

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA GEOMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rekonstrukce původního tvaru uměleckého předmětu
z dochovaných fragmentů

Plzeň, 2018

Bc. Kateřina Halíková

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina HALÍKOVÁ**
Osobní číslo: **A16N0155P**
Studijní program: **N3602 Geomatika**
Studijní obor: **Geomatika**
Název tématu: **Rekonstrukce původního tvaru uměleckého předmětu
z dochovaných fragmentů**
Zadávací katedra: **Katedra geomatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte rešerši dostupných pramenů a literatury.
2. Zpracujte získané informace a popište aktuální stav problematiky.
3. Navrhněte postup rekonstrukce původního tvaru uměleckého předmětu z dochovaných fragmentů pro zvolený modelový předmět.
4. Navržený postup prakticky ověřte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah kvalifikační práce: cca 45 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- ARBACE, Lucia, Elisabetta SONNINO, Marco CALLIERI, Matteo DELLEPIANE, Matteo FABBRI, Antonio IACCARINO IDELSON a Roberto SCOPIGNO. Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage* [online]. 2013, 14(4), 332-345 [cit. 2017-06-29]. DOI: 10.1016/j.culher.2012.06.008. ISSN 12962074.
- VRUBEL, A., O.R.P. BELLON a L. SILVA. A 3D reconstruction pipeline for digital preservation. In: 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [online]. IEEE, 2009, s. 2687-2694 [cit. 2017-06-29]. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206586. ISBN 978-1-4244-3992-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martina Kepka Vichrová, Ph.D.
Katedra geomatiky

Datum zadání diplomové práce: 2. října 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 25. května 2018

Vlasta Radová

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka



Václav Čada

Doc. Ing. Václav Čada, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 2. října 2017

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a následné obhajobě diplomovou práci zpracovanou na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracovala samostatně. Všechny zdroje, prameny a literaturu, které jsem při vypracování používala nebo z nich čerpala, v práci řádně cituji s uvedením úplného odkazu na příslušný zdroj.

V Plzni, dne 24. 5. 2018

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat své vedoucí diplomové práce paní Ing. Martině Kepka Vichrové, Ph.D. za její ochotu a cenné rady. Dále bych chtěla poděkovat Výzkumnému programu Kybernetické systémy řízení, identifikace, inteligentního rozhodování a komunikace, projektu Řídicí systémy strojů a procesů, výzkumného centra NTIS, za poskytnutí skenerů od firmy Artec a licence k programu Artec Studio 9, jmenovitě panu doc. Ing. Miloši Železnému, Ph.D. a panu Ing. Zdeňku Krňoulovi, Ph.D., za instruktáž používání všech produktů firmy Artec. Poděkování patří i zaměstnancům Muzea jižního Plzeňska v Blovicích za zapůjčení sochy Madony a umožnění sběru dat v muzeu. Na závěr bych chtěla poděkovat své rodině za finanční a psychickou podporu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rekonstrukcí původního tvaru uměleckého předmětu (roztříštěné sochy Panny Marie Lurdské) z dochovaných fragmentů. Byly navrženy dva postupy, jak sestavit virtuální 3D model sochy Madony. V prvním navrženém postupu byla socha Madony naskenována laserovou multistanicí Leica Nova MS50, pořízená data byla zpracována v open source softwaru MeshLab. Druhý postup popisuje sběr dat pomocí 3D skenerů Artec pracujících na principu strukturovaného světla. Takto naskenovaná data byla zpracována v komerčním programu Artec Studio. V práci jsou oba postupy porovnány a výsledkem je složený virtuální 3D model sochy Madony.

Klíčová slova

3D model, virtuální 3D model, socha, Panna Marie Lurdská, umělecký předmět, fragment, laserové skenování, 3D skener, Artec, MeshLab, rekonstrukce, Blovice.

Abstract

This work deals with the reconstruction of the original shape of the artwork (fractured statue of Our Lady of Lourdes) from preserved fragments. Two procedures have been proposed to build a virtual 3D model of the Madonna statue. In the first proposed process, the Madonna statue was scanned by the Leica Nova MS50 laser multistation, and the data obtained was then processed in the open source software MeshLab. The second step describes a data collection using structured light 3D scanners Artec 3D. This scanned data was processed in the Artec Studio commercial program. At work, the two procedures are compared and the result is a composite virtual 3D model of the Madonna statue.

Keywords

3D model, virtual 3D model, statue, Our Lady of Lourdes, artistic subject, fragment, laser scanning, 3D scanner, Artec, MeshLab, reconstruction, Blovice.

Obsah

OBSAH	7
Seznam použitých zkratk a pojmů	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek.....	12
ÚVOD	13
1 VIRTUÁLNÍ REKONSTRUKCE A RESTAUROVÁNÍ HISTORICKÝCH PŘEDMĚTŮ	14
1.1 Možnosti sběru dat	15
1.1.1 Sběr dat pomocí 3D skenování.....	15
1.1.2 Sběr dat pomocí fotogrammetrických metod	20
1.2 Dostupné programy pro zpracování dat	22
1.2.1 Open source softwary	22
1.2.2 Komerční programy	24
1.3 Shrnutí poznatků o tvorbě virtuálních 3D modelů uměleckých předmětů	27
2 NÁVRH A TESTOVÁNÍ POSTUPU PRACÍ	29
2.1 Popis uměleckého předmětu	29
2.2 Návrh postupu prací	31
2.3 Testování sběru a zpracování dat	33
2.3.1 Testovací sběr dat pomocí laserového skenování.....	34
2.3.2 Zpracování testovacích dat vázy v programu MeshLab	35
3 SBĚR DAT POMOCÍ STROJE LEICA MS50 A ZPRACOVÁNÍ POŘÍZENÝCH DAT V PROGRAMU MESHLAB	38
3.1 Multistanice Leica Nova MS 50	38
3.2 Skenování sochy Madony strojem Leica Nova MS50	39
3.3 Zpracování dat z laserového skeneru v open source softwaru MeshLab	41
3.3.1 Program MeshLab	41
3.3.2 Tvorba virtuálních 3D modelů jednotlivých fragmentů sochy v programu MeshLab.....	42
3.3.3 Tvorba virtuálního 3D modelu celé sochy v programu MeshLab	44
4 SBĚR DAT POMOCÍ SKENERU ARTEC A ZPRACOVÁNÍ V PROGRAMU ARTEC STUDIO	47
4.1 Skener Artec 3D	47
4.2 Skenování sochy Madony skenery Artec 3D	48
4.3 Zpracování dat v programu Artec Studio	50
4.3.1 Informace o programu Artec Studio	50
4.3.2 Tvorba virtuálních 3D modelů fragmentů sochy v programu Artec Studio	51

4.4 Spojení jednotlivých částí sochy	54
5 POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	59
5.1 Porovnání sběru dat	59
5.2 Porovnání zpracování dat	61
5.3 Shrnutí výsledků práce	66
ZÁVĚR	68
LITERATURA	70
SEZNAM PŘÍLOH	76

Seznam použitých zkratek a pojmů

3DS	formát aplikace Autodesk 3ds Max
AOP	American Academy of Orthotists & Prosthetists File Format
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BMP	Bitmap image file, formát obrázků
CAD	Computer aided design
COMDEX	Computer Dealers' Exhibition
CRMD	Centre de Recherche Sur la Matiere Divisée
DXF	Drawing Exchange Format
E57	formát pro 3D Imaging Data Exchange
FAV	Fakulta aplikovaných věd
GNSS	Global Navigation Satellite System
INOA	Istituto Nazionale di Ottica Applicata
ISTI-CNR	Institute of Information Science and Technology- Italian National Research Council
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light-emitting diode
LLC	Limited liability company
MP	Megapixel
NTIS	Nové technologie pro informační společnost
OBJ	Object, formát pro ukládání 3D dat
OFF	Object File Format
PLY	Polygon File Format
PNG	Portable Network Graphics
PRISME	Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes et Mécanique Energétique
PTS	formát pro 3D souřadnice firmy Leica
PTX	formát založený na formátu ASCII pro mračna bodů
RAM	Random-access memory
SLR	Single-lens reflex
STL	Stereolithografy, formát pro 3D data
SVG	Scalable Vector Graphics
U3D	Universal 3D

USB	Universal Serial Bus
VRML	Virtual Reality Modeling Language
WRL	soubor VRML
X3D	formát pro 3D data založený na XML
XML	Extensible Markup Language
XYZRGB	soubor se souřadnicemi X, Y, Z a barvami RGB

Seznam obrázků

Obr. 1: Taxonomie 3D skenerů.	16
Obr. 2: Upevněný střep nádoby na rotačním zařízení při skenování.....	18
Obr. 3: 3D skener pracující na principu strukturovaného světla užitý při skenování.	19
Obr. 4: Systém pro sběr dat pro neporušenou i roztržštěnou keramiku.	20
Obr. 5: Socha Magdaleny – sběr dat pomocí blízké fotogrammetrie.....	21
Obr. 6: Systém pro sběr dat (vlevo), ukázka roztržštěné keramiky (vpravo).....	22
Obr. 7: Složení jednotlivých fragmentů sochy Madony Pietronico.	23
Obr. 8: Aplikace textury na 3D model vázy.....	24
Obr. 9: Virtuální 3D model hlavy sochy Marie Magdaleny.....	26
Obr. 10: Uložení fragmentů sochy Panny Marie Lurdské v kostele v Blovicích.....	29
Obr. 11: Fragmenty sochy Panny Marie Lurdské - dochované části.....	30
Obr. 12: Graf návrhu postupu práce při tvorbě virtuálního 3D modelu sochy.....	33
Obr. 13: Konfigurace stanovisek při skenování vázy a střepů talíře.	35
Obr. 14: Ukázky vypočtených normál mračna bodů vázy.	36
Obr. 16: Výsledný virtuální model vázy.	37
Obr. 15: Vytvořená trojúhelníková síť vlevo, vpravo odfiltrovaná síť.	37
Obr. 17: Multistanice Leica Nova MS 50..	38
Obr. 18: Fotografie podstavy sochy Madony pořízená před skenováním.	39
Obr. 19: Konfigurace stanoviska a přímky při měření nejmenších střepů sochy.....	40
Obr. 20: Konfigurace stanoviska a přímky při měření velkých střepů sochy.	40
Obr. 21: Konfigurace stanoviska a přímky při měření největších částí sochy.	40
Obr. 22: Fotografie z průběhu skenování hlavy sochy.....	41
Obr. 23: Fixace hlavy sochy Madony v prostoru.	41
Obr. 24: Virtuální 3D model střepu těla vlevo bez textury, vpravo s texturou.	43
Obr. 25: Postup prací při tvorbě virtuálního 3D modelu fragmentu č. 5.....	44
Obr. 26: Dialogové okno funkce Point Based Glueing v programu MeshLab.....	45
Obr. 27: Virtuální 3D model sochy Madony vytvořený v programu MeshLab.....	46
Obr. 28: Ukázka přetočení virtuálního 3D modelu „zad1“ po vybrání.	46
Obr. 29: Ruční skenery Artec Eva a Artec Space Spider.	47
Obr. 30: Grafická lišta, která ukazuje správnou vzdálenost skeneru od objektu.....	49
Obr. 31: Fotografie z průběhu skenování těla sochy skenerem Artec Space Spider.....	49
Obr. 32: Fotografie z průběhu skenování skenerem Artec Space Spider.....	50

Obr. 33: Ukázka vybrání přebytečných bodů pomocí funkce Cutoff plan na skenu těla... 52	52
Obr. 34: Virtuální 3D model střepu těla vlevo bez textury, vpravo s texturou. 53	53
Obr. 35: Fáze procesu tvorby virtuálního 3D modelu fragmentu č. 5..... 54	54
Obr. 36: Ukázka označení bodů na modelech rukou (ruce1 a ruce2)..... 56	56
Obr. 37: Začlenění modelu ruce1 do složeného modelu. 56	56
Obr. 38: Složená socha Panny Marie Lurdské ze sedmi částí. 57	57
Obr. 39: Ukázka začlenění 3 částí do spojeného modelu Madony..... 57	57
Obr. 40: Výsledný složený virtuální 3D model Panny Marie Lurdské. 58	58
Obr. 41: Porovnání vytvořených 3D modelů fragmentů sochy Madony. 63	63
Obr. 42: Ukázka složení virtuální 3D modelů fragmentů sochy. 65	65
Obr. 43: Nepřesnosti na spojeném virtuálním 3D modelu v programu Artec Studio. 65	65

Seznam tabulek

Tab. 1: Tabulka srovnání dvou použitých typů skenerů..... 61	61
Tab. 2: Tabulka srovnání open source programu a komerčního programu..... 64	64

Úvod

V současnosti je využívání digitálních technologií umožňujících tvorbu virtuálních 3D modelů uměleckých předmětů velmi aktuálním tématem. Problematika virtuální rekonstrukce kompletních dochovaných uměleckých předmětů nebo z jejich dochovaných fragmentů je velmi rozsáhlá. Je řešena na mnoha místech celého světa, především na místech, kde se dochovalo nejvíce historických uměleckých předmětů, jako jsou např. Itálie, Kypr, Řecko, ale i Rakousko nebo Čína. Existují i různé projekty, jejichž cílem je podpora studia historie umění s využitím vytvořených virtuálních 3D modelů uměleckých předmětů. Mezi takové projekty patří i projekt CENOBIUM zabývající se multimedialní reprezentací románských klášterů nacházející se ve Středomoří. Podrobnější informace o projektu jsou k dispozici v [33]. Dalším příkladem dobré praxe je projekt European 3D COFORM, jehož cílem je vytvoření 3D dokumentace hmatatelného kulturního dědictví, která bude cenově dostupná a praktická. Bližší informace jsou k dispozici v [34].

Tato diplomová práce navazuje na několikaletou spolupráci s Muzeem jižního Plzeňska v Blovicích, které sídlí na zámku Hradiště. V rámci předcházejícího výzkumu zaměřeného na sestavení kompletního přehledu a na digitální rekonstrukci původního inventáře kaple byla v kostele Jana Evangelisty v Blovicích nalezena socha Panny Marie Lurdské. V současné době je socha v neuspokojivém stavu, je rozbitá na množství fragmentů, hrany fragmentů i textura se drolí a odlupují. Doposud nebyly dohledány žádné fotografie ani jiné materiály, dokládající podobu sochy.

Cílem této diplomové práce je provést digitální rekonstrukci sochy z dochovaných fragmentů a získat tak informace o původním tvaru a podobě sochy. Práce kombinuje rešeršní činnost, měřickou činnost a počítačové modelování. V první kapitole jsou uvedeny informace o možnostech sběru a zpracování dat s využitím různých metod sběru dat, open source softwarů i komerčních programů pro zpracování dat. Ve druhé kapitole je popsán zvolený umělecký předmět, jehož původní podoba a tvar budou rekonstruovány. Třetí kapitola je věnována ověření prvního navrženého postupu (laserové skenování, zpracování dat v open source softwaru a složení virtuálního 3D modelu). Ve čtvrté kapitole je popsáno ověření druhého navrženého postupu prací (skenování s využitím strukturovaného světla, zpracování dat v komerčním programu a vytvoření virtuálního 3D modelu sochy v tomtéž komerčním programu). V poslední, páté kapitole, jsou dosažené výsledky porovnány.

1 Virtuální rekonstrukce a restaurování historických předmětů

V současné době probíhá neustálý a velmi rychlý rozvoj digitálních technologií, které jsou velmi hojně uplatňovány i v oblastech dokumentace a ochrany kulturního dědictví. Digitální technologie se používají k získávání, ukládání, zpracovávání a prezentaci informací v digitální podobě, přispívají též k ochraně a zachování kulturního dědictví UNESCO. Geomatika může přispívat v různých krocích k vytváření virtuálních 3D modelů pro zachování a rozvoj kulturního dědictví. [13] Výsledné digitální reprezentace objektů by měly mít co nejmenší souborovou velikost, aby byla následná práce s nimi co nejsnazší. [15]

Digitální technologie mění způsob, jakým výzkumní pracovníci v oblasti kulturního dědictví, archeologové a kurátoři pracují, neboť poskytuje nové způsoby spolupráce a obnovení objektů. [13] Lidé, kteří pracují na zachování a obnově kulturního dědictví, stále pracují na vývoji účinnějšího nástroje pro obnovu designu a provedení. Neustálý vývoj moderních digitálních nástrojů pro strukturální analýzu nabízí nové příležitosti v oblasti zachování a obnovy kulturního dědictví. [14]

Digitalizace kulturního dědictví a procesy virtuálního 3D modelování jsou založeny především na laserovém skenování a digitální fotogrammetrii. Slouží k vytvoření úplných, detailních a fotorealistických trojrozměrných průzkumů, mezi které patří geometrické a chromatické aspekty, doložené materiály, pracovní techniky atd. [7] Současné digitální nástroje zahrnují přístroje pro digitální získávání dat, jako jsou pozemní laserové skenery, 3D skenery pracující na principu strukturovaného světla (v anglickém originále *structured light 3D scanner*), digitální kamery, optické kamery, tepelné kamery a další. Existuje řada programů pro zpracování dat, které nabízí výstupy v různých formátech. [6]

Fotografie jsou základem pro dokumentování a sdělování informací, avšak poskytují pouze omezený pohled na konstrukce objektů. [15] Proto jsou vhodnější pro dokumentování objektů virtuální 3D modely, které nabízí uživatelům i nové alternativní produkty. Virtuální 3D modely zasahují v dnešní době do každodenního života (kino, reklama, lékařství a další), často jsou využívány i v muzeích. Mohou tedy sloužit i jako vzdělávací nástroj. Pomáhají návštěvníkům a studentům lépe prozkoumat daný objekt. [6] Hlavním cílem využití virtuálních 3D modelů v muzeích je získání nových poznatků a kombinace učení se zábavou. [4]

Pojem rekonstrukce znamená opětovné sestavení, uvedení do původního stavu nebo přestavba. [42] Virtuální rekonstrukce mimo jiné umožňuje též zkoumání různých alternativních řešení ještě před fyzickým sestavením objektu. U vytvořených virtuálních 3D modelů lze dosáhnout různého stupně detailu. Existují stále rychlejší, snazší a spolehlivější metody pro tvorbu virtuálních 3D modelů, které jsou geometricky a opticky mnohem dokonalejší. [6] Detailní 3D modely mohou sloužit jako atraktivní vzdělávací nástroj, jehož pomocí se mohou děti a studenti aktivně účastnit prohlídky muzea během své návštěvy. [4]

Virtuální 3D modely mají dva hlavní úkoly, a to umožnit jinou formu studia uměleckých děl a dále mohou sloužit pro zkoumání, jak umělecké dílo vypadalo například v minulosti. Hlavním cílem využívání virtuálních 3D modelů uměleckých děl je rozšíření možností jejich studia a sledování vývoje podoby díla během staletí. Virtuální 3D modely mají vliv na každodenní práci badatelů, kurátorů a restaurátorů v oblasti kulturního dědictví. Oproti skutečným uměleckým předmětům mají jejich virtuální 3D modely výhody i v tom, že jsou volně přístupné bez omezení provozních hodin, jako je tomu například v muzeích, nebo nejsou omezeny přístupovými právy. [13]

Vytvořené virtuální 3D modely mohou být např. umístěny na webu muzeí. I když v současné době existuje množství možností pro tvorbu virtuálních 3D modelů, stále je možné narazit na otevřené otázky jak při návrhu postupu tvorby, tak při výběru vhodného programu.

Lze vytvářet virtuální 3D modely jak objektů, které jsou celistvé, tak objektů, které celistvé nejsou, tj. objekt je např. rozbitý na několik částí nebo na větší množství fragmentů. Stav, v jakém se objekt nachází, pak ovlivní postup sběru dat, zejména jejich následné zpracování a tvorbu virtuálního 3D modelu.

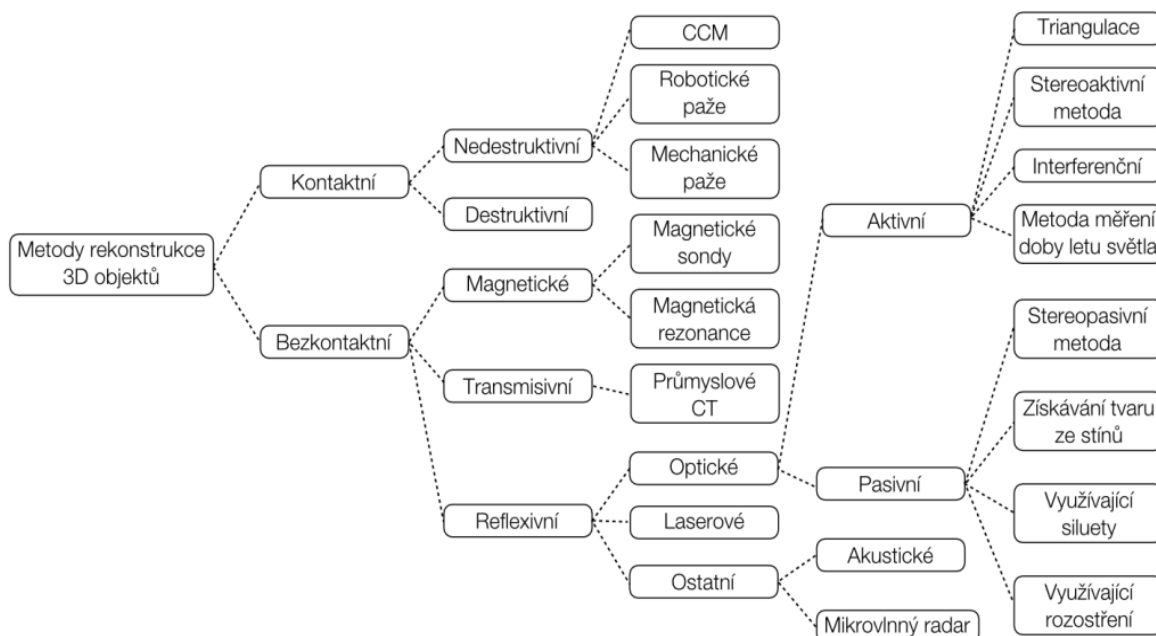
1.1 Možnosti sběru dat

V následujících kapitolách budou popsány možnosti pořízení a následného zpracování dat, které vedou k vytvoření virtuálního 3D modelu, celistvého či poškozeného objektu.

1.1.1 Sběr dat pomocí 3D skenování

3D skenování je v dnešní době využíváno v nejrůznějších oborech jako je např. architektura, archeologie, průmyslový design, počítačové hry, efekty ve filmech nebo lékařství. Ke sběru dat jsou používány 3D skenery, zařízení, která dokáží zaznamenat jak tvar objektu, tak jeho texturu. Téměř ve všech případech je pomocí skeneru pořízeno velké množství bodů,

tzv. mračno bodů, které je dále převedeno do počítače, kde probíhá zpracování. Naměřené body jsou proloženy vhodnou polygonální sítí a výsledkem zpracování je virtuální 3D model. Pro sběr dat jsou využívána nejrůznější zařízení, jako kamery, lasery, rentgeny či magnetické mikrotomografy. 3D skenery lze dělit různými způsoby. [21] Příklad dělení 3D skenerů je na obr. 1.



Obr. 1: Taxonomie 3D skenerů. [21]

Metody sběru dat lze dělit na pasivní a aktivní metody. Pasivní metody zaznamenávají okolní záření a aktivní používají záření emitované na povrch objektu. Mezi aktivní metody patří též skenování. [4]

Moderní technologie, jako je 3D skenování, umožňují rekonstruovat virtuální 3D modely objektů kulturního dědictví. 3D data jsou běžně používána při výrobě animací, interaktivní vizualizaci nebo aplikaci virtuální reality. [9] Skenování se ukazuje jako velmi užitečné i jako univerzální podpora interaktivní vizualizace. [1] Využívá se při sběru dat nejrůznějších objektů i malých objektů jako jsou sochy, vazy, nádoby nebo též části lidského těla (např. lidské pánve). Způsob sběru dat závisí na různorodosti tvarů, velikostí a materiálů objektů či jejich fragmentů. Virtuální 3D modelování je velmi přínosné v případech, kdy by při fyzické (ruční) rekonstrukci díla restaurátorem či archeologem mohlo dojít k jeho poškození.

1) Laserové skenování

Vhodným nástrojem pro sběr dat a následnou tvorbu virtuálních 3D modelů je laserové skenování. [1] Skenery jsou založeny na měření vzdálenosti od snímače po povrch, který je

snímači nejbliže. Zařízení mají různou rychlost sběru dat (od tisíců bodů až po stovky tisíc bodů za vteřinu) a též různou přesnost (od centimetrů až po milimetry). Měření je realizováno na několika různých stanoviscích. Kdyby proběhlo jen na jednom stanovišti, nebyly by zaznamenané informace o měřeném předmětu nebo oblasti dostatečné. [21] Popřípadě lze využít otočný systém.

Laserové skenování je technologie, která umožňuje sběr velkého počtu dat za velmi krátký čas. S daty lze dále pracovat. K zaměření trojrozměrného objektu není třeba klasického měření, lze použít laserové skenování. Laserové skenování se dělí na pozemní statické, pozemní mobilní a letecké mobilní. [18]

Dále jsou popsány příklady užití laserového skenování při sběru dat nutných k vytvoření virtuálních 3D modelů uměleckých předmětů, jako jsou sochy nebo nejrůznější nádoby:

- Nejčastěji byl využit laserový skener od firmy Konica Minolta. Tento skener byl užit při restaurování **terakotové sochy Madony Piatronico**, která je uložena v národním muzeu d'Abruzzo v Itálii. Socha byla roztržena při zemětřesení na několik kusů, došlo i k porušení polychromie. Po upevnění některých fragmentů došlo ke skenování sochy. Přesnost a rozlišení skenování bylo závislé na velikosti fragmentů a typu materiálu. Byl použit laserový skener *Konica Minolta Vivid 91*. Podrobnější informace jsou k dispozici v [1].
- Dalším příkladem, kdy byl užit laserový skener od firmy Konica Minolta, byla virtuální rekonstrukce **terakotové sochy postavy Krista v ukřižované pozici z 15. století**. Socha byla vážně poškozena, roztržena na množství střepů. Geometrie sochy byla získána pomocí triangulačního laserového skeneru (Konica Minolta VIVID 900). [12]
- Obnovou **sochy Neptuna** s využitím laserového skenování se zabývá i výzkumný program *Repture*. Tento program zahrnuje pracovníky z PRISME a CRMD laboratoře na Orleánské univerzitě a restaurátory kulturního dědictví z Coignards. Socha Neptuna byla též naskenována laserovým skenerem od firmy Konica Minolta, jednotlivé fragmenty byly skenovány ze všech stran. Podrobněji v [14].
- Odborníci na Kypru řešili skenování roztržené historické **nádoby ze 13. století**. Pomocí laserového skeneru NextEngine 3D Desktop byly naskenovány všechny

restaurované i větší střepy nádoby. Skenované úlomky byly při skenování položeny na rotační zařízení, ukázka je na Obr. 2. [3]



Obr. 2: Upevněný střep nádoby na rotačním zařízení při skenování laserovým skenerem NextEngine 3D Desktop. [3]

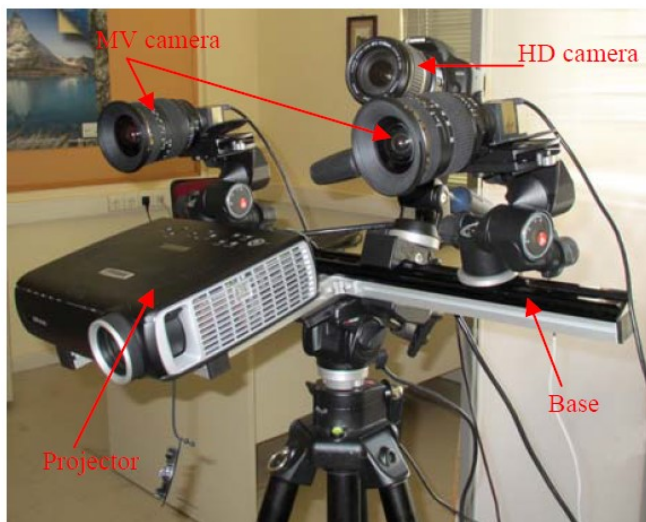
- Vážně poškozená **obří železná socha lva**, významné umělecké dílo z roku 953, byla naskenována skenerem LS880 Scanner HE80. Vzhledem k velikosti sochy (socha měří přes 5 metrů) muselo být při pořizování dat použito lešení. Socha byla naskenována z 21 stanovisek, byl skenován i vnitřní prostor sochy. Systém skeneru poskytoval data ve formátu souřadnic (x, y, z), jež bylo možné propojit s počítačovým programem Faro Scene. [8]
- V rámci restaurování **sochy Davida od Michelangela** bylo provedeno 3D laserové skenování. Socha Davida byla naskenována pomocí Cyberwarového laserového skeneru propojeného s počítačem, což umožnilo technikům dálkové ovládání skeneru. Bylo pořízeno přibližně 4 000 rozsahových map, které byly následně zpracovány sadou nástrojů vyvinutou laboratoří Stanford Computer Graphics Lab. Podrobněji je problematika popsána v [9].
- Laserové skenování bylo též použito v projektu restaurování **dřevěné sochy Marie Magdaleny od Donatella**, která se nachází v muzeu ve Florencii. Pro pořízení dat byl zvolen systém, který se sestával z analogové videokamery a LCD projektoru. Zařízení byla připevněna společně na kovovou tyč a ovládána počítačem. Podrobnější informace jsou k dispozici v [11].

2) 3D skenování s využitím strukturovaného světla

Pro zaznamenání tvaru a textury nejrůznějších objektů lze použít 3D skener pracující na principu strukturovaného světla. Předností skenerů využívajících strukturovaného světla je

jejich relativně nízká cena a vysoká rychlost sběru dat. Trojrozměrný tvar objektu je zaměřen kamerovým systémem díky promítání světelného vzoru na objekt. Na ten lze promítat různé vzory např. úzké pásy světla nebo mřížku. Promítaný vzor je na objektu zkreslený, protože světelné paprsky dopadají na různě zakřivené plochy pod různým úhlem. V počítači se následně porovnávají odpovídající si pixely z projektoru a ze snímací kamery. Výsledkem je mračno bodů, se kterým se dá dále pracovat a lze z něj vytvořit virtuální 3D model. [21]

- Skenování s využitím strukturovaného světla bylo užito při skenování **lékythos**, (starořeckých nádob s vysokým hrdlem a jedním uchem). [19] Nádobky jsou nyní vystaveny v Národním archeologickém muzeu v Aténách v Řecku. 3D skener pracující na principu strukturovaného světla se skládal z digitální zrcadlovky CANON 450D s 12 MP fotoaparátem, Infocus IN35W DLP a projektoru (obrázek Obr. 3). Podrobněji je problematika popsána v [4].



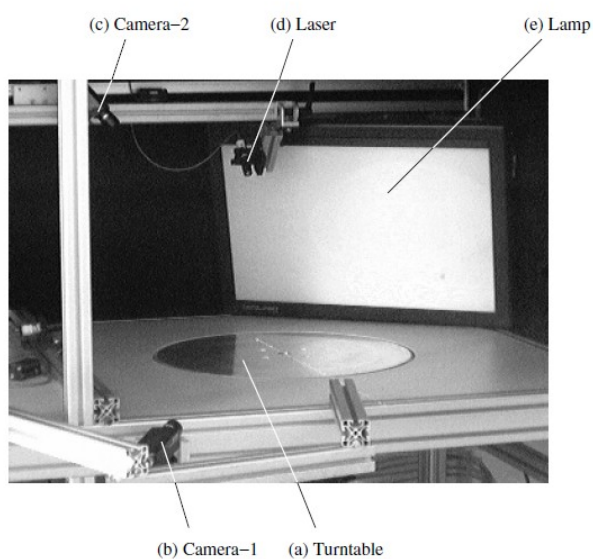
Obr. 3: 3D skener pracující na principu strukturovaného světla užitý při skenování lékythos. [4]

Tvorba virtuálních 3D modelů ze skenovaných dat je tématem nejrůznějších projektů, příkladem je např. *Minerva Project*, který se zaměřuje na vývoj a experimentování v oblasti virtuálních 3D modelů a jeho využití pro potřeby dokumentace a ochrany kulturního dědictví. V projektu byly srovnány a zhodnoceny dva systémy: 3D skener pracující na principu strukturovaného světla a laserový skener instituce INOA. Pořízená data byla zpracována pomocí programové sady nástrojů navržené na ISTI-CNR. Podrobnější informace o projektu jsou k dispozici v [5] a [10].

1.1.2 Sběr dat pomocí fotogrammetrických metod

Virtuální 3D modely lze vytvářet též zpracováním digitálních fotografií. Požadavky jsou kladeny na přesnost, přenositelnost a náklady. Kvalitu rekonstrukce předmětu může ovlivnit prostředí, kvalita fotografií nebo úplnost pokrytí předmětu fotografiemi. [13] Výhodou využití fotogrammetrických metod sběru dat je nižší finanční náročnost, přenosnost fotografické komory i dalšího vybavení, flexibilita a možnost detailně zachytit tvar a texturu objektu.

- Sběr a zpracování dat pomocí fotogrammetrie bylo využito např. při rekonstrukci **roztříštěné i neporušené keramiky**. Keramika patří mezi nejrozšířenější archeologické nálezy, které jsou velmi často roztříštěné. Technická univerzita ve Vídni vyvíjí systém, který zrekonstruuje, jak rozbité, tak kompletní nádoby. K získání dat byl použit digitální fotoaparát vybavený projektořem Leica, otočný stůl, dvě monochromatické kamery, červený laser s hranolem a osvětlovací lampa. Před použitím byl celý systém kalibrován (tj. byly známy prvky vnitřní a vnější orientace kamer, byly známy osy rotace otočného talíře). Ukázka systému je na Obr. 4. Podrobnější popis je k dispozici v [2].



Obr. 4: Systém pro sběr dat pro neporušenou i roztříštěnou keramiku. [2]

- Dalším příkladem využití fotogrammetrie při sběru dat bylo **studium 3 artefaktů vyrobených z různých materiálů**. První byl vyroben z mramoru, druhý z bronzu a třetí, u něhož chybí přibližně 30% textury, byl vyroben z keramiky.

Fotogrammetrický postup se skládal z pořizování snímků pomocí digitálního fotoaparátu SLR. [17] SLR je zpravidla tzv. jednooká zrcadlovka, tedy fotoaparát, který

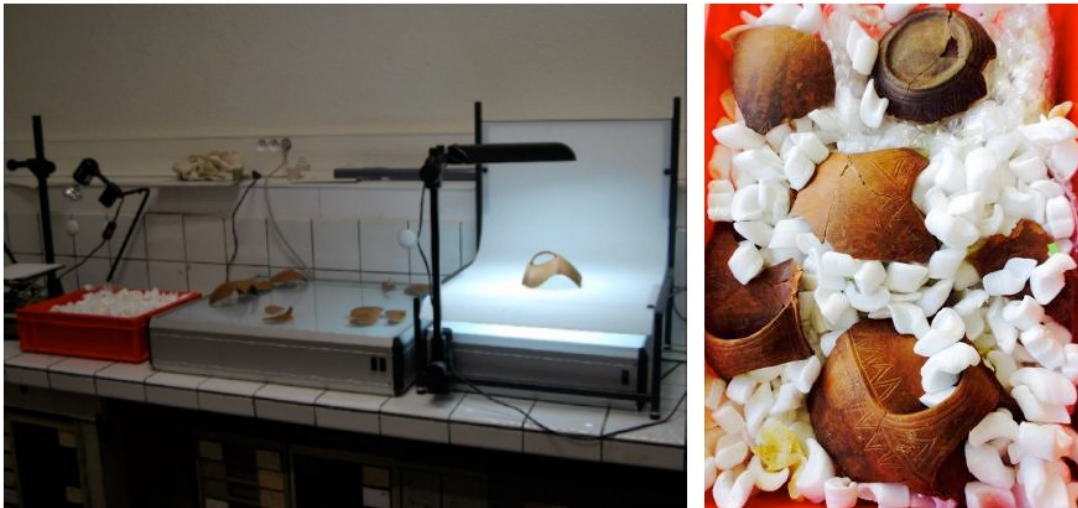
má v hledáčku sklopné zrcadlo a má jeden objektiv pro expozici i pro hledáček. [20] V projektu v [17] byly pomocí fotogrammetrických metod modelovány všechny tři artefakty, ze kterých byl sběr dat u třetího předmětu nejzajímavější. K pořízení dat potřebných k virtuální rekonstrukci tohoto artefaktu z keramiky byly použity dva způsoby. Pro oba případy byl použit 14,2 Mpx fotoaparát DX Nikon D3100. Na předmět byl promítán náhodný vzor jako náhrada za chybějící texturu. Pro projekci vzoru byl použit miniprojektor Dell M109S. Byly pořízeny dvě sady fotografií, jeden snímek s promítaným vzorem a druhý bez něj. Virtuální rekonstrukce artefaktu byla udělána pomocí snímků s promítaným vzorem. Snímky bez vzoru byly zarovnány a následně použity k rekonstrukci artefaktu. [17]

- Kromě skenování byla **dřevěná socha Marie Magdaleny od Donatella** též snímkována digitálním fotoaparátem 5,2 Mpx Nikon Coolpix 5000. Protože dřevo absorbovalo část světla, bylo nutné pro pořízení snímků sochy použít maximální osvětlení 250 W a téměř maximální akvizici. Ukázka sběru dat je na Obr. 5. [11]



Obr. 5: Socha Magdaleny – sběr dat pomocí blízké fotogrammetrie. [11]

- Fotogrammetrické metody byly užity pro sběr dat **keramických fragmentů**. Byla použita digitální zrcadlovka Nikon D60, světelná tabulka a halogenová lampa. Bylo vždy třeba zvolit správnou intenzitu světla pro daný střep. Na Obr. 6 je ukázka z procesu sběru dat roztržité keramiky. [16]



Obr. 6: Systém pro sběr dat (vlevo), ukázka roztržité keramiky (vpravo). [16]

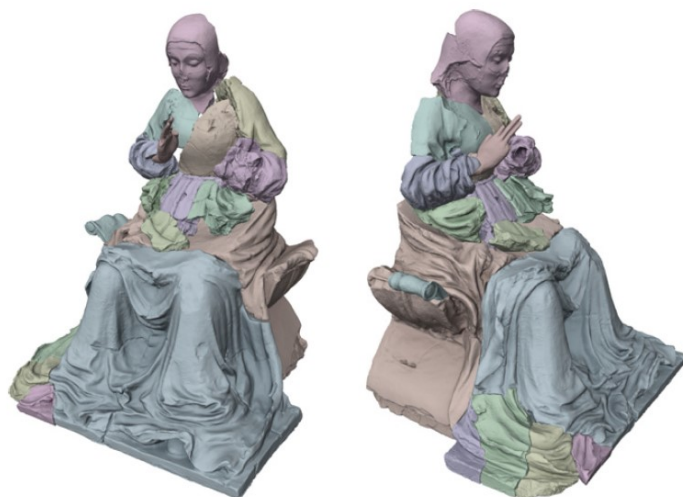
1.2 Dostupné programy pro zpracování dat

Pro zpracování dat pořízených skenováním nebo metodami fotogrammetrie jsou využívány nejrůznější programy, které mohou patřit mezi tzv. open source nebo komerční programy.

1.2.1 Open source softwary

Prvním vhodným open source softwarem je *MeshLab*. Tento program je vhodný pro zpracování a editaci 3D trojúhelníkových sítí. Patří mezi nejvyužívanější open source softwary, které jsou vhodné pro tvorbu virtuálních 3D modelů např. z mračen bodů. Více informací o tomto programu je uvedeno v kapitole [3.3.1. Program MeshLab](#).

- Program MeshLab byl použit např. pro modelování a restaurování **terakotové sochy Madony Piatranico**. V programu byly provedeny veškeré úkony modelování a sestavování sochy. Nejprve byly vytvořeny a následně zjednodušeny jednotlivé povrchy všech naskenovaných částí. Z důvodu zdokumentování současného stavu sochy, byla propojena geometrie s texturou, tj. pořízené série fotografií byly přiřazeny jednotlivým částem sochy. Virtuální 3D modely jednotlivých částí pak byly postupně přiřazeny na odpovídající místa. Do celého procesu bylo zapojeno množství osob z řad techniků, historiků a restaurátorů, neboť složení sochy z velkého množství střepů, které na sebe často nenavazovaly, bylo velmi náročné. Ukázka spojených virtuálních 3D modelů jednotlivých částí sochy je na Obr. 7. V programu MeshLab bylo provedeno též testování, zda by bylo možné složit sochu i ve skutečnosti. Podrobněji je problematika popsána v [1].



Obr. 7: Složení jednotlivých fragmentů sochy Madony Pietronico v programu MeshLab. [1]

- Druhým příkladem užití programu MeshLab je tvorba virtuálního 3D modelu **terakotové sochy Krista**. Téměř veškeré práce byly realizovány v programu MeshLab, finální úpravy virtuálního 3D modelu byly provedeny v programu Blender. Podrobnější informace o postupu prací jsou uvedeny [12].
- Při tvorbě virtuálních 3D modelů **rozbité keramiky** byl použit také program MeshLab. Byl v něm vypočten objem a měřítko. Samotné vytvoření virtuálního 3D modelu a konečné úpravy proběhly v jiných programech. [16]

Dalším open source softwarem vhodným pro tvorbu virtuálních 3D modelů je *Blender*.

Nabízí množství nástrojů pro manipulaci, simulaci, vykreslování 3D dat, lze v něm editovat videa či tvořit hry. Program Blender byl nejprve vyvíjen jako aplikace holandského animačního studia a byl distribuován jako shareware. Až od roku 2002 je vydáván pod licencí GNU General Public License. V současnosti je stále aktivně vyvíjen, jeho vývoj zajišťuje Blender Foundation. [23] Je dostupný na mnoha platformách jako je Windows, Linux, Mac Os X nebo také FreeBSD a Solaris, podporuje formáty typu 3DS, DXF, SVG, STL, VRML nebo X3D. [24]

Aby bylo možné provádět potřebné kroky k vytvoření virtuálního 3D modelu v programu Blender je nutné doinstalovat zásuvné moduly, jako je Mesh Align Plus, který umožňuje např. zarovnat objekty ve scéně nebo napojit jednotlivé části sítě. Dalšími zásuvnými moduly jsou Mesh Simplify nebo Mesh Merge. [26] Program Blender obsahuje mnoho funkcí využitelných při digitální rekonstrukci např. soch nebo různých nádob. Příklady užití programu Blender jsou uvedeny níže.

- Program Blender byl využit při digitální rekonstrukci **nádoby nalezené na Kypru**. Zpracování dat proběhlo v programech AutoCAD a Blender. Při virtuálním 3D modelování bylo využito kruhového tvaru nádoby. Virtuální 3D model nádoby jako celku byl vytvořen v programu Blender pomocí Python Script. Následně došlo ke spojení jednotlivých střepeň. Tento model byl potažen texturami a obarven. Pomocí pořízených pevných snímků z Blenderu a python skriptu byl model vizualizován. Na Obr. 8 je zobrazena aplikace textury na model vázy v Programu Blender. [3]



Obr. 8: Aplikace textury na 3D model vázy. [3]

- Dále byl program Blender užit k finálním úpravám virtuálního 3D modelu již zmiňované **sochy Krista**. Jednalo se především o doplnění textur na výsledný virtuální 3D model (podrobněji v [12]).
- Program Blender byl využit též při virtuálním 3D modelování **fragmentů keramiky**. Sestavení jednotlivých fragmentů keramiky bylo provedeno v programu Blender. [16]

Poslední open source možnosti vytvoření virtuálního 3D modelu z fotografií je *Arc3D*.

Jedná se o webovou službu obsahující sadu nástrojů, jejichž pomocí lze vytvářet virtuální 3D modely z fotografií. Uživatel nahraje pořízené fotografie objektu do aplikace, kterou si stáhne do svého počítače a která slouží jako nástroj pro nahrávání fotografií. Po nahrání se fotografie uloží na server, kde správci této webové služby provádí virtuální 3D rekonstrukci modelu. Za několik minut dostane uživatel výsledek na svůj email. Podrobnější informace k danému tématu jsou k dispozici v [13].

1.2.2 Komerční programy

Mezi nejznámější komerční programy patří *AutoCAD*, který je vhodný pro konstruování virtuálních 3D modelů jak 2D tak 3D objektů. Výstupním formátem je DWG a jeho textová podoba DXF. Do AutoCADu lze doinstalovat nejrůznější rozšíření (extension).

Program AutoCAD byl vyvinut firmou Autodesk, jež byla založena Johnem Walkerem a dalšími 12 osobami v roce 1982. Licence programu je chráněna programovým

klíčem nebo autorizačním kódem. V současné době je program AutoCAD hojně využíván v mnoha odvětvích, jako je strojírenství, stavebnictví, mapování, GIS, archeologie, elektrotechnika, chemie, ale i astronomie či divadelnictví. [27]

- AutoCAD byl využit při tvorbě **nádoby**, která byla nalezena na **Kypru**. Do AutoCAD byl importován vytvořený profil ve formátu DXF. Další pracování proběhlo kromě v programu AutoCad ještě v programu Blender. [3]

Mezi komerční programy patří software *FLAC3D*. Jedná se o numerický modelovací software, který je vhodný pro geotechnické analýzy půdy a konstruování modelů. Zahrnuje analýzy od počátečních konstrukčních návrhů, faktorů předpovědi bezpečnosti, testování a zpětné analýzy selhání. [28] Program FLAC3D byl vyvinut firmou Itasca Consulting Group, Inc., globální inženýrskou a softwarovou firmou, která řeší problémy v mnoha odvětvích jako je těžba ropy a zemního plynu, stavitelství a další. [28] Do programu FLAC3D lze importovat i exportovat formáty DXF a STL a dva speciální formáty definované firmou Itasco.

- Program FLAC3D byl použit např. při tvorbě **virtuálního 3D modelu sochy Neptuna** (byly vytvořeny jednotlivé virtuální 3D modely fragmentů, speciální opěrný systém a vložky, aby jednotlivé části sochy fyzicky držely na sobě). Podrobněji je postup popsán v [14].

Dalším komerčním programem, který je používán pro tvorbu virtuálních 3D modelů, je software *Artec Studio*. Program spolu se skenery vyrábí a distribuuje firma Artec 3D. Více informací o programu Artec Studio je uvedeno v kapitole 4.3.1 Informace o programu Artec Studio.

Vhodným programem pro tvorbu virtuálních 3D modelů je též *PolyWorks Modeler*. Tento program umožňuje vytváření přesných a hladkých polygonálních modelů a Nurbs povrchů z velkých mračen bodů. Program PolyWorks Modeler dokáže zpracovat až 100 milionů bodů pořízených laserovými skenery. Program disponuje funkcemi umožňujícími spojit více skenů, práci s polygony (např. zaoblení nebo automatické vyplňování děr) a má též adaptivní síťování. [29] Program je distribuován společností InnovMetric Software Inc, která byla založena v roce 1994 a v současnosti má sídla po celém světě, včetně Evropy. [30]

- Program PolyWorks Modeler byl použit pro veškeré zpracování dat, kromě rekonstrukce pomocí fotogrammetrických metod, při tvorbě virtuálního 3D modelu **dřevěné sochy Marie Magdaleny**. Ukázka výsledného modelu je na Obr. 9, podrobněji je postup prací popsán v [11].



Obr. 9: Virtuální 3D model hlavy sochy Marie Magdaleny. [11]

Mezi nejznámější komerční softwary, které jsou vhodné pro tvorbu virtuálních 3D modelů z fotografií patří Agisoft PhotoScan. V tomto programu jsou při zpracování pořízených dat využívány různé fotogrammetrické metody. [31] Tvorba virtuálního 3D modelu objektu může probíhat za předpokladu, že je objekt zachycen alespoň na dvou snímcích. Úpravy obrazu a rekonstrukce modelu jsou plně automatizovány. [32]

Program Agisoft PhotoScan byl vyvinut společností Agisoft LLC založenou v roce 2006. Původní zaměření společnosti bylo směřováno na technologie počítačového vidění, v současné době převládá digitální fotogrammetrie. Program Agisoft PhotoScan se v současné době používá v GIS aplikacích, pro dokumentaci kulturního dědictví, pro vytváření vizuálních efektů nebo zjišťování velikosti či tvaru různých objektů. [31]

- Program Agisoft PhotoScan byl využit při tvorbě virtuálních 3D modelů **keramiky z fragmentů**. Snímky fragmentů byly importovány do programu Agisoft PhotoScan, kde byl vytvořen virtuální 3D model, který byl následně importován ve formátu OBJ do programu MeshLab, kde byl finálně upraven. Bližší informace viz. [16].

Pro tvorbu virtuálních 3D modelů z fotografií lze využít též program ShapeCapture, který distribuovala firma ShapeQuest, Inc. V současné době firma již neexistuje a program není dále vyvíjen.

- Program ShapeCapture byl použit pro kalibraci digitálního fotoaparátu (5,2 Mpx Nikon Coolpix 5000) při sběru dat pro tvorbu virtuálního 3D modelu **dřevěné sochy Marie Magdaleny**. Model z fotografií byl vytvořen opět v programu ShapeCapture. [11]

1.3 Shrnutí poznatků o tvorbě virtuálních 3D modelů uměleckých předmětů

Virtuální 3D modelování je v současnosti využíváno v celé řadě oborů, jako je archeologie, architektura, stavitelství nebo lékařství. Své uplatnění našlo ve filmovém průmyslu i při vývoji počítačových her. Stále častěji jsou virtuální i tištěné 3D modely využívány pro vzdělávání. Spolupráce odborníků z oblasti historie, archeologie a restaurátorů s odborníky z technických oborů nabízí nové možnosti a postupy vedoucí k ochraně a zachování kulturního dědictví.

Sběr dat potřebných pro tvorbu virtuálního 3D modelu se provádí zpravidla bezkontaktními metodami, skenováním (laserovým skenováním, skenováním využívajícím strukturovaného světla) nebo metodami fotogrammetrie. Pro zpracování dat pořízených skenováním lze využít jak open source softwaru (MeshLab, Blender) tak komerční programy (AutoCAD, Flac3D, Polyworks modeler, Geomagic Studio). Pro zpracování dat pořízených metodami fotogrammetrie lze využít open source aplikaci Arc3D nebo komerční programy Agisoft PhotoScan či ShapeCapture. Aktuální stav zájmového objektu a předpokládané využití výsledného modelu ovlivňují jak metodu sběru dat, tak postup zpracování, a tedy i použitý program. Významným faktorem je též finanční náročnost a dostupnost technologií.

Před zahájením sběru dat, je vhodné využít všechny dostupné podklady a prostudovat možné postupy. Hlavním cílem nemusí být vždy vytvoření vizuální reprezentace zájmového objektu, v některých případech je žádoucí zvolit či otestovat různé postupy a programové prostředky, které umožní experimentování a posuzování možných variant řešení, neboť první nalezené řešení nemusí být vždy správné.

Klasický proces restaurování objektu z dochovaných fragmentů zahrnuje zpravidla několik iterací, než jsou jednotlivé fragmenty sestaveny v jeden celek. Restaurátoři postupně lepí, popřípadě upevňují, jednotlivé fragmenty na připravený podklad nebo využívají různé opěrné systémy. Při manipulaci s jednotlivými fragmenty může dojít k poškození nebo zničení některých částí. Proto je velmi žádoucí před vlastním restaurováním konkrétního objektu nejprve navrhnout vhodný opěrný systém a vytvořit rekonstruovaný virtuální 3D

model, který by umožnil testovat různé varianty sesazení jednotlivých fragmentů či ucelenějších částí objektu.

Je zřejmé, že rekonstrukce původního tvaru uměleckého předmětu z dochovaných fragmentů je složitý a časově i finančně velmi náročný proces. Velmi často je třeba úzká spolupráce odborníků z různých vědních oborů.

2 Návrh a testování postupu prací

Nejdříve bylo nutné se podrobně seznámit s uměleckým předmětem, jehož podoba byla digitálně rekonstruována a navrhnout postup sběru a následného zpracování dat.

2.1 Popis uměleckého předmětu

Uměleckým předmětem, jehož původní podoba byla v rámci vypracování této diplomové práce rekonstruována, je sádrová socha. Její fragmenty se v současné době nachází v kostele sv. Jana Evangelisty v Blovicích. V minulosti se socha nacházela v kapli sv. Ondřeje na zámku Hradiště v Blovicích. Jedná se nejspíše o sochu Panny Marie Lurdské, sochu stojící postavy Madony s překříženými rukama na prsou. Odhadovaná výška sochy je přibližně jeden metr. Tato socha odpovídá popisu v posudku Zdeňka Knoflíčka, kde byly popsány všechny artefakty, které původně byly uloženy v kapli i na zámku Hradiště v Blovicích. V posudku je socha popsána takto: *Stojící postava Madony v bílém šatě s modrou šerpou a spjatýma rukama na prsou. Materiál: sádra, polychromovaná. Rozměry: v = 100 cm. Datování: konec 19. století. Běžná řemeslná práce zhotovená ve velkých sériích. Bez umělecké hodnoty.* [37] Přesné umístění sochy v kapli není známo, informaci nelze zjistit ani z dostupných historických fotografií kaple.



Obr. 10: Uložení fragmentů sochy Panny Marie Lurdské v kostele sv. Jana Evangelisty v Blovicích. (Foto: Kateřina Haliková).

V současnosti je socha rozbitá na několik větších a množství malých částí (viz. Obr. 10 a Obr. 11). Není zřejmé, kdy k poškození sochy došlo. Socha mohla být poškozena v době, kdy na zámku sídlilo zemědělské učiliště. Kaple, ve které byla socha pravděpodobně umístěna, tehdy sloužila zemědělskému učilišti jako skladiště. Další možností je též varianta

poškození sochy během převozu z kaple, neboť inventář kaple byl přemístěn do správy různých farních úřadů. Od roku 2000 se v zámku nachází Muzeum jižního Plzeňska. [38] Vzhledem k tomu, že fragmenty sochy byly po dlouhou dobu uloženy v kostele na prašném místě, byl jejich povrch značně znečištěn. Z jednotlivých fragmentů bylo nejprve nutné odstranit štětcem největší nečistoty a prach, aby byl při skenování skenován skutečně pouze povrch fragmentu.

Socha byla vyrobena ze sádry, proto je třeba s jednotlivými fragmenty manipulovat velmi opatrně, aby nedocházelo k dalšímu poškození. Vzhledem k tomu, že se sádrový povrch velmi drolil, byly při manipulaci s jednotlivými fragmenty používány rukavice, aby nedocházelo k dalšímu poškození. I přes velmi opatrné zacházení s fragmenty, docházelo k odlupování drobných částí z povrchu fragmentů zejména na jejich hranách. Proto není textura povrchu na všech místech celistvá.



Obr. 11: Fragmenty sochy Panny Marie Lurdské - dochované části.

Všechny dochované fragmenty sochy jsou na Obr. 11. Největšími dochovanými fragmenty jsou hlava, tělo a podstava. Dále se dochovaly čtyři větší části, dvě části sepjatých rukou, dva díly zad, 14 dílů větších než 6 cm a 32 velmi malých střípků. Je zřejmé, že se nejedná o všechny fragmenty sochy. Odhadované množství fragmentů, které chybí je více než 1/3 z celé sochy.

2.2 Návrh postupu prací

Na základě studia dostupných pramenů zabývajících se problematikou skenování a vizualizace historických objektů, jako jsou sochy různých velikostí, vázy a další umělecké předměty, byl navržen postup prací, který lze rozčlenit do tří dílčích kroků.

Vyhledání dostupných informací o objektu

Nejprve bylo nutné dohledat dostupné informace o historii sochy včetně jejího začlenění do historického kontextu. Obecně by práce v této fázi měly být zaměřeny na shromáždění údajů o modelovaném objektu, které lze využít při virtuální rekonstrukci. Pozornost by měla být též věnována materiálu, z něhož je objekt vyroben, a především aktuálnímu stavu objektu, tj. zda se dochoval bez poškození textury, zda je objekt celistvý nebo poškozený. V případě poškození či roztržení na množství fragmentů, je třeba věnovat pozornost stavu a počtu fragmentů, aby bylo možné odhadnout, zda jsou k dispozici všechny části, případně jaká část z celku chybí.

Sběr dat

Na základě studia dostupných informací a pramenů bylo třeba zvolit vhodnou metodu sběru dat. Z provedené rešerše bylo zřejmé, že nejrozšířenější metodou sběru dat je 3D skenování, konkrétně laserové skenování nebo skenování s využitím strukturovaného světla. Principy obou metod skenování jsou odlišné. Zatímco laserovým skenerem je vysílán laserový paprsek, pomocí kterého se měří vzdálenost snímače a povrchu, který je nejbližší, 3D skener pracující na principu strukturovaného světla je založen na jiném principu. Na měřený objekt je promítán vzor, jako je např. mřížka. Následně jsou porovnávány sobě si odpovídající pixely projektoru a snímací kamery, tj. modulovaný vzor v počítači s promítaným vzorem. Výstupem obou těchto metod je mračno bodů, které je dále zpracováno.

Dalším možným postupem vhodným pro sběr dat, je metoda založená na principu fotogrammetrie. Tato metoda je vhodná pro zpracování objektů, které mají na povrchu nepravidelnou texturu, tj. pro objekty s hladkým povrchem a jednolitou texturou není příliš vhodná. Na jednotlivé fragmenty by bylo nutné promítat vzor, aby bylo možné zrekonstruovat původní tvar objektu. Tato metoda je založena na stejném principu, jaký využívá 3D skener pracující na principu strukturovaného světla.

Pro sběr dat zvoleného uměleckého předmětu, sochy Panny Marie Lurdské, byly zvoleny metody 3D skenování. První metodou bylo **laserové skenování**, druhou metodou bylo **skenování pomocí 3D skeneru pracujícím na principu strukturovaného světla**.

Laserové skenování bylo provedeno pomocí laserové multistanice Leica Nova MS50, která umožňuje nastavení podrobnosti i rychlosti sběru mračna bodů. Skenování pomocí 3D skeneru pracujícím na principu strukturovaného světla bylo provedeno pomocí 3D ručního skeneru od firmy Artec 3D.

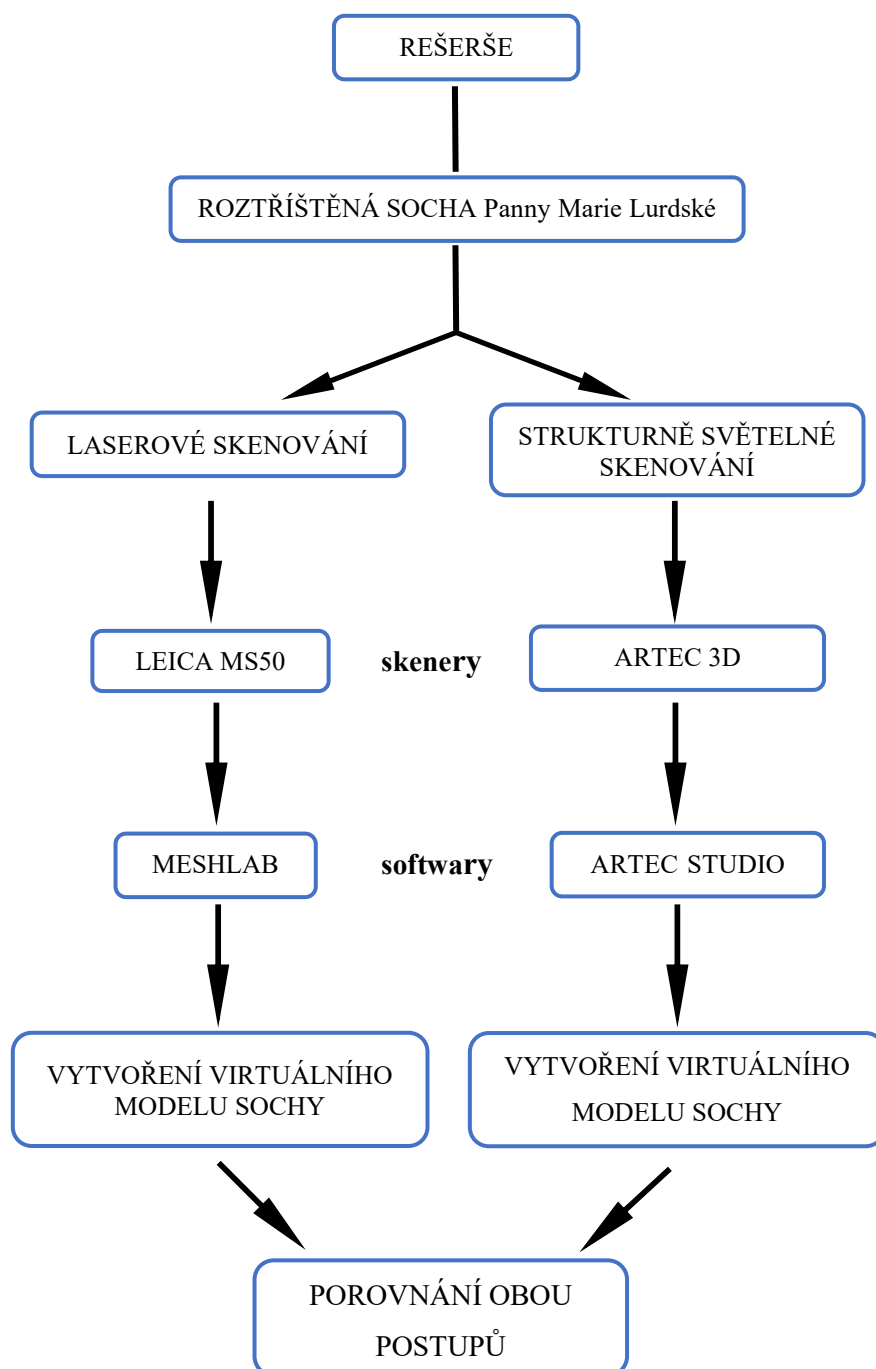
Zpracování dat a tvorba virtuálních 3D modelů

Nejprve je nutné vytvořit virtuální 3D modely jednotlivých částí sochy. Z pořízených mračen bodů jsou pak odstraněny nadbytečné body. Následuje proložení bodů sítí a potažení vymodelovaného 3D povrchu texturou.

Data pořízená multistanicí Leica MS 50 budou zpracována v open source softwaru MeshLab, který je dle výsledků provedené rešerše dostupných pramenů jeden z nejčastěji užívaným open source softwarem pro tyto úkony. Data pořízená ručním skenerem od firmy Artec budou zpracována v komerčním softwaru Artec Studio od téže firmy.

Po vytvoření virtuálních 3D modelů jednotlivých částí sochy, budou tyto 3D modely virtuálně spojeny. Tato fáze je velmi náročná především v případech, kdy je třeba nelézt správnou polohu pro jednotlivé malé fragmenty, nebo když některé části sochy zcela chybí. Pro tyto činnosti budou opět využity programy MeshLab a Artec Studio. Výsledkem by měl být virtuální 3D model uměleckého předmětu buď celého nebo jeho části (v tomto konkrétním případě sochy Panny Marie Lurdké) vytvořený v programu MeshLab a v programu Artec Studio.

V návrhu prací jsou popsány dva možné postupy sběru i zpracování dat, výstupem budou též dva virtuální 3D modely sochy Panny Marie Lurdké, což umožní nejen ověření navrženého postupu ale i vzájemné porovnání jak postupu prací, tak výsledků. Grafické vyjádření postupu prací je na Obr. 12.



Obr. 12: Graf návrhu postupu práce při tvorbě virtuálního 3D modelu sochy.

2.3 Testování sběru a zpracování dat

Vzhledem k tomu, že socha Panny Marie Lurdské je uložena v kostele sv. Jana Evangelisty v Blovicích, kde nejsou vhodné podmínky pro skenování, bylo třeba zajistit přesun sochy do vhodnějších prostor. Skenování bylo možné realizovat v prostorách muzea Jižního Plzeňska v Blovicích, kam byla socha dočasně zapůjčena. Aby nedocházelo ke zbytečným časovým prodlevám, bylo skenování pomocí multistanice Leica Nova MS50 a vytvoření virtuálního modelu v programu MeshLab testováno na podobném artefaktu (bílá keramická váza)

v prostorách Katedry geomatiky Fakulty aplikovaných věd ZČU. Skenování bylo též testováno na několika střepech bílého talíře, které velikostí odpovídaly některým střepům sochy Panny Marie Lurdské. Podrobné informace o multistanici Leica MS50 jsou uvedeny v kapitole 3.1 Multistanice Leica Nova MS50.

2.3.1 Testovací sběr dat pomocí laserového skenování

Prvním krokem při sběru dat bylo zvolení vhodné konfigurace stanovisek přístroje a umístění skenovaného předmětu. Minimální vzdálenost objektu od stroje musel být 1,5 m, minimální počet stanovisek skenování byl dva. Pro práci v místním souřadnicovém systému byly použity dva odrazné hranoly Leica, které vymezovaly přímku, jejíž pomocí bylo orientováno měření ze všech stanovisek.

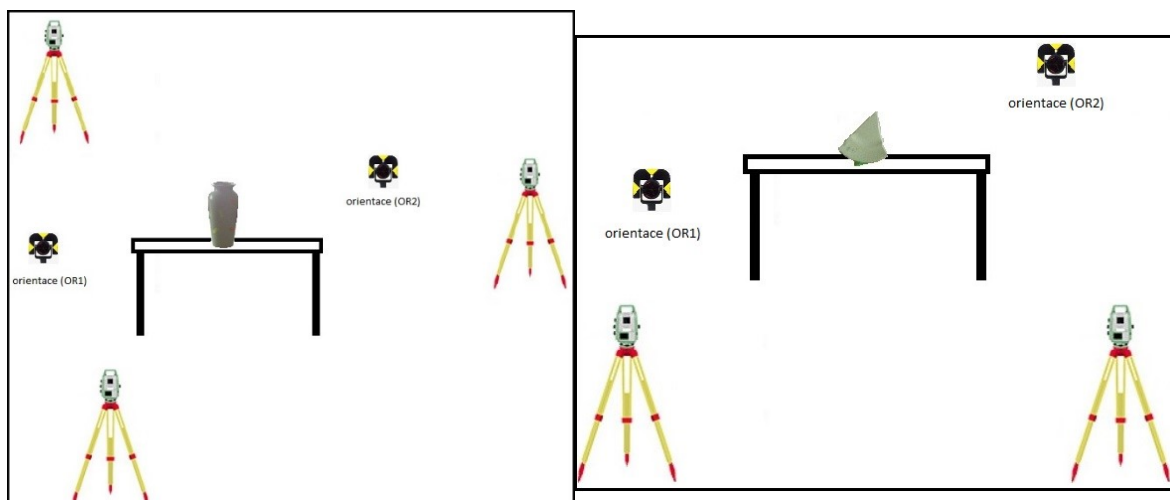
Předměty byly během skenování umístěny na stole přibližně ve výšce horizontu stroje. Nejprve byla postupně ze tří stanovisek skenována keramická váza pro lepší orientaci polepená barevnými štítky, následovalo skenování jednotlivých střepů talíře.

Po přípravě stroje na stanovisku byla založena nová zakázka. Následně bylo zacíleno na obě orientace (orientace měření k přímce). V nastavení skenování byla zvolena možnost definování nepravidelné oblasti skenované mřížky, čímž dochází k redukci nadbytečného počtu bodů při zpracování dat. Nepravidelná oblast musí být definována minimálně třemi nebo více body, po výpočtu skenované mřížky je třeba pořídit snímek nepravidelné oblasti, aby bylo možné přiřadit barvu jednotlivým bodům naskenovaného mračna.

V dalším kroku bylo definováno rozlišení skenování (lze definovat dle délky nebo úhlu, pro tuto práci byla zvolena možnost rozestupů mračna bodů podle délek). Nejprve byl nastaven rozestup bodů na hodnotu 0,005 m v horizontálním i vertikálním směru. Tento rozestup se při testovacím zpracování dat ukázal jako nedostatečný. Při druhém měření bylo zvoleno nastavení na hodnotu 0,002 m v horizontálním i vertikálním směru. Počet bodů mračna se lišil podle velikosti jednotlivých předmětů, tedy u vázy byl až 2x větší než u střepů talíře.

Před zahájením skenování bylo třeba nastavit režim a rychlost skenování, tj. s jakou rychlostí proběhne skenování v závislosti na vzdálenosti skenovaného předmětu od stroje.

Rychlost skenování byla 1000 b/s (bodů za sekundu). Konfigurace stanovišek a přímky u testovacích skenovaných předmětů je na Obr. 13.



Obr. 13: Konfigurace stanovišek při skenování vázy na náčrtu vlevo a střepů talíře na náčrtu vpravo.

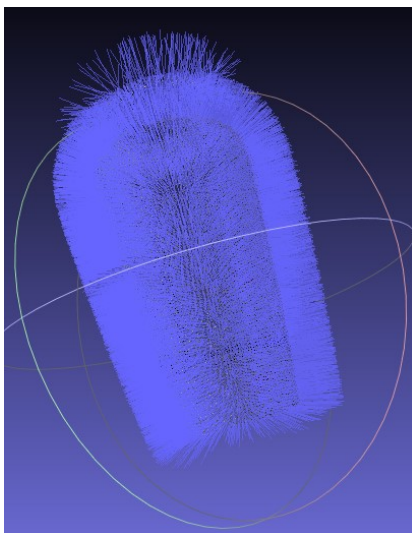
Při skenování vázy s rozestupem bodů bodového mračka 0,005 m bylo pořízeno celkem 6 300 bodů, tedy z každého stanoviška přibližně 2 100 bodů. Tento počet bodů nebyl pro popis hran střepů dostatečně podrobný, proto byl pro další skenování vždy nastaven rozestup bodů 0,002 m. Při skenování vázy s rozestupem bodů 0,002 m dosahoval celkový počet bodů pořízených ze tří stanovišek téměř 21 000 bodů. Při skenování střepů talíře ze dvou stanovišek dosahoval počet bodů mračka každého střepu téměř 10 500 bodů.

2.3.2 Zpracování testovacích dat vázy v programu MeshLab

Naskenovaná data byla pomocí programu Leica Infinity exportována do formátu PTS, který uchovává informace také o barvách naskenovaných mračen bodů. Aby bylo možné data importovat do programu MeshLab, byla data dále konvertována do formátu PLY. Pro tento účel byl použit open source software CloudCompare, který poskytuje sadu základních nástrojů pro ruční úpravy a vykreslování mračen bodů. Program je dostupný pro operační systémy Windows, Linux a Mac OS X. [40] Data ve formátu PLY byla do programu MeshLab importována pomocí funkce *Import Mesh*.

Po importu byly z naskenovaného mračka bodů vázy odfiltrovány nadbytečné body. Pomocí funkce *Select Vertexes* byly identifikovány nadbytečné body, které byly vymazány pomocí funkce *Delete Selected Verticles*. Následovala tvorba trojúhelníkové sítě. Nejprve byly spočteny normály mračka bodů pomocí funkce *Compute normals for point sets*. Tuto funkci nalezneme v záložce *Filters > Point Set*. Následovalo vhodné nastavení hodnoty *Neighbourhood number* v dialogovém okně, která udává počet nejbližších bodů, které budou

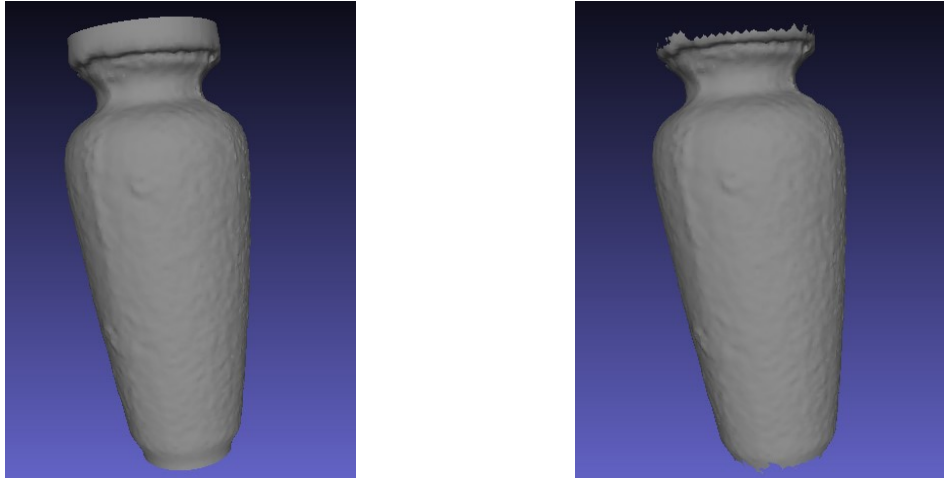
mít společnou normálu. Pro mračno bodů vázy byla určena jako vhodná hodnota 16, neboť se jedná o husté mračno bodů. Následovalo stisknutí tlačítka *Apply*. Pro zobrazení bylo nutné vybrat záložku *Render > Show Normal*. Bylo důležité, aby všechny vypočtené normály směřovaly z vázy ven, jak tomu je na Obr. 14.



Obr. 14: Ukázky vypočtených normál mračna bodů vázy.

Následoval výpočet trojúhelníkové sítě, která definuje povrch objektu. Z nabízených možností rekonstrukcí povrchu byl zvolen Poisson algoritmus (nachází se v záložce *Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction > Screened Poisson Surface Reconstruction*). V novém dialogové okně bylo nutné definovat bližší specifikace jako je *Reconstruction depth*, *Minimum Number of Sample* a *Interpolation Weight* (parametr *Reconstruction depth* byl zvýšen z čísla osm na deset, ostatním parametrům byly ponechány předdefinované hodnoty). Po stisknutí tlačítka *Apply* proběhl algoritmus a byla vytvořena trojúhelníková síť. Dále bylo nutné z vytvořené trojúhelníkové sítě odfiltrovat nadbytečné trojúhelníky. Pro tento účel byla využita funkce *Select Faces in a rectangular region*. Po volbě této funkce následoval ruční výběr trojúhelníků, které byly smazány pomocí funkce *Delete Selected Faces and Verticles*. Tento krok dokumentuje Obr. 15.

Předposledním krokem bylo vyhlazení povrchu (tento krok lze provést před i po potažení modelu texturou). Pro vyhlazení povrchu byla použita funkce *Laplacian smooth*, která se nachází v záložce *Filters > Smoothing, Fairing and Deformation*. V dialogovém okně bylo třeba nastavit *Smoothing Steps*, kde byla nastavena hodnota 3. Po stisknutí *Apply* byla trojúhelníková síť odfiltrována.



Obr. 16: Vytvořená trojúhelníková síť vlevo, vpravo odfiltrovaná síť.

Následovalo potažení modelu texturou. Nejprve byla v záložce *Filters > Texture* zvolena možnost *Parametrization: Trivial Per-Triangle*. V dialogovém okně bylo nutné specifikovat parametr pro rozlišení textury *Texture Dimension* a určit metodu, podle které dojde buď k přizpůsobení stávající trojúhelníkové sítě (*Space-optimizing*) nebo budou trojúhelníky pro texturu stejně velké (*Basic*). Opět byl výběr potvrzen tlačítkem *Apply*. Dalším krokem bylo tzv. obarvení parametrizovaných trojúhelníků, což je zajištěno přenesením atributu barvy z naskenovaného mračna bodů (záložka *Filters > Texture*, funkce *Transfer Vertex Attributes to Texture (between two meshes)*). V dialogovém okně je třeba nastavit zdrojová data (*Source Mesh*) a cílová data (*Target Mesh*), dále je nutné definovat rozměry textury dle potřeby (byly ponechány předdefinované hodnoty) a na závěr je třeba zaškrtnout možnost *Assign Texture*. Výsledný virtuální 3D model je na Obr. 16. Na modelu jsou patrné černé čáry, které jsou pozůstatkem kresby při volbě skenované oblasti. Ten samý problém nastal i při skenování fragmentů sochy. Tento problém byl vyřešen v rámci semestrální práce jiného předmětu během studia.



Obr. 15: Výsledný virtuální model vázy.

3 Sběr dat pomocí stroje Leica MS50 a zpracování pořízených dat v programu MeshLab

Jako první možnost sběru dat bylo zvoleno laserové skenování. Socha Panny Marie Lurdské byla naskenována multistanicí Leica Nova MS50. Pořízená data byla následně zpracována v open source softwaru MeshLab.

3.1 Multistanice Leica Nova MS 50

Multistanice Leica Nova MS50 distribuuje společnost Leica Geosystems HDS, která nachází své zákazníky ve více než 40 zemích světa. Hlavní sídlo společnosti je ve východním Švýcarsku. [39] Multistanice kombinuje moderní měřické technologie do jednoho stroje. Zahrnuje robotickou totální stanici, přesný 3D laserový skener, integrované GNSS a obrazově podporované měření.

Leica Nova MS50 integruje měřené 3D mračno bodů do běžného měřícího procesu. Pořízená data lze prohlížet přímo ve stroji, což usnadňuje a urychluje práce při sběru dat. Multistanice nabízí funkce, které jsou přesné, výkonné a umožňují plnou automatizaci postupů měření. Minimální vzdálenost objektu od stroje při skenování je 1,5 m. S rostoucí frekvencí skenování klesá dosah skeneru. Absolutní polohová přesnost skenování při vzdálenosti do 500 m je 2 mm + 2ppm. [35]



*Obr. 17: Multistanice Leica Nova MS 50.
(Foto: Ing. Martina Kepka Vichrová, Ph.D.).*

3.2 Skenování sochy Madony strojem Leica Nova MS50

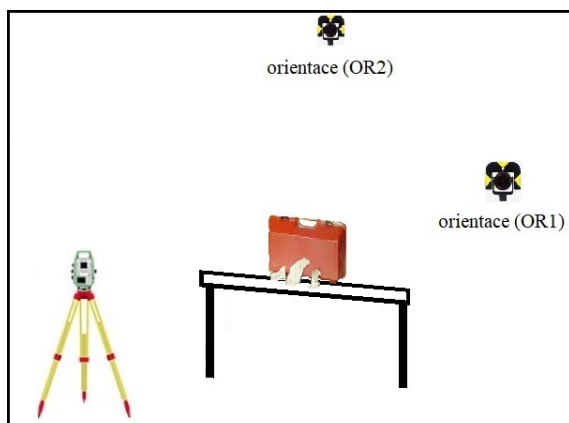
Skenování sochy Panny Marie Lurdské probíhalo v prostorách Muzea jižního Plzeňska v Blovicích ve dvou termínech 14. 3. 2018 a 4. 4. 2018. Vzhledem k omezenému prostoru v místnosti, kde skenování probíhalo, bylo nutné řádně zvážit konfiguraci stanic, orientací a umístění jednotlivých fragmentů sochy při skenování. Pro skenování bylo užito stejné nastavení multistanice, jako je popsáno v kapitole 2.3.1 Testovací sběr dat pomocí laserového skenování.

Před samotným skenováním byla pro každý fragment sochy pořízena fotodokumentace. Ukázka je na Obr. 18. Všechny fragmenty sochy byly skenovány s hustotou bodů v horizontálním i vertikálním směru 0,002 m. Vzhledem k tomu, že vzdálenost skenovaných fragmentů byla menší než 300 m, byla zvolena rychlost 1 000 b/s. Měření probíhalo v místním souřadnicovém systému, přímka byla vymezena dvěma odraznými hranoly Leica.

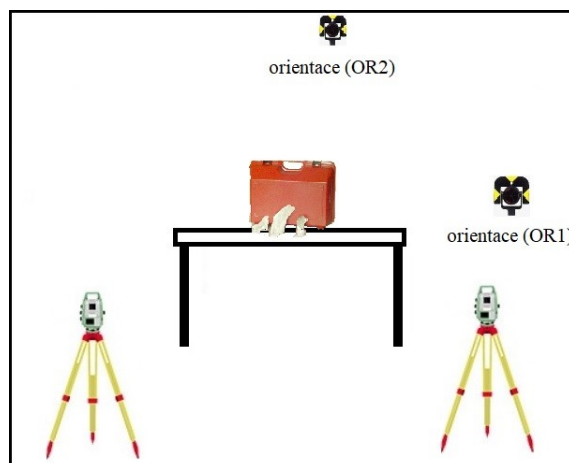


Obr. 18: Fotografie podstavce sochy Madony pořízená před skenováním. (Foto: Ing. Martina Kepka Vichrová, Ph.D.).

Pro měření nejmenších fragmentů byla zvolena konfigurace stanic a orientací dle Obr. 19. Tyto fragmenty byly skenovány pouze z jednoho stanoviska, byly umístěny na stole s bílou deskou a opřeny o červený kufr stroje s hrubším povrchem, který sloužil jako kontrastní pozadí, což usnadnilo práci při zpracování pořízených dat. Pro urychlení sběru dat byly malé střepy skenovány po skupinách v počtu tří až čtyř fragmentů najednou. Celkem bylo takto naskenováno 25 malých fragmentů o velikost přibližně 4 cm. Mračno bodů jednoho fragmentu obsahovalo přibližně 1 000 bodů, celkem bylo pořízeno více jak 30 000 bodů.



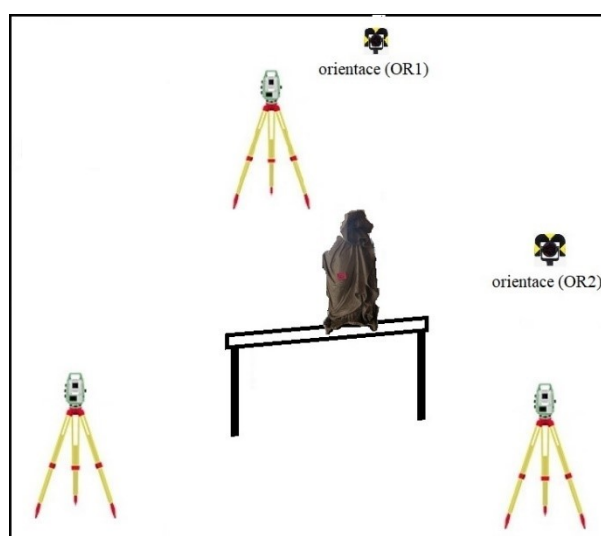
Obr. 19: Konfigurace stanoviška a přímky při měření nejmenších střepeň sochy.



Obr. 20: Konfigurace stanoviška a přímky při měření velkých střepeň sochy.

Následovalo skenování 4 větších fragmentů, z nichž dva tvořily záda sochy a zbývající dva sepnuté ruce Madony. Konfigurace stanovišek a orientace k přímce tvořené dvěma odraznými hranoly je na obr. 20. Větší fragmenty byly vzhledem k jejich členitosti skenovány ze dvou stanovišek, byly opět umístěny na bílý stůl s kontrastním pozadím. Každý fragment byl skenován samostatně. Mračno bodů jednoho fragmentu představujícího části rukou obsahovalo celkem 5 500 bodů, mračna bodů částí zad jsou větší, obsahují přibližně 10 000 bodů.

Části těla, hlavy a podstavy byly skenovány ze tří stanovišek. Konfigurace stanovišek a orientací je na Obr. 21. Orientace k přímce zůstala stejná jako v předchozích případech. Největší mračno bodů bylo pořízeno pro tělo sochy, obsahuje více jak 58 000 bodů, mračno bodů odpovídající podstavě obsahuje více jak 10 000 bodů.



Obr. 21: Konfigurace stanoviška a přímky při měření největších částí sochy.

Vzhledem k tvaru a členitosti bylo nutné fragment hlavy sochy vhodně umístit a zafixovat v prostoru, aby bylo možné pořídit skeny ze tří stanovisek, viz. Obr. 23, na kterém je v podobě červené tečky zachycen též laserový paprsek vysílaný multistanicí Leica Nova MS50 při skenování. Mračno bodů hlavy Madony bylo složeno ze tří skenů, celkový počet bodů mračna byl více jak 33 000.



Obr. 22: Fotografie z průběhu skenování hlavy sochy. (Foto: Ing. Martina Kepka Vichrová, Ph.D.).



Obr. 23: Fixace hlavy sochy Madony v prostoru. (Foto: Ing. Martina Kepka Vichrová, Ph.D.).

3.3 Zpracování dat z laserového skeneru v open source softwaru MeshLab

Všechna data pořízená multistanicí Leica Nova MS50 byla zpracována v open source softwaru MeshLab.

3.3.1 Program MeshLab

MeshLab je open source software pro zpracování a editaci 3D trojúhelníkových sítí. Poskytuje řadu nástrojů vhodných pro editaci dat, čištění, kontrolu, vykreslování a konverzi různých typů sítí. Nabízí funkce pro zpracování dat pořízených zařízeními pro 3D digitalizaci a pro přípravu modelů k 3D tisku. Program MeshLab disponuje i různými filtry, vhodnými pro odstranění duplicitních vrcholů i ploch, nereferenčních vrcholů a nulových ploch. Nabízí několik možností rekonstrukcí povrchů z mračen bodů, obsahuje různé typy vyhlazovacích filtrů a nástrojů pro analýzu a vizualizaci vytvořených virtuálních 3D modelů.

MeshLab původně vznikl jako kurz na univerzitě v Pise na konci roku 2005. Jeho další vývoj zajistilo výzkumné centrum ISTI-CNR. Je určen pro většinu platforem jako je

Windows, Linux či Mac OS X, k dispozici je i verze s omezenou funkcionalitou pro iOS nebo Android. Byla též vyvinuta aplikace v jazyce JavaScript, MeshLabJS. Program MeshLab podporuje formáty PLY, STL, OFF, OBJ, VRML nebo např. COLLADA a podléhá požadavkům GNU General Public License.

Program MeshLab je používán při řešení různých problémů v nejrůznějších odvětvích jako je mikrobiologie, kulturní dědictví, rekonstrukce povrchu, paleontologie, rychlé prototypování v ortopedické chirurgii, ortodoncie nebo při výrobě stolních počítačů. [22]

3.3.2 Tvorba virtuálních 3D modelů jednotlivých fragmentů sochy v programu MeshLab

Nejprve bylo nutné v programu Leica Infinity spojit pořízená mračna bodů jednotlivých střepů a ty vyexportovat ve formátu PTS. Poté byla data v programu CloudCompare převedena do formátu PLY, který byl importován do programu MeshLab. Virtuální 3D modely jednotlivých fragmentů sochy byly vytvořeny postupem, který je popsán v kapitole 2.3.2 Zpracování testovacích dat vázy v programu MeshLab pouze s tím rozdílem, že u některých algoritmů byly nastaveny jiné parametry.

Jako první byl vytvořen virtuální 3D model těla sochy. Z mračna bodů tohoto fragmentu byly odfiltrovány nadbytečné body, které byly identifikovány pomocí funkce *Select Vertexes* a poté odstraněny funkcí *Delete Selected Vertices*.

Následoval výpočet normál pomocí funkce *Compute normals for point sets*, kde byla hodnota pro *Neighbour num* nastavena na 16. Po výpočtu byly normály zobrazeny užitím funkce *Show Normal*. Dalším krokem byl výpočet trojúhelníkové sítě, definující povrch objektu. Byl zvolen Poisson algoritmus, jehož principem je vytvoření nepropustné trojúhelníkové sítě, tedy sítě, která neobsahuje žádné díry. Tento algoritmus uvažuje celou množinu bodů najednou, neměl by tedy být ovlivněn body, které jsou nerovnoměrně rozloženy nebo které vznikly jako šum. Rekonstrukce pomocí Poisson algoritmu se dle [41] sestává ze 4 kroků:

1. výpočet normál,
2. aproximace gradientu indikátorové funkce využitím normál,
3. odvození indikátorové funkce z gradientu,
4. vykreslení požadované polygonální sítě.

Tento algoritmus se nalézá ve funkci *Screened Poisson Surface Reconstruction*, kde byla upravena hodnota *Reconstruction depth* na 10, ostatním parametrům byly nechány hodnoty předdefinované. Po spuštění algoritmu byla vytvořena trojúhelníková síť, ze které byly přebytečné trojúhelníky vzniklé při rekonstrukci odfiltrovány pomocí funkce *Delete Selected Faces and Vertices*. Následovalo potažení modelu texturou. Byla spuštěna funkce *Parametrization: Trivial Per-Triangle*, parametr *Texture Dimension* byl upraven na hodnotu 1024, zvolena byla metoda *Space-optimizing*. Finálním krokem bylo obarvení parametrizovaných trojúhelníků přenesením atributu barvy z naskenovaného mračna bodů použitím funkce *Transfer Vertex Attributes to Texture (between two meshes)*. Zde byly nastaveny parametry, které byly již popsány v kapitole [2.3.2 Zpracování testovacích dat vázy v programu MeshLab](#). Výsledný virtuální 3D model těla sochy je na Obr. 24. Na tomto obrázku je vidět, že výsledný virtuální 3D model vystihuje tvar a velikost fragmentu, avšak ne všechny záhyby jsou dobře vystiženy.

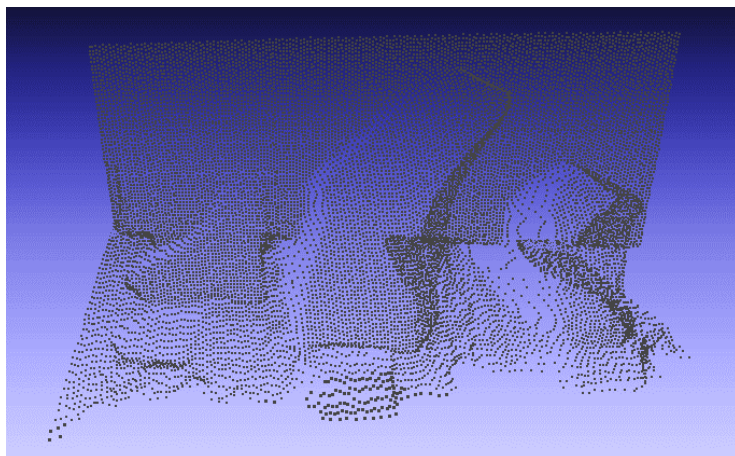


Obr. 24: Virtuální 3D model střepu těla vlevo bez textury, vpravo s texturou.

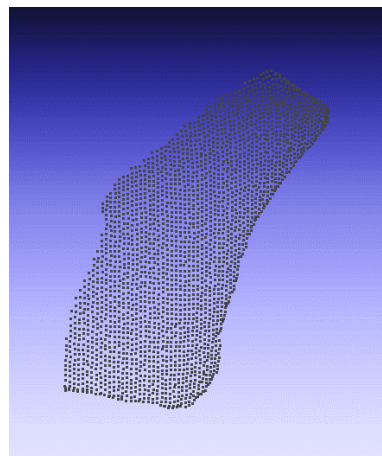
Stejným postupem byly vytvořeny virtuální 3D modely i zbývajících částí sochy (podstava, ruce, záda1, záda2, prsty a hlava), případné drobné odchylky byly pouze v nastavení při výpočtu normál a při Poisson algoritmu (pro větší fragmenty byla nastavena hodnota *Neighbour num* u výpočtu normál na 16, u Poisson algoritmu byla hodnota *Reconstruction depth* nastavena na 10).

Dle postupu popsaného výše byly vytvořeny virtuální 3D modely zbývajících 25 fragmentů. Hodnota *Neighbour num* byla nastavena vždy tak, aby vypočtené normály vždy

směřovaly stejným směrem, tj. ven. Jednotlivé kroky při tvorbě virtuálního 3D modelu v programu MeshLab jsou zachyceny na Obr 25.



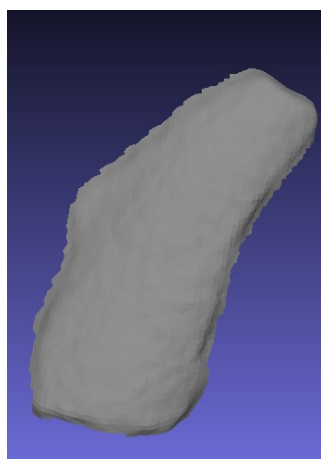
Originální skeny fragmentů č. 4 až 6.



Mračno bodů fragmentu č. 5 po filtraci.



Vypočtené normály fragmentu č.5.



Polygonální síť vytvořená funkcí Screened Poisson Surface Reconstruction.



Výsledný virtuální 3D model potažený texturou.

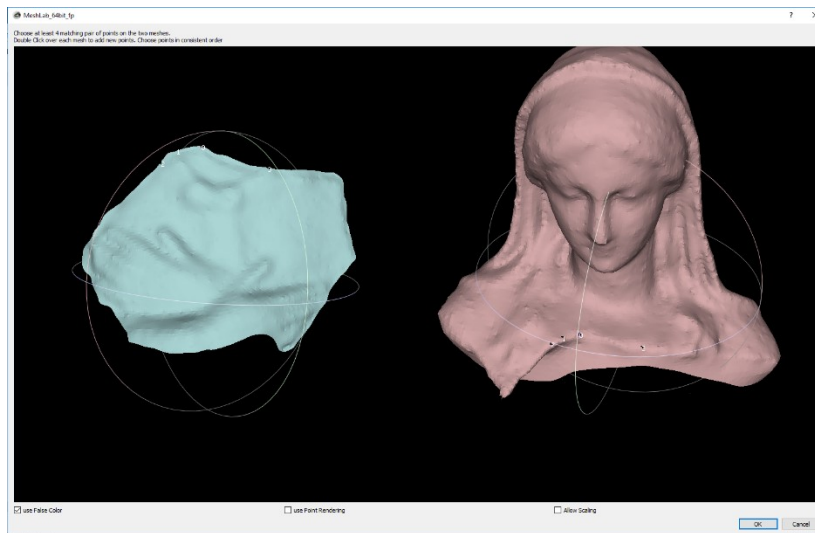
Obr. 25: Postup prací při tvorbě virtuálního 3D modelu fragmentu č. 5 v programu MeshLab.

3.3.3 Tvorba virtuálního 3D modelu celé sochy v programu MeshLab

Virtuální 3D modely jednotlivých fragmentů sochy byly v programu MeshLab spojeny pomocí funkce *Align*, která je vhodná pro spojování navzájem překrývajících se virtuálních 3D modelů. Virtuální 3D modely fragmentů sochy se bohužel nepřekrývaly, měly pouze společné hrany (při skenování nebylo možné k sobě sesadit každé dva odpovídající si fragmenty a ty naskenovat). Funkce *Align* bude v tomto případě do jisté míry otestována.

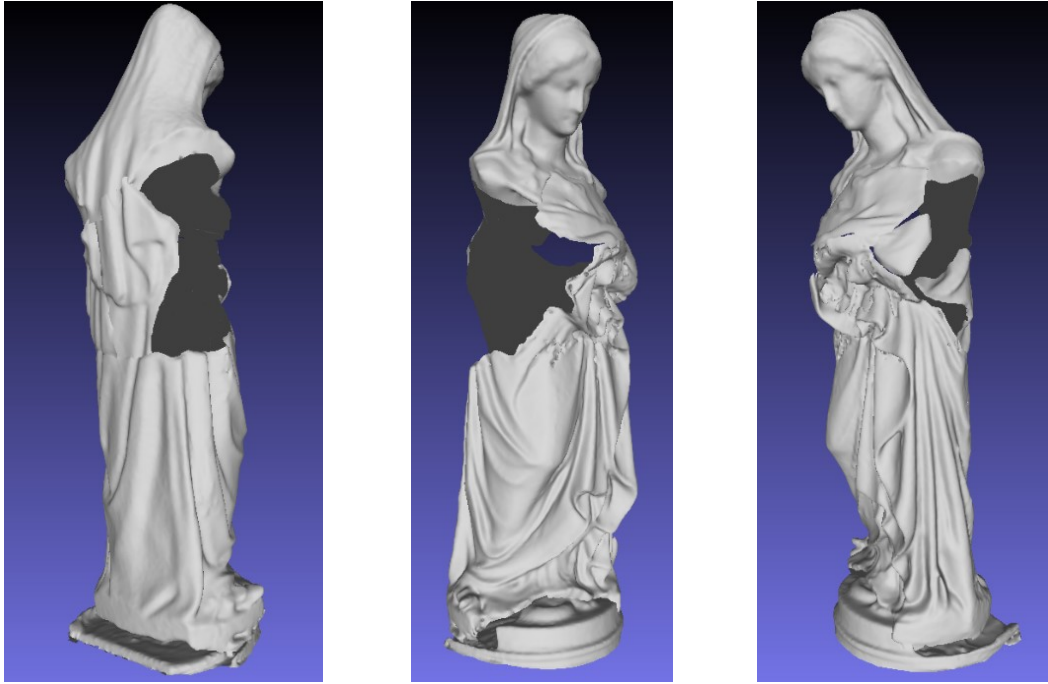
Již během skenování bylo zřejmé, že 7 fragmentů sochy Madony bude možné sesadit, virtuální 3D modely těchto fragmentů tedy byly spojeny jako první. Pokud to bude možné, modely zbývajících fragmentů pak budou do modelu postupně doplněny.

Po importu modelů sedmi střepů do programu MeshLab byla zvolena funkce *Align*. V dialogovém okně funkce byl uveden seznam všech nahraných modelů. Bylo nutné vybrat model, jehož umístění bylo „pevné“, ostatní modely pak budou doplněny, pomocí funkce *Glue Mesh*. V tomto případě byl jako „pevný“ nastaven model **hlava**, pro model **ruce** bylo zvoleno nastavení *Point Based Glueing*. Následně se zobrazilo dialogové okno s oběma modely, kde bylo možné pohybovat s každým modelem. Dvojklikem byly zvoleny 4 páry identických bodů a po potvrzení proběhl výpočet. Ukázka dialogového okna je na Obr. 26.



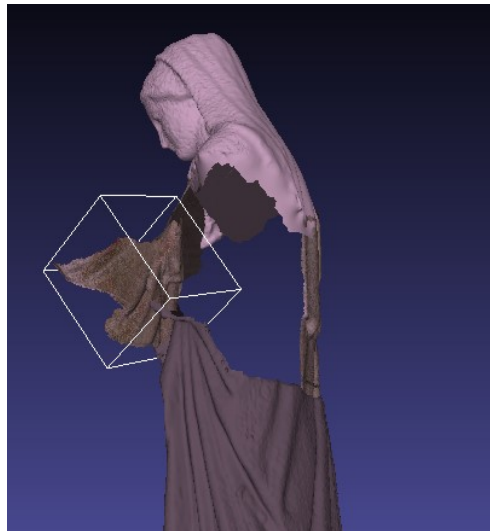
Obr. 26: Dialogové okno funkce *Point Based Glueing* v programu MeshLab.

Dále byla zvolena možnost *Glue Here Visible Meshes*, která zamezila pohybování modelů v dialogovém okně. Pokud bychom tuto možnost nenastavili, již spojené virtuální 3D modely fragmentů by se rozpojily. Další postup byl již stejný, spojené modely **hlava** a **ruce** byly pomocí *Set as Base Mesh* nastaveny jako základní, byl vybrán model dalšího fragmentu pro připojení (**telo**), zvolena funkce *Point Based Glueing* pro zobrazení dialogového okna, ve kterém byly identifikovány páry identických bodů již spojeného modelu **hlava** a **ruce** a modelu **telo**. Tentokrát bylo vybráno 5 páru identických bodů. Po potvrzení byl vypočten a zobrazen výsledek. Dále byla zvolena možnost *Glue Here Visible Meshes*, aby se již spojené modely nepohybovaly. Takto byly do modelu zakomponovány všechny zbývající modely fragmentů: **zada2**, **zada1**, **prsty** a **podstava**. Složený virtuální 3D model bez textury je na Obr. 26. V této fázi byly na sestaveném modelu identifikovány nedostatky (Jednotlivé modely se částečně překrývají – např. **hlava** a **zada2**, či na sebe vůbec nedoléhají – např. **zada1**).



Obr. 27: Virtuální 3D model sochy Madony vytvořený v programu MeshLab.

Snaha o odstranění těchto nedostatků z výsledného modelu volbou většího počtu identických bodů však měla zcela opačný výsledek. Např. po výběru modelu s názvem **zada1**, byla zvolena možnost *Unglue Here Mesh*, aby bylo možné s tímto modelem pohybovat. Poté byla opět užita funkce *Point Based Glueing*, ve které bylo zvoleno 12 párů identických bodů. Po výpočtu se model **zada1** přetočil (viz Obr. 28). Totéž nastalo i při úpravě umístění dalších modelů fragmentů.



Obr. 28: Ukázka přetočení virtuálního 3D modelu „zada1“ po vybrání zpřesňujících identických bodů.

V programu MeshLab tedy nelze přesně spojit jednotlivé virtuální modely fragmentů sochy Madony.

4 Sběr dat pomocí skeneru Artec a zpracování v programu Artec Studio

Pro druhý způsob pořízení skenů sochy Panny Marie Lurdské byly použity 3D skenery pracující na principu strukturovaného světla od společnosti Artec 3D zapůjčené Výzkumným programem centra NTIS (Kybernetické systémy řízení, identifikace, inteligentního rozhodování a komunikace, konkrétně projektem Řídicí systémy strojů a procesů). Data pořízená těmito skenery byla zpracována v komerčním softwaru Artec Studio.

4.1 Skener Artec 3D

Firma Artec 3D patří mezi světové lídry v oblasti ručních 3D skenerů. Byla založena v roce 2007. První skenery uvedla na trh v roce 2008. Od té doby je každý rok vydán nový software a každé dva roky uveden na trh nový skener. Hlavní sídlo společnosti je v Lucembursku, další pobočky se nachází v Kalifornii a v Moskvě.

Společnost Artec 3D nabízí několik typů 3D skenerů. Pro tuto diplomovou práci byly použity dva skenery, Artec Eva a Artec Space Spider.

Skener Artec Eva je ruční 3D skener pracující na principu strukturovaného světla, který je schopný vytvořit texturovaný a velmi přesný virtuální 3D model středně velkých objektů. Skenuje velmi rychle ve vysokém rozlišení. Dokáže zachytit téměř všechny druhy povrchů včetně černých a lesklých povrchů. Skener Artec Eva je používán v nejrůznějších oborech jako je automobilový průmysl, lékařství, letectví či digitalizace a ochrana kulturního dědictví. Pomocí skeneru Artec Eva byl skenován i Barack Obama, byl tak vytvořen první 3D portrét amerického prezidenta.



Obr. 29: Ruční skenery Artec Eva a Artec Space Spider. [36]

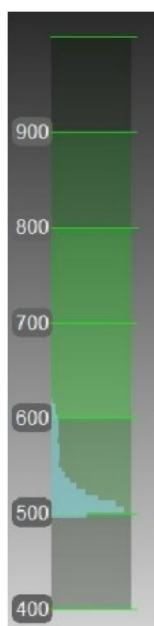
Ruční skener Artec Space Spider má vysoké rozlišení a je založený na technologii modrého světla. Je používán pro skenování malých předmětů nebo složitých detailů u velkých objektů, kde je třeba skenování s vysokým rozlišením, např. lisovací díly, desky plošných spojů, klíče, mince nebo lidské orgány jako je např. ucho. Tento skener byl původně vyvinut pro mezinárodní kosmickou stanici, proto je vybaven výkonnou teplotní stabilizací a kvalitní elektronikou. [36]

4.2 Skenování sochy Madony skenery Artec 3D

Pro pořízení skenování všech fragmentů sochy Madony byly použity dva ruční skenery společnosti Artec 3D (Artec Eva a Artec Space Spider), výkonný notebook (procesor Intel Core i7-7700HQ, 16 GB RAM a grafická karta NVIDIA GeForce GTX Ti) se softwarem Artec Studio.

Skenování 3D skenerem pracujícím na principu strukturovaného světla probíhalo opět v prostorách Muzea jižního Plzeňska v Blovicích dne 27. 3. 2018 v dopoledních hodinách. Prvním krokem byla příprava ručního 3D skeneru. Nejprve byl skener zapojen do zásuvky a přes USB kabel propojen s počítačem. Dalším krokem bylo spuštění programu Artec Studio na notebooku a založení nového projektu, do kterého byly pořízené skeny ukládány. Po zvolení možnosti *Scan* v programu Artec Studio bylo nutné v dialogovém okně zvolit *Geometry+Texture* (geometrie a textura), tj. chceme mít zaznamenanou jak geometrii, tak texturu objektu. Bylo třeba provést kontrolu, zda je ruční skener připojen do programu. Poté byla nastavena rychlost skenování (počet snímků za sekundu). Pro skener Artec Eva byla nastavena rychlost 15 snímků za sekundu a pro skener Artec Space Spider 7 snímků za sekundu. Další nastavení se týkalo rychlosti sběru dat. Skener Artec Eva může dosáhnout rychlosti až 2 000 000 b/s, zatímco skener Artec Space Spider dosahuje rychlosti pouze poloviční. U obou skenerů byla zvolena maximální rychlost skenování. Je důležité poznamenat, že ne každý snímek byl pořizován s texturou, pořízená data by pak byla příliš velká. V nastavení *Texture recording mode* lze nastavit automatický záznam textury (*Automatic texture recording*) nebo přímo stanovit, kolikátý snímek bude pořízen i s texturou (*Record texture every x th frame*). Dále lze nastavit citlivost skeneru nebo upravit jas pro textury.

Po kontrole nastavených hodnot bylo zahájeno skenování. Notebook i jednotlivé skenované fragmenty sochy byly umístěny na stole. Při vlastním skenování ručními skenery Artec potřebuje operátor průběžně sledovat obrazovku notebooku, aby mohl kontrolovat a korigovat pomocí zelené grafické lišty správnou vzdálenost skeneru od objektu (Obr. 30). Ideální vzdálenost skeneru Artec Eva od objektu je v rozmezí 40–100 cm, u skeneru Artec Space Spider je tato vzdálenost mnohem menší, 20–30 cm. Pořízená data jsou ihned vidět na obrazovce počítače v programu Artec Studio, je tedy zřejmé, jaká část objektu ještě nebyla naskenována.



Obr. 30: Grafická lišta, která ukazuje správnou vzdálenost skeneru Artec Eva od skenovaného objektu.



Obr. 31: Fotografie z průběhu skenování těla sochy skenerem Artec Space Spider.

Prvním skenovaným fragmentem byla hlava sochy, ležící týlem na desce stolu. Pro skenování hlavy sochy byl vybrán ruční skener Artec Eva, který je vhodný pro skenování větších objektů, protože má větší plochu záběru. Nejen při skenování bylo nutné, aby pohyb ručním skenerem byl plynulý a ne příliš rychlý, neboť Artec Studio pak není schopné zarovnat po sobě jdoucí snímky a skenování se zastaví. Program Artec Studio zobrazí chybovou hlášku *Tracking is lost*. Tato situace nastala i při skenování hlavy sochy, proto je počet skenů hlavy větší, než je nezbytně nutné. Po naskenování přední části, byla hlava přetočena a skenování pokračovalo. Bylo nutné, aby hlava byla naskenována s překryvy, aby bylo možné pořízené skeny spojit (program Artec Studio umožňuje spojení několika skenů). Bylo pořízeno 7 skenů hlavy Madony, jejichž celková datová velikost činí téměř 6 GB.

Po naskenování hlavy proběhlo skenování těla sochy. Vzhledem k velikosti tohoto střepu byl opět použit skener Artec Eva. Byly pořízeny dva skeny těla s dostatečným překryvem. Datová velikost jednoho skenu byla téměř 2 GB. Ukázka skenování těla sochy je na Obr. 30. Pro skenování menších střepů byl zvolen skener Artec Space Spider. Nejprve byla skenována podstava sochy, byly pořízeny dva skeny, jejichž celková datová velikost přesahuje 2 GB. Následovalo skenování dvou střepů zad a dvou střepů, které tvořily ruce Madony. Každý z těchto střepů byl naskenován dvakrát, datová velikost jednotlivých skenů byla přibližně 1 GB. Nakonec byly pořízeny skeny malých střepů, kterých bylo celkem 25, 15 z nich bylo skenováno dvakrát, zbývající jednou. Celkově skenování trvalo 4,5 hodiny, bylo pořízeno 59 skenů včetně textury. Ukázka z průběhu skenování je na Obr. 32.



Obr. 32: Fotografie z průběhu skenování skenerem Artec Space Spider.

4.3 Zpracování dat v programu Artec Studio

Data pořízená 3D skenery pracující na principu strukturovaného světla Artec byla zpracována v programu téže firmy, Artec Studio. Jedná se o komerční program.

4.3.1 Informace o programu Artec Studio

Firma Artec 3D vyrábí nejen ruční 3D skenery, ale dodává též softwary, které vyhovují potřebám zkušených uživatelů i začátečníků. Kromě programu Artec Studio a Artec ScanApp, vyvíjí firma 3D softwary jako je Artec SDK, což je sada nástrojů a knihoven umožňující vytvoření vlastní aplikace na skenování. Firma Artec 3D spolupracuje s firmou SOLIDWORKS, která nabízí CAD produkty. K dalším produktům patří skupina Geomagic (Geomagic Design X, Geomagic Control X, Geomagic Wrap).

Program Artec Studio je software vhodný pro tvorbu 3D modelů fyzických objektů z dat, která byla pořízena skenery Artec. Program umožňuje provádět zpracování dat,

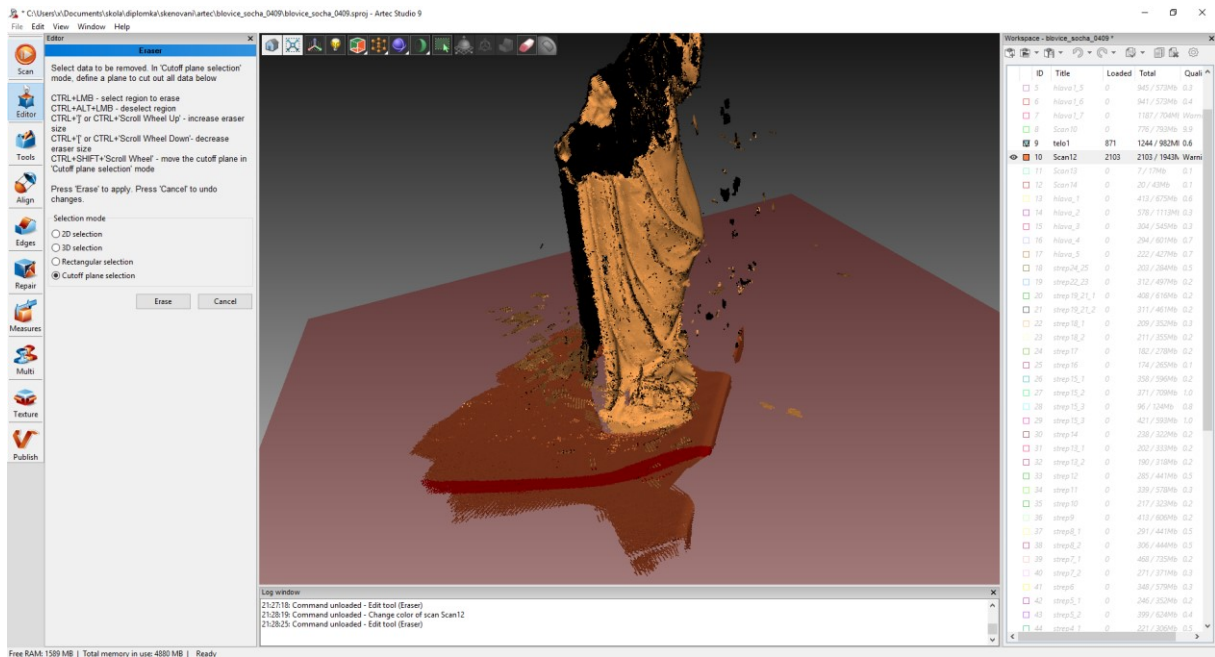
optimalizaci teselace sítí a provedení dalších operací nutných pro získání kvalitního virtuálního 3D modelu. Výsledný model lze importovat i do jiných softwarů určených pro 3D modelování. Artec Studio nabízí též „Autopilota“, který vede uživatele od 3D skenování až po zpracování dat. Firma Artec 3D nabízí dvě verze programu Artec Studio, PROFESSIONAL A ULTIMATE. Obě verze jsou určeny pro zpracování dat pořízených 3D skenery Artec jako je Artec Leo, Eva nebo Space Spider. [36]

4.3.2 Tvorba virtuálních 3D modelů fragmentů sochy v programu Artec Studio

Vzhledem k tomu, že při skenování 3D skenerem pracující na principu strukturovaného světla, je skener propojený s počítačem a musí být spuštěn software Artec Studio, není nutný žádný import pořízených dat do programu, kde bude probíhat zpracování dat. Pro zpracování pořízených dat skenerem od firmy Artec 3D je nutné mít výkonný počítač s velkou operační pamětí a kvalitní grafickou kartou. Zpracování dat probíhalo na notebooku s procesorem Intel Core i7-2670QM, grafickou kartou NVIDIA GeForce GT 540M a 8 GB RAM.

Zpracování pořízených dat proběhlo v programu Artec Studio 9. V programu stačilo přepnout z režimu skenovací pracovní plochy *Scan* do režimu editovací pracovní plochy *Editor*. V pracovní liště *Workspace* byly zobrazeny všechny pořízené skeny (byl otevřený celý projekt, který vznikl skenováním). Vzhledem k tomu, že velikost všech skenů přesahovala 16 GB, bylo možné pracovat pouze s několika vybranými skeny, tj. byly načítány vždy pouze skeny jednoho fragmentu sochy (pravým kliknutím myši na zvolený sken a volbou *Load scans*).

Nejprve byly zpracovány dva skeny těla sochy. Pro lepší zobrazení bodů byla v *Render Mode* zvolena možnost *Points*. Z každého pořízeného skenu hlavy byly odfiltrovány nadbytečné body využitím funkce *Eraser*, která se nachází v nástroji *Editor*. Označení přebytečných bodů probíhalo stisknutím *Ctrl* + *levé tlačítko myši*. Funkce *Eraser* nabízí několik možností výběru: *2D selection*, *3D selection*, *Rectangular selection*, *Cutoff plan selection*. Pro odfiltrování nadbytečných bodů ve spodní části skenu těla, byla použita možnost *Cutoff plan*, pomocí které byla označena část bodů a následně spočtena rovina, ve které se nacházely vybrané body. Výsledkem bylo označení všech bodů ve spočtené rovině (Obr. 33). Všechny takto vybrané body byly odstraněny volbou *Erase*. Zbývající body byly odstraněny pomocí druhé možnosti (funkce *Eraser*, *2D selection*). Opět byly označeny body stisknutím *CTRL* + *levým tlačítkem myši* a následným potvrzením *Erase* byly odstraněny.



Obr. 33: Ukázka vybrání přebytečných bodů pomocí funkce Cutoff plan na skenu těla.

Po odstranění nadbytečných bodů bylo nutné skeny spojit. K tomuto účelu byla využita funkce *Align*. Po zvolení této funkce bylo zobrazeno dialogové okno, ve kterém byly označeny oba skeny, které bylo třeba spojit. Vzhledem k tomu, že oba skeny těla byly pořízeny s velkým překryvem, bylo možné skeny spojit užitím funkce *I'm feeling lucky!* (*auto-alignment*). Následně byly zobrazeny spojené skeny. Pokud bylo spojení vyhovující, stačilo pak potvrdit stisknutím *Apply*.

Dalším krokem při tvorbě virtuálního 3D modelu fragmentů byla registrace. Ve funkci *Tools* bylo k dispozici několik možností registrací: *Rough Serial Registration* (předběžné zarovnání snímku ve fázi skenování), *Fine Serial Registration* (přesnější zarovnání snímku pomocí relativního umístění sousedních snímků) a *Global Registration* (zarovná všechny snímky do jednoho souřadnicového systému). Jako vhodná registrace byla zvolena *Global Registration*, kde byl zvolen algoritmus registrace textury a geometrie (*Texture_and_Geometry*) a ostatním parametrům byly ponechány defaultní hodnoty. Potvrzením *Apply* byla spuštěna registrace. Vzhledem k velikosti spojovaných skenů (každý měl velikost téměř 1 GB), probíhala registrace 2 hodiny.

Po registraci následovala tzv. fúze (*Fusion*), tj. proces vytvoření polygonální 3D sítě. V dialogovém okně *Tools* bylo k dispozici několik možností fúze: *Fast Fusion*, *Smooth Fusion* a *Sharp Fusion*. *Fast Fusion* poskytuje rychlé výsledky, *Smooth Fusion* je vhodná pro zpracování dat, která vznikla při skenování lidského těla, protože dokáže kompenzovat drobné pohyby. Jako nejvhodnější byla zvolena *Sharp Fusion*, která dokonale rekonstruuje

jemné prvky. Všechny defaultní hodnoty byly ponechány, následovalo potvrzení tlačítkem *Apply*. Fúze byla oproti registraci mnohem rychlejší, u registrovaných skenů těla proběhla za několik málo minut. Po dokončení fúze byl vytvořen virtuální 3D model těla sochy.

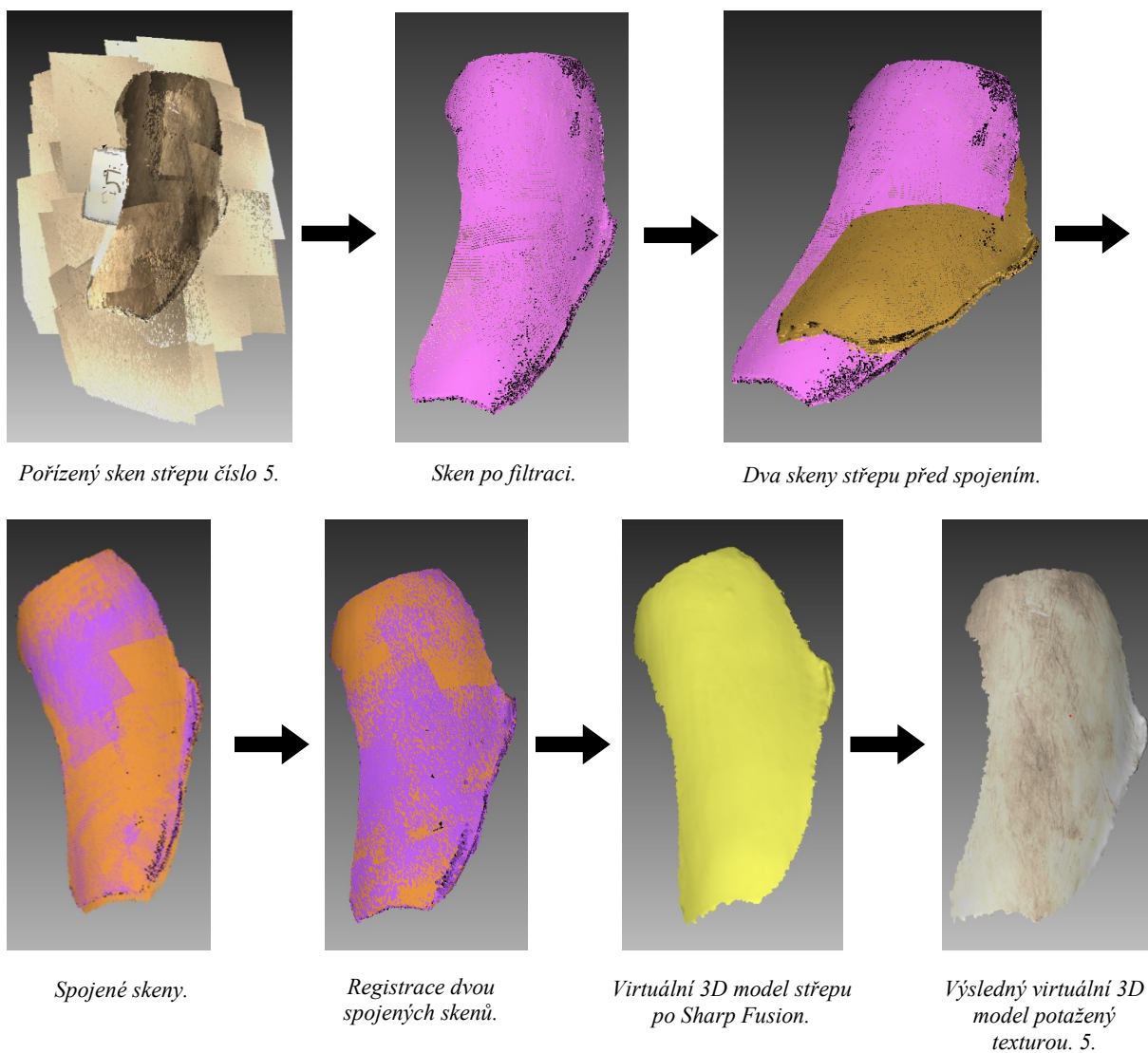
Posledním krokem bylo potažení 3D modelu těla sochy texturou pomocí funkce *Texture*. V dialogovém okně *Texture* byl zvolen model, který bude potažen texturou, tedy nově vzniklý virtuální 3D model těla sochy. Dále bylo nutné určit, ze kterých skenů bude vytvořena textura, v tomto případě se jednalo o dva skeny těla sochy. Dále bylo nutné zvolit *Generate triangles map*. Tato metoda rasterizovala trojúhelníkovou síť. Na závěr stačilo potvrdit stisknutím *Apply*. Tvorba textury trvala přibližně stejnou dobu jako fúze. Po výpočtu textury byla v dialogovém okně zobrazena možnost nastavení textury: *Britness* (jas), *Saturation* (saturace), *Hue* (odstín), *Contrast* (kontrast) a *Gamma correction* (gama korekce). Po nastavení všech uvedených parametrů tak, aby textura co nejvíce odpovídala podobě fragmentu ve skutečnosti, stačilo stisknout *Apply*. Na Obr. 34 je zobrazen virtuální 3D model těla bez textury (vlevo) i s texturou (vpravo).



Obr. 34: Virtuální 3D model střepu těla vlevo bez textury, vpravo s texturou.

Stejným způsobem jako byl vytvořen virtuální 3D model těla, byly vytvořeny i modely ostatních fragmentů. Ze všech pořízených skenů byly odfiltrovány nadbytečné body, následovalo spojení odpovídajících skenů. Hlava sochy Panny Marie Lurdské byla spojena z nejvíce skenů, ze sedmi. Zbývající části sochy (dva fragmenty zad, ruce, prsty, podstava a 15 menších střepů) byly spojeny pouze ze dvou skenů, pro 10 nejmenších fragmentů byl pořízen vždy pouze jeden sken. Dalším krokem byla registrace. Kromě zpracování fragmentu těla trvala registrace dvě hodiny u skenů hlavy. U ostatních fragmentů trval proces registrace maximálně 30 minut. Předposledním krokem byla fúze, která u všech střepů trvala

pouze několik minut. Na závěr byla všem virtuálním 3D modelům přiřazena textura. Všechny vytvořené virtuální 3D modely byly exportovány ve formátu OBJ. Na Obr. 35 je dokumentován celý postup tvorby virtuálního 3D modelu fragmentu č. 5 v softwaru Artec Studio 9.



Obr. 35: Fáze procesu tvorby virtuálního 3D modelu fragmentu č. 5 sochy Panny Marie Lurdské v programu Artec Studio.

4.4 Spojení jednotlivých částí sochy

Složení virtuálních 3D modelů jednotlivých fragmentů sochy bylo provedeno v programu Artec Studio.

Nejprve byl v programu Artec Studio založen nový projekt, do kterého byly importovány všechny vytvořené virtuální 3D modely jednotlivých fragmentů sochy i s texturou ve formátu OBJ. Pro snazší manipulaci a snížení náročnosti výpočtu byla

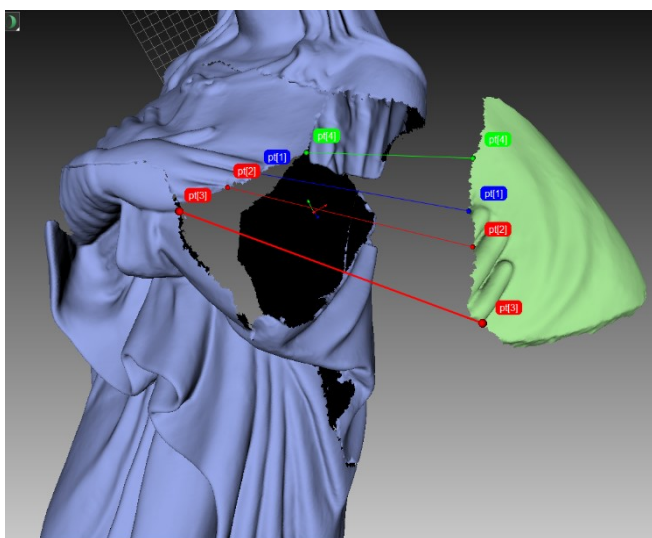
zvolena možnost zobrazení *Quality* v nástroji *Color*, která zobrazí všechny virtuální 3D modely fragmentů stejnou jednolitou barvou.

Již při skenování bylo zřejmé umístění sedmi největších fragmentů sochy Madony. Jejich umístění bylo fyzicky testováno během skenování fragmentů sochy, zkoušením, zda na sebe jednotlivé fragmenty navazují. Následovala volba funkce *Align* v programu Artec Studio. Po zobrazení dialogového okna bylo nutné vybrat *Rigid*, protože se jednalo o rigidní (pevné) artefakty. Ve funkci *Align* bylo možné mít zobrazené pouze dva neregistrované virtuální 3D modely současně. Jako první proběhlo spojení virtuálního 3D modelu **hlavy** a virtuálního 3D modelu s názvem **ruce2**. Nejprve bylo nutné vybrat v dialogovém okně *Align* možnost *New pair*. Poté bylo třeba označit identické body. Pro přesné ukotvení těchto dvou virtuálních 3D modelů fragmentů bylo zvoleno celkem 5 párů identických bodů. Poté byla zvolena funkce *Align markers*, tím byl neregistrovaný virtuální 3D model transformován na registrovaný. Kliknutím na *New pair*, označením dalších identických bodů a vybráním funkce *Align markers*, bylo spojení dvou virtuálních 3D modelů zpřesněno. Pokud je spojení uspokojivé, stačí kliknout pravým tlačítkem myši na název virtuálního 3D modelu a zvolit *Mark as registered*. Tím bude virtuální 3D model pevně zakotven na stávajícím místě.

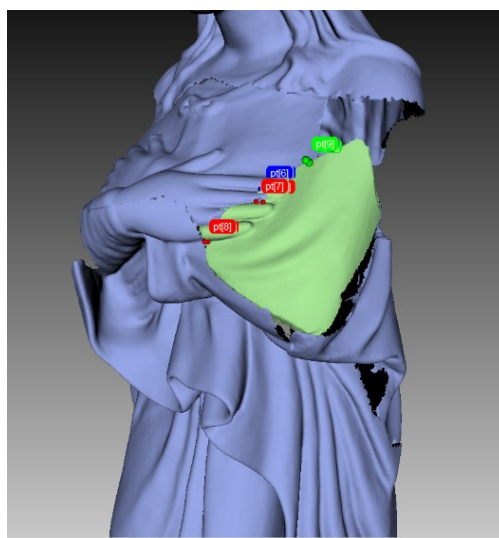
K takto registrovaným virtuálním 3D modelům bylo možné připojit další virtuální 3D model. Stejným způsobem byl připojen virtuální 3D model s názvem **zada1**. Pro spojení stačilo vybrat tři páry identických bodů a virtuální 3D model registrovat. Následovalo připojení největšího virtuálního 3D modelu fragmentu těla s názvem **telo**. Byly nalezeny čtyři páry identických bodů na virtuálním 3D modelu **telo** a **zada1** a pět párů identických bodů na virtuálních 3D modelech **ruce2** a **telo**. Po tomto připojení a registraci virtuálního 3D modelu **zada1** byl vybrán pro spojení druhý virtuální 3D model zad sochy, **zada2**. Nejprve byly zvoleny identické body na virtuálních 3D modelech **zada2** a **telo**. Tímto způsobem bylo otestováno, zda jsou doposud všechny registrované virtuální 3D modely správně spojeny. Došlo k malým odchylkám v návaznosti jednotlivých virtuálních modelů fragmentů. Proto byly některé modely odregistrovány pomocí kliknutí pravým tlačítkem myši na název virtuálního 3D modelu a zvolením možnosti *Unmark as registered*. Týkalo se to virtuálních 3D modelů **hlava**, **zada1** a **ruce2**. Došlo tedy k opakování celého postupu. Nejdříve byly spojeny virtuální 3D modely **telo** a **zada2**, volbou šesti si odpovídajících párů identických bodů. Poté byl k těmto registrovaným virtuálním 3D modelům připojen virtuální 3D model **ruce2** (pět párů identických bodů s virtuální 3D modelem **telo**) a **hlava** (pět párů

identických bodů s virtuálním 3D modelem **ruce2**). Doplněním virtuálního 3D modelu **zada1** bylo otestováno, zda jsou virtuální 3D modely jednotlivých fragmentů spojené správně. Test byl úspěšnější než v předchozím případě, odchylky jednotlivých virtuálních 3D modelů střepů byly menší.

Následovalo připojení virtuálního 3D modelu s názvem **ruce1**. Tento virtuální 3D model měl společné hrany se třemi již registrovanými virtuálními 3D modely: **ruce2**, **telo** a **zada2**. Pro spojení virtuálního 3D modelu **ruce1** s modelem **ruce2** byly zvoleny čtyři páry identických bodů. Ukázka začlenění virtuálního 3D modelu **ruce1** do složeného virtuálního 3D modelu je na Obr. 36 a Obr. 37. Dále byla opakovaně testována správnost spojení modelů jednotlivých fragmentů. Protože virtuální 3D modely fragmentů **ruce1** a **ruce2** nenavazovaly dostatečně správně, musel být celý proces spojování znovu opakován. Nejdříve byl opět registrován virtuální 3D model **telo**, poté byl k němu připojen virtuální 3D model **zada2**, **zada1**, **ruce1** a **hlava**.



Obr. 36: Ukázka označení bodů na modelech rukou (**ruce1** a **ruce2**).



Obr. 37: Začlenění modelu **ruce1** do složeného modelu.

Zapojením virtuálního 3D modelu fragmentu **ruce2** byl proveden test, zda jsou spojeny všechny virtuální 3D modely správně. Drobné nedostatky v návaznosti nastaly opět u spojení mezi virtuálními 3D modely fragmentů **ruce1** a **ruce2**. I když na sebe jednotlivé virtuální 3D modely fragmentů na hranách nenavazovaly zcela přesně, lze říci, že výsledek spojení jednotlivých virtuálních 3D modelů fragmentů v programu Artec byl velmi uspokojivý. Při fyzickém složení na sebe jednotlivé fragmenty na hranách také nenavazují, socha je vyrobena ze sádry, která se především na hranách neustále odlupuje a rozpadá.

Jako poslední byl k registrovanému virtuálnímu 3D modelu připojen virtuální 3D model fragmentu s názvem **podstava**. Na tomto virtuálním 3D modelu a virtuálním 3D

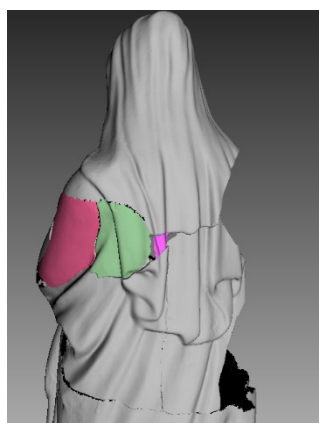
modelu **telo** bylo zvoleno šest párů identických bodů. Po registraci všech virtuálních 3D modelů fragmentů, u kterých bylo známé jejich umístění, byla zvolena možnost *Apply*, došlo ke spojení všech fragmentů. Virtuální 3D model sochy (viz Obr. 38 byl i s texturou exportován do formátu OBJ.



Obr. 38: Složená socha Panny Marie Lurdské ze sedmi částí.

V této fázi zbývalo nalézt odpovídající umístění a začlenit do virtuálního modelu sochy dalších 25 malých fragmentů, jejichž hrany byly často značně poničené. Práce probíhaly následujícím způsobem.

- Do programu Artec Studio byl načten stávající virtuální 3D model sochy a k němu byl zobrazen vždy model dalšího fragmentu.
- Byla hledána společná hrana stávajícího virtuálního 3D modelu sochy a dalšího fragmentu.
- V případě nalezení alespoň částečné tvarové shody na hranách, byla spuštěna funkce *Align* a učiněn pokus, začlenit model daného fragmentu do stávajícího virtuálního 3D modelu sochy.



Obr. 39: Ukázka začlenění 3 částí do spojeného modelu Madony.

Celkem z 25 malých fragmentů se tímto způsobem podařilo do stávajícího virtuálního 3D modelu sochy začlenit pouze tři fragmenty (číslo 5, 8 a 21). Tyto fragmenty se nachází na levé ruce a na zádech sochy. Ukázka virtuálního 3D modelu sochy po doplnění je na Obr. 38. Digitální rekonstrukce levé poloviny sochy z dochovaných fragmentů tak byla téměř kompletní. Pro zbývajících 22 malých fragmentů se nepodařilo identifikovat jejich správné umístění, nejspíše jsou součástí pravé poloviny sochy, tj. v místech, kde je socha nejvíce poškozena a není zřejmé, jak v těchto místech vypadala.

Takto doplněný virtuální 3D model sochy byl exportován do formátu OBJ. Dále bylo provedeno zahlázení povrchu celého složeného virtuálního 3D modelu použitím funkce *Edges* v nástroji *Edges*. V dialogovém okně byly vybrány všechny vypočtené díry pomocí možnosti *Select All* a následně zahlázeny pomocí funkce *Smooth edges*. Na závěr byl výpočet potvrzen zvolením *Apply*. Následovalo zmenšení velikosti výsledného virtuálního 3D modelu na polovinu, protože dosahoval velké souborové velikosti. Ukázka výsledku digitální rekonstrukce sochy Panny Marie Lurdské v programu Artec Studio je na Obr. 40.



Obr. 40: Výsledný složený virtuální 3D model Panny Marie Lurdské.

5 Porovnání dosažených výsledků

V této kapitole budou porovnány možnosti sběru dat (laserové skenování multistanicí Leica Nova MS50 a 3D skenery Artec pracující na principu strukturovaného světla) a následné zpracování dat v open source softwaru MeshLab a v komerčním programu Artec Studio.

5.1 Porovnání sběru dat

Pro sběr dat byly vybrány dvě možnosti skenování, první byla laserové skenování a druhá skenování pracující na principu strukturovaného světla. Pro sběr dat metodou laserového skenování byla použita multistanice Leica Nova MS50. Pro získání dat metodou skenování založenou na principu strukturovaného světla byly využity dva ruční skenery od firmy Artec 3D, Artec Eva a Artec Space Spider.

Princip sběru dat u těchto dvou metod skenování je naprosto rozdílný. Laserovým skenerem je vysílán laserový paprsek, který měří vzdálenost od přístroje po povrch, který je nejbližší. 3D skener pracující na principu strukturovaného světla promítá vzor na měřený artefakt. Tento promítnutý vzor se následně porovnává s originálním vzorem v počítači. Obě vybrané metody mají stejný výstup, tj. mračno bodů.

Průběh měření je také rozdílný. Při měření multistanicí je třeba si dobře promyslet konfiguraci stanovisek, orientací a umístění artefaktu. Počet stanovisek je závislý na daném artefaktu, zda je nutné předmět skenovat kolem dokola nebo stačí jen z některých stran. Při skenování předmětu kolem dokola je třeba mít alespoň tři stanoviště orientovaná k přímce, při skenování jen některých stran artefaktu postačí stanoviště méně. Pro měření multistanicí je nutné mít prostor o rozloze větší než 5,5 m² (vypočítáno na základě požadované vzdálenosti objekt–stroj a konfigurace stanovisek a orientací).

Ruční skenery od firmy Artec 3D nejsou při sběru dat tak prostorově náročné. Ke skenování je třeba mít kromě ručního skeneru výkonný notebook s velkou operační pamětí, dobrou grafickou kartou a s programem Artec Studio. Není třeba rozmyšlení konfigurace stanovisek a orientací. Notebook je třeba položit na vhodné místo, např. stůl a skenovaný předmět mít blízko něj, protože se měřič orientuje podle naměřených dat, která se zobrazují v programu Artec Studio, kam se ihned nahrávají během procesu skenování. Měřič tedy okamžitě vidí, co mu ještě chybí naskenovat. To je výhoda oproti laserovému skenování multistanicí, kdy si měřič může prohlédnout naměřené mračno bodů až po dokončení skenování na jednom stanovišti. Pro skenování ručními skenery Artec je

dostačující mít prostor o rozloze 1,5 m², tedy např. stůl alespoň o rozloze 1 × 1 metr a místo pro pohyb kolem něj.

Rozdílná je vzdálenost artefaktu od měřicího přístroje. Zatímco multistanice musí být na každém stanovišti vzdálena od artefaktu alespoň 1,5 m [35], u ručních skenerů je tato vzdálenost téměř o řád menší. Ručními skenery se měřič pohybuje přímo nad skenovanými artefakty, u Artec Eva je operační vzdálenost od 40–100 cm a u Artec Space Spider 20–30 cm. [36]

Při skenování je maximální rychlost pořízení dat u multistanice 1 000 b/s při vzdálenosti stroje od objektu menší než 300 m. [35] Artec Eva dosahuje rychlosti sběru dat až 2 000 000 b/s, u Artec Space Spider je rychlost pořízení dat poloviční, 1 000 000 b/s. [36]

Odlišná je i časová náročnost pořízení skenů všech fragmentů sochy. Pro příklad je uvedena doba při pořízení skenů hlavy. Hlavu sochy bylo třeba naskenovat kolem dokola. Multistanicí byla tato část sochy skenována ze tří stanovisek, kde bylo třeba vždy zhorizontovat stroj a nastavit parametry skenování. Celková doba pořízení skenu hlavy byla 40 minut. U skenování ručním skenerem Artec Eva byla doba skenování jen 15 minut, po nastavení parametrů skenování není při přerušení skenování nutné je nastavovat znovu. Pořízení veškerých skenů multistanicí probíhalo dva dny, dohromady 9,5 hodiny; u ručních skenerů Artec byla doba poloviční, 4,5 hodiny, tedy jedno dopoledne.

Multistanicí bylo pořízeno celkem 25 skenů pro 32 fragmentů sochy. Střepe hlava, tělo a podstava byly naskenovány ze tří stanovisek, dva střepy rukou a dva střepy zad ze dvou stanovisek. Zbývajících 25 střepů bylo skenováno z jednoho stanoviště. Celková velikost pořízených dat činí téměř 29 MB. Ručními skenery Artec bylo pořízeno celkem 59 skenů, o velikosti celkem 16 GB. Bylo pořízeno sedm skenů hlavy, dva skeny střepu těla, sken pro střep podstavy. Pro oba dva střepy rukou a oba dva střepy zad byly pořízeny vždy dva skeny. Vždy dva skeny byly pořízeny pro 15 menších střepů, zbývajících 10 bylo skenováno pouze jednou.

Mračna bodů pořízená multistanicí Leica MS50 jsou velikostně menší, konkrétně 550×, než data pořízená ručními skenery od společnosti Artec. Celkově naskenovaná data multistanicí obsahují přibližně 210 000 bodů. U dat pořízených ručními skenery je tato hodnota násobně větší, přesně 2 000×, obsahují kolem 458 milionů bodů. Vytvořené virtuální 3D modely v Artec Studiu budou tedy mnohem podrobnější a lépe vystihnou tvar fragmentů sochy. Rozdíly jednotlivých typů skenerů jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.

Porovnávané parametry	Leica Nova MS50	ruční skenery Artec	
		Artec Eva	Artec Space Spider
SPOLEČNOST	Leica Geosystems	Artec 3D	
CENA	1 345 000 Kč	13 700 €	19 700 €
		při koupi obou skenerů 26 700 €	
POTŘEBNÝ PROSTOR PRO SKENOVÁNÍ	5,5 m ²	1,5 m ²	
VZDÁLENOST OBJEKT STROJ	1,5 m	0,4–1 m	0,2–0,3 m
RYCHLOST SKENOVÁNÍ	1 000 b/s	2 000 000 b/s	1 000 000 b/s
DOBA SKENOVÁNÍ	9,5 h	4,5 h	
CELKOVÝ POČET POŘÍZENÝCH SKENŮ	25	59	
VELIKOST POŘÍZENÝCH DAT	29 MB	16 GB	

Tab. 1: Tabulka srovnání dvou použitých typů skenerů.

5.2 Porovnání zpracování dat

Data pořízená pomocí multistanice Leica Nova MS50 byla zpracována v open source softwaru MeshLab a data pořízená ručními skenery od firmy Artec v komerčním programu Artec Studio 9.

Pro zpracování dat v programu MeshLab bylo nutné data předzpracovat. Naskenovaná data byla z multistanice Leica exportována na paměťovou SD kartu. Dále bylo nutné převést tato data do formátu PTS použitím programu Leica Infinity. Na závěr byla data v programu CloudCompare konvertována do formátu PLY. Takto upravená data již bylo možné importovat do programu MeshLab. Data pořízená ručními skenery od firmy Artec 3D předzpracování nevyžadovala, byla během skenování přímo nahrávána do programu Artec Studio, ve kterém probíhalo i následné zpracování.

První krok při zpracování byl u obou programů stejný, bylo třeba odfiltrovat nadbytečné body. V dalších krocích bylo zpracování odlišné. U programu MeshLab bylo v dalším kroku třeba vypočítat normály a poté proložit mračno bodů trojúhelníkovou sítí,

aby byl vytvořen povrch objektu. Následně byly odstraněny nadbytečné trojúhelníky. Posledním krokem bylo potažení virtuálního 3D modelu texturou. Tímto způsobem byly vytvořeny všechny virtuální 3D modely fragmentů sochy v programu MeshLab. V případě programu Artec Studio probíhalo vytvoření virtuálního 3D modelu jiným způsobem. Po odfiltrování přebytečných bodů následovalo spojení vyčištěných mračen bodů jednoho fragmentu. Dalším krokem v Artec Studiu byla registrace, kdy byly všechny snímky zarovnány do jednoho místního souřadnicového systému. Poté proběhla fúze, tedy vytvoření trojúhelníkové 3D sítě. Závěrečným krokem bylo potažení vytvořené polygonální sítě texturou. Takto byly vytvořeny všechny virtuální 3D modely fragmentů sochy v programu Artec Studio.

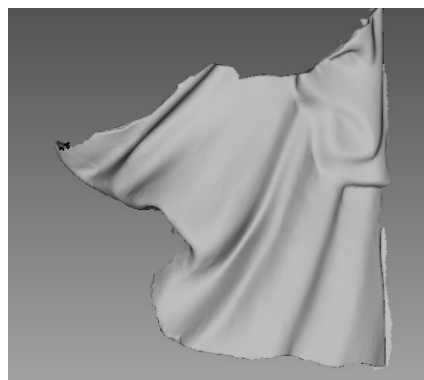
Všechny virtuální 3D modely vytvořené v programu MeshLab i Artec Studio, byly vytvořeny na stejném notebooku s procesorem Intel Core i7-2670QM, grafickou kartou NVIDIA GeForce GT 540M a 8 GB RAM. Časová náročnost tvorby virtuálních 3D modelů byla odlišná. V programu MeshLab byl vytvořen virtuální 3D model největšího fragmentu sochy, tedy těla, během desítek minut. Nejdéle trvalo odfiltrování přebytečných bodů, při kterém je třeba postupovat velmi pečlivě. Nejnáročnější výpočet, tedy vytvoření trojúhelníkové sítě použitím Poisson algoritmu, trval 5 minut. Celkový čas nepřesáhl 40 minut. Tvorba v programu Artec Studio byla výpočetně mnohem náročnější, bylo potřeba mít počítač s výkonným procesorem a velkou RAM. Nejnáročnější krok byla registrace, která u střepu těla sochy trvala 2 hodiny. Celková doba tvorby virtuálního 3D modelu těla trvala kolem 3,5 hodiny (210 minut). Tvorba virtuálních 3D modelů v Artec Studiu tedy byla časově mnohem náročnější než v programu MeshLab.

Virtuální 3D modely vytvořené v komerčním programu Artec Studio jsou mnohem podrobnější a lépe vystihují tvar fragmentu sochy než virtuální 3D modely vytvořené v open source softwaru MeshLab. Vykreslují veškeré záhyby fragmentu a jsou také lépe rozeznatelné hrany, které jsou třeba pro složení sochy Madony. Kvalita vykreslení virtuálních 3D modelů fragmentů sochy je ovlivněna rozestupem bodů pořízených mračen bodů. Srovnání vytvořených 3D modelů fragmentů sochy bez textury, kde jsou lépe identifikovatelné rozdíly vykreslení je na Obr. 41. Virtuální 3D modely fragmentů vzniklé v programu firmy Artec 3D jsou mnohem podrobnější a přesnější i co se týče textury. To je ovlivněno i kvalitou naskenovaných dat, protože mračna bodů pořízená ručními skenery jsou

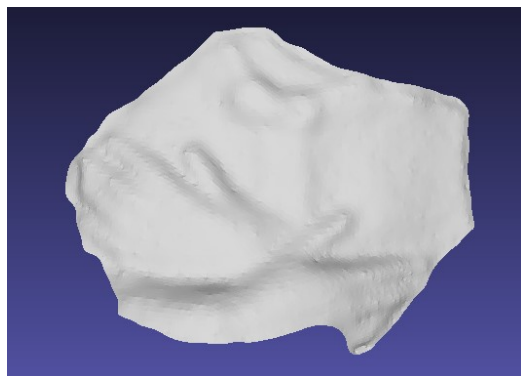
mnohem podrobnější. Textura má také mnohem větší rozlišení, 1,3 MP. I z tohoto důvodu jsou exportované virtuální 3D modely z Artec Studia mnohem větší.



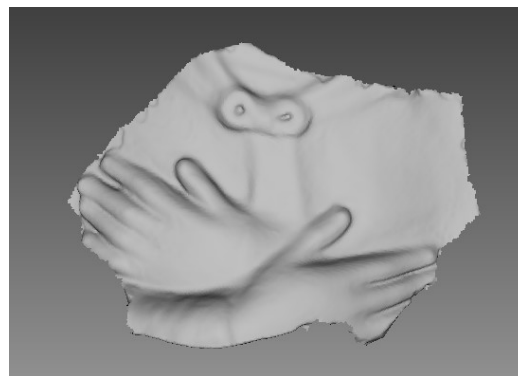
Virtuální 3D model fragmentu zad vytvořený v programu MeshLab.



Virtuální 3D model fragmentu zad vytvořený v programu Artec Studio.



Virtuální 3D model fragmentu ruce vytvořený v programu MeshLab.



Virtuální 3D model fragmentu ruce vytvořený v programu Artec Studio.

Obr. 41: Porovnání vytvořených 3D modelů fragmentů sochy Madony.

MeshLab i Artec Studio umožňují export virtuálních 3D modelů do různých formátů. Jak virtuální 3D modely vytvořené v programu MeshLab, tak i ty vytvořené v Artec Studiu, byly exportovány do formátu OBJ.

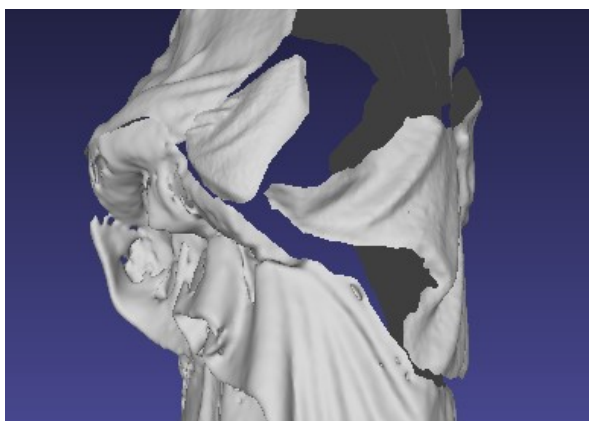
Zatímco test složení vytvořených virtuálních 3D modelů střeptů sochy proběhl v programu MeshLab jen částečně úspěšně, v programu Artec Studio proběhl poměrně s kladným výsledkem. V tabulce Tab. 2 jsou uvedeny shrnující údaje o zvolených programech.

Porovnávané parametry	MeshLab	Artec Studio 9
SPOLEČNOST	vyvinutý výzkumným centrem ISTI-CNR	Artec 3D
TYP PROGRAMU	open source	komerční software
CENA	-	roční licence 400 €
NUTNÉ PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT	ano	ne
VÝPOČETNÍ NÁROČNOST (příklad uveden u největšího střepu sochy)	40 minut	210 minut
FORMÁTY PRO EXPORT	PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML 2.0, U3D, X3D a COLLADA	OBJ, PLY, WRL, STL, AOP, ASCII, PTX, E57 a XYZRGB

Tab. 2: Tabulka srovnání open source programu a komerčního programu.

Po vzniku všech virtuálních 3D modelů střepů sochy, proběhl test složení. Oba programy nabízejí funkci *Align*, která je využívána pro složení překrývajících se skenů. Vytvořené virtuální 3D modely střepů sochy však nemají překryvy, ale pouze společné hrany. Virtuální 3D model se v programu MeshLab sice podařilo složit, mezi jednotlivými virtuálními 3D modely střepů sochy ale byly mezery a při snaze o zpřesnění napojení jednotlivých částí se virtuální 3D modely střepů přetáčely. Oproti tomu test funkce *Align* v programu Artec Studio dopadl více než uspokojivě. Funkce *Align* umožňuje jednoduchý pohyb s jednotlivými modely střepů sochy, což též umožnilo začlenit do výsledného virtuálního 3D modelu sochy i fragmenty, u kterých nebylo předem známé jejich umístění. Jednotlivé virtuální 3D modely fragmentů na sebe poměrně dobře navazují. Porovnání vybraných výsledků složení virtuálních 3D modelů fragmentů sochy v programu MeshLab a Artec Studio je na Obr. 42.

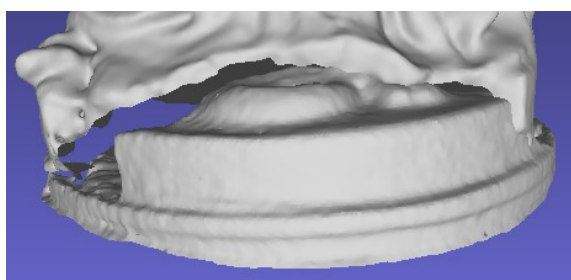
Ani výsledný virtuální 3D model sochy Madony vytvořený v Artec Studiu není zcela dokonalý. Některé modely fragmentů na sebe nedoléhají. Nepřesnosti vznikly u spojení virtuálních modelů fragmentů zad a těla sochy a další větší nepřesnost byla



Složení virtuálních 3D modelů těla, záda, prsty a ruce Madony v programu MeshLab.



Složení virtuálních 3D modelů těla, záda, prsty a ruce Madony v programu Artec Studio.



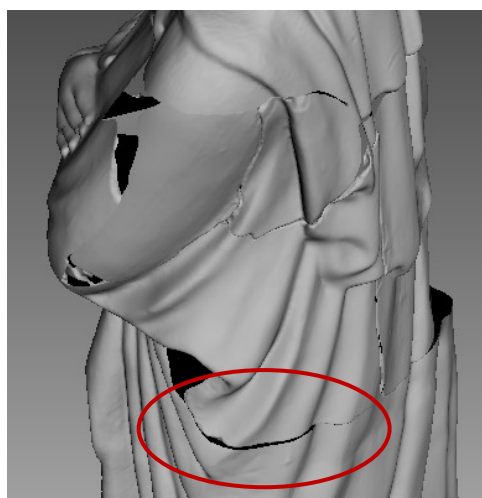
Složení virtuálních 3D modelů podstavy a těla Madony v programu MeshLab.



Složení virtuálních 3D modelů podstavy a těla Madony v programu Artec Studio.

Obr. 42: Ukázka složení virtuální 3D modelů fragmentů sochy v programu MeshLab a Artec Studio.

identifikována u spojení střepů prsty, ruce a tělo, jak je znázorněno na Obr 43. I když bylo v několika krocích provedeno zpřesnění umístění jednotlivých částí, navenazují na sebe některé části zcela přesně. Příčinou jsou vlastnosti algoritmu funkce *Align*, i fakt, že střepy sochy na sebe přesně nedoléhají ani ve skutečnosti.



Obr. 43: Nepřesnosti na spojeném virtuálním 3D modelu v programu Artec Studio.

Pro rekonstrukci původního tvaru sochy bylo využito 10 střepů, zbývající střepy jsou velice drobné a jejich hrany nenavazují na žádnou z hran složeného virtuálního 3D modelu. Žádné z nezakomponovaných střepů zřejmě nenavazují ani na sebe navzájem. Nezakomponované virtuální 3D modely dochovaných střepů netvoří ani 1/3 chybějící části sochy. Je zřejmé, že některé fragmenty se nedochovaly, zejména chybí relativně velká část pravé ruky sochy.

Virtuální 3D model sochy Madony, vytvořený v programu Artec Studio má velikost přes 600 MB a obsahuje přes 1 500 000 bodů. Proto bylo nutné model zmenšit. I když velikost modelu po zmenšení klesla na 750 000 bodů, stále se jedná o poměrně hustou síť bodů. Tato velikost není nijak výjimečná, u ostatních projektů dosahují vytvořené virtuální 3D modely podobných velikostí, jako je tomu tak např. v [43].

5.3 Shrnutí výsledků práce

Během skenování střepů sochy Panny Marie Lurdské se ukázalo, že multistanice Leica Nova MS50 je vhodná pro skenování velkých objektů nebo i prostor, ale u malých předmětů, které jsou hodně členité a mají mnoho záhybů, jako jsou i některé střepy sochy Panny Marie Lurdské, má multistanice Leica Nova MS50 potíže. Pořízené mračno bodů není tak podrobné, jak by bylo potřeba pro zachycení jejich tvaru. Pro skenování multistanicí Leica Nova MS50 je také potřeba větší prostor, zatímco skenery od firmy Artec 3D nepotřebují místa. Díky jejich malé vzdálenosti od objektu lze lépe naskenovat záhyby sochy a lze tedy lépe vystihnout její tvar. Dokonalejší jsou i pořízené snímky pro texturu sochy, než je tomu u multistanice. Pořízené mračno bodů je na jednu stranu hodně husté, což je potřeba k vystižení tvaru střepů, na druhou stranu zabírá velkou část paměti počítače, což je nevýhoda.

Pro zpracování dat z multistanice je třeba předzpracování, zatímco u dat pořízených ručními skenery to není nutné, protože jsou ihned během skenování nahrávané do programu Artec Studio, ve kterém probíhá jejich zpracování. Vytvoření virtuálních 3D modelů v programu Artec je oproti programu MeshLab hodně výpočetně, a tudíž i časově, náročné a je opravdu nutné mít výkonný počítač. Zpracování v programu MeshLab není tak časově náročné, což je ovlivněno i mnohem menší velikostí dat, která v něm byla zpracována, oproti datům z ručních skenerů.

S hustotou mračna naskenovaných bodů souvisí i kvalita vytvořených virtuálních 3D modelů. Kvalitnější a přesnější virtuální 3D modely byly vytvořeny v komerčním

programu Artec Studio. Ačkoliv jako open source software podal MeshLab velmi dobré výsledky, pro virtuální 3D složení celého objektu z fragmentů je více vhodný testovaný komerční program, který dosáhl relativně lepšího výsledku. Program MeshLab tedy není pro řešení tohoto problému příliš vhodný.

Pokud Muzeum jižního Plzeňska získá sochu Panny Marie Lurdské zpět do kaple, a mělo by zájem o další zlepšení virtuálního 3D modelu sochy Panny Marie Lurdské, bylo by třeba spolupracovat nebo předat takto vytvořený virtuální 3D model restaurátorům, kteří mají zkušenosti s restaurováním starých a roztržitých soch. Pro lepší spojení stěpů sochy, by bylo velmi vhodné vytvořit vlastní program, přizpůsobený přímo pro skládání mnoha na sebe navazujících fragmentů. Kromě požadavku na přesné spojení by bylo dobré i jednoduché ovládání s virtuálními 3D modely objektů.

Závěr

Virtuální 3D modely jsou v současné době využívány v řadě nejrůznějších oborů. Spolupráce odborníků z oblasti historie, archeologie a restaurátorů s odborníky z technických oborů tak nabízí nové možnosti a postupy vedoucí k ochraně a zachování kulturního dědictví.

Existují nejrůznější metody sběru dat, mezi něž patří laserové skenování, pořízení dat skenery využívající princip strukturovaného světla či fotogrammetrické metody. Zpracování pořízených dat pak probíhá jak v open source, tak v komerčních programech.

Pro rekonstrukci původního tvaru uměleckého předmětu z dochovaných fragmentů byla zvolena socha Panny Marie Lurdské, která se v současnosti nachází v kostele sv. Jana Evangelisty v Blovicích, původně byla součástí inventáře kaple sv. Ondřeje na zámku Hradiště v Blovicích, kde nyní sídlí Muzeum jižního Plzeňska. V současné době je socha rozbitá na množství střepů.

Na základě rešerše dostupné literatury byly navrženy dva postupy, jak provést rekonstrukci původního tvaru sochy Madony z dochovaných fragmentů. V prvním návrhu byla socha Madony naskenována metodou laserového skenování multistanicí Leica Nova MS50. Data pořízená tímto způsobem byla nejdříve předzpracována a poté nahrána do open source softwaru MeshLab, kde byly vytvořeny z pořízených mračen bodů fragmentů sochy Madony jejich virtuální 3D modely. V tomto programu proběhl test složení jednotlivých virtuálních 3D modelů, jehož výsledek nebyl uspokojivý.

Ve druhém navrženém postupu byly fragmenty sochy naskenovány 3D skenery od firmy Artec 3D. Tyto 3D skenery pracují na principu strukturovaného světla. Velké střepy byly naskenovány 3D skenerem Artec Eva a menší 3D skenerem Artec Space Spider. Data pořízena těmito 3D skenery byla zpracována v komerčním programu Artec Studio 9. V tomto programu proběhl i úspěšný test složení vytvořených virtuálních 3D modelů fragmentů sochy Madony.

Hlavním výstupem této práce je virtuální 3D model sochy Panny Marie Lurdské, který bude po obhajobě této práce prezentován vedení Muzea jižního Plzeňska, jež se dlouhodobě snaží o dohledání a navrácení původního inventáře. Vzhledem k tomu, že doposud nebyly dohledány žádné fotografie ani jiné obrazové materiály, dokládající podobu sochy, nabízí výsledek této diplomové práce unikátní možnost po mnoha letech sochu spatřit

opět v jednom celku. Dle dostupných informací není restaurování sochy v několika následujících letech plánováno, virtuální 3D model sochy je tedy aktuálně jediným obrazovým materiálem dokládajícím podobu sochy.

Literatura

- [1] ARBACE Lucia, Elisabetta SONNINO, Marco CALLIERI, Matteo DELLEPIANE, Matteo FABBRI, Antonio IACCARINO IDELSON a Roberto SCOPIGNO. Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage* [online]. 2013, 14(4), 332-345 [cit. 2017-12-20]. DOI: 10.1016/j.culher.2012.06.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1296207412001070>.
- [2] KAMPEL Martin, SABLATNING Robert. Virtual Reconstruction of broken and unbroken Pottery [online]. *Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003*. 3DIM 2003. Proceedings., 2003, 318-325. [cit. 2017-12-29]. DOI: 10.1109/IM.2003.1240265. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1240265&isnumber=27810>.
- [3] IANNONE G., GEORGIU R., AMICO n., RONZINO P. HERMON S.: Ancient Vase 3D reconstruction and 3D visualization [online]. **In:** *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference, Beijing*. Pallas Publications, Amsterdam, 59-64. 2011. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281649349_Ancient_Vase_3D_Reconstruction_and_3D_Visualization.
- [4] SOILE S., ADAM K., IOANNIDIS C., GEORGOPOULOS A. Accurate 3D textured models of vessels for the improvement of the educational tools of a museum [online]. **In:** *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Trento, February 25-26, Trento*, 211-217. [cit. 2018-01-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265140086_ACCURATE_3D_TEXTURED_MODELS_OF_VESSELS_FOR_THE_IMPROVEMENT_OF_THE_EDUCATIONAL_TOOLS_OF_A_MUSEUM.
- [5] FONTANA, Raffaella, Marinella GRECO, Marzia MATERAZZI, Enrico PAMPALONI, Luca PEZZATI, Claudio ROCCHINI a Roberto SCOPIGNO. Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage*

[online]. 2002, 3(4), 325-331 [cit. 2018-01-19]. DOI: 10.1016/S1296-2074(02)01242-6.

Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/248546035_Three-dimensional_modelling_of_statues_The_Minerva_of_Arezzo.

[6] GEORGOPOULOS, Andreas. 3D virtual reconstruction of archaeological monuments. [online]. **In:** Mediterranean Archeology and Archaeometry, Vol. 14, No4, 155-164, 2014. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/298024246_3D_virtual_reconstruction_of_archaeological_monuments.

[7] TUCCI, G., V. BONORA, A. CONTI a L. FIORINI. HIGH-QUALITY 3D MODELS AND THEIR USE IN A CULTURAL HERITAGE CONSERVATION PROJECT. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online]. 2017, XLII-2/W5, 687-693 [cit. 2018-01-22]. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-687-2017. Dostupné z:

<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W5/687/2017/>.

[8] XIAN-DONG WANG, WEI WANG (2011). Digital Modeling and Virtual Restoration of a Giant Iron Statue of a Lion in China (AD 053), [online], Studies in Conservation, 56:2, 154-160, [cit. 2018-01-26]. DOI: 10.1179/sic.2011.56.2.154. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289639251_Digital_Modeling_and_Virtual_Restoration_of_a_Giant_Iron_Statue_of_a_Lion_in_China_AD_953.

[9] SCOPIGNO R., CIGNONI P., CALLIERI M., GANOVELLI F., IMPOCO G., PINGI P., PONCHIO F.: Using optically scanned 3D data in the restoration of Michelangelo's David. **In:** Optical Metrology for Arts and Multimedia. Mnichov: 2003. DOI: 10.1117/12.499921. [cit. 2018-01-27]. Dostupné z:

<https://www.semanticscholar.org/paper/3D-Scanning-the-Minerva-of-Arezzo-Rocchini-Cignoni/9b85674dcb02102eb05df047326d21996f826d57>.

[10] CIGNONI P., CYGIELMAN M., FONTANA R., GRECO M., GIACHETTI R., GORI G., MONTANI C., MICCIO M., PINGI P., PAMPALONI E., PEZZATI L., PECCHIOLI R., ROCCHINI C., SCOPIGNO R.: 3D Scanning the Minerva of Arezzo, [online]. (2001). Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/3D-Scanning-the-Minerva-of-Arezzo-Rocchini-Cignoni/9b85674dcb02102eb05df047326d21996f826d57>.

- [11] GUIDI G., J.-A. BERARDIN, C. ATZENI. High-Accuracy 3-D Modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's "Maddalena". *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2004, 13(3), 370-380 [cit. 2018-01-30]. DOI: 10.1109/TIP.2003.822592. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1278360/>.
- [12] DIAZ-MARIN C., VENDRELL-VIDAL E., AURA-CASTRO E., ABATE A. F., SANCHEZ-BELENGUER C., NARDUCCI F. Virtual reconstruction and representation of an archaeological terracotta statue. In: *2015 Digital Heritage* [online]. IEEE, 2015, s. 699-702 [cit. 2018-02-05]. DOI: 10.1109/DigitalHeritage.2015.7419602. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7419602/>.
- [13] SCOPIGNO R., CALLIERI M., CIGNONI P., CORSINI M., DELLEPIANE M., PONCHIO F, RANZUGLIA G.. 3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization. *Computer* [online]. 2011, 44(7), 48-55 [cit. 2018-02-05]. DOI: 10.1109/MC.2011.196. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5958706/>.
- [14] MICHEL L., PHI DO D., HOXHA D., COIGNARD B., BRUNETAUUD X., AL MUKHTAR M. Numerical study of the stability of restoring damaged sculpture. In: proceedings of 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone [online]. New York: Columbia University, 2012 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235574721_Numerical_study_of_the_stability_of_restoring_damaged_sculpture.
- [15] BOIER-MARTIN I., RUSHMEIER H. Reverse Engineering Methods for Digital Restoration Applications. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* [online]. 2006, 6(4), 364- [cit. 2018-02-06]. DOI: 10.1115/1.2356497. ISSN 15309827. Dostupné z: <http://ComputingEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1400635>.
- [16] BARREAU J.-B., NICOLAS T., BRUNIAUX G., PETIT E., PETIT Q, BERNARD Y., GAUGNE R., GOURANTON V. Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications. In: *International Conference on Cultural Heritage* [online]. Lemessos: 2014, CoRR abs/1412.1330 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1412.1330>.
- [17] NICOLAE C., NOCERINO E., MENNA F., REMONDINO F. Photogrammetry applied to problematic artefacts. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online]. 2014, XL-5, 451-456 [cit. 2018-02-17]. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014. ISSN 2194-9034.
Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ISPAr.XL5..451N>.
- [18] Laserové skenování. Geodézie Ledec nad Sázavou. [online]. [cit. 2018-02-19]
Dostupné z: <http://www.geodezieledec.cz/cs/laserove-skenovani/>.
- [19] Příspěvatelé Wikipedie, 2016. DXF. [online]. [cit. 2018-02-19].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lékythos&oldid=13599109>.
- [20] Příspěvatelé Wikipedie, 2017. Zrcadlovka. [online]. [cit. 2018-02-28].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zrcadlovka&oldid=15685077>.
- [21] ČERMÁK Jan. Metody 3D skenování objektů. [online] Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850
- [22] Příspěvatelé Wikipedie, 2018. MeshLab. [online]. [cit. 2018-03-17].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MeshLab&oldid=830513401>
- [23] BLENDER.ORG - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software. blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software [online]. [cit. 2018-03-17] Dostupné z: <https://www.blender.org>
- [24] Příspěvatelé Wikipedie, 2017. Blender. [online]. [cit. 2018-03-17].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Blender&oldid=15305713>
- [25] ARC 3D. ARC 3D [online]. [cit. 2018-03-17].
Dostupné z: <https://homes.esat.kuleuven.be/~visit3d/webservice/v2/>
- [26] GitHub - egtwobits/mesh-align-plus. Use scene geometry and/or measurements as the basis for transformations. GitHub [online]. 2018 [cit. 19.03.2018].
Dostupné z: <https://github.com/egtwobits/mesh-align-plus>
- [27] CAD Studio a.s. AutoCAD (AutoCAD 2018) [online]. [cit. 2018-03-20].
Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/autocad>
- [28] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D VERSION 6.0 [online]. An Itasca International Company [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: <https://www.itascacg.com/software/flac3d>

- [29] PRIMA BILAVČÍK, s.r.o. Software Polyworks Modeler [online]. PRIMA BILAVČÍ, s.r.o, 2014, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/software-polyworks-modeler/>
- [30] InnovMetric Software. PolyWorks Modeler, Technical Specifications [online]. 2013 [cit. 2018-03-21] Dostupné z: <https://www.innovmetric.com/en/products/polyworksmodeler/polyworksmodeler-technical-specifications>
- [31] Agisoft. Agisoft PhotoScan [online]. Agisoft, 2018, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.agisoft.com>
- [32] Agisoft. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3 [online]. Agisoft LLC, 2017, [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf
- [33] Kunsthistorisches Institut in Florenz. CENOBIUM [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://cenobium.isti.cnr.it>
- [34] The Fraunhofer Institute for Computer Graphics Research IGD. 3D Coform [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.3d-coform.eu>
- [35] Leica Geosystems AG. Leica Nova MS50 Datasheet [online]. Heerbrugg, Swizerland, 2013. [cit. 2018-03-27] Dostupné z: http://www.leicageosystemsdares.com/download/Leica_Nova_MS50_DAT_us.pdf
- [36] Professional 3D Scanners. Artec 3D [online]. Artec Europe, 2018. [cit. 16.04.2018]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com>
- [37] KNOFLÍČEK, Zdeněk. Znalecký posudek č. 182. Plzeň: 14. března 1991. 21 s. čj. Spr. 2473/89. [cit. 2018-04-02].
- [38] HALÍKOVÁ, Kateřina. Digitální rekonstrukce interiéru kaple sv. Ondřeje na zámku Hradiště. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí práce Martina Vichrová. [cit. 2018-04-02].
- [39] Leica Geosystems 2018. Company Profile [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: http://hds.leica-geosystems.com/en/Company-Profile_19096.htm
- [40] Příspěvatelé Wikipedie, 2018, CloudCompare. [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>

- [41] KAZHDAN, M., BOLITHO, M., HOPPE, H. Poisson surface reconstruction. **In:** Eurographics symposium on Geometry processing (SGP 06). [cit. 2018-05-14]. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Švýcarsko, 61-70. Dostupné z: <http://research.microsoft.com/enus/um/people/hoppe/poissonrecon.pdf>
- [42] Rekonstrukce. **In:** ABZ.cz: slovník cizích slov [online]. 2005. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/rekonstrukce>
- [43] VRUBEL A., BELLON O. R. P., SILVA L. A 3D reconstruction pipeline for digital preservation In: 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, Florida, 2009, 2687-2694. [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206586. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5206586&isnumber=5206488>

Seznam příloh

Příloha 1: Struktura přiložené SD karty.	78
Příloha 2: Fragmenty sochy Madony a jejich virtuální 3D modely.	80

Příloha 1: Struktura přiložené SD karty

Na přiložené SD kartě jsou adresáře pojmenované podle hlavních kapitol této diplomové práce. Názvy kapitol jsou uvedeny ve struktuře v závorkách.

2 (Návrh a testování postupu prací)

- vaza/ - složka, ve které se nachází originální naskenovaná data vázy, složený virtuální 3D model vázy z programu MeshLab včetně souboru *.obj.mtl, k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu MeshLab
 - vaza.obj - soubor, ve kterém je složený virtuální 3D model vázy z programu MeshLab
 - vaza.png
 - vaza.PTS – soubor s originálnímu naskenovanými data
- strep1/ - složka, ve které se nachází originální naskenovaná data střepu 1, složený virtuální 3D model vázy z programu MeshLab včetně souboru *.obj.mtl, k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu MeshLab
 - strep1.obj - soubor, ve kterém je složený virtuální 3D model vázy z programu MeshLab
 - strep1.png
 - strep1.PTS – soubor s originálnímu naskenovanými data
- strep2/ - složka, ve které se nachází originální naskenovaná data střepu 2, složený virtuální 3D model vázy z programu MeshLab včetně souboru *.obj.mtl, k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu MeshLab
 - strep2.obj - soubor, ve kterém je složený virtuální 3D model střepu 2 z programu MeshLab
 - strep2.png
 - strep2.PTS – soubor s originálnímu naskenovanými data

3 (Sběr dat pomocí stroje Leica MS50 a zpracování pořízených dat v programu MeshLab)

- cela_socha/ - složka, ve které se nachází složený virtuální 3D model Madony z programu MeshLab včetně souboru *.obj.mtl, k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu MeshLab
 - madona.obj – soubor, ve kterém je složený virtuální 3D model Madony z programu MeshLab

- telo_textura.png, ruce_textura.png, prsty_textura.png, podstava_textura.png, zada2_textura.png, zada1_textura.png, hlava_textura.png, madona.obj.mtl
- obr_mereni/ - složka, ve které se nachází fotografie z průběhu měření
- originalni_naskenovana_data/
 - data/ - soubor ve kterém se nachází soubory jednotlivých prořízených mračen bodů pořízených multistanicí Leica Nova MS50
 - foto/ - soubor, ve kterém se nachází fotografie pořízené multistanicí Leica Nova MS50
- strepy/ - soubor, ve kterém se nachází soubory pojmenované podle jednotlivých střepů Madony, ve kterých se nachází vždy jeden virtuální 3D model ve formátu OBJ, včetně souboru *.obj.mtl, a k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu MeshLab
 - hlava, podstava, prsty, ruce, zada1, zada2, telo, strep1, strep2, strep3, strep4, strep5, strep6, strep7, strep8, strep9, strep10, strep11, strep12, strep14, strep15, strep16, strep17, strep18, strep19, strep20, strep21, strep22, strep23, strep24, strep25

4 (Sběr dat pomocí skeneru Artec a zpracování v programu Artec 3D)

- cela_socha/ - složka, ve které se nachází složený virtuální 3D model Madony z programu Artec
 - madona.obj – soubor, ve kterém je složený virtuální 3D model Madony z programu MeshLab včetně souboru *.obj.mtl
 - madona0.png, madona1.png, madona2.png, madona3.png, madona4.png, madona5.png, madona6.png, madona7.png, madona8.png, madona9.png, madona10.png, madona11.png, madona12.png, madona13.png, madona14.png, madona15.png, madona16.png, madona17.png, madona18.png, madona19.png, madona20.png, madona21.png, madona.obj.mtl
- obr_mereni/ - složka, ve které se nachází fotografie z průběhu měření
- originalni_naskenovana_data/ - složka ve které se nachází celý projekt, ve kterém jsou uložena data pořízená 3D skenery Artec
 - History, Measures, Scans, Temp a Blovice_socha_0327.sproj
- strepy/ - složka, ve které se nachází soubory pojmenované podle jednotlivých střepů Madony, ve kterých se nachází vždy jeden virtuální 3D model ve formátu OBJ včetně

souboru *.obj.mtl a k němu příslušná textura ve formátu PNG vytvořená v programu Artec

- hlava, podstava, prsty, ruce, zada1, zada2, telo, strep1, strep2, strep3, strep4, strep5, strep6, strep7, strep8, strep9, strep10, strep11, strep12, strep14, strep15, strep16, strep17, strep18, strep19, strep20, strep21, strep22, strep23, strep24, strep25

text/

- diplomova_prace.pdf – text diplomové práce
- obr_text/ - složka obsahující obrázky použité v textu diplomové práce
- obr_priloha/ - složka obsahující obrázky použité v textu diplomové práce

Příloha 2: Fragментy sochy Madony a jejich virtuální 3D modely z programu MeshLab a Artec Studio



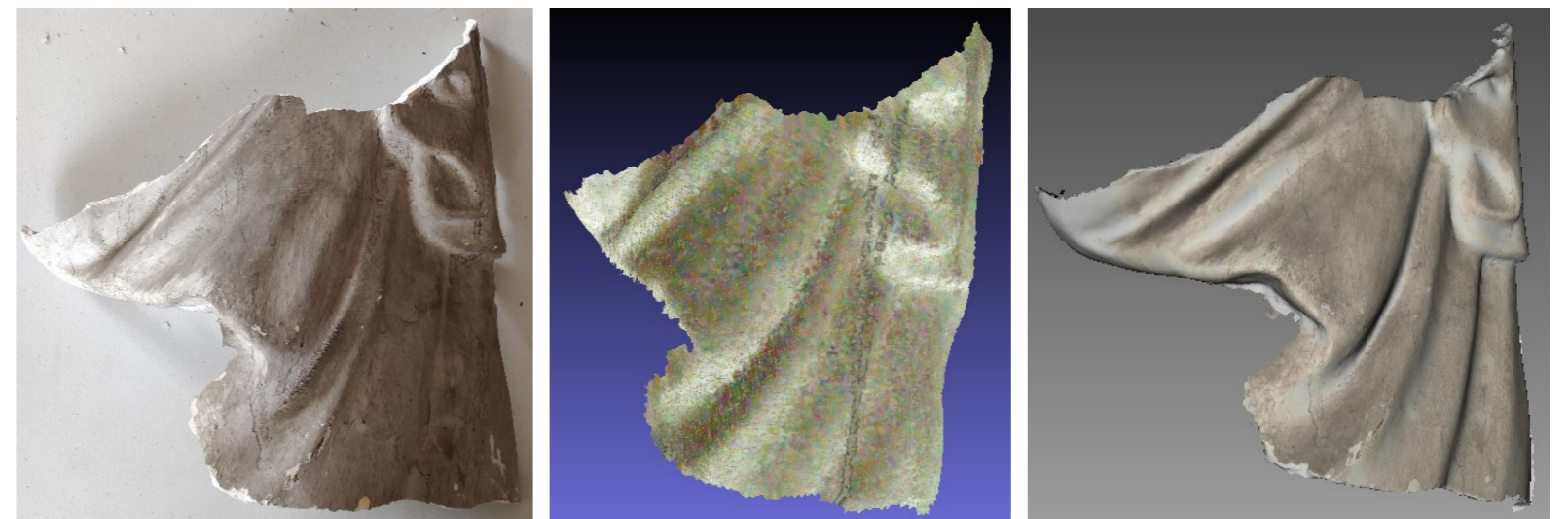
Fragment „telo“ sochy Madony.



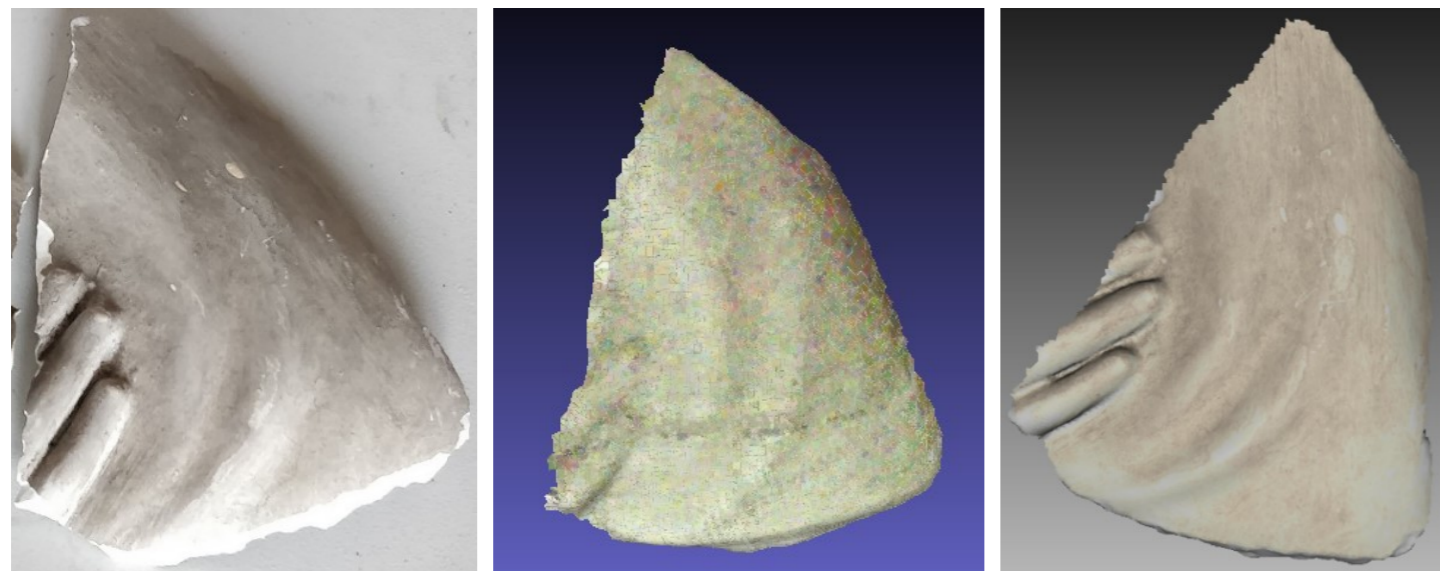
Fragment „hlava“ sochy Madony.



Fragment „zad1“ sochy Madony.



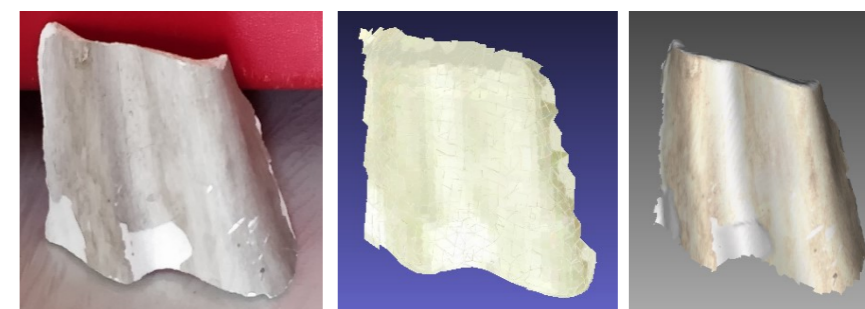
Fragment „zad2“ sochy Madony.



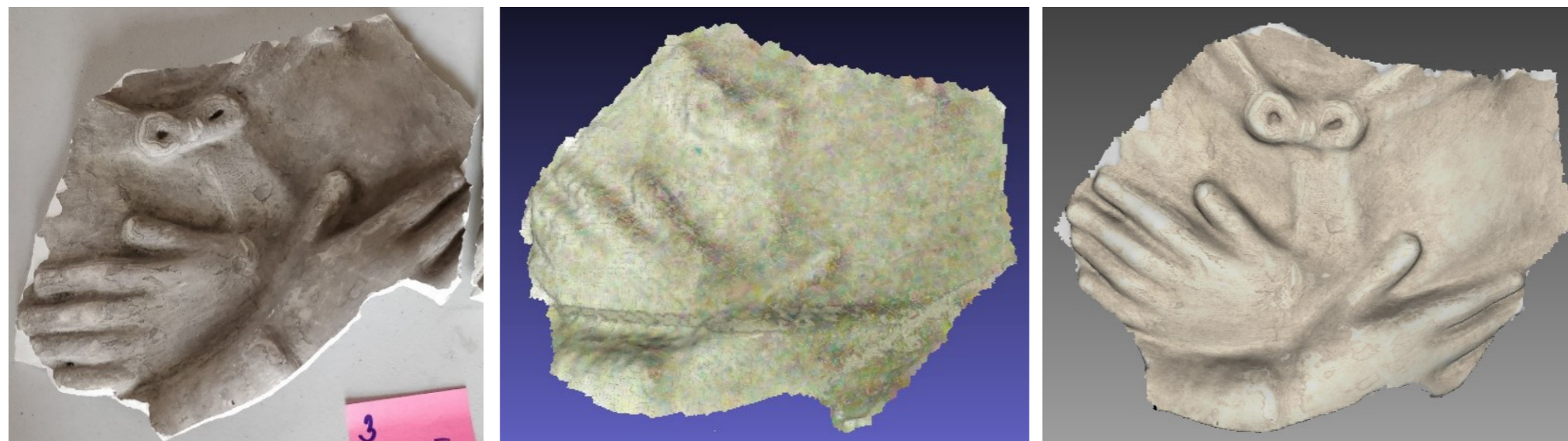
Fragment „prsty“ sochy Madony.



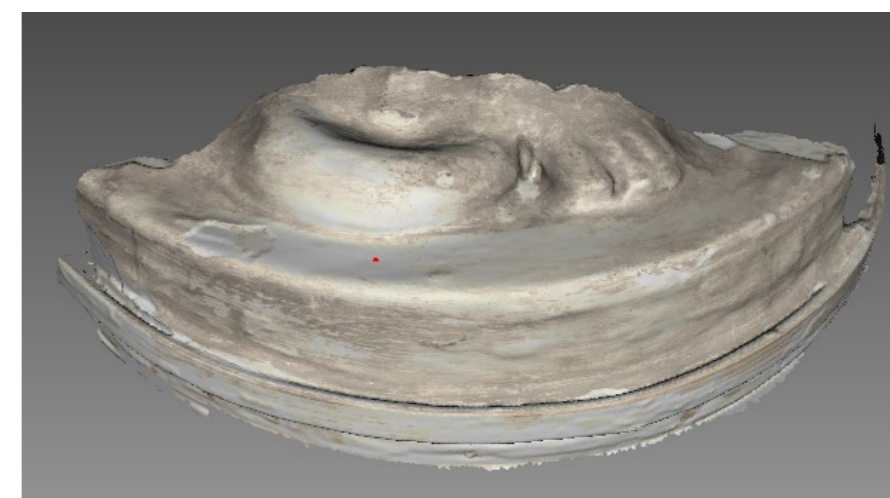
Fragment „strep1“ sochy Madony.



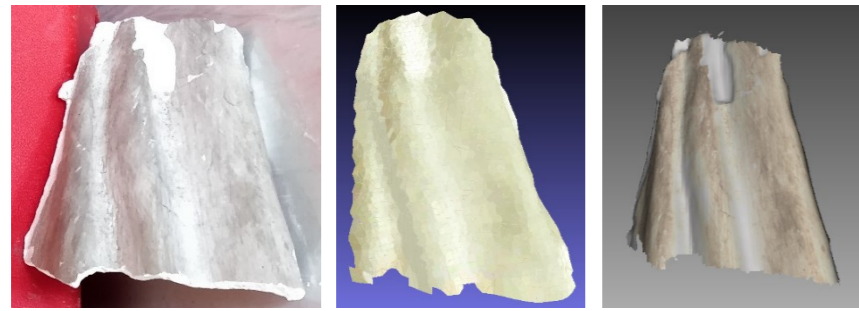
Fragment „strep2“ sochy Madony.



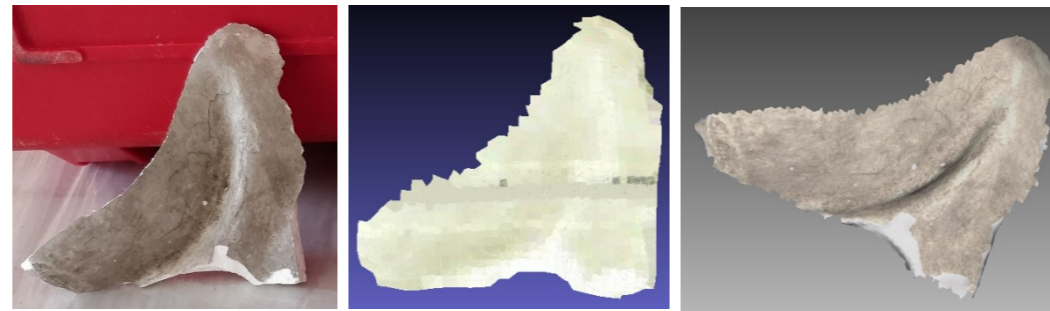
Fragment „ruce“ sochy Madony.



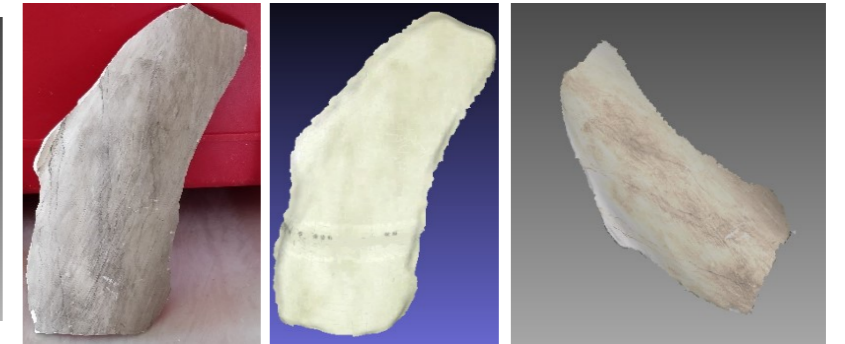
Fragment „podstava“ sochy Madony.



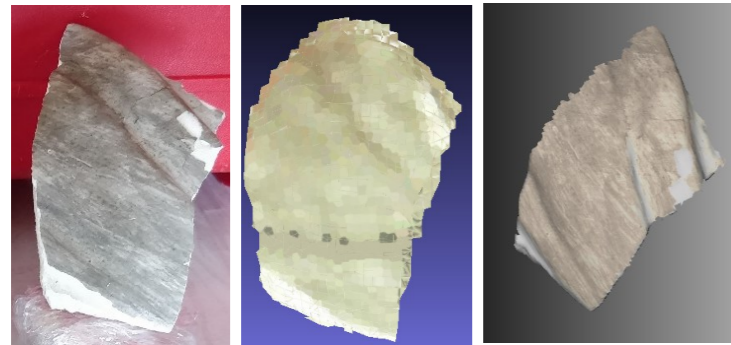
Fragment „strep3“ sochy Madony.



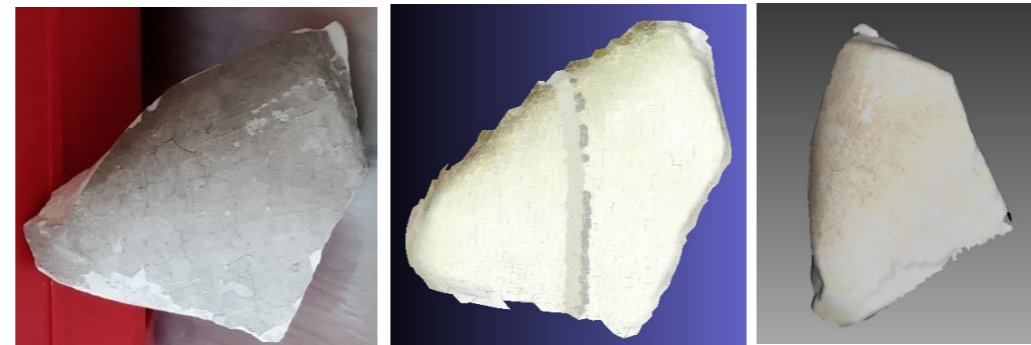
Fragment „strep4“ sochy Madony.



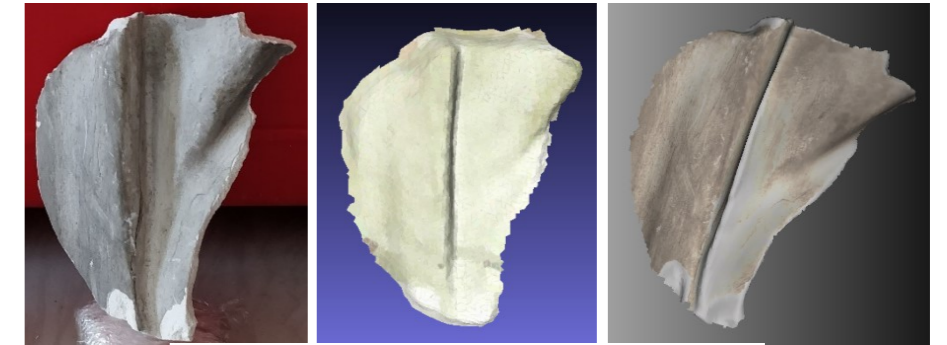
Fragment „strep5“ sochy Madony.



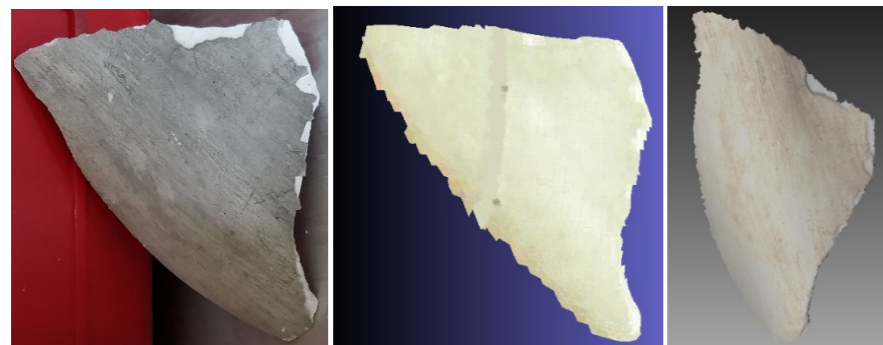
Fragment „strep6“ sochy Madony.



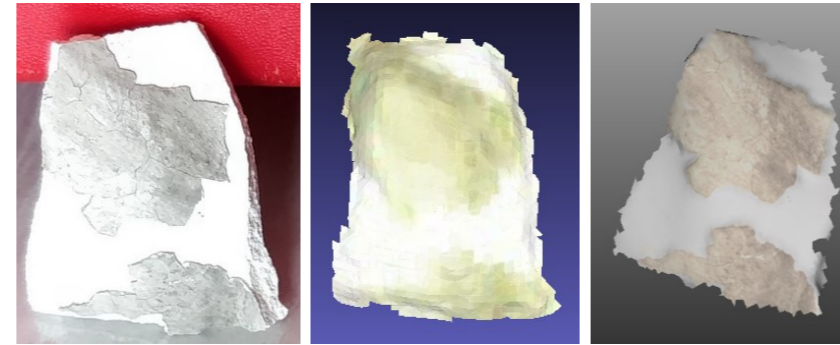
Fragment „strep7“ sochy Madony.



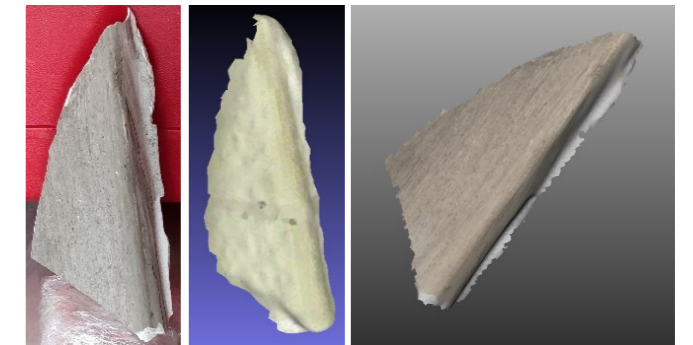
Fragment „strep8“ sochy Madony.



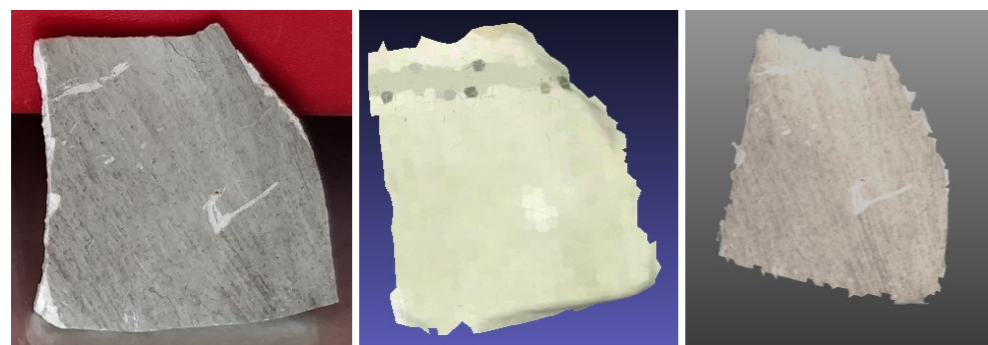
Fragment „strep9“ sochy Madony.



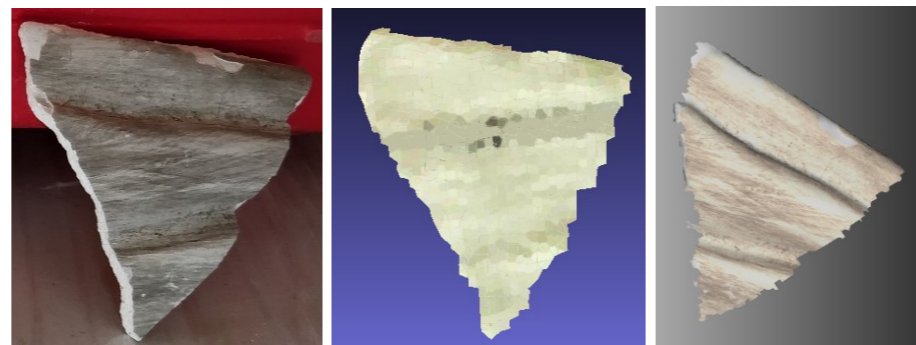
Fragment „strep10“ sochy Madony.



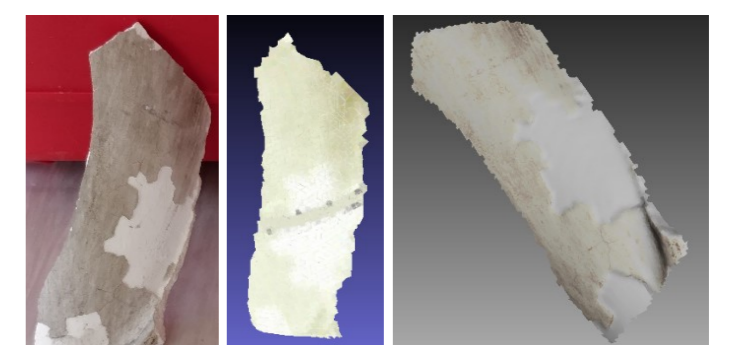
Fragment „strep11“ sochy Madony.



Fragment „strep12“ sochy Madony.



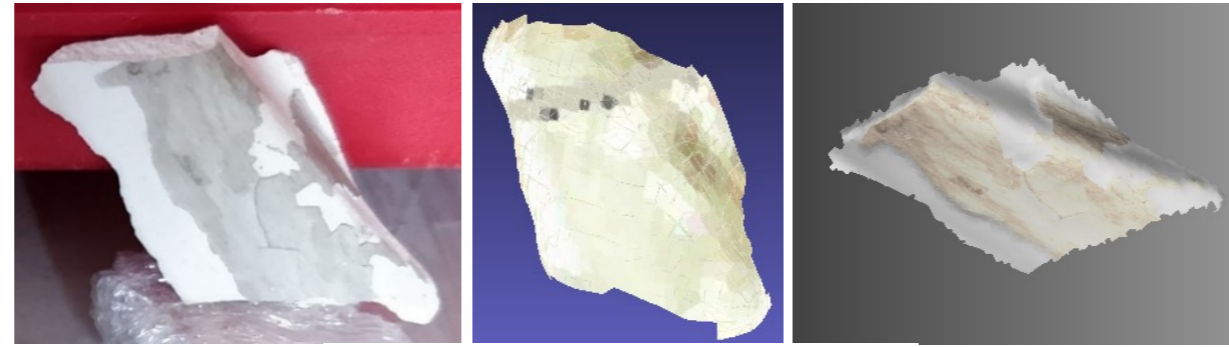
Fragment „strep13“ sochy Madony.



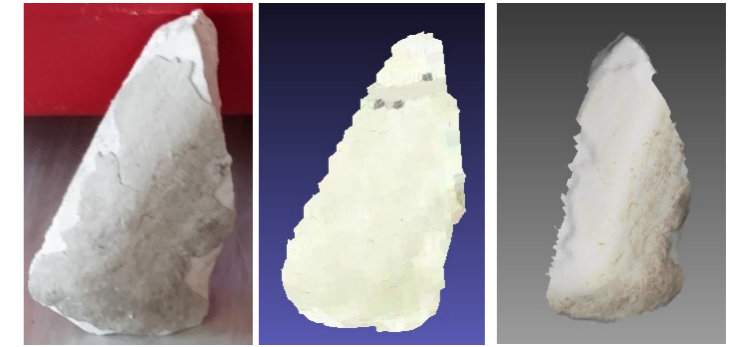
Fragment „strep14“ sochy Madony.



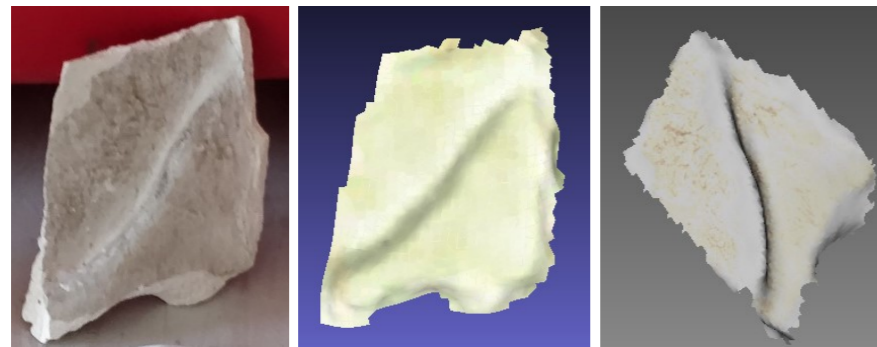
Fragment „strep15“ sochy Madony.



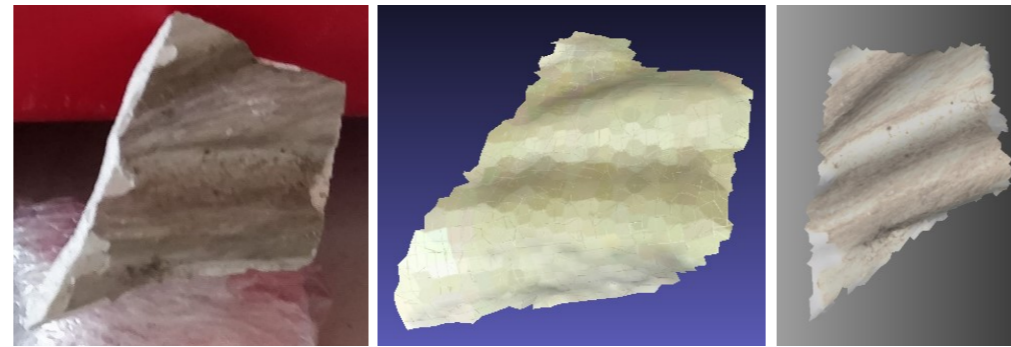
Fragment „strep16“ sochy Madony.



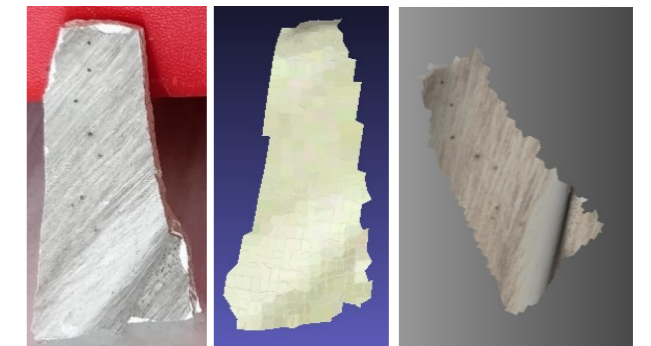
Fragment „strep17“ sochy Madony.



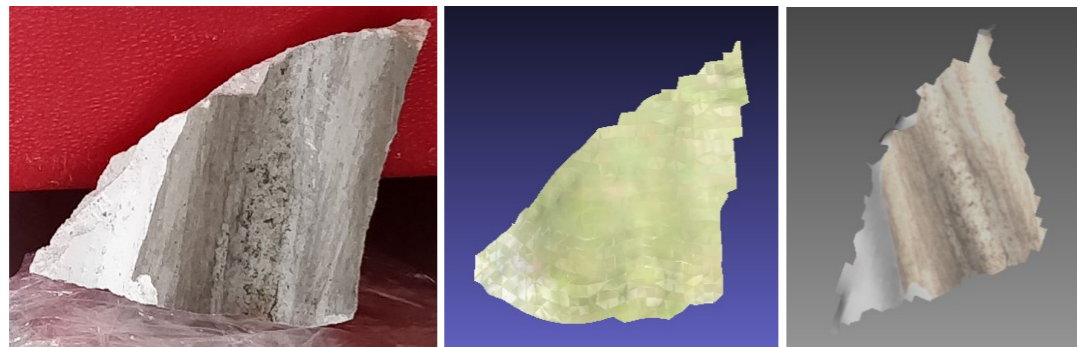
Fragment „strep18“ sochy Madony.



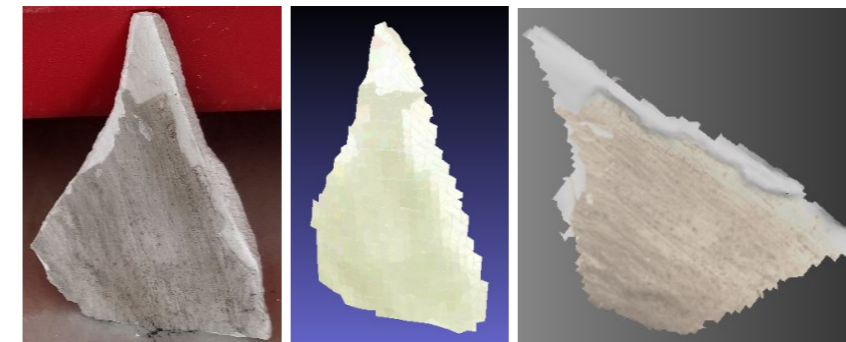
Fragment „strep19“ sochy Madony.



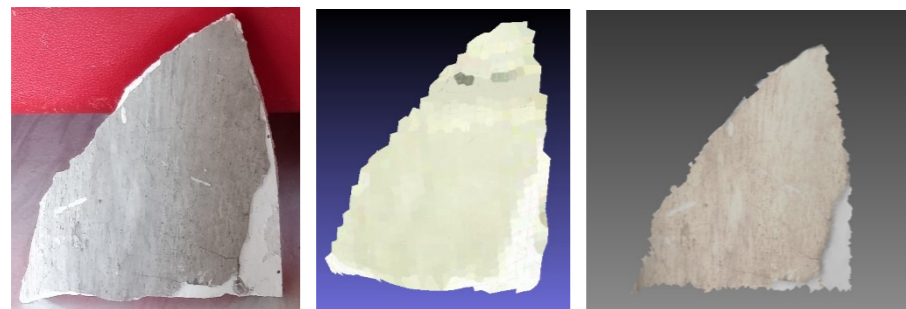
Fragment „strep20“ sochy Madony.



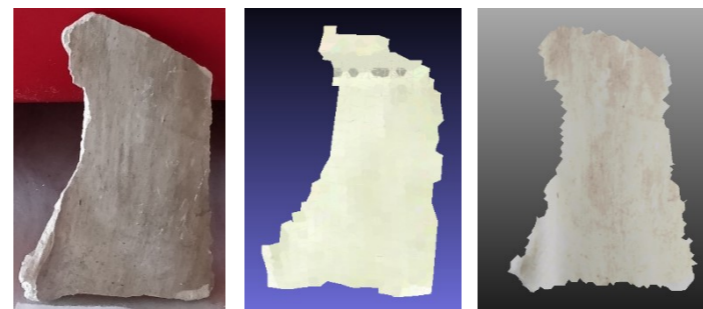
Fragment „strep21“ sochy Madony.



Fragment „strep22“ sochy Madony.



Fragment „strep23“ sochy Madony.



Fragment „strep24“ sochy Madony.



Fragment „strep25“ sochy Madony.