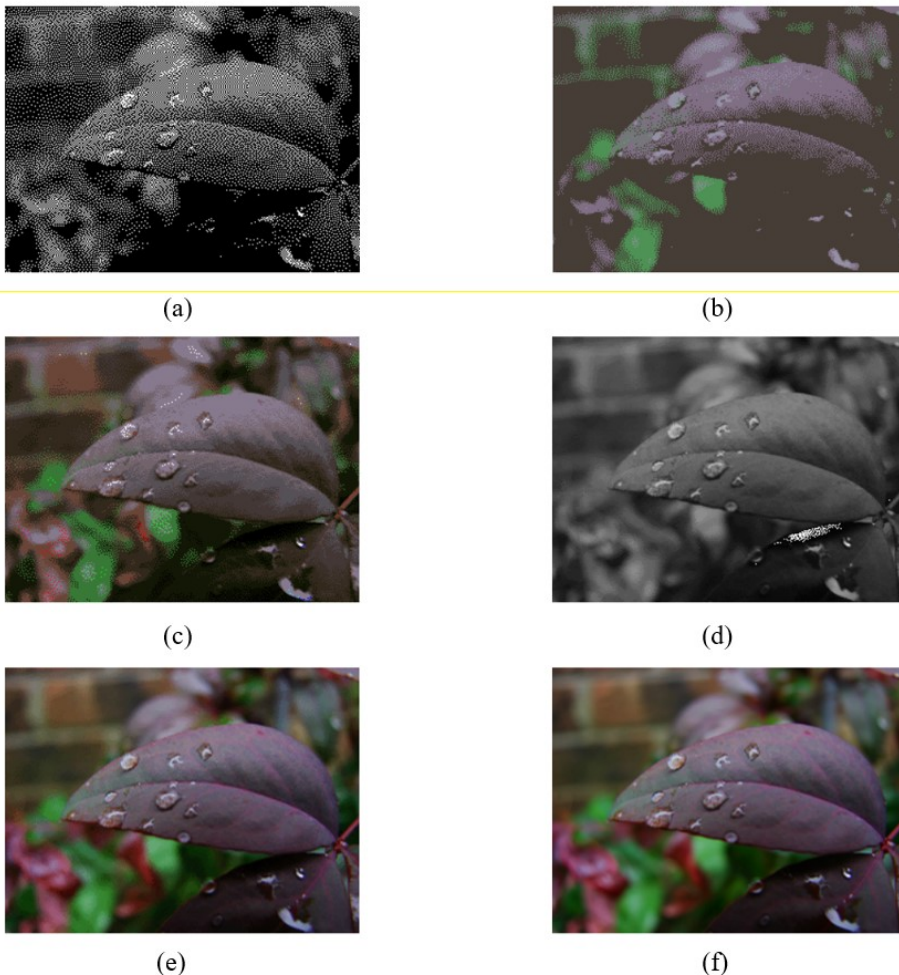
Aby bylo možné přesněji definovat vlastnosti světelných zdrojů byl zaveden pojem „absolutně černé těleso“. Jde o ideální těleso, které pohlcuje 100% elektromagnetického záření. V přírodě se absolutně černé těleso nevyskytuje. Pro vyjádření barevného odstínu světla, jak ho vnímá lidské oko byla zavedena veličina „teplota chromatičnosti“. Je to vlastně teplota absolutně černého tělesa, které by při dané teplotě vyzařovalo světlo stejné barvy jako daný světelný zdroj. [93]

4.5 Vlastnosti a formáty grafiky

Kvalita dat v počítačové grafice hraje klíčovou roli při vytváření realistických vizuálních výstupů. Ovlivňuje ji celá řada faktorů, jako jsou rozlišení, bitová hloubka, míra komprese či zvolený datový formát. Významným aspektem je rovněž správná volba grafických formátů, které mají přímý dopad na výslednou kvalitu zobrazení. [94]

4.5.1 Grafické vlastnosti

Barevná hloubka určuje množství bitů použitých k zakódování barevné informace jednoho pixelu. Barevné hloubky mohou být 8, 16, 24 nebo 32bitové. Nejrozšířenější je barevná hloubka 24bitů. [94]



Obrázek 18 Srovnání kvality obrázku při použití různých barevných hloubek a) 1bitová hloubka (2 barvy), b) 2bitová hloubka (4 barvy), c) 4bitová hloubka (16 barev), d) 8bitová hloubka (256 odstínech šedi), e) 8bitová hloubka (256 barev), f) 24bitová hloubka (16.777.216 barev) [99]

Rozlišení DPI určuje počet pixelů na jeden palec (inch=2,54cm – **D**ots **p**er **I**nch). Se zvyšujícím se DPI se zvyšuje i kvalita obrázku. [94]

Komprese se používá pro zmenšení velikosti dat při zachování stejné kvality zdrojového obrázku. Známe „Ztrátová komprese“ při které se zmenšuje velikost dat a s tím související i snížení kvality obrázku a „Beztrátovou komprese“, která zmenší velikost

souboru bez snížení kvality obrázku. V tomto případě je ale zmenšení velikosti dat minimální. [94]

Průhlednost je grafická vlastnost, která umožňuje částečné nebo úplné zobrazení pozadí skrz samotný obrázek. Nastavuje se pomocí takzvaného alfa kanálu, jenž určuje míru průhlednosti jednotlivých barev. [94]

4.5.2 Grafické formáty

STL (StereoLithography) je formát používaný k 3D tisku. U formátu STL je povrch objektu definován sítí trojúhelníků, ke každému trojúhelníku uchovává informace o souřadnicích jeho vrcholů. STL soubory neobsahují barvy a textury. [95]

OBJ (Object) je jeden z nejpoužívanějších formátů. Mají formát prostého textu s informací o plochách, texturách a vrcholech objektu, jinými slovy o tvaru objektu. Informace o vzhledu objektu zajišťují doprovodné MTL soubory. [96]

PLY (Polygon File Format) je formát, který umožňuje ukládat nejen samotný tvar objektu, tedy jeho geometrii, ale i další atributy jako např. barvy, textury nebo vlastnosti materiálu. Díky tomu je vhodný pro aplikace, u nichž se požaduje realistický vzhled objektů. Každý soubor ve formátu PLY popisuje právě jeden objekt, a to pomocí bodů (vrcholů), plošek a dalších prvků s doplněnými vlastnostmi jako je informace o povrchu ve formě textury, souřadnice textury, průhlednost. [97]

ABC (Alembic) je formát obsahující různé typy 3D objektů, jako jsou polygonové sítě, NURBS či parametrické křivky. Používá se především pro export složitých scén, animací nebo simulací. Hodí se i pro přenos objektů s velkým počtem bodů (vrcholů). [98]

4.6 Shrnutí kapitoly 4. Hlavní atributy v 3D grafice

Tato kapitola se věnuje hlavním atributům 3D grafiky, které ovlivňují vzhled a chování objektů v digitálním prostoru. Je vysvětlen význam tvaru a textura, což je klíčová technika pro dosažení realistického vzhledu povrchů objektů, bez nutnosti modelovat každý detail. Součástí kapitoly je i popis světelných zdrojů. Kapitola rovněž zmiňuje, jak kvalita grafických dat, jako je rozlišení nebo bitová hloubka, ovlivňuje výsledný obraz. Dále je vysvětleno, jak průhlednost a komprese ovlivňují vizuální výstup. V závěru jsou uvedeny hlavní souborové formáty jako STL, OBJ, PLY a ABC, které se používají pro ukládání a přenos 3D objektů včetně informací o geometrii, texturách a dalších vlastnostech.

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 PŘEDSTAVENÍ MODELŮ

5.1 Popis uměleckých objektů

Pro účely 3D rekonstrukce jsem vybral šest autorských uměleckých děl různého charakteru, materiálu a velikosti. Záměr byl pracovat s co nejvíce odlišnými objekty tak, aby bylo možné sledovat, jak se jednotlivé vlastnosti – jako je například textura povrchu, lesk, složitost tvaru nebo prostředí – promítají do výsledné kvality 3D modelu. Výběr objektů zahrnuje interiérové objekty (např. sošky a malby) a jeden exteriérový objekt umístěný ve veřejném prostoru.

5.1.1 Dřevěná loď

Prvním uměleckým dílem byla dřevěná loď, kterou vlastnoručně vyrobil můj dědeček. Dílo je bohaté na detaily, a proto bylo zvoleno jeho fotografování z různých úhlů.

První série snímků byla pořízena v jedné rovině kolem celého objektu. Následně byla vyfocena spodní část lodi, včetně podstavce, na kterém loď stojí. Poslední série fotografií byla zaměřena na horní pohled s cílem zachytit palubu a stožáry.

Snímek dřevěného modelu lodi umístěného na podstavci před samotným fotografováním.



Obrázek 19 Dřevěná loď

(zdroj: vlastní)

Celkem bylo pořízeno 230 snímků. Po výběru a odstranění nevhodných snímků bylo ve finále použito 169 fotografií. Celková datová velikost těchto snímků je 510 MB. Nastavení fotoaparátu:

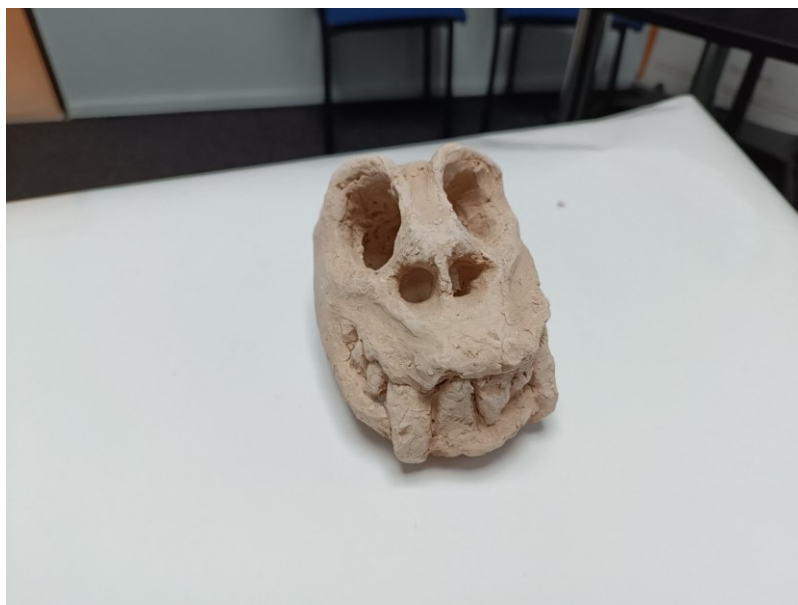
Clona: f/1.89 | Čas závěrky: 1/50 s | Citlivost ISO: 1366 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

5.1.2 Lebka zvířete

Dalším objektem pro tvorbu 3D modelu byla keramická socha imaginární zvířecí lebky. Jedná se o mé autorské dílo vytvořené v období dospívání. Objekt byl zachycen ve dvou sériích fotografií. První série byla pořízena v horizontální rovině kolem celého objektu, druhá pak z horního pohledu, aby byly zachyceny detaily horní části sochy. Obě série dohromady obsahují 82 fotografií, jejichž celková velikost činí 168 MB. Nastavení fotoaparátu:

Clona: f/1.9 | Čas závěrky: 1/100 s | Citlivost ISO: 520 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

Snímek keramické zvířecí lebky na podstavci a podkladovém papíru připravený k fotografování.



Obrázek 20 Lebka zvířete

(zdroj: vlastní)

5.1.3 Socha krále

Třetím zvoleným uměleckým dílem pro rekonstrukci 3D modelu byla keramická socha krále. Jedná se opět o mé autorské dílo vytvořené v období dospívání. Výběr tohoto objektu

byl motivován barevnou kombinací, u níž bylo cílem si ověřit, jak si SW poradí s barevným rozlišením při jeho rekonstrukci. Socha byla snímána ze tří úhlů – shora, ze středové úrovně a zespodu. Každá série obsahovala 31 fotografií pořízených kolem celého objektu. Celkem bylo použito 93 fotografií o celkové velikosti 245 MB. Nastavení fotoaparátu:

Clona: f/1.9 | Čas závěrky: 1/50 s | Citlivost ISO: 318 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

Čelní pohled na keramickou sochu krále.



Obrázek 21 Socha krále

(zdroj: vlastní)

5.1.4 Olejomalba krajiny

Čtvrtým zpracovaným objektem byla olejomalba od malíře Františka Shöna. Jedná se o barevnou krajinomalbu, která byla vybrána záměrně z důvodu své pestré paletě barev. Cílem bylo ověřit, jak SW zvládne rekonstrukci 2D uměleckého díla s výraznými přechody a detaily tahů štětce. Obraz byl fotografován ze dvou úhlů – z horního pohledu a v úrovni kolem rámu s celkovým pokrytím 360° kolem objektu. Bylo pořízeno celkem 95 fotografií, kdy celková velikost fotografií je 317 MB. Nastavení fotoaparátu:

Clona: f/1.89 | Čas závěrky: 1/50 s | Citlivost ISO: 378 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

Vrchní pohled na olejomalbu krajiny umístěnou na podstavci.



Obrázek 22 Olejomalba krajiny

(zdroj: vlastní)

5.1.5 Bronzová socha želvy

Jediným venkovním objektem je bronzová socha želvy, která zároveň představuje největší fotografované umělecké dílo. Socha je umístěná na Horním náměstí v Olomouci, v těsné blízkosti Arionovy kašny. Autorem tohoto uměleckého díla je sochař Ivan Theimer. Při fotografování bylo nutné zohlednit intenzitu a směr slunečního svitu, který může výrazně ovlivnit kvalitu výsledného 3D modelu. Z tohoto důvodu bylo focení prováděno v době, kdy byla zatažená obloha, aby nedocházelo ke zkreslení fotografovaného předmětu vlastním stínem nebo stínem fotografujícího. Celkově bylo pořízeno 133 fotografií o hromadné velikosti 789 MB. Nastavení fotoaparátu:

Clona: f/1.9 | Čas závěrky: 1/100 s | Citlivost ISO: 50 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

Bronzová socha želvy na Horním náměstí v Olomouci.



Obrázek 23 Bronzová socha želvy

(zdroj: vlastní)

5.1.6 Olejomalba lidské lebky

Posledním objektem byla olejomalba lidské lebky. Jedná se o mé autorské dílo, které bylo namalováno v období dospívání. Jedná se o malbu na plátno. Fotodokumentace byla pořízená ze dvou úhlů – z horního pohledu a v horizontální rovině. Dílo bylo zachyceno po celém obvodu. Celkem bylo pořízeno 96 fotografií, jejichž celková velikost je 229 MB. Nastavení fotoaparátu:

Clona: f/1.9 | Čas závěrky: 1/100 s | Citlivost ISO: 520 | Ohnisková vzdálenost: 6 mm

Černobílá olejomalba lidské lebky na podstavci a podkladovém papíru s odleskem osvětlení.



Obrázek 24 Olejomalba lebky

(zdroj: vlastní)

5.1.7 Omezení při focení uměleckých děl

V počáteční fázi dokumentace byla jednotlivá umělecká díla fotografována pomocí mobilního telefonu Apple iPhone 11. Cílem bylo pořídit dostatečně kvalitní fotografie pro následné zpracování 3D modelů v softwaru COLMAP. Po úvodním nafocení šesti objektů se ukázalo, že formát fotografií není kompatibilní s použitým SW.

Mobilní zařízení iPhone 11 ukládá fotografie ve formátu HEIC (High Efficiency Image Coding), který není podporovaný SW COLMAP. Tento program akceptuje pouze standardní formáty, jako jsou JPG, JPEG, PNG nebo TIFF. Z tohoto důvodu nebylo možné s původními fotografiemi dále pracovat a bylo nutné proces focení zopakovat s jiným zařízením.

Pro další fázi focení byl proto využit jiný mobilní telefon Xiaomi Redmi Note 12S, který ukládá snímky ve formátu JPG. Tento formát je kompatibilní se SW COLMAP.

5.1.8 Popis místnosti a světelných podmínek při snímání

Fotografování uměleckých objektů pro tvorbu 3D digitálních modelů probíhalo v kancelářském prostředí. Objekty byly foceny na kancelářském stole, který sloužil jako podstavec. Na stole byl položen bílý nelesklý papír. Tento papír měl za úkol vizuálně izolovat objekty od podstavce a minimalizovat rušivé elementy při budoucí tvorbě ve fotogrammetrickém softwaru. Fotografování probíhalo přímo pod stopním světlem s možností nastavení intenzity a barvy osvětlení, což umožnilo optimalizovat světelné

podmínky pro jednotlivé snímky. Rovnoměrné nasvícení, které bylo dosaženo úpravou intenzity a barvy světelného zdroje, napomohlo lepší viditelnosti detailů a současně omezilo nežádoucí stíny. Pro fotografování byla nastavena maximální intenzita a bílá barva.

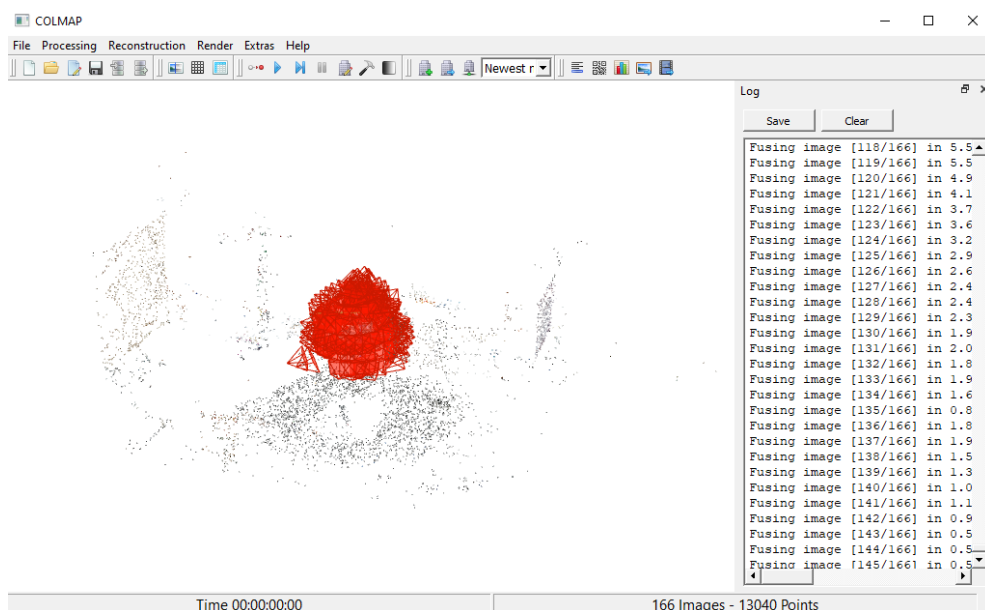
5.2 Rekonstrukce uměleckých děl v programu COLMAP

5.2.1 Dřevěná loď

Jako první objekt pro generování v programu COLMAP byla zvolena dřevěná loď. Rekonstrukce byla nastavena na nejnižší kvalitu. Pro toto dílo bylo použito celkem 169 fotografií. Program COLMAP při rekonstrukci využil pouze 166 z nich – zbývající tři fotografie byly vyhodnoceny jako nadbytečné nebo podobné jiným snímkům, a tedy pro výpočet nepotřebné. Proces rekonstrukce trval přibližně 17 minut. Po provedení generace se podařilo vytvořit řídké mračno bodů, které přibližně zachycovalo tvar a proporce lodi. I přes zvolenou nízkou kvalitu generování dat bylo možné pozorovat základní obrys dřevěné lodi, včetně tvaru paluby, stěžňů a objektů, které se na ní nachází. Detailní části u lodi ale chyběly nebo nebyly vůbec vidět z důvodu použití nejnižší kvality rekonstrukce.

Výsledná rekonstrukce obsahuje 13 040 bodů. Celková velikost složky obsahující výslednou rekonstrukci má 2,28 GB.

Vygenerované mračno bodů dřevěné lodi s nerozeznatelnými obrysy.



Obrázek 25 Rekonstrukce dřevěné lodi v COLMAP

(zdroj: vlastní)

Tabulka 1 Výpis atributů – dřevěná loď

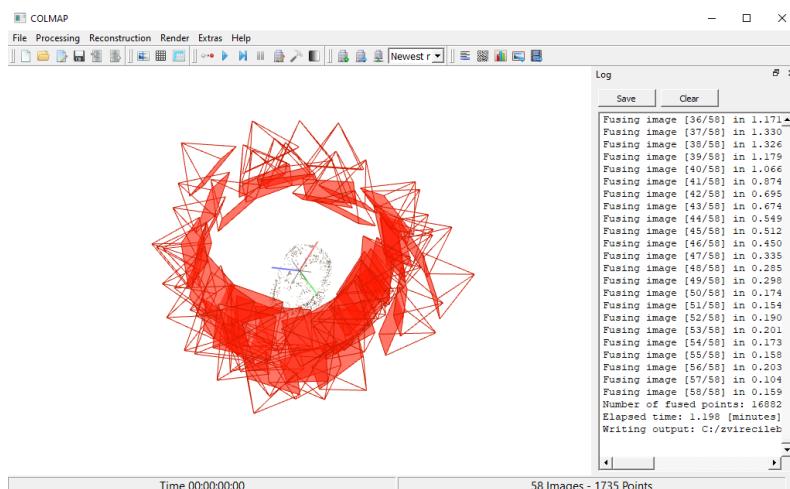
Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.89
Kvalita rekonstrukce	Nízká
Čas závěrky	1/50 s
Citlivost ISO	1366
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	230
Počet použitých snímků	169
Celková velikost složky/meshed-poisson	2,57 GB / 91 MB

(zdroj: vlastní)

5.2.2 Lebka zvířete

Druhým rekonstruovaným objektem byla keramická zvířecí lebka. Rekonstrukce byla nastavena na střední kvalitu. Pro zajištění dostatečného pokrytí lebky bylo pořízeno celkem 82 fotografií, které zachycovaly lebku z různých úhlů. Program COLMAP použil pouze 58 snímků. Proces generování trval přibližně 14 minut. Výsledkem rekonstrukce bylo řídké mračno bodů, které zahrnovalo 1 735 bodů. I přes použití střední kvality se podařilo zachytit základní tvar lebky včetně nosních a očních otvorů. Okolní prostředí, na kterém byla lebka umístěna, se v rekonstrukci téměř vůbec neobjevilo. Celková velikost složky obsahující výstupy rekonstrukce má 0,7 GB.

Vygenerované mračno bodů lebky zvířete s viditelnými obrysy. Ukazuje obrázek 26.



Obrázek 26 Rekonstrukce zvířecí lebky v COLMAP

(zdroj: vlastní)

Tabulka 2 Výpis atributů – zvířecí lebka

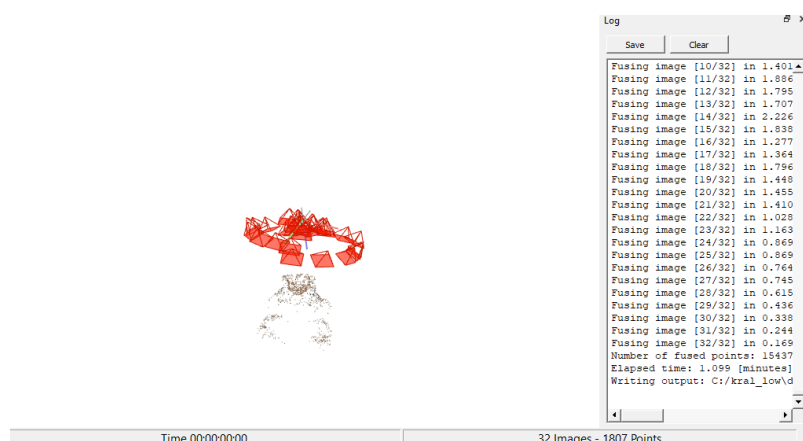
Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.9
Kvalita rekonstrukce	Střední
Čas závěrky	1/100 s
Citlivost ISO	520
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	82
Počet použitých snímků	58
Celková velikost složky/meshed-poisson	2,48 GB / 10, 2 MB

(zdroj: vlastní)

5.2.3 Socha krále

Třetí rekonstrukcí je keramická socha krále. Pro tuto rekonstrukci byla zvolena nejnižší kvalita. Pro vytvoření 3D modelu bylo původně pořízeno celkem 93 fotografií. U této rekonstrukce program COLMAP využil pouze 32 snímků. Po úspěšné rekonstrukci se podařilo vygenerovat mračno bodů, které obsahovalo 1807 bodů. Rekonstrukce trvala přibližně 4 minuty.

Výsledný model zachycuje základní proporce a objem sochy, ale vzhledem k nízké kvalitě zpracování chybí větší množství detailů a některé části keramické sochy působí neúplně. Výsledné mračno bodů zachycuje pouze sochu a okolí se zde vůbec nenachází. Celková velikost složky s výslednou rekonstrukcí má 1,2 GB.



Obrázek 27 Rekonstrukce sochy krále v COLMAP, vygenerované mračno bodů sochy krále

(zdroj: vlastní)

Tabulka 3 Výpis atributů – socha krále

Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.9
Kvalita rekonstrukce	Nízká
Čas závěrky	1/50 s
Citlivost ISO	318
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	93
Počet použitých snímků	32
Celková velikost složky/meshed-poisson	1,24 GB / 14,5 MB

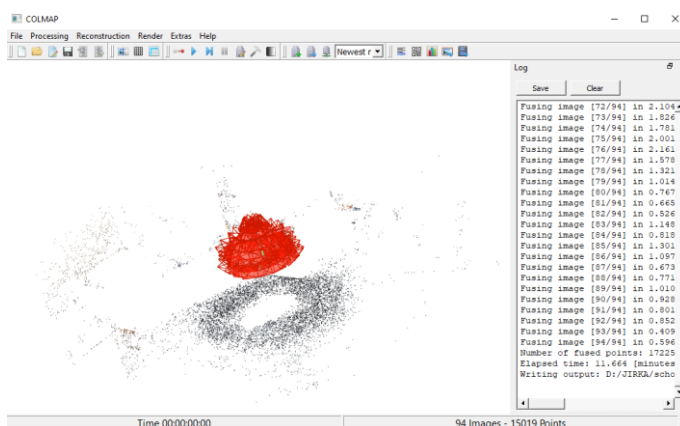
(zdroj: vlastní)

5.2.4 Olejomalba krajiny

Dalším zpracovaným uměleckým dílem byla olejomalba krajiny. Rekonstrukce byla nastavena na střední kvalitu, která měla umožnit dosáhnout detailnějšího výsledku. Pro rekonstrukci bylo původně pořízeno celkem 95 fotografií. COLMAP automaticky vyřadil pouze jednu fotografii a použil tedy 94 snímků. Celý proces generování olejomalby trval přibližně 38 minut.

Po dokončení generování vzniklo mračno bodů, které obsahuje celkem 15 019 bodů. Výsledný výstup zachycuje základní tvar a proporce samotného obrazu, převážně přímo malby. Vzhledem k tomu, že byly během snímání zachyceny i okolní prostory, do výsledného mračna bodů se odrazila také část místnosti, ve které byl obraz focen. Celková velikost složky s výslednou rekonstrukcí má přibližně 3,2 GB.

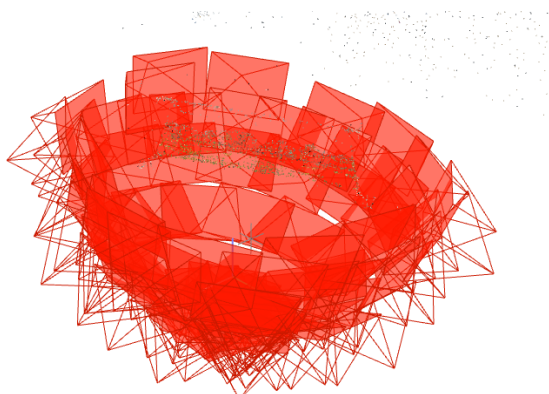
Vygenerované mračno bodů olejomalby krajiny jde vidět na obrázku 28.



Obrázek 28 Rekonstrukce olejomalby krajiny v COLMAP

(zdroj: vlastní)

Spodní pohled na vygenerované mračno bodů olejomalby krajiny je znázorněn na obrázku 29.



Obrázek 29 Pohled zespoda na olejomalbu

(zdroj: vlastní)

Tabulka 4 Výpis atributů – olejomalba krajiny

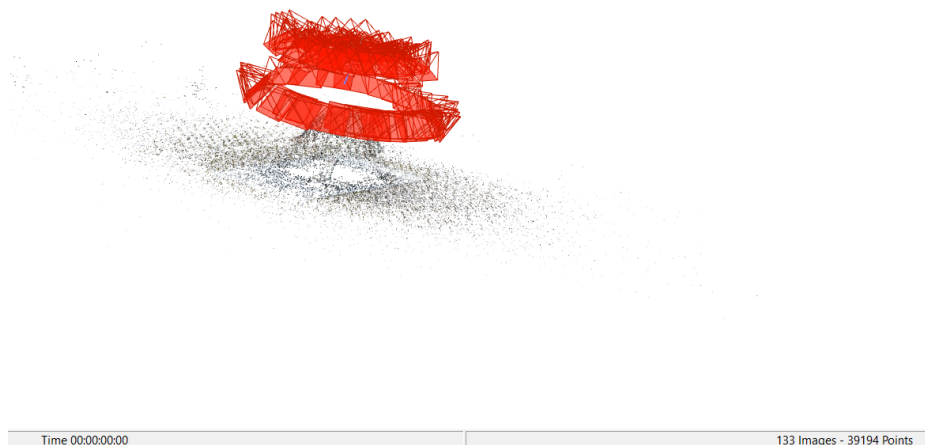
Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.89
Kvalita rekonstrukce	Střední
Čas závěrky	1/50 s
Citlivost ISO	378
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	95
Počet použitých snímků	94
Celková velikost složky/meshed-poisson	3,3 GB / 103 MB

(zdroj: vlastní)

5.2.5 Bronzová socha želvy

Pátým objektem byla zvolená bronzová socha želvy. Rekonstrukce byla provedena s nastavením nízké kvality, což vedlo k rychlejšímu generování modelu. Pro toto umělecké dílo bylo pořízeno 133 fotografií a všechny tyto fotografie program COLMAP použil. Proces rekonstrukce trval přibližně 15 minut. Po dokončení generování vzniklo mračno bodů, které obsahuje celkem 39 149 bodů. Výsledná rekonstrukce zachycuje základní tvar želvy, ale zobrazuje se zde i část dlažby, která byla zachycena v průběhu snímání želvy. Celková velikost složky s výslednou rekonstrukcí má 2,1 GB.

Na obrázku 30. jde vidět vygenerované mračno bodů bronzové sochy želvy s viditelným krunýřem.



Obrázek 30 Rekonstrukce bronzové sochy želvy v COLMAP

(zdroj: vlastní)

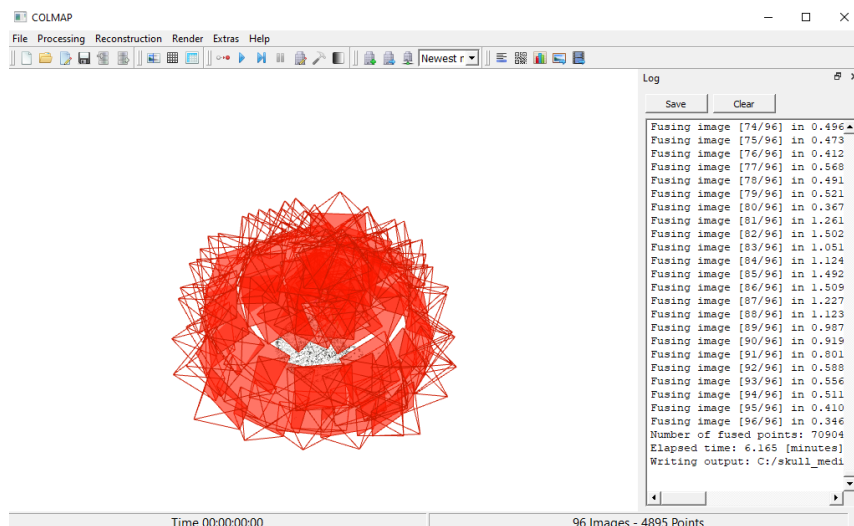
Tabulka 5 Výpis atributů – bronzová socha želvy

Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.9
Kvalita rekonstrukce	Nízká
Čas závěrky	1/100 s
Citlivost ISO	50
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	133
Počet použitých snímků	133
Celková velikost složky/meshed-poisson	2,19 GB / 147 MB

(zdroj: vlastní)

5.2.6 Olejomalba lidské lebky

Posledním uměleckým dílem, které jsem zpracoval pomocí programu COLMAP, byla olejomalba lidské lebky. Rekonstrukce byla nastavená na střední kvalitu, což umožnilo dosažení vyšší úrovně detailů. Pro tuto olejomalbu bylo pořízeno 96 fotografií, přičemž všechny byly využity při rekonstrukci. Proces rekonstrukce trval přibližně 35 minut. Výsledné mračno bodů zachytilo pouze obrys namalované lebky. Plátno, na kterém je lebka namalovaná, nebylo v mračnu bodů zachyceno. Místnost, ve které bylo toto umělecké dílo foceno nebyla zaznamenána, jelikož se snímky zaměřovaly výhradně na samotnou olejomalbu. Celková velikost složky s rekonstrukcí má 3,1 GB.



Obrázek 31 Rekonstrukce olejomalby lidské lebky v COLMAP – vygenerované mračno bodů olejomalby

(zdroj: vlastní)

Tabulka 6 Výpis atributů – olejomalba lebky

Atributy	Hodnoty
Použitá clona (f/)	f/1.9
Kvalita rekonstrukce	Střední
Čas závěrky	1/100 s
Citlivost ISO	520
Ohnisková vzdálenost	6 mm
Celkový počet snímků	96
Počet použitých snímků	96
Celková velikost složky/meshed-poisson	3,1 GB / 11 MB

(zdroj: vlastní)

5.3 Zpracování a úpravy modelu v programu MeshLab

U všech objektů byl z hlediska zpracování použit stejný postup, odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP, *Merge Close Vertices*, *Repair Non Manifold Edges*, *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* a *Laplacian Smooth*. U prvního objektu dřevěné lodi byly jednotlivé kroky rozepsány podrobně pod samostatné body. U zbývajících objektů jsou u jednotlivých bodů vždy uvedeny jen vstupní a výsledné hodnoty.

5.3.1 Dřevěná loď

- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Jako první krok u rekonstrukce bylo potřeba odstranit přebytečné části vygenerované v programu COLMAP, jako například rušivé okolí kolem objektu nebo podstavec, na kterém byl daný objekt vyfocen. U dřevěné lodi jde vidět na obrázku níže, že je zde vygenerovaná i část místnosti, ve která byla loď focena.



Obrázek 32 Vložení „meshed-poisson“ dřevěné lodi

(zdroj: vlastní)

Byla použita funkce „*Select vertices*“ pomocí které bylo označeno veškeré okolí kolem lodi. Označené okolí bylo následně smazáno pomocí funkce „*Delete selected vertices*“. Po odmazání okolí, včetně podstavce vypadá loď následovně:



Obrázek 33 Očištění rušivých elementů

(zdroj: vlastní)

Před začátkem mazání rušivého okolí a podstavce na kterém byla loď focena obsahovala loď „vertices“ – 2 034 498 a 4 024 813 „faces“, po smazání měla dřevěná loď 1 128 496 vertices a 2 257 944 faces.

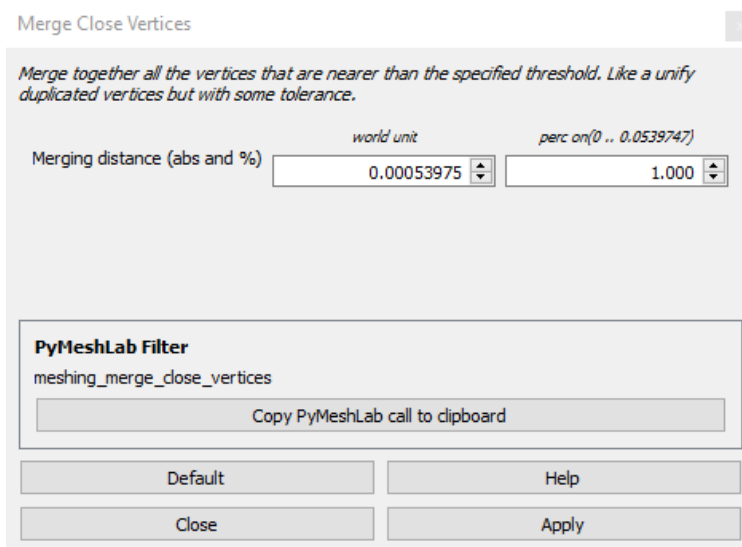
Další kroky se již zabývají jen snížením co největšího počtu vrcholů (*vertices*) a ploch (*faces*), čímž by mělo dojít k optimalizaci výsledného 3D modelu. Důvodem této úpravy byla snaha o dosažení rovnováhy mezi vizuální kvalitou a výpočetní efektivitou. Vysoký počet polygonů sice zajišťuje podrobnou a přesnou geometrii, ale výrazně zvyšuje i velikost výsledného souboru a tím i následnou náročnost na HW zdroje při dalším zpracování, zobrazování nebo sdílení modelu.

- ***Filtr Merge Close Vertices***

V rámci úpravy a optimalizace modelu dřevěné lodi byla aplikovaná funkce *Merge Close Vertices*, která se nachází v nabídce *Filters -> Cleaning and Repairing*. Tento nástroj slouží ke sloučení vrcholů (*vertices*), které jsou od sebe vzdálené méně než stanovený práh – odstraňuje duplicity a drobné geometrické nesrovnalosti vzniklé při předchozí rekonstrukci

nebo exportu modelu. Ve výsledném modelu tak dochází ke zpřehlednění topologie a odstranění nepotřebných bodů, které neovlivňují vizuální kvalitu, ale zvyšují složitost dat.

Pro tento krok byly použity výchozí hodnoty *Merging distance*, konkrétně absolutní hodnota 0.0053975 a relativní hodnota 1.000 v poměru k velikosti objektu (*perc on*), jak je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 34 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při těchto nastavených hodnotách bylo úspěšně sloučeno celkem 69 291 vrcholů bez narušení tvaru dřevěné lodi.

- ***Aplikace filtru Repair Non Manifold Edges***

Po sloučení *Close Vertices* následoval krok *Repair Non Manifold Edges*, který je dostupný v nabídce *Filters -> Cleaning and Repairing*. Tato funkce je určena k detekci a odstranění tzv. netopologických (non-manifold) hran a plošek, které představují geometrické chyby v modelu. Tyto nesprávně definované části mohou následně způsobovat komplikace při dalším zpracování. Po aplikaci filtru bylo automaticky detekováno a odstraněno celkem 1601 *faces*, které nevyhovovaly správné topologii.

- ***Aplikace filtru Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Dalším krokem pro optimalizaci bylo použití filtru *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* s cílem výrazně snížit počet *faces* a *vertices*. Tento filtr se nachází v nabídce *Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge*

Collapse Decimation. Tento nástroj využívá metodu kvadratických chybových metrik a umožňuje efektivní zjednodušení sítě při minimálním dopadu na vzhledu modelu.

Na obrázku 35. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami.

Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation

Simplify a mesh using a quadric based edge-collapse strategy. A variant of the well known Garland and Heckbert simplification algorithm with different weighting schemes to better cope with aspect ration and planar/degenerate quadrics areas.

See:
M. Garland and P. Heckbert.
Surface Simplification Using Quadric Error Metrics ([pdf](#))
In Proceedings of SIGGRAPH 97.

Target number of faces: 1059357

Percentage reduction (0..1): 0

Quality threshold: 0.9

Preserve Boundary of the mesh: ☐

Boundary Preserving Weight: 1

Preserve Normal: ☒

Preserve Topology: ☒

Optimal position of simplified vertices: ☒

Planar Simplification: ☐

Planar Simp. Weight: 0.001

Weighted Simplification: ☐

Post-simplification cleaning: ☒

Simplify only selected faces: ☐

PyMeshLab Filter
meshing_decimation_quadric_edge_collapse

Copy PyMeshLab call to clipboard

Default Help

Close Apply

Obrázek 35 Zadané hodnoty v *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

Cílový počet *faces* byl nastaven na 1 059 357 – tedy snížen o $\frac{1}{2}$ a hodnota kvality na 0.9 aby nedošlo ke změně kvality výsledného modelu lodi. Zároveň byly zatrženy volby *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices* a *Post-simplification cleaning*.

Po dokončení operace model lodi obsahoval 529 188 *Vertices* a 1 059 356 *Faces*. Systém také automaticky odstranil ještě dalších 97 nepotřebných vrcholů.



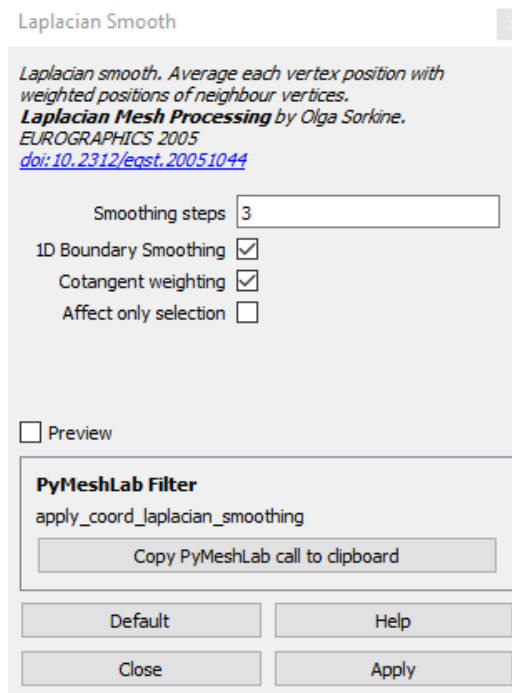
Obrázek 36 Výsledek modelu lodi po snížení *Vertices* a *Faces*

(zdroj: vlastní)

- ***Aplikace filtru Laplacian Smooth***

Posledním krokem při úpravě modelu bylo použití filtru *Laplacian Smooth*, který je dostupný v nabídce *Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*. Tento nástroj slouží k vyhlazení povrchu u 3D modelu. Výsledkem je plynulejší a vizuálně konzistentnější síť, která je zbavena drobných nerovností vzniklých v předchozích fázích zpracování.

Při aplikaci filtru byly ponechány výchozí hodnoty: počet kroků vyhlazení (*Smoothing steps*) byl nastaven na 3, aktivní volby byly *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*, přičemž vyhlazení se aplikovalo na celý model lodi.

Obrázek 37 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u dřevěné lodi

(zdroj: vlastní)

Tímto filtrem došlo k úpravě všech 529 188 *Vertices*. Použití tohoto filtru přispělo ke zvýšení vizuální kvality výsledného modelu lodi.



Obrázek 38 Výsledný model dřevěné lodi po úpravách

(zdroj: vlastní)

Tabulka 7 Výchozí a konečné hodnoty – dřevěná loď

Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	2 034 498
Počáteční počet <i>faces</i>	4 024 813
Absolutní hodnota	0.00053975
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	1601
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	529 188
Konečný počet <i>faces</i>	1 059 356

(zdroj: vlastní)

5.3.2 Lebka zvířete

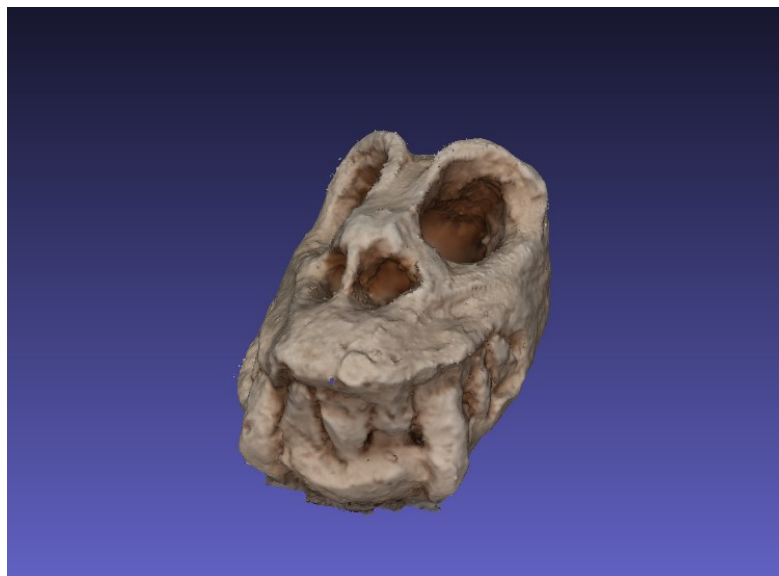
- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Model zvířecí lebky prošel stejným počátečním krokem jako dřevěný model lodi. Pomocí nástroje *Select Vertices* a následně *Delete Selected Vertices* bylo odstraněno rušivé okolí objektu, včetně podkladového bílého papíru, který narušoval spodek lebky a celkovou čistotu rekonstrukce.

Obrázek 39 Vložení neupraveného *meshed-poisson* zvířecí lebky

(zdroj: vlastní)

Před zahájením mazání obsahoval model zvířecí lebky 228 417 *Vertices* a 456 329 *Faces*. Po odstranění nežádoucích částí zůstalo 140 461 *Vertices* a 279 691 *Faces*. To pomohlo ke zjednodušení modelu ještě před zahájením samotné optimalizace.

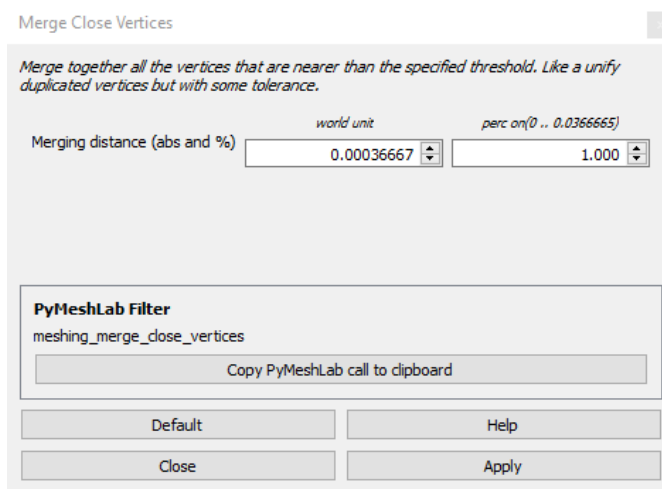


Obrázek 40 Smazání rušivého pozadí včetně bílého papíru

(zdroj: vlastní)

- **Filtr Merge Close Vertices**

Dalším krokem v úpravě modelu zvířecí lebky bylo použito filtru *Merge Close Vertices*. Byly ponechány výchozí hodnoty nastavení: absolutní vzdálenost 0.00036667 a relativní práh 1.000 %.



Obrázek 41 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při tomto nastavení došlo k odstranění 172 *Vertices* a odstranění 332 *Faces*, což vedlo k menšímu zjednodušení sítě.

- ***Aplikace filtru Repair Non Manifold Edges***

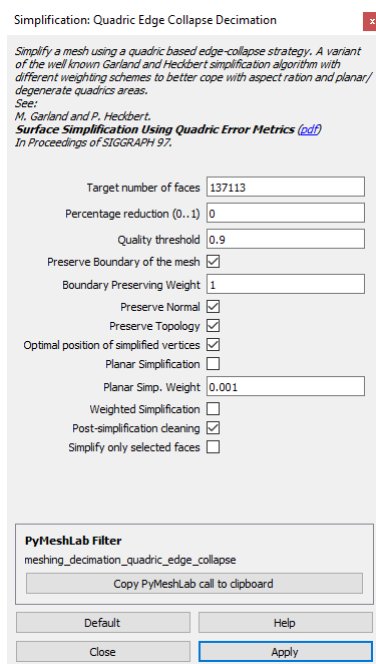
Následující krok byla aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges* (*Filters -> Cleaning and Repairing -> Repair Non Manifold Edges*). Při této operaci bylo odstraněno celkem 10 *non-manifold faces*.

- ***Aplikace filtru Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Po aplikování filtru *Repair Non Manifold Edges* byl použitý filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* (*Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*). V nastavení byl zadán cílový počet *faces* o polovinu menší, tedy 137 113 a *Quality threshold* na 0.9. Aktivní byly volby: *Preserve Boundary of the mesh*, *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices*.

Po aplikaci filtru měl model výsledně 69 116 *vertices* a 137 113 *faces*. Během operace navíc bylo odstraněno 53 *unreferenced vertices*.

Na obrázku 42. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami

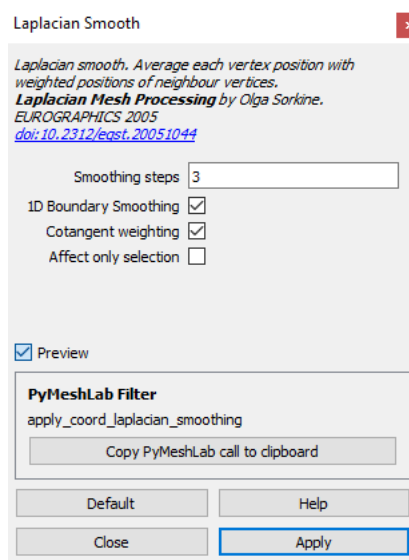


Obrázek 42 Nastavené hodnoty filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

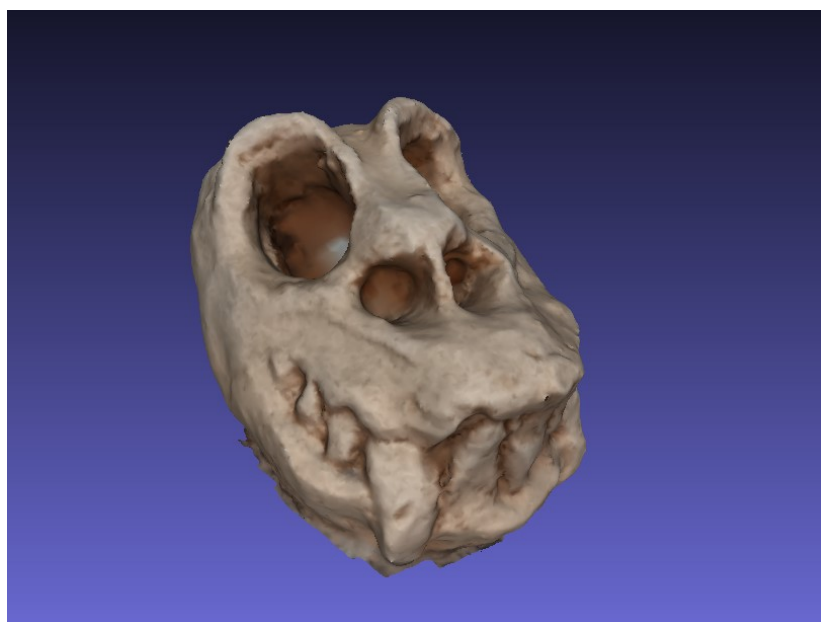
- *Aplikace filtru Laplacian Smooth*

Na závěr byl použitý filtr *Laplacian Smooth* (*Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*), jehož parametry zůstaly na výchozích hodnotách – *Smoothing steps* 3 a aktivní volby *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*. Vyhlazení bylo provedeno po celém modelu a vyhlazeno bylo 69 116 *vertices*.



Obrázek 43 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u zvířecí lebky

(zdroj: vlastní)



Obrázek 44 Výsledný model zvířecí lebky po aplikování filtrů

(zdroj: vlastní)

Tabulka 8 Výchozí a konečné hodnoty – zvířecí lebka

Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	228 417
Počáteční počet <i>faces</i>	456 329
Absolutní hodnota	0.00036667
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	10
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	69 116
Konečný počet <i>faces</i>	137 113

(zdroj: vlastní)

5.3.3 Socha krále

- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Model sochy krále prošel stejným počátečním krokem jako dřevěný model lodi. Pomocí nástroje *Select Vertices* a následně *Delete Selected Vertices* byl odstraněn podkladový bílý papír, který se nacházel pod sochou krále.

Obrázek 45 Vložení neupraveného *meshed-poisson* sochy krále

(zdroj: vlastní)

Před zahájením mazání obsahoval model krále 323 598 *Vertices* a 646 398 *Faces*. Po odstranění nežádoucích částí zůstalo 275 644 *Vertices* a 550 433 *Faces*. To pomohlo ke zjednodušení modelu ještě před zahájením samotné optimalizace.

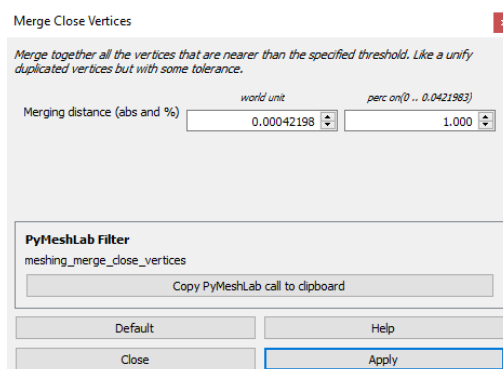


Obrázek 46 Smazání bílého papíru pod sochou

(zdroj: vlastní)

- ***Filtr Merge Close Vertices***

Dalším krokem v úpravě modelu sochy krále byl použitý filtr *Merge Close Vertices*. Byly ponechány výchozí hodnoty nastavení: absolutní vzdálenost 0.00042198 a relativní práh 1.000 %.



Obrázek 47 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při tomto nastavení došlo k odstranění 309 *Vertices* a odstranění 611 *Faces*, což vedlo k menšímu zjednodušení sítě.

- **Aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges***

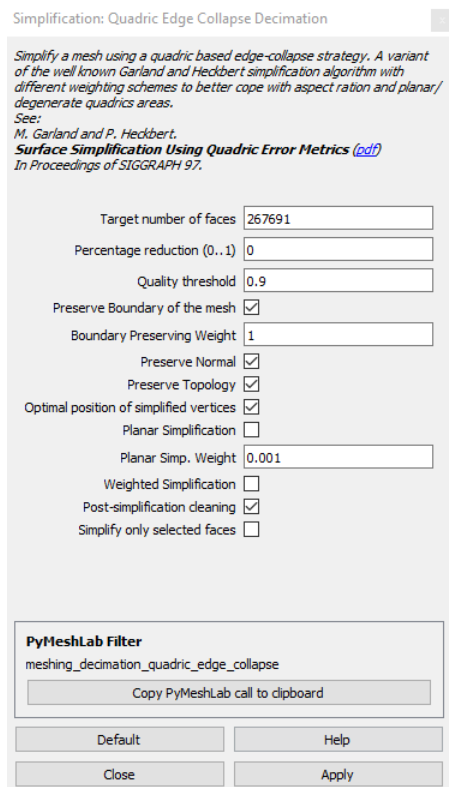
Následující krok byla aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges* (*Filters -> Cleaning and Repairing -> Repair Non Manifold Edges*). Při této operaci bylo odstraněno celkem 18 *non-manifold faces*.

- **Aplikace filtru *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Po aplikování filtru *Repair Non Manifold Edges* byl použitý filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* (*Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*). V nastavení byl zadán cílový počet *faces* o polovinu menší, tedy 267 691 a *Quality threshold* na 0.9. Aktivní byly volby: *Preserve Boundary of the mesh*, *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices*, *Post-simplification cleaning*.

Po aplikaci filtru měl model výsledně 134 264 *vertices* a 267 691 *faces*. Během operace navíc bylo odstraněno 6 *unreferenced vertices*.

Na obrázku 48. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami.

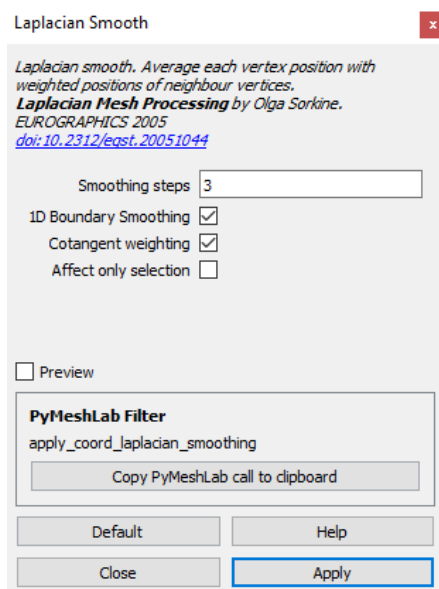


Obrázek 48 Nastavené hodnoty filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

- *Aplikace filtru Laplacian Smooth*

Na závěr byl použitý filtr *Laplacian Smooth* (*Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*), jehož parametry zůstaly na výchozích hodnotách – *Smoothing steps* 3 a aktivní volby *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*. Vyhlazení bylo provedeno po celém modelu a vyhlazeno bylo 134 264 *vertices*.



Obrázek 49 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u sochy krále

(zdroj: vlastní)



Obrázek 50 Výsledný model sochy krále po aplikování filtrů

(zdroj: vlastní)

Tabulka 9 Výchozí a konečné hodnoty – socha krále

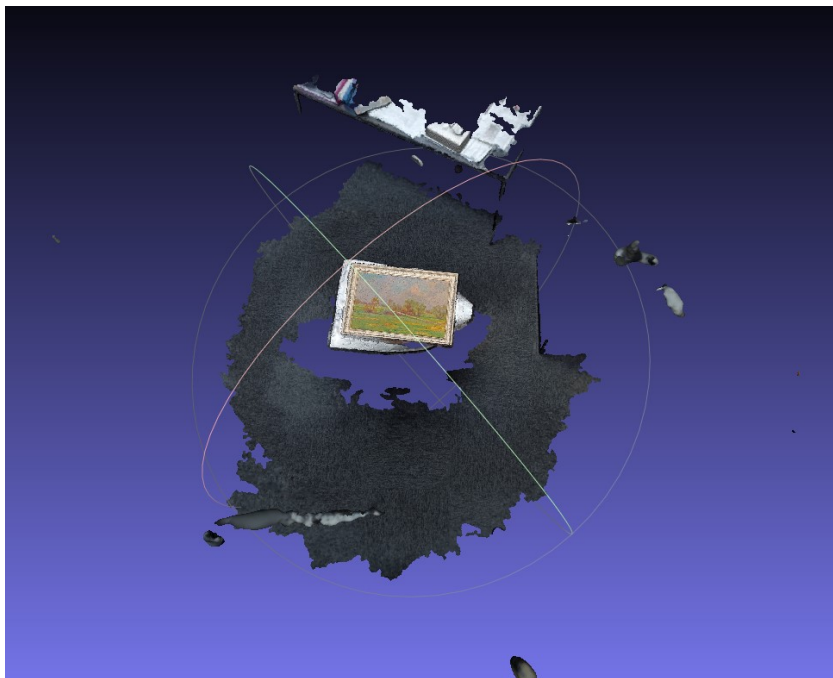
Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	323 598
Počáteční počet <i>faces</i>	646 398
Absolutní hodnota	0.00042198
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	18
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	134 264
Konečný počet <i>faces</i>	267 691

(zdroj: vlastní)

5.3.4 Olejomalba krajiny

- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Model olejomalby krajiny prošel stejným počátečním krokem jako dřevěný model lodi. Pomocí nástroje *Select Vertices* a následně *Delete Selected Vertices* bylo odstraněno rušivé okolí objektu, včetně podkladového bílého papíru, který narušoval spodek olejomalby a celkovou čistotu rekonstrukce.

Obrázek 51 Vložení neupraveného *meshed-poisson* olejomalby krajiny

(zdroj: vlastní)

Před zahájením mazání obsahoval model olejomalby krajiny 2 297 946 *Vertices* a 4 576 638 *Faces*. Po odstranění nežádoucích částí zůstalo 472 707 *Vertices* a 941 699 *Faces*. To pomohlo ke zjednodušení modelu ještě před zahájením samotné optimalizace.

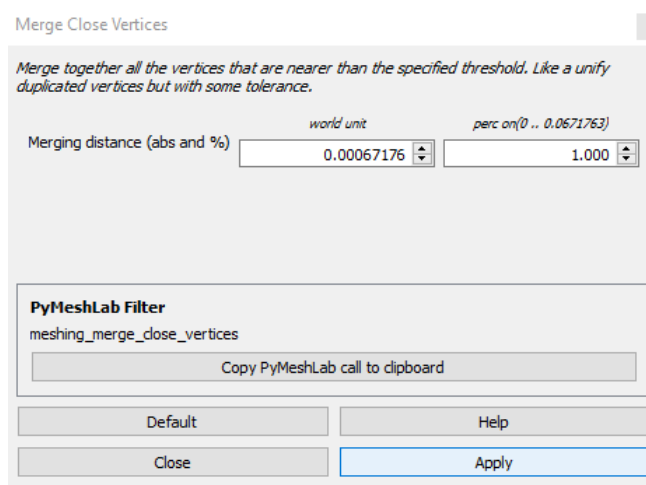


Obrázek 52 Smazání rušivého pozadí včetně bílého papíru

(zdroj: vlastní)

- ***Filtr Merge Close Vertices***

Dalším krokem v úpravě modelu olejomalby krajiny bylo použito filtru *Merge Close Vertices*. Byly ponechány výchozí hodnoty nastavení: absolutní vzdálenost 0.00067176 a relativní práh 1.000 %.



Obrázek 53 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při tomto nastavení došlo k odstranění 3 599 *Vertices* a odstranění 7 163 *Faces*, což vedlo k menšímu zjednodušení sítě.

- **Aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges***

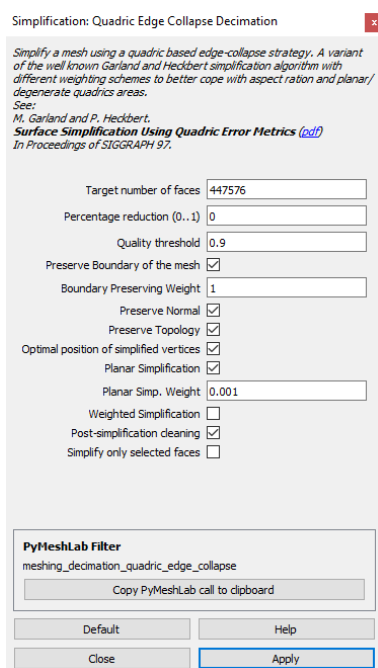
Následující krok byla aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges* (*Filters -> Cleaning and Repairing -> Repair Non Manifold Edges*). Při této operaci bylo odstraněno celkem 956 *non-manifold faces*.

- **Aplikace filtru *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Po aplikování filtru *Repair Non Manifold Edges* byl použitý filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* (*Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*). V nastavení byl zadán cílový počet *faces* o polovinu menší, tedy 447 576 a *Quality threshold* na 0.9. Aktivní byly volby: *Preserve Boundary of the mesh*, *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices*, *Planar Simplification*, *Post-simplification cleaning*.

Po aplikaci filtru měl model výsledně 225 686 *vertices* a 447 575 *faces*. Během operace navíc bylo odstraněno 71 *unreferenced vertices*.

Na obrázku 54. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami.

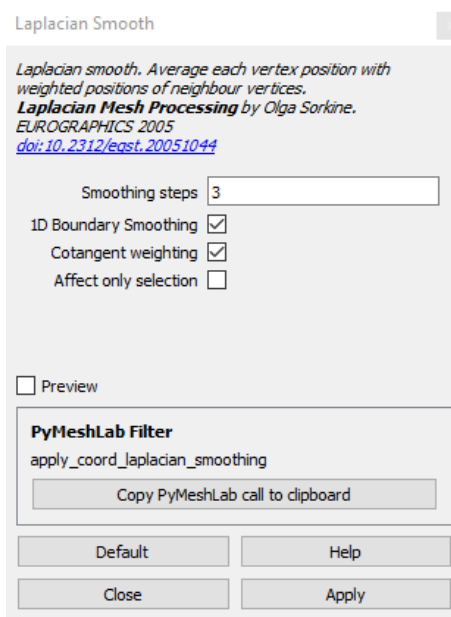


Obrázek 54 Nastavené hodnoty filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

- *Aplikace filtru Laplacian Smooth*

Na závěr byl použitý filtr *Laplacian Smooth* (*Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*), jehož parametry zůstaly na výchozích hodnotách – *Smoothing steps* 3 a aktivní volby *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*. Vyhlazení bylo provedeno po celém modelu a vyhlazeno bylo 225 686 *vertices*.



Obrázek 55 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u olejomalby krajiny

(zdroj: vlastní)



Obrázek 56 Výsledný model olejomalby krajiny po aplikování filtrů

(zdroj: vlastní)

Tabulka 10 Výchozí a konečné hodnoty – olejomalba krajiny

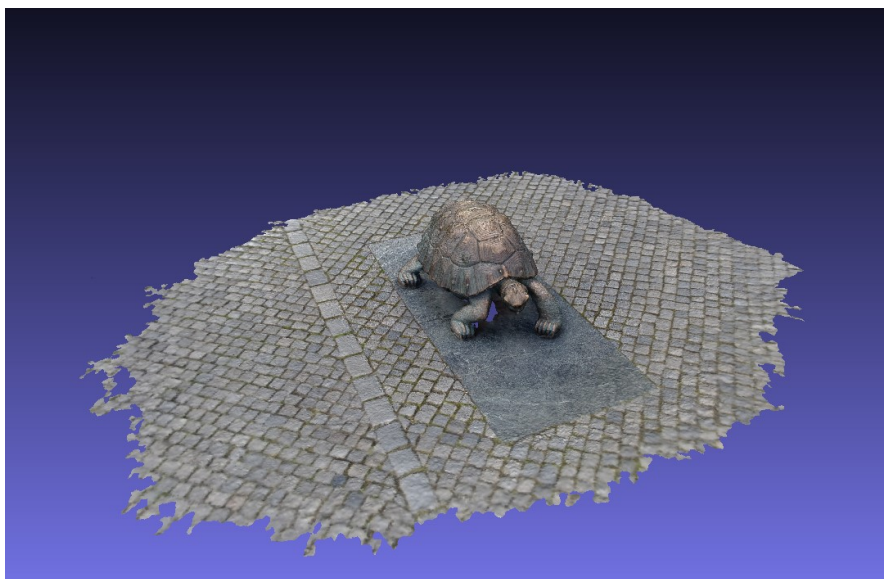
Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	2 297 946
Počáteční počet <i>faces</i>	4 576 638
Absolutní hodnota	0.00067176
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	956
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	225 686
Konečný počet <i>faces</i>	447 575

(zdroj: vlastní)

5.3.5 Bronzová socha želvy

- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Model bronzové sochy želvy prošel stejným počátečním krokem jako dřevěný model lodi. Pomocí nástroje *Select Vertices* a následně *Delete Selected Vertices* bylo odstranění dlažby kolem želvy a ponechaná část mramorového podstavce.

Obrázek 57 Vložení neupraveného *meshed-poisson* bronzové sochy želvy

(zdroj: vlastní)

Před zahájením mazání obsahoval model bronzové sochy želvy 3 289 197 *Vertices* a 6 563 979 *Faces*. Po odstranění nežádoucích částí zůstalo 1 394 833 *Vertices* a 2 780 833 *Faces*. To pomohlo ke zjednodušení modelu ještě před zahájením samotné optimalizace.

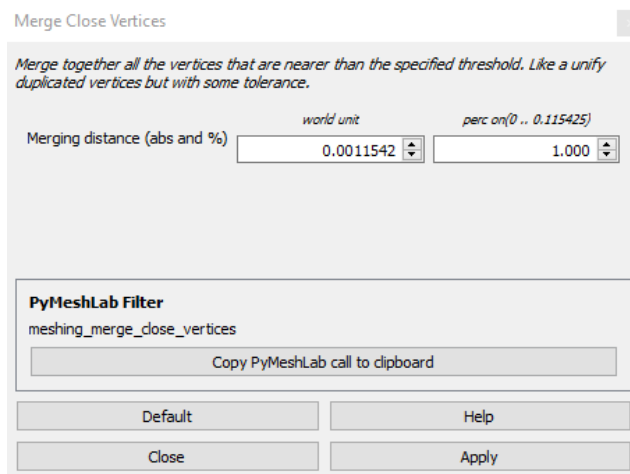


Obrázek 58 Smazání dlažby

(zdroj: vlastní)

- ***Filtr Merge Close Vertices***

Dalším krokem v úpravě modelu bronzové sochy želvy bylo použito filtru *Merge Close Vertices*. Byly ponechány výchozí hodnoty nastavení: absolutní vzdálenost 0.00011542 a relativní práh 1.000 %.

Obrázek 59 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při tomto nastavení došlo k odstranění 140 272 *Vertices* a odstranění 280 436 *Faces*, což vedlo k menšímu zjednodušení sítě.

- ***Aplikace filtru Repair Non Manifold Edges***

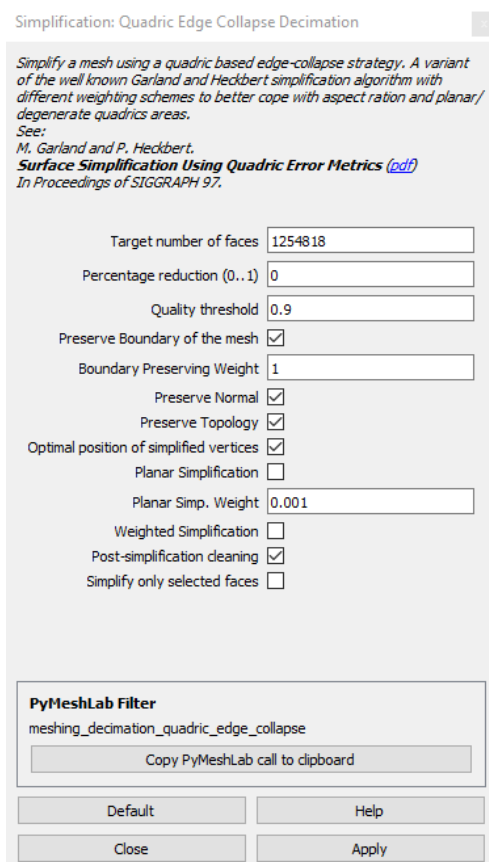
Následující krok byla aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges* (*Filters -> Cleaning and Repairing -> Repair Non Manifold Edges*). Při této operaci bylo odstraněno celkem 760 *non-manifold faces*.

- **Aplikace filtru *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Po aplikování filtru *Repair Non Manifold Edges* byl použitý filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* (*Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*). V nastavení byl zadán cílový počet *faces* o polovinu menší, tedy 1 254 818 a *Quality threshold* na 0.9. Aktivní byly volby: *Preserve Boundary of the mesh*, *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices*, *Post-simplification cleaning*.

Po aplikaci filtru měl model výsledně 631 821 *vertices* a 1 254 818 *faces*. Během operace navíc bylo odstraněno 108 *unreferenced vertices*.

Na obrázku 60. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami.

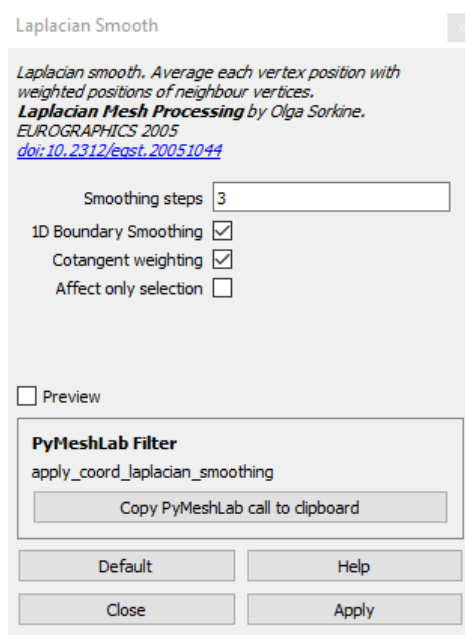


Obrázek 60 Nastavené hodnoty filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

- *Aplikace filtru Laplacian Smooth*

Na závěr byl použitý filtr *Laplacian Smooth* (*Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*), jehož parametry zůstaly na výchozích hodnotách – *Smoothing steps* 3 a aktivní volby *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*. Vyhlazení bylo provedeno po celém modelu a vyhlazeno bylo 69 116 *vertices*.



Obrázek 61 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u bronzové sochy želvy

(zdroj: vlastní)



Obrázek 62 Výsledný model bronzové sochy želvy po aplikování filtrů

(zdroj: vlastní)

Tabulka 11 Výchozí a konečné hodnoty – bronzová socha želvy

Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	3 289 197
Počáteční počet <i>faces</i>	6 563 979
Absolutní hodnota	0.00011542
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	760
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	631 821
Konečný počet <i>faces</i>	1 254 818

(zdroj: vlastní)

5.3.6 Olejomalba lidské lebky

- **Odstranění přebytečných částí vygenerovaných v programu COLMAP**

Model olejomalby lidské lebky prošel stejným počátečním krokem jako dřevěný model lodi. Pomocí nástroje *Select Vertices* a následně *Delete Selected Vertices* bylo odstraněno rušivé okolí objektu.

Obrázek 63 Vložení neupraveného *meshed-poisson* olejomalby lidské lebky

(zdroj: vlastní)

Před zahájením mazání obsahoval model olejomalby lidské lebky 246 802 *Vertices* a 491 804 *Faces*. Po odstranění nežádoucích částí zůstalo 238 652 *Vertices* a 475 124 *Faces*. To pomohlo ke zjednodušení modelu ještě před zahájením samotné optimalizace.

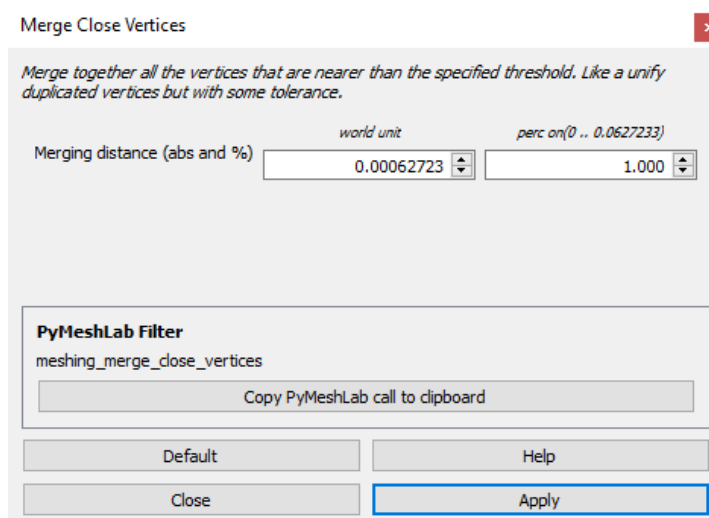


Obrázek 64 Smazání rušivého okolí

(zdroj: vlastní)

- **Filtr Merge Close Vertices**

Dalším krokem v úpravě modelu zvířecí lebky bylo použito filtru *Merge Close Vertices*. Byly ponechány výchozí hodnoty nastavení: absolutní vzdálenost 0.00062723 a relativní práh 1.000 %.

Obrázek 65 Nastavení výchozích hodnot pro *Merging distance*

(zdroj: vlastní)

Při tomto nastavení došlo k odstranění 141 *Vertices* a odstranění 310 *Faces*, což vedlo k menšímu zjednodušení sítě.

- **Aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges***

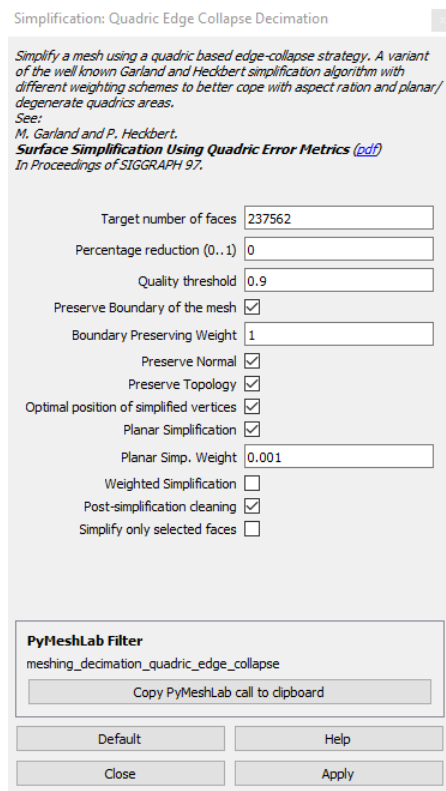
Následující krok byla aplikace filtru *Repair Non Manifold Edges* (*Filters -> Cleaning and Repairing -> Repair Non Manifold Edges*). Při této operaci bylo odstraněno celkem 0 *non-manifold faces*.

- **Aplikace filtru *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation***

Po aplikování filtru *Repair Non Manifold Edges* byl použitý filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* (*Filters -> Remashing, Simplification and Reconstruction -> Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation*). V nastavení byl zadán cílový počet *faces* o polovinu menší, tedy 237 562 a *Quality threshold* na 0.9. Aktivní byly volby: *Preserve Boundary of the mesh*, *Preserve Normal*, *Preserve Topology*, *Optimal position of simplified vertices*, *Planar Simplification*, *Post-simplification cleaning*.

Po aplikaci filtru měl model výsledně 119 853 *vertices* a 237 562 *faces*. Během operace navíc bylo odstraněno 38 *unreferenced vertices*.

Na obrázku 66. je filtr *Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation* se zadáním cílových hodnot *faces* a nastavenými volbami.

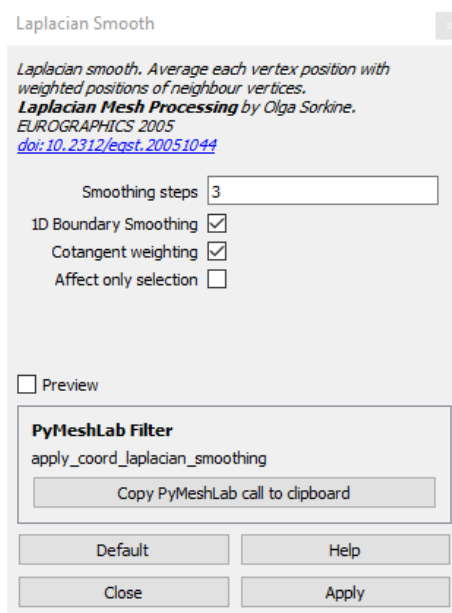


Obrázek 66 Nastavené hodnoty filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*

(zdroj: vlastní)

- *Aplikace filtru Laplacian Smooth*

Na závěr byl použitý filtr *Laplacian Smooth* (*Filters -> Smoothing, Fairing and Deformation -> Laplacian Smooth*), jehož parametry zůstaly na výchozích hodnotách – *Smoothing steps* 3 a aktivní volby *1D Boundary Smoothing* a *Cotangent weighting*. Vyhlazení bylo provedeno po celém modelu a vyhlazeno bylo 119 853 *vertices*.



Obrázek 67 Nastavení filtru *Laplacian Smooth* u olejomalby lidské lebky

(zdroj: vlastní)



Obrázek 68 Výsledný model olejomalby lidské lebky po aplikování filtrů

(zdroj: vlastní)

Tabulka 12 Olejomalba lebky – výsledné hodnoty fází zpracování v *MeshLab*

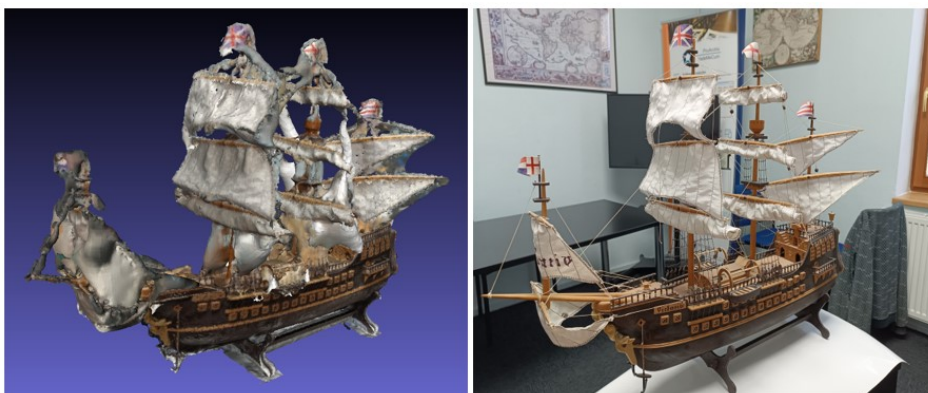
Atributy	Hodnoty
Počáteční počet <i>vertices</i>	246 802
Počáteční počet <i>faces</i>	491 804
Absolutní hodnota	0.00062723
Odstraněné <i>non-manifold faces</i>	0
<i>Quality threshold</i>	0.9
Konečný počet <i>vertices</i>	119 853
Konečný počet <i>faces</i>	237 562

(zdroj: vlastní)

5.4 Porovnání výsledných 3D modelů

5.4.1 Dřevěná loď

Porovnání výsledného 3D modelu dřevěné lodi s fotografií ukazuje, že model sice věrně zobrazil základní tvar a proporce objektu, ale kvalita rekonstrukce je příliš nízká pro zachycení větších detailů. Barvy byly přeneseny poměrně v dobré kvalitě, trup lodi i detaily boků jsou dobře rozpoznatelné. Textura plachet se na modelu zčásti deformovala, a v některých místech dokonce splývá dohromady, což vytváří tzv. “bublíny“. Tenké části, jako jsou lana, nejdou na modelu vidět vůbec. To bylo zřejmě způsobeno nízkou kvalitou generování. Boční prvky lodi, jako jsou dělostřelecké střílny, okna a výzdoba, jsou v uspokojivé kvalitě, ale i zde jsou patrné drobné nepřesnosti a zaoblení hran. Celková kvalita detailů je nízká a povrch působí hrubě, což může být příčina nízké kvality generování a složitosti objektu.



Obrázek 69 Porovnání 3D modelu lodi s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.2 Lebka zvířete

Model zvířecí lebky má jednoduchý tvar a také málo detailů. To se pozitivně odrazilo na výsledku rekonstrukce – model byl vygenerován bez větších deformací. Výsledný model zvířecí lebky odpovídá originálu jako po tvarové, tak objemové povrchové stránce. Modelování probíhalo ve střední kvalitě generování, která byla pro tento typ objektu zcela dostačující. Plastika neobsahuje jemné struktury ani povrchové detaily. Tvar zubů i otvory lebky jsou v modelu rozpoznatelné a odpovídají reálné předloze.



Obrázek 70 Porovnání 3D modelu zvířecí lebky s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.3 Socha krále

Model keramické sochy krále byl generován ve variantě s nižším nastavením kvality. Výsledný 3D model však zachycuje tvar objektu velmi dobře. Barva odpovídá originálu, jak jde vidět např. na nose červená barva nebo po soše tmavě hnědá barva. Detaily ve tváři, očích i rýhování jsou na modelu viditelné. Za menší nedostatek lze považovat deformaci v horní části koruny, kde se objevuje “bublina“. Tento prvek mohl vzniknout kvůli nedostatečnému množství snímků pořízených z horního pohledu, což vedlo k tomu, že program chybějící část musel doplnit na základě odhadu. Celkový výsledek považuji za kvalitní rekonstrukci s ohledem na nízké generování kvality.

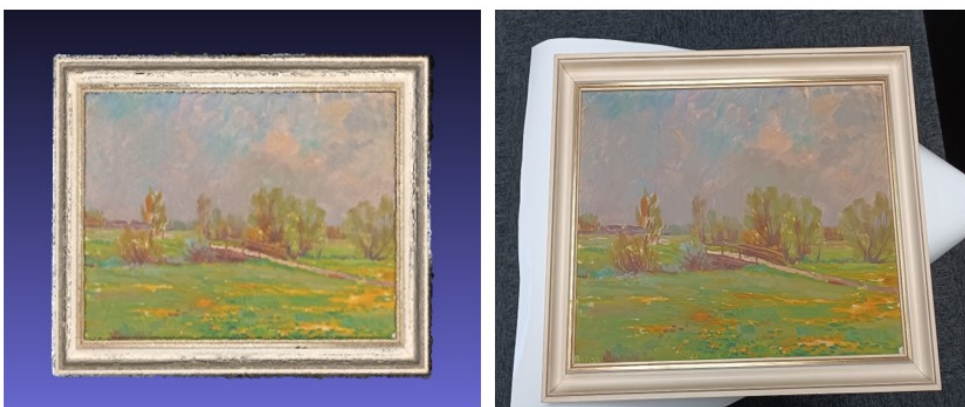


Obrázek 71 Porovnání 3D modelu sochy krále s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.4 Olejomalba krajiny

Rekonstrukce olejomalby krajiny patří mezi nejpovedenější výstupy v rámci celé praktické části. Model byl generován při střední nastavení kvality a výsledkem je vizuálně velmi přesná kopie. Barevnost obrazu byla přenesená do 3D podoby s velmi dobrou přesností, bez výrazných deformací či ztráty sytosti. Za pozitivní lze považovat i přesné zachycení rámu obrazu, který si v 3D modelu udržel tvar i strukturu. Okraje jsou ostré a perspektiva zůstává stabilní. Výsledný 3D model působí realisticky bez potřeby výraznějších oprav či úprav.



Obrázek 72 Porovnání 3D modelu olejomalby krajiny s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.5 Bronzová socha želvy

Model bronzové želvy patří mezi náročnější objekty. Tvar i celkové proporce byly převedeny do 3D podoby velmi přesně. Za samostatnou část rekonstrukce u sochy želvy lze

považovat rekonstrukci podkladu, na kterém želva stojí – podstavec je v modelu rovný i pestrý na detaily a odpovídá realitě. Tělo želvy včetně tvaru končetin a hlavy bylo převedeno do digitální podoby s odpovídajícími proporcemi a celkovým tvarem, nicméně detaily jsou mírně zjednodušené. Nejvíce je to patrné u očí, které ve výsledném modelu ztrácí ostrost. Na krunýři jsou viditelné menší geometrické nerovnosti, zvláště v jeho horní části. Kvůli nemožnosti snímání ze spodních úhlů zůstala oblast pod tělem želvy neúplná, taktéž i některé končetiny.



Obrázek 73 Porovnání 3D modelu sochy želvy s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.6 Olejomalba lidské lebky

Olejomalba lebky byla převedená do 3D podoby při středním nastavení kvality. Výsledný model zachovává základní tvar plátna. Určitou slabinou je barevná stránka – některé odstíny v modelu působí méně sytě a ztrácejí svou intenzitu. V horní části modelu se navíc objevila menší deformace v podobě hrbolu, který na originálním díle není. Přesto lze celkový výsledek hodnotit pozitivně, s ohledem na to že jde o plošný obraz převedený do prostorové formy.



Obrázek 74 Porovnání 3D modelu lidské lebky s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt

(zdroj: vlastní)

5.4.7 Porovnání atributů 3D modelů

Souhrnná tabulka atributů a hodnot zpracovaných uměleckých děl

Tabulka 13 Výpis atributů a jejich hodnot při zpracování uměleckých předmětů v programech COLMAP a MeshLab.

	Dřevěná loď	Zvířecí lebka	Socha krále	Olejomalba krajiny	Bronzová socha želvy	Olejomalba lebky
Atributy	Hodnoty					
Použitá clona (f/)	f/1.89	f/1.9	f/1.9	f/1.89	f/1.9	f/1.9
Kvalita rekonstrukce	Nízká	Střední	Nízká	Střední	Nízká	Střední
Čas závěrky	1/50 s	1/100 s	1/50 s	1/50 s	1/100 s	1/100 s
Citlivost ISO	1366	520	318	378	50	520
Ohnisková vzdálenost	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm
Celkový počet snímků	230	82	93	95	133	96
Počet použitých snímků	169	58	32	94	133	96
Celková velikost složky/meshed-poisson	2,57 GB / 91 MB	2,48 GB / 10, 2 MB	1,24 GB / 14,5 MB	3,3 GB / 103 MB	2,19 GB / 147 MB	3,1 GB / 11 MB
Počáteční počet vertices	2 034 498	228 417	323 598	2 297 946	3 289 197	246 802
Počáteční počet faces	4 024 813	456 329	646 398	4 576 638	6 563 979	491 804
Absolutní hodnota	0.00053975	0.00036667	0.00042198	0.00067176	0.00011542	0.00062723
Odstraněné non-manifold faces	1601	10	18	956	760	0
Quality threshold	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Konečný počet vertices	529 188	69 116	134 264	225 686	631 821	119 853
Konečný počet faces	1 059 356	137 113	267 691	447 575	1 254 818	237 562

(zdroj: vlastní)

Výpis atributů a jejich hodnot při zpracování uměleckých předmětů v programech COLMAP a MeshLab.

5.5 Možnosti zvýšení kvality 3D reprodukce

Na základě výsledků provedené rekonstrukce a následné analýze vygenerovaných objektů je zřejmé, že kvalitu výstupních 3D dat by bylo možné ještě znatelně zlepšit v několika oblastech. Asi nejzásadnější je pořízení kvalitních vstupních dat, fotografií. V rámci možností byly objekty v interiéru fotografovány nastaveným konstantním osvětlením a z okolí objektů bylo částečně odstraněno rušivé okolí. V případě bronzové sochy želvy, která byla fotografována v exteriéru toto nebylo možné zajistit vůbec. Vhodným řešením pro objekty fotografované v interiéru by bylo využití fotografického studia se standardizovanými a kontrolovanými světelnými podmínkami, kde lze minimalizovat nežádoucí prvky a dosáhnout konzistentního nasvícení objektu ze všech stran.

Stejně tak byly všechny objekty fotografovány „z ruky“ což mělo za následek, že na sebe navazující fotografie nebyly snímány pod stejným úhlem a ze stejné vzdálenosti. Opět by bylo možné zlepšit vstupní data uchycením fotoaparátu nebo mobilu do stojanu a umístěním objektu na otočný podstavec. Při pořizování snímků by se tedy otáčel snímáný objekt, zatímco fotoaparát nebo mobil by zůstával na stejném místě. Jen by se u něj měnil úhel, pod kterým by snímky objektu pořizoval.

Dalším faktorem, který ovlivnil finální výsledek byla kvalita použitého fotografického zařízení. Vyšší rozlišení, větší snímač a optika s nízkým zkreslením by mohly přinést přesnější a detailnější vstupní data. To by pak umožnilo lepší rekonstrukci jemných struktur, jako jsou textury povrchu nebo drobné geometrické prvky.

Z hlediska softwarového zpracování představovalo významné omezení náročnost programu COLMAP na HW prostředky. To se projevovalo především při generování hustého mračka bodů a následné rekonstrukci *mesh* sítě. Výrazně výkonnější HW – zejména v oblasti grafických karet a operační paměti by jednoznačně vedl k rychlejšímu zpracování, možnosti pracovat s většími objemy dat a také výsledným generováním ve vyšší kvalitě.

Také v rámci programu MeshLab lze najít další nástroje pro zlepšení modelu, které nebyly v rámci této práce využity. Příkladem může být nástroj *HC Laplacian Smooth*, který oproti klasickému *Laplacian Smooth* více zachovává ostré hrany, a je tak vhodnější pro technické nebo geometricky výrazné objekty. Další možností je i využití nástroje pro

rekonstrukci barevné textury přímo z fotografií, které by následně mohly nahradit původní automaticky mapovanou texturu.

5.6 Shrnutí kapitoly 5. Představení modelů

Tato kapitola se již zabývá praktickou částí bakalářské práce, Pro samotné zpracování bylo vybráno šest autorských uměleckých děl různých materiálů, tvarů i barevnosti s cílem ověřit, jak jednotlivé vlastnosti objektů ovlivňují výslednou kvalitu jejich 3D rekonstrukcí. Objekty byly fotografovány z různých úhlů za optimalizovaných světelných podmínek, přičemž výsledné snímky sloužily jako vstup pro SW COLMAP. Každý objekt byl následně zpracován individuálně, přičemž výsledná mračna bodů vykazovala různou úroveň detailu v závislosti na kvalitě rekonstrukce. Zatímco jednodušší tvary, jako keramická lebka, byly dobře zachyceny i při střední kvalitě, složitější objekty jako loď nebo želva vykazovaly horší zachování jemných struktur. Po vygenerování modelů následovala druhá fáze zpracování, která probíhala v programu MeshLab a zahrnovala očištění od okolních částí, sloučení blízkých bodů a opravu geometrických chyb. Klíčovým krokem bylo zjednodušení sítě pomocí filtru *Quadric Edge Collapse Decimation*, které významně snížilo nároky na paměť i složitost modelu při zachování jejich tvaru. Finální úpravou bylo vyhlazení povrchu pomocí filtru *Laplacian Smooth*, které přispělo k lepšímu vizuálnímu výsledku. Analýza ukázala, že kvalitu výsledného modelu zásadně ovlivňuje nejen použitý SW a jeho nastavení, ale také podmínky při pořizování fotografií, včetně osvětlení a úhlů snímání. Nedostatky jako odrazy, stíny nebo chybějící úhly se negativně projeví zejména u složitějších objektů. Jako doporučení pro další práci se nabízí použití lepší techniky, kontrolovaného prostředí a pokročilejších nástrojů jako Agisoft Metashape nebo RealityCapture.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla analýza a porovnání atributů 3D modelů zvolených uměleckých děl. Celou práci je rozdělena do dvou základních částí.

V teoretické části jsem se snažil z dostupných materiálů uvést základní informace související s oblastí počítačové grafiky, fotogrammetrií, 2D a 3D zobrazováním a 3D modelováním. Do teoretické části jsem také zpracoval stěžejní body historického vývoje grafiky a modelování včetně klíčových osobností, které se zasadily o rozvoj tohoto oboru. Mimo historické údaje jsem zde také nastínil i možný budoucího vývoj 3D grafiky. Pro podání komplexních informací byly v teoretické části také uvedeny odvětví, využívající ve větším měřítku počítačovou grafiku.

V praktické části jsem se již přímo věnoval zpracování a vyhodnocení vybraných uměleckých předmětů. Zde jsem se zaměřil na možnost převodu reálných objektů do 3D modelů. Vybrané objekty se lišily nejen velikostí a tvarem, ale i použitým materiálem, barevností a mírou detailního zpracování. Fotodokumentace jednotlivých objektů, které jsem si vybral byla prováděna v interiéru s možností nastavení konstantního osvětlení a okolí což v jisté míře napomohlo k získání kvalitnějších vstupních dat a v exteriéru, kde jsem musel vycházet z aktuální situace bez možnosti ovlivnění okolních vlivů, zejména pak proměnlivého světla a okolí. Všechny vybrané objekty byly převedeny do 3D modelu za použití specializovaných SW. U vygenerovaných 3D modelů byla porovnána jejich výsledný vizuální vzhled s reálnou předlohou. Jednalo se zejména o tvar objektu, vymodelování složitých prvků, textury nebo barvy. Cílem bylo porovnat nastavení klíčových atributů, které ovlivňují kvalitu 3D rekonstrukce v závislosti na vlastnostech objektů, vstupních datech a HW možnostech.

Závěrem je nutné dodat, že výsledné rekonstrukce 3D objektů byly částečně ovlivněny HW možnostmi počítače, na kterém jsem rekonstrukce prováděl, zejména při rekonstrukcích objektů s vyšší hustotou mračna bodů kvalitou vstupních dat a také i zvoleným programy, které jsem používal.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GOODWIN, Laura. *2D vs 3D – Co jsou a jak si mezi nimi vybrat*. Vidmore.com. Online. 2024-04-22 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.vidmore.com/cs/tips/2d-vs-3d/>
- [2] MATYÁŠ, Jakub. *Revoluce ve zdravotnictví: Jak 3D tisk změnil medicínu*. Médium.cz. Online. 2025-01-31 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://medium.seznam.cz/clanek/jakub-matyas-revoluce-ve-zdravotnictvi-jak-3d-tisk-zmeni-medicinu-117292>
- [3] 3D GRAFIKA. *3D Grafika: Základy 3D grafiky*. WebSnadno.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <http://www.3dgrafika.wbs.cz/>
- [4] K611 – Katedra geomatiky. *Lineární perspektiva*. Intranet FD ČVUT. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://intranet.fd.cvut.cz/departament/k611/PEDAGOG/K611GM_soubory/webskriptum/perspektiva/linearni_perspektiva.html
- [5] PANÁK, Ján, ČEPPAN, Michal, DVONKA, Vladimír, KARPINSKÝ, Ľudovít, KORDOŠ, Pavel, MIKULA, Milan, JAKUCEWICZ, Štefan. *Polygrafické minimum*. Bratislava: TypoSet, 2000. ISBN 80-967811-3-8.
- [6] Cartesian Coordinate System. GeeksforGeeks. Online. 2024-06-10 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/cartesian-coordinate-system/>
- [7] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Raster graphics*. Britannica.com. Online. 2025-05-05 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/raster-graphics>
- [8] COREL CORPORATION. *Guide to Vector Design*. CorelDRAW.com. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.coreldraw.com/en/learn/guide-to-vector-design/>
- [9] ČESKÝ 3D TISK. *Blog o 3D tisku*. Český 3D tisk. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.cesky3dtisk.cz/blog/>
- [10] ALZA.CZ. *3D grafické programy – 3D modelování*. Alza.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/3d-programy-modelovani/18867986.htm>
- [11] EVERMOTION. *Innovative Applications of 3D Models – What Industries Use 3D Modeling?* Evermotion.org. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z:

<https://evermotion.org/articles/show/13195/innovative-applications-of-3d-models-what-industries-use-3d-modeling->

- [12] ALZA.CZ. *3D tisk: jak funguje, kde stáhnout předlohy a jak začít?* Alza.cz. Online. 2024-06-01 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/3d-tisk>
- [13] NEXTECH3D.AI. *3D Modeling in Gaming Industry: Evolution and Impact.* Nextech3D.ai. Online. 2023-09-05 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.nextechar.com/blog/3d-modeling-in-gaming-industry>
- [14] ROCKETBRUSH STUDIO. *The Evolution of 3D Graphics and Its Impact on Game Art Styles.* RocketBrush.com. Online. 2024-03-04 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://rocketbrush.com/blog/the-evolution-of-3d-graphics-and-its-impact-on-game-art-styles>
- [15] PEŠEK, Ondřej. *Co je to herní engine? [stručný rádce].* Zboží.cz. Online. 2022-08-02 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/magazin/c/co-je-to-herni-engine/>
- [16] EASYRENDER. *12 Top Benefits of 3D Architectural Visualization.* EasyRender.com. Online. 2024-03-15 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.easyrender.com/a/12-top-benefits-of-3d-architectural-visualization>
- [17] IKARUS DELTA. *Importance of 3D Visualization for Architects and Designers.* IkarusDelta.com. Online. 2024-10-17 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.ikarusdelta.com/blog/importance-of-3d-visualization-for-architects-and-designers>
- [18] SKETCHUP. *Architecture.* SketchUp.com. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.sketchup.com/en/industries/architecture>
- [19] SELFCAD. *How 3D Modeling is Used in the Film Industry.* SelfCAD. Online. 2023-03-15 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.selfcad.com/blog/how-3d-modeling-is-used-in-the-film-industry>
- [20] IWCONNECT. *The Impact of 3D Modelling in Today's Advertising: A Deep Dive into How 3D Modelling is Reshaping the Way Products Are Advertised.* IWConnect. Online. 2023-09-22 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://iwconnect.com/3d-modelling-in-advertising/>

- [21] PRUSA RESEARCH. *3D tisk pro zdravotnictví*. Prusa3D.com. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/aplikace/3d-tisk-pro-zdravotnictvi_232354/
- [22] FOR3DTISK. *3D tisk ve zdravotnictví: Co vše už lékaři dokážou*. For3Dtisk.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/blog/3d-tisk-ve-zdravotnictvi-co-vse-uz-lekari-dokazou/>
- [23] HAPPY PRINT. *Není tisk, jako tisk – aneb 3D tisk biologických tkání*. HappyPrint.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.happyprint.cz/o-nas/blog/neni-tisk-jako-tisk-aneb-3d-tisk-biologickych-tkani-31.html>
- [24] DESIGNHOK. *Benefits of 3D Modeling for Industrial Designers*. DesignHok.com. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://designhok.com/benefits-of-3d-modeling-for-industrial-designers/>
- [25] SUZUKI, Emily. *4 Reasons 3D Modeling Software Is an Important Tool for Product Designers*. Autodesk Fusion 360. Online. 2025-05-02 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/3d-modeling-software-design-process-benefits/>
- [26] NEXTECH3D.ai. *The Impact of 3D Modeling in Product Design*. Nextech3D.ai. Online. 2024-08-27 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.nextechar.com/blog/3d-modeling-in-product-design>
- [27] AnM. *3D tisk v automobilovém průmyslu*. MotoFocus.cz. Online. 2022-12-13 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/jine-info-zajimavosti/77360,3d-tisk-v-automobilovem-prumyslu>
- [28] 3D STISK. *Jak 3D tisk přetváří svět letectví a kosmonautiky*. 3DStisk.cz. Online. 2023-08-29 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://3dstisk.cz/uncategorized/jak-3d-tisk-pretvari-svet-letectvi-a-kosmonautiky/>
- [29] WECAN.CZ. *Modern technology in construction – 3D printing of houses*. WeCan.cz. Online. 2024-12-30 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://wecan.cz/blog/71-modern-technology-in-construction-3d-printing-of-houses>
- [30] PLANRADAR. *3D tisk ve stavebnictví: jaké jsou jeho výhody?* PlanRadar. Online. 2023-05-12 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.planradar.com/cs/tisk-3d-stavebnictvi/>

- [31] SEIFERT, Jan. *Co je rozšířená realita (AR) a jaké má využití*. JanSeifert.cz Online. 2022-12-14 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://janseifert.cz/rozsirena-realita/>
- [32] HAYES, Adam. *Augmented Reality (AR): Definition, Examples, and Uses*. Investopedia Online. 2025-03-02 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/a/augmented-reality.asp>
- [33] YASAR, Kinza; SHELDON, Robert. *What is Virtual Reality? How it's Used and How it Will Evolve*. TechTarget Online. 2024-08-14 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/virtual-reality>
- [34] REALSPACE 3D. *Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in AI-Driven Architectural Visualization*. RealSpace 3D Online. 2023-09-13 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.realspace3d.com/blog/augmented-reality-ar-and-virtual-reality-vr-in-ai-driven-architectural-visualization/>
- [35] SAJID, Hazika. *Applications of Augmented Reality in Healthcare*. Unite.AI Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.unite.ai/applications-of-augmented-reality-in-healthcare/>
- [36] HEALTHYSIMULATION.COM. *Virtual Reality in Medicine*. HealthySimulation.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.healthysimulation.com/virtual-reality-in-medicine/>
- [37] SAMEK, Miroslav. *Jak na zábavnou a efektivní výuku pomocí virtuální a rozšířené reality*. Učíme nanečisto #98. Učíme online. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.ucimeonline.cz/wp-content/uploads/2021/06/Ucime-nanecisto-98-M.-Samek.pdf>
- [38] GROHMANN, Jan. *Rozšířená realita pro vojáky*. ArmyWeb.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.armyweb.cz/clanek/rozsirena-realita-pro-vojaky>
- [39] FERYNA, Jan. *Rozšířená a virtuální realita ve vojenské praxi*. Armádní noviny. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/rozsirena-virtualni-realita-ve-vojenske-praxi.html>
- [40] BAILEY, Lance W. *Rozšíření rolí AR a VR napříč lékařskou simulací vojenského výcviku*. HealthySimulation.com. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.healthysimulation.com/cs/ar-vr-military-simulation-training/>

- [41] ČTK. *Zemřel vynálezce pixelu Russell Kirsch*. Novinky.cz. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/internet-a-pc-zemrel-vynalezce-pixelu-russell-kirsch-40333368>
- [42] BOEING. *William Fetter's Boeing Man*. Boeing Images. Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://secure.boeingimages.com/archive/William-Fetter-s-Boeing-Man-2F3XC5YCZNC.html>
- [43] HOSCH, William L. *Ivan Sutherland*. Britannica.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Ivan-Sutherland>
- [44] ETHW. *David Evans*. Engineering and Technology History Wiki Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://ethw.org/David_Evans
- [45] AWA. *3D Modeling: History, Software Types, and Techniques*. Medium.com Online. 2023-08-24 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://medium.com/%40alwalxed/3d-modeling-history-software-types-and-techniques-ae2db9f095c1>
- [46] PÁSZTO, Vít; KRIŠOVÁ, Zdeňka. *Počítačová grafika*. Moravská vysoká škola Olomouc Online. 2018 [cit. 2025-05-24]. ISBN 978-80-7455-089-8. Dostupné z: <https://www.mvso.cz/files/pocitacova-grafika.pdf>
- [47] VEVERKA, Aleš. *Historie 3D grafiky*. Drevokocour.4fan.cz Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: http://drevokocour.4fan.cz/?page_id=87
- [48] ADOBE. *Co je 3D modelování a k čemu se používá?*. Adobe.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/products/substance3d/discover/what-is-3d-modeling.html>
- [49] BLENDER FOUNDATION. *Blender's History*. Blender.org Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.blender.org/about/history/>
- [50] AL BAKI, Abdullah. *Understanding 3D Modeling: From Its Evolution to Revolution*. 7CGI Online. 2024-08-07 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://7cgi.com/blog/understanding-3dmodeling-evolution-to-revolution/>
- [51] JÁNSKÝ, Hubert. *3D nanotiskárna dokáže vytvořit mikroimplantáty pro biomedicínu. Vyrobili ji Češi*. Novinky.cz Online. 2023-11-15 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/internet-a-pc-hardware-3d-nanotiskarna-dokaze-vytvorit-mikroimplantaty-pro-biomedicinu-vyrobili-ji-cesi-40450900>

- [52] 3D STISK. *Budoucnost 3D tisku: Jaké inovace nás čekají?*. 3dstisk.cz Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://3dstisk.cz/uncategorized/budoucnost-3d-tisku-jake-inovace-nas-cekaji/>
- [53] ABCLINIC. *3D tisk a biotisk: Co přinese budoucnost plastické chirurgie?*. ABClinic.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://abclinic.com/3d-tisk-a-biotisk/>
- [54] YES TECHS. *Je 3D holografická projekce možná?*. YES TECHS Online. 2023-12-10 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://cz.yes-techs.net/info/is-3d-holographic-projection-possible--91374898.html>
- [55] GEEKSFORGEEKS. *Polygonal Modeling in Computer Graphics*. GeeksforGeeks.org Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/polygonal-modeling-in-computer-graphics/>
- [56] GRAITEC. *Exploring 3D Modeling Software: A Comprehensive Guide*. Graittec.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://graittec.com/cz/zdroje/hub/exploring-3d-modeling-software-a-comprehensive-guide/>
- [57] 3D-ACE. *What Is 3D Sculpting and Where Can You Use It?*. 3D-Ace.com Online. 2021-05-25 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://3d-ace.com/blog/what-is-3d-sculpting-and-where-can-you-use-it/>
- [58] RHINO3D. *NURBS – What are NURBS?*. Rhino3D.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/en/features/nurbs/>
- [59] DASSAULT SYSTÈMES. *What is NURBS modeling and why is it crucial to CAD software?* 3ds.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/store/cad/nurbs-modeling>
- [60] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Formát X3D a záhadná zkratka NURBS*. Root.cz Online. 2008-02-21 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/format-x3d-a-zahadna-zkratka-nurbs/>
- [61] ASSEM, Osman. *3D Modeling: An Overview on Various Techniques*. OsmanAssem.com Online. 2020-02-28 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://osmanassem.com/3d-modeling-an-overview-on-various-techniques/>

- [62] ROY, Sushmita. *Procedural Modeling: A Beginner's Guide to Level Up Your Skills*. Professional 3D Services Online. 2023-05-31 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://professional3dservices.com/blog/procedural-modeling.html>
- [63] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie*. 2. přepracované vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02649-3.
- [64] MUBANGA, Kanyanta. *What is photogrammetry?*. Artec3D.com Online. 2025-02-28 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/what-is-photogrammetry>
- [65] EGELS, Yves; KASSER, Michel. *Digital Photogrammetry*. 1. vydání. Londýn: Taylor & Francis, 2002. ISBN 978-0-7484-0945-7.
- [66] STANĚK, Jan. *Kapitoly z fotogrammetrie*. SPŠ zeměměřická, Praha. Online 2013 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/68/Kapitoly-z-FOT-2013.pdf>
- [67] GEODETIC SYSTEMS, INC. *Basics of Photogrammetry*. Geodetic.com Online. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/>
- [68] PAVELKA, Karel. *Historický vývoj*. SPS Základní škola Zeměřič Online. 2025-05-24 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/662/1-3-Historicky-vyvoj.pdf>
- [69] HODAČ, Jindřich. *3x3 pravidla pro jednoduchou fotogrammetrickou dokumentaci architektury*. Praha: Katedra mapování a kartografie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, září 2004. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://people.fsv.cvut.cz/~hodacjin/3x3/3x3_pravidla.pdf
- [70] BÖHM, Jozef. *Fotogrammetrie*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřictví. Online 2002 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/skripta/Fotogrammetrie.pdf>
- [71] 3DSOURCED. *Photogrammetry Guide 2023 – Definition, Advantages and Uses Explained*. 2023-11-22 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/guides/photogrammetry-guide/>
- [72] ZUZA, Mikolas. *Photogrammetry – 3D scanning with just your phone/camera*. Prusa3D.com Online. 2018-03-13 [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/photogrammetry-3d-scanning-just-phone-camera_7811/

- [73] ČVUT. *Lineární perspektiva*. ČVUT Fakulta dopravní Online, obrázek. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: https://intranet.fd.cvut.cz/departament/k611/PEDAGOG/K611GM_soubory/webskriptum/perspektiva/linearni_perspektiva.html
- [74] PHOTOTOOLS.CZ. *DPI*. Phototools.cz Online, obrázek. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.phototools.cz/slovník/dpi/>
- [75] ROUBAL, Pavel. *Barevná hloubka*. EduIT.cz Online, obrázek. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: http://www.eduit.cz/zaklady-grafiky/bar_hl.htm
- [76] UMIMEINFORMATIKU.CZ. *Vektorová grafika*. Umimeinformatiku.cz Online, obrázek. [cit. 2025-05-24]. Dostupné z: <https://www.umimeinformatiku.cz/cviceni-vektorova-grafika>
- [77] KMOŠEK, J. *Prusa 3D Printing Stories: Institute for Clinical and Experimental Medicine (IKEM)*. Prusa3D.com Online, obrázek. 2019-08-01 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/prusa-3d-printing-stories-institute-for-clinical-and-experimental-medicine-ikem_56524
- [78] SOTONA, Jiří. *3D tiskárny už dovedou skoro zázraky*. Novinky.cz Online, obrázek. 2023-08-10 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/internet-a-pc-hardware-3d-tiskarny-uz-dovedou-skoro-zazraky-40439256>
- [79] PLANRADAR. *3D tisk ve stavebnictví: jaké jsou jeho výhody?*. PlanRadar.com Online, obrázek. 2023-05-12 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.planradar.com/cs/tisk-3d-stavebnictvi/>
- [80] SEIFERT, Jan. *Rozšířená realita*. JanSeifert.cz Online, obrázek. 2022-12-14 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://janseifert.cz/rozsirena-realita/>
- [81] GROHMANN, Jan. *Virtuální realita pro vojenský výcvik a plánování*. Armádní noviny.cz Online, obrázek. 2021-06-03 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/virtualni-realita-pro-vojensky-vycvik-a-planovani.html>
- [82] FUTURAPHOTO.COM. *Russel Kirsch and the History of Digitising Photos*. FuturaPhoto.com Online, obrázek. 2020-08-11 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://futuraphoto.com/blog/russel-kirsch-and-the-history-of-digitising-photos/>
- [83] DUŠKOVÁ, Veronika. *Lékařům v liberecké nemocnici pomáhá 3D tisk. Mohou navrhovat implantáty, tisknout kosti i nádory*. Liberecká Drbna Online, obrázek. 2022-

- 11-08 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://liberecka.drbna.cz/galerie/page/31135-lekarum-v-liberecke-nemocnici-pomaha-3d-tisk-mohou-navrhovat-implantaty-tisknout-kosti-i-nadory.html>
- [84] MCNEEL. *NURBS Surfaces Concepts*. McNeel Wiki Online, obrázek. 2020-08-14 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://wiki.mcneel.com/rhino/nurbssurfaces>
- [85] DRONPRO.CZ. *Fotogrammetrie z dronu – 2D a 3D modelování*. DronPro.cz Online, obrázek. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/fotogrammetrie-z-dronu-2d-a-3d-modelovani>
- [86] HAGGRÉN, Henrik. *Academic Revival of Terrestrial Photogrammetry*. ResearchGate.net Online, obrázek. 2002-12 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/n-1907-Theodor-Scheimpflug-used-his-panoramic-camera-for-aerial-photography-from_fig1_303285617
- [87] DE WERVE, Claus. *Mourners from the Tomb of Philip the Bold, Duke of Burgundy (1364–1404)*. Cleveland Museum of Art Online, obrázek. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.clevelandart.org/art/1958.67>
- [88] CHLÁDEK, Dominik [@Isibalo]. *2 – Kartézské soustavy souřadnic (MAT – Analytická geometrie)*. Online, video. 27. 12. 2015. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=1CQ3iofRN-s>. [cit. 2025-05-25].
- [89] BENEŠ, Bedřich, FELKEL, Petr, SOCHOR, Jiří a ŽÁRA, Jiří. *Moderní počítačová grafika*. 2. vyd. Brno: Computer Press, 2008. ISBN 978-80-251-1701-6.
- [90] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Grafická knihovna OpenGL (22): texturování*. Root.cz. Online. 2003-12-02 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/opengl-22-texturovani/>
- [91] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Základy počítačové grafiky – 7. kapitola*. Online. [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/ZPG/00/7.pdf>
- [92] CABOVSKÁ, Blanka. *Základní parametry světelných zdrojů*. Enerfis.cz. Online. 2015-05-15 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.enerfis.cz/blog/zakladni-parametry-svetelnych-zdroju-2>
- [93] KAPLANOVÁ, Marie a kol. *Moderní polygrafie*. 3. vyd. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2012. 391 s. ISBN 978-80-254-4230-2.

- [94] HAJDUCH, Ondřej. *49.1 Grafické vlastnosti a formáty (studijní text)*. dum.hajduch.net. Online. [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: https://dum.hajduch.net/VY_32_INOVACE_1ICT7roc_49_B
- [95] ADOBE. *Popis souborů STL | Seznamte se s formátem souboru STL*. Adobe.com. Online. [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>
- [96] ADOBE. *What Are OBJ Files?* Adobe.com. Online. [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/products/substance3d/discover/what-are-obj-files.html>
- [97] FILEFORMAT.COM. *Ply soubor*. Fileformat.com. Online. 2025 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://docs.fileformat.com/cs/3d/ply/>
- [98] GAZBER.CZ. *3D formáty*. Gazber.cz. Online 2025 [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: <https://www.gazber.cz/formaty-3d/>
- [99] HAJDUCH, Ondřej. *49.1 Grafické vlastnosti a formáty (studijní text)*. dum.hajduch.net. Online, obrázek [cit. 2025-05-28]. Dostupné z: https://dum.hajduch.net/VY_32_INOVACE_1ICT7roc_49_B
- [100] MFF UK. *Přednáška 3 – Mechanika: Soustavy souřadnic*. physics.mff.cuni.cz. Online, obrázek. 2025 [cit. 2025-05-30]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfnt/vyuka/mechanika/prednaska3.pdf>
- [101] GONZALEZ, Rafael C. a Richard E. WOODS. *Digital Image Processing*. 4. vydání. Harlow, Spojené království: Pearson Education Limited, 2018. ISBN 978-1-292-22304-9.
- [102] HUGHES, John F., Andries VAN DAM, Morgan McGUIRE, David F. SKLAR, James D. FOLEY, Steven K. FEINER a Kurt AKELEY. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 3. vydání. Boston: Addison-Wesley, 2014. ISBN 978-0-321-39952-6.
- [103] REICHL, Jiří. *Princip trojrozměrného vidění*. fyzika.jreichl.com. Online. [cit. 2025-06-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1536-princip-trojrozmerneho-videni>
- [104] DIGIKURZ.CZ. *Využití fotogrammetrie a 3D skenování pro digitalizaci fyzických aktiv*. Online. Digikurz.cz. 2023-03-07 [cit. 2025-06-05]. Dostupné z: <https://digikurz.cz/vyuziti-fotogrammetrie-a-3d-skenovani-pro-digitalizaci-fyzickych-aktiv/#:~:text=V%C4%9Bd%C4%9Bli%20jste%2C%20%C5%BEE%20historick%C3>

%A9%20budovy%20i%20um%C4%9Bleck%C3%A1,jak%C3%BDm%20uchov%C3%A1v%C3%A1me%20a%20studujeme%20na%C5%A1e%20kulturn%C3%AD%20d%C4%9Bdictv%C3%AD

- [105] KEDZIORA, Haley. *3-D Magnifies Miniatures and More*. *Cleveland Art*. 2022, č. 4. Článek. Online. Dostupné z: <https://www.clevelandart.org/articles/3-d-magnifies-miniatures-and-more> [cit. 2025-06-04].
- [106] CLEVELAND MUSEUM OF ART. *Looking From All Angles: ARTLENS Exhibition Embraces Photogrammetry*. Online. 2023-07-26 Dostupné z: <https://medium.com/cma-thinker/looking-from-all-angles-artlens-exhibition-embraces-photogrammetry-d2cb75d61735> [cit. 2025-06-04].
- [107] ADOBE. *AI art: Use cases, benefits & examples*. Online. Dostupné z: <https://www.adobe.com/cz/products/firefly/discover/ai-art-use-cases.html> [cit. 2025-06-04].
- [108] MCAE SYSTEMS. *Umění a design*. Webová stránka. Online. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/odvetvi-aplikace/art/> [cit. 2025-06-04].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Sbíhající se kolejnice [4]	16
Obrázek 2 Pravotočivý a levotočivý kartézský systém [100]	17
Obrázek 3 Počet obrázkových bodů na ploše o velikosti jednoho palce [74].....	18
Obrázek 4 Porovnání barevné hloubky [75]	18
Obrázek 5 Textová reprezentace jednoduchého tvaru ve formátu SVG [76]	18
Obrázek 6 3D model srdce jako příprava před transplantací [77]	21
Obrázek 7 Kotníkové ortézy pro děti [78]	22
Obrázek 8 Zed' z 3D tiskárny [79]	23
Obrázek 9 AR umístění sedačky do pokoje [80]	24
Obrázek 10 VR simulace [81].....	25
Obrázek 11 První naskenovaná fotografie [82]	27
Obrázek 12 3D tisk cévního systému mozku [83]	30
Obrázek 13 Geometrie povrchu NURBS [84]	32
Obrázek 14 Fotogrammetrie skladu pomocí dronu [85]	33
Obrázek 15 Panoramatická kamera [86]	34
Obrázek 16 Vývojový diagram	39
Obrázek 17 3D model Smuteční host z hrobky Filipa Smělého [87]	40
Obrázek 18 Srovnání kvality obrázku při použití různých barevných hloubek a) 1bitová hloubka (2 barvy), b) 2bitová hloubka (4 barvy), c) 4bitová hloubka (16 barev), d) 8bitová hloubka (256 odstínů šedi), e) 8bitová hloubka (256 barev), f) 24bitová hloubka (16.777.216 barev) [99]	44
Obrázek 19 Dřevěná loď	47
Obrázek 20 Lebka zvířete	48
Obrázek 21 Socha krále	49
Obrázek 22 Olejomalba krajiny	50
Obrázek 23 Bronzová socha želvy	51
Obrázek 24 Olejomalba lebky	52
Obrázek 25 Rekonstrukce dřevěné lodi v COLMAP	53
Obrázek 26 Rekonstrukce zvířecí lebky v COLMAP	54
Obrázek 27 Rekonstrukce sochy krále v COLMAP, vygenerované mračno bodů sochy krále	55
Obrázek 28 Rekonstrukce olejomalby krajiny v COLMAP	56
Obrázek 29 Pohled zespoda na olejomalbu	57
Obrázek 30 Rekonstrukce bronzové sochy želvy v COLMAP	58

Obrázek 31 Rekonstrukce olejomalby lidské lebky v COLMAP – vygenerované mračno bodů olejomalby	59
Obrázek 32 Vložení „ <i>meshed-poisson</i> “ dřevěné lodi	60
Obrázek 33 Očištění rušivých elementů	61
Obrázek 34 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	62
Obrázek 35 Zadané hodnoty v <i>Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation</i>	63
Obrázek 36 Výsledek modelu lodi po snížení <i>Vertices</i> a <i>Faces</i>	64
Obrázek 37 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u dřevěné lodi	65
Obrázek 38 Výsledný model dřevěné lodi po úpravách	65
Obrázek 39 Vložení neupraveného <i>meshed-poisson</i> zvířecí lebky	66
Obrázek 40 Smazání rušivého pozadí včetně bílého papíru	67
Obrázek 41 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	67
Obrázek 42 Nastavené hodnoty filtru <i>Quadric Edge Collapse Decimation</i>	68
Obrázek 43 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u zvířecí lebky	69
Obrázek 44 Výsledný model zvířecí lebky po aplikování filtrů	69
Obrázek 45 Vložení neupraveného <i>meshed-poisson</i> sochy krále	70
Obrázek 46 Smazání bílého papíru pod sochou	71
Obrázek 47 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	71
Obrázek 48 Nastavené hodnoty filtru <i>Quadric Edge Collapse Decimation</i>	72
Obrázek 49 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u sochy krále	73
Obrázek 50 Výsledný model sochy krále po aplikování filtrů	73
Obrázek 51 Vložení neupraveného <i>meshed-poisson</i> olejomalby krajiny	74
Obrázek 52 Smazání rušivého pozadí včetně bílého papíru	75
Obrázek 53 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	75
Obrázek 54 Nastavené hodnoty filtru <i>Quadric Edge Collapse Decimation</i>	76
Obrázek 55 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u olejomalby krajiny	77
Obrázek 56 Výsledný model olejomalby krajiny po aplikování filtrů	77
Obrázek 57 Vložení neupraveného <i>meshed-poisson</i> bronzové sochy želvy	78
Obrázek 58 Smazání dlažby	79
Obrázek 59 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	79
Obrázek 60 Nastavené hodnoty filtru <i>Quadric Edge Collapse Decimation</i>	80
Obrázek 61 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u bronzové sochy želvy	81
Obrázek 62 Výsledný model bronzové sochy želvy po aplikování filtrů	81
Obrázek 63 Vložení neupraveného <i>meshed-poisson</i> olejomalby lidské lebky	82
Obrázek 64 Smazání rušivého okolí	83

Obrázek 65 Nastavení výchozích hodnot pro <i>Merging distance</i>	83
Obrázek 66 Nastavené hodnoty filtru <i>Quadric Edge Collapse Decimation</i>	84
Obrázek 67 Nastavení filtru <i>Laplacian Smooth</i> u olejomalby lidské lebky	85
Obrázek 68 Výsledný model olejomalby lidské lebky po aplikování filtrů	85
Obrázek 69 Porovnání 3D modelu lodi s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt	86
Obrázek 70 Porovnání 3D modelu zvířecí lebky s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt	87
Obrázek 71 Porovnání 3D modelu sochy krále s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt.....	88
Obrázek 72 Porovnání 3D modelu olejomalby krajiny s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt	88
Obrázek 73 Porovnání 3D modelu sochy želvy s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt.....	89
Obrázek 74 Porovnání 3D modelu lidské lebky s reálným modelem, levá fotografie výsledný 3D model, pravá fotografie originální objekt.....	90

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výpis atributů – dřevěná loď	54
Tabulka 2 Výpis atributů – zvířecí lebka.....	55
Tabulka 3 Výpis atributů – socha krále	56
Tabulka 4 Výpis atributů – olejomalba krajiny	57
Tabulka 5 Výpis atributů – bronzová socha želvy.....	58
Tabulka 6 Výpis atributů – olejomalba lebky.....	59
Tabulka 7 Výchozí a konečné hodnoty – dřevěná loď	66
Tabulka 8 Výchozí a konečné hodnoty – zvířecí lebka	70
Tabulka 9 Výchozí a konečné hodnoty – socha krále	74
Tabulka 10 Výchozí a konečné hodnoty – olejomalba krajiny	78
Tabulka 11 Výchozí a konečné hodnoty – bronzová socha želvy.....	82
Tabulka 12 Olejomalba lebky – výsledné hodnoty fází zpracování v <i>MeshLab</i>	86
Tabulka 13 Výpis atributů a jejich hodnot při zpracování uměleckých předmětů v programech COLMAP a MeshLab.....	90

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
4D	Four-dimensional
DPI	Dots Per Inch
SW	Software
HW	Hardware
BMP	Bitmap
GIF	Graphic Interchange Format
JPEG	Joint Photographic Experts Group
TIFF	Tagged Image File Format
PNG	Portable Network Graphics
SVG	Scalable Vector Graphics
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
CAD	Computer Aided Design
AI	Artificial intelligence
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
USA	United States of America
NASA	National Aeronautics and Space Administration
W	Wide
ISO	International Organization for Standardization
MB	Megabite
GB	Gigabite
HEIC	High Efficiency Container
JPG	Joint Photographic Group

RGB Red, Green, Blue

CMYK Cyan, Magenta, Yellow, Key

HSV Hue, Saturation, Value

HSL Hue, Saturation, Lightness

STL Stereolithography

OBJ Object

PLY Polygon File Format

ABC Alembic

MTL Material Template Library

mm Millimetr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výsledné 3D reprodukce

PŘÍLOHA P I: VÝSLEDNÉ 3D REPRODUKCE

Lod_low

Final_lod.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply

Schon_medi

Final_schon_medi.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply

Lebkaz_medi

Final_lebkaz_medi.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply

Skull_medi

Final_skull_medi.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply

Zelva_low

Final_zelva_low.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply

Kralll

Final_kral_low.ply

Fused

Fused.ply.vis

Meshed-poisson.ply