

Univerzita Hradec Králové
Filozofická fakulta

Diplomová práce

2022

Bc. Beata Dvořáková

Univerzita Hradec Králové
Filozofická fakulta
Katedra pomocných věd historických a archivnictví

**Spojení fotogrammetrie a metod laserového skenování pro digitalizaci
kulturního dědictví**
Diplomová práce

Autor: Bc. Beata Dvořáková
Studijní program: N7105 Historické vědy
Studijní obor: Archivnictví – modul Moderní systémy v archivnictví
Forma studia: kombinovaná
Vedoucí práce: Mgr. Klára Rybenská, Ph.D.

Hradec Králové, 2022



Zadání diplomové práce

Autor: Beata Dvořáková

Studium: F16NK0025

Studijní program: N7105 Historické vědy

Studijní obor: Archivnictví

Název diplomové práce: **Spojení fotogrammetrie a metod laserového skenování pro digitalizaci kulturního dědictví**

Název diplomové práce AJ: Combination of photogrammetry and laser scanning methods for digitization of cultural heritage

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Tato diplomová práce se zabývá digitalizací kulturního dědictví. Zaměřuje se na vybrané metody digitalizace a sice na metodu fotogrammetrie a metodu 3D skenování pomocí strukturovaného světla.

Cílem práce je ověřit využitelnost těchto dvou metod v souvislosti s digitalizací vybraného kulturního dědictví, popsat jejich výhody a jejich omezení, jejich možnosti a přesnost zpracování. V teoretické části budou obecně popsány metody digitalizace.

V praktické části budou obě metody aplikovány na vybrané předměty muzejní sbírky a následně budou vytvořeny jejich 3D modely. Na základě získaných dat budou tyto metody vyhodnoceny a vzájemně porovnány.

1. FIŠEROVÁ, Věra. *Laserové skenování*. 1. vydání Ústí nad Labem: Filozofická fakulta Univerzity J.E. Purkyně, 2012. 48 s. ISBN 978-80-7414-458-5.

2. FIALOVÁ, Dagmar, Pavel HLUBUČEK a Jan HOLOVS. Zpráva o průběžném plnění koncepce rozvoje muzejnictví v letech 2015 až 2020: *Strategie dalšího postupu v oblasti digitalizace národního kulturního dědictví, eSbírky* [online]. In: 5.10. 2018, str. 86 - 94 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.mkcr.cz/zpravy-o-plneni-koncepce-rozvoje-muzejnictvi-v-cr-v-letech-20152020-1970.html>

3. ŠINDELÁŘ, Jiří, POLÁČEK, Lumír a KRUPIČKOVÁ, *Přehled výzkumů: Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu* [online]. 60. Brno: Archeologický ústav Akademie věd České republiky v Brně, str. 201 - 224, 2019 [cit. 2021-02-11]. ISSN 2571-0605. Dostupné z: http://prehled-vyzkumu.arub.avcr.cz/miranda2/export/sitesavcr/arub-prehled-vyzkumu/prehled-cisel-a-clanku/prehled-vydanych-cisel/files/pv_60_2_sindelar_et_al.pdf

4. Digitalizace sbírek. *Www.emuzeum.cz* [online]. 19.12. 2015 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <http://emuzeum.cz/informacni-zdroje/digitalizace-sbirek>

5. SAMADI, Ali. Structured-light 3D scanner. *www.academia.edu* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1107159/Structured-light_3D_scanner-Samadi

6. MEDINA, Joshua J. a James M. MALEY a kol. A rapid and cost-effective pipeline for digitization of museum specimens with 3D photogrammetry. *Plos one* [online]. August 13, 2020 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0236417>

7. GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial: *Advances in Optics and Photonics 3/2. OSA Publishing* [online]. 2011, 128-160 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561>

Zadávající pracoviště: Katedra pomocných věd historických a archivnictví, Filozofická fakulta

Vedoucí práce: Mgr. Klára Rybenská, Ph.D.

Oponent: Mgr. Jan Košek

Datum zadání závěrečné práce: 21.2.2020

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala (pod vedením vedoucí diplomové práce) samostatně a uvedla jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne 14. 6. 2022



Bc. Beata Dvořáková

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala své vedoucí práce Mgr. Kláře Rybenská, Ph.D. za vstřícný přístup, cenné rady a odborné vedení. Dále děkuji za možnost práce se skenery v Centru digitálních historických věd KPVHA FF UHK a v neposlední řadě také Městskému muzeu v Náchodě za zapůjčení předmětů sbírky k digitalizaci.

Anotace

DVOŘÁKOVÁ, BEATA. *Spojení fotogrammetrie a metod laserového skenování pro digitalizaci kulturního dědictví*. Hradec Králové: Filosofická fakulta, Univerzita Hradec Králové, 2022, 120 stran. Diplomová práce.

Diplomová práce se zabývá digitalizací kulturního dědictví na příkladech tvorby 3D modelů. V práci je popsána digitalizace některých historických hodin, zapůjčených z Městského muzea v Náchodě. Exponáty jsou datovány v rozmezí od 18. do pol. 20. století. Práce se zaměřuje na metodu fotogrammetrie, její možnosti, využitelnost při tvorbě modelů, její výhody, omezení a přesnost zpracování. Jsou popsány některé problémy vyskytující se v průběhu tvorby 3D modelů společně s návrhy na jejich řešení. Druhou metodou digitalizace zapůjčených muzejních exponátů je metoda 3D skenování pomocí strukturovaného světla. Obě metody jsou porovnány a vyhodnoceny z pohledu využití při digitalizaci kulturního dědictví a vhodnosti jejich aplikace pro paměťové instituce.

Klíčová slova

fotogrammetrie, digitalizace, muzejní sbírka, skenování strukturovaným světlem, kulturní dědictví

Annotation

DVOŘÁKOVÁ, BEATA. *Combination of photogrammetry and laser method scanning for the digitization of cultural heritage*. Hradec Králové: Philosophical Faculty, University of Hradec Králové, 2022, 120 pp. Master Thesis.

The diploma thesis deals with the digitization of cultural heritage using examples of creating 3D models. Digitization of several historical clocks borrowed from the City Museum of Náchod is described in the thesis. Exhibits date from the 18th to the mid-20th century. The thesis focuses on the method of photogrammetry, its possibilities and usability for creating models, its advantages, limitations and accuracy of processing. Some of the issues that occur during the process of 3D model creation are described along with suggestions on how to solve them. The other method of digitization of the borrowed museum exhibits is the method of 3D scanning using structured light. Both methods are compared and evaluated based on their usefulness for cultural heritage digitization as well as how suitable their application is for memory institutions.

Keywords

photogrammetry, digitalization, museum collection, structured light scanning, cultural heritage

Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická východiska a vymezení pojmů.....	11
1.1 Problematika ochrany kulturního dědictví.....	11
1.2 Současné metody a nástroje 3D digitalizace.....	16
1.2.1 Metoda fotogrammetrie.....	17
1.2.2 Metoda 3D skenování.....	27
1.2.3 3D skenery a další nástroje určené k pořízení digitalizátu.....	31
1.2.4 Digitalizace za využití skenerů se strukturovaným světlem.....	32
1.3 Využití 3D skenerů při digitalizaci vybraných objektů kulturního dědictví.....	41
2 Vymezení a formulace cílů diplomové práce a metod výzkumu.....	42
2.1 Popis zvolené sbírky určené k digitalizaci.....	42
2.2 Hardware a software pro zpracování dat fotogrammetrií.....	43
2.3 Hardware a software pro zpracování dat 3D skenováním.....	47
3 Proces digitalizace předmětů sbírky.....	51
4 Vizualizace vzniklých 3D modelů.....	76
5 Srovnání a možnosti kombinace užitých metod digitalizace.....	77
Diskuse.....	84
Závěr.....	87
Prameny a literatura.....	89
Seznam příloh.....	98

Seznam zkratek

AR	Augmented reality
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DSM	Digital Surface Model
eSAD	e-Science and Ancient Documents
GNU	General Public License
JPEG	Joint Photographic Experts Group
MTL	Material Template Library
OBJ	Advanced Visualizer animation package
PNG	Portable Network Graphics
RTI	Reflectance Transformation Imaging
STL	Standard Triangle Language
VCSEL	Vertical-cavity surface-emitting laser
VR	Virtual reality

Úvod

Diplomová práce s názvem *Spojení fotogrammetrie a metod laserového skenování pro digitalizaci kulturního dědictví* se zabývá digitalizací kulturního dědictví na příkladech tvorby 3D modelů. V práci je popsána digitalizace některých vybraných a zapůjčených exponátů muzejní sbírky (historických hodin z Městského muzea v Náchodě), které jsou datovány v rozmezí od 18. stol. do poloviny 20. století. Práce se zaměřuje na dvě metody, fotogrammetrii a skenování strukturovaným světlem, na jejich možnosti, využitelnost při tvorbě modelů, jejich výhody, omezení a přesnost zpracování. Obě metody jsou navzájem porovnány. Jsou zde popsány principy pořizování dat, použitá zařízení, programy určené k jejich zpracování a postupy při konkrétní digitalizaci. Zmíněny jsou i některé problémy vzniklé při tvorbě 3D modelů společně s návrhy na jejich řešení.

Cíle diplomové práce jsou:

- digitalizace vybraných muzejních exponátů a tvorba jejich 3D modelů,
- porovnání vzniklých 3D modelů,
- posouzení vhodnosti, cenové dostupnosti a náročnosti použití jednotlivých metod,
- posouzení vhodnosti a využití metod pro paměťové instituce, zejména muzea.

1 Teoretická východiska a vymezení pojmů

Zvolené téma digitalizace kulturního dědictví propojuje historii a moderní technologie a v následující části jsou uvedeny související pojmy. Jedná se o vymezení pojmů kulturní dědictví a problematika jeho ochrany a dále Digital Humanities, 3D modely, virtuální a rozšířená realita, současné nástroje a metody digitalizace, mezi nimi zejména vybrané metody fotogrammetrie a 3D skenování pomocí strukturovaného světla.

1.1 Problematika ochrany kulturního dědictví

V této kapitole je blíže rozveden pojem kulturního dědictví v souvislosti s jeho ochranou a s paměťovými institucemi. Právě všestranná digitalizace a tvorba 3D modelů přispívá k zajištění jeho ochrany.

Kulturní dědictví a jeho základní specifika

Součástí každé kultury je i její kulturní dědictví, které je definováno jako souhrn lidských výtvorů ovlivňujících kulturu. Je možné ho rozdělit na materiální (hmotné předměty a výrobky z různých oblastí, např. malířství, sochařství, grafiky nebo architektury) a nemateriální, např. myšlenky, citáty, rčení atd. (Kulturní dědictví, 2016). Problematikou definice pojmu kulturního dědictví se zabývají mnozí badatelé. Příkladem lze uvést následující: „*Termín kulturní dědictví, který zahrnuje takové dílčí pojmy jako krajina, historické soubory památek, přírodní i zastavěná místa, sbírkové předměty, kulturní zkušenosti, tradice, výrobní postupy apod., tak zcela přirozeně propojuje přírodní a kulturní prostředí každé společnosti.*“ (Patočka, Heřmanová, 2008, s. 23). Kulturní dědictví představují různé památky, stavby nebo místa s kulturní hodnotou (Horák, Nejedlý, 2013).

Značná část kulturního dědictví je spravována paměťovými institucemi (muzea, archivy a knihovny), které mají jako primární úlohu toto dědictví chránit (hrozí opotřebování, přírodní katastrofy, válečné konflikty nebo nedbalost) a zpřístupňovat jej veřejnosti (Remondino, 2011). Kromě tradičních způsobů ochrany, jako jsou restaurování, vytvoření vhodných podmínek pro uchovávané předměty (správná teplota, světelné podmínky, odborný dohled i manipulace s předměty kulturního dědictví), lze zařadit také moderní technologie. Právě jejich využití umožňuje rozšířit ochranu kulturního dědictví o další způsoby ochrany a sdílení kulturního dědictví s veřejností a badateli (Cubr, 2010). Konkrétně v oblasti digitalizace historických předmětů jsou

moderní technologie nápomocné, a to pro všechny paměťové instituce. Jedná se např. o 2D digitalizace rukopisů, starých dokumentů, map nebo 3D digitalizace různých předmětů muzejních sbírek. Digitalizovaný obsah nebo virtuální modely je možné následně zpřístupnit na Internetu.

Dlouhodobá ochrana dat

S digitalizací souvisí i archivace dat a jejich dlouhodobá ochrana. Digitální obsah je oproti předmětům analogovým (dokumenty, rukopisy a různé artefakty) dynamičtější a jeho ukládání a ochrana je náročná (Hutař a kol., 2016). Digitalizované kulturní dědictví by mělo být dobře dostupné s možností jeho sdílení. Data je potřeba dlouhodobě chránit, ukládat a umožnit jejich přístup i v budoucnosti (Najar, Wani, 2019).

S tím souvisejí následující problémy:

- data je často nutné přesouvat vzhledem k rychlému vývoji médií a technologií,
- nutnost zálohování dat na více typech médií (náročnost na datová úložiště) a ta ukládat na více místech,
- potřeba aktualizace softwaru,
- nutnost ochránit data samotná (bity),
- ochrana a ukládání metadat (data o datech, která zajišťují udržení kontextu, Hutař a kol., 2016).

Digital Humanities

S digitalizací historických předmětů a objektů souvisí Digital Humanities (digitální humanitní vědy). Jsou považovány za jádro vzdělanosti humanitních věd pro 21. století. Postupně se vyvíjejí od 80. let 20. století a propojují humanitní obory s digitálními technologiemi. Například při rozboru historické korespondence zpracovávají data nejdříve humanitní vědci a následně na to naváže jejich digitalizace za využití technologií (Burdicková a kol., 2019).

V rámci těchto věd jsou prováděny různé případové studie, při kterých dochází ke spolupráci pracovníků s digitálními technologiemi s pracovníky paměťových institucí (knihoven, muzeí a archivů). Digitální technologie jsou aplikovány v souvislosti s kulturním dědictvím (v návaznosti na aktuální dění v oblasti výzkumu.)¹ Tato spolupráce je vždy vyhodnocena a je zkoumán její celkový potenciál (Warwick a kol., 2012). Digital Humanities přináší paměťovým institucím nové možnosti v podobě různých metod, které veřejnosti umožňují prohlížet si uchovávané předměty

¹ Některé studie zároveň přidávají i spolupráci s veřejností, např. v rámci eSAD (Warwick a kol., 2012).

kulturního dědictví detailně a bez přímého přístupu k fyzickému předmětu (Burdicková a kol., 2019). Například vytváření 3D modelů objektů kulturního dědictví má velký potenciál pro paměťové instituce, zejména pro muzea. V případě 3D modelů se jedná o výhodu jejich vizualizace a jejich prostorového zobrazení. Oproti pouhé fotografii představuje 3D model pro veřejnost interaktivnější a zábavnější formu prohlížení objektu či předmětu. Zobrazení přes digitální platformu v prostředí Internetu umožňuje jejich snadnější a rychlejší sdílení (Smithies, 2017).

V tabulce 1 jsou uvedeny některé případové studie ze zahraničí, které proběhly v rámci digitálních humanitních věd.

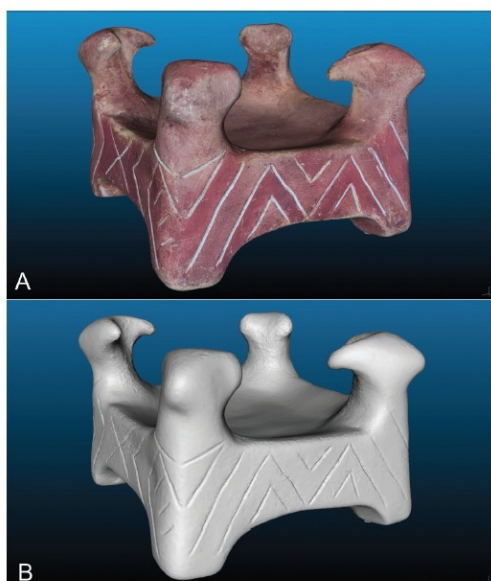
Tab. 1 Vybrané zahraniční případové studie zaměřené na digitální humanitní vědy.

Název případové studie	Zvolená metoda	Popis
Znovu sestavení starověkých fresek.	Skenování jednotlivých kusů pomocí 3D skeneru; virtuální „deska stolu“ program Griphos.	Práce s digitalizovanými kusy: umožnila rychlejší sestavení celku oproti fyzické manipulaci a výsledek byl čitelnější. Docházelo ke kombinování 3D modelu v programu Griphos s vrstvenými 2D prezentacemi (Warvick a kol., 2012).
Virtual Bethel: Zachování kostela Indianapolis založeného roku 1836.	Laserové skenování a proces digitálního modelování.	3D zobrazování, modelování a reprezentace prostorů (a vizualizace na Media Arts & Science) s cílem využití zobrazení jako vlastivědné dokumentace (Neilson, D.Rheams, 2018).
Digitální zobrazování pro asijské umění a kulturu.	3D skenování vybraných jeskynních soch Tianlongshan (sochy Buddhů) pomocí technologie zařízení Artec Spider a Eva.	Shromáždění získaných dat umožnilo rekonstruovat rozbité sochy. Zároveň se podařilo zpětně určit umístění jednotlivých soch v jeskyni. Byly vytvořeny webové stránky s interaktivními ukázkami soch (v kombinaci 2D obrázků (Smithies, 2017).

3D modely

3D model je virtuální zobrazení reálného objektu v prostředí počítačové grafiky. Použita je tzv. lineární perspektiva a 3D model budí zdání trojrozměrnosti (Stanco a kol., 2011). Pomocí specializovaného programu² je vytvořena polygonová síť (síť tvořená trojúhelníky ve tvaru 3D modelu) a na ní je nanesena barva a textura. Textura 3D modelu představuje vzor nebo strukturu na povrchu reálného objektu. Textura se generuje nejjednodušší projekcí na povrch (mapováním textury). Vlivem textur mají výsledné modely věrnou podobu ve vztahu k reálnému objektu (Luhmann a kol., 2014).

Digitalizaci objektu lze provést i bez textury, povrch 3D modelu má tak jednotný, bílý vzhled, na kterém chybí detaily struktury a barva povrchu modelu. Na obr. 1 je znázorněn 3D model s texturou (varianta A) a tzv. „shaded“ 3D model bez textury (varianta B).



Obr. 1 Znáznornění 3D modelu hliněného předmětu („Vinča“) z období Neolitu, 3D model s texturou (A) a stínovaný 3D model (B) bez textury (zdroj: Zachar a kol., 2017).

3D modely mají své využití v různých oblastech:

- jako náhrada za reálný předmět (např. jejich replika vytvořená pomocí 3D tisku),
- prezentace na webu, virtuální muzea³ (Stanco a kol., 2011),

² Specializovaných programů pro fotogrammetrii je celá řada, například 3DF Zephyr (3DF Zephyr, 2021), Colmap (Colmap, 2016), Agisoft (Agisoft, 2028), Meshroom (Meshroom, 2021) nebo Reality Capture (Reality Capture, 2021). V případě 3D skenování jsou programy dodávány se senzeny, např. program Artec Studio (Artec3D, 2021).

- zachycení aktuálního tvaru, detailu, barev, struktury předmětů (uchování jejich digitálního záznamu),
- virtuální rekonstrukce historického předmětu, objektu⁴
- v lékařství,
- v herním a filmovém průmyslu,
- vizualizace objektů – možnost 3D model otáčet, přibližovat, lze používat zvětšení (nápisů mohou být lépe čitelné),
- využití propojení jejich prezentace s dalšími technikami, např. dotykové stoly, virtuální prostředí, projektory (Warvick a kol., 2012).

S 3D modelováním také souvisí virtuální (VR) a rozšířená (AR) realita. Jejich součástí jsou vytvořené 3D modely. Nejvíce jsou využívány v oblastech herního průmyslu, ve vzdělávání a strojírenství. Virtuální realita simuluje v prostředí počítačové grafiky ve 3D prostoru různá reálná prostředí či světy. Takto uměle vytvořené prostředí a objekty souvisí s 3D modelováním předloh z reálného světa. K promítání jsou potřebné speciálně upravené brýle, sluchátka a anatomicky upravené ovladače (Virtuální realita, 2021). Rozšířená realita (AR) funguje na principu, doplnění reálného prostředí o konkrétní digitální prvek v podobě předmětu, objektu, značení nebo textu. Na obrazovce nebo displeji použitého zařízení (chytrý telefon, PC nebo tablet) je zobrazeno reálné prostředí s přidávanými digitálními prvky (Rozšířená realita, 2021).

V rámci vizualizace 3D modelů v prostředí webových stránek je možné využít například platformu pro 3D modelování Sketchfab, kde se publikuje a sdílí 3D obsah, VR i AR obsah. AR obsah je dostupný na mobilních zařízeních a tabletech, jako např. iPhone65+ a nebo Android 8,0+ (Sketchfab, 2022).

1.2 Současné metody a nástroje 3D digitalizace

Digitalizace je obecně definována jako převod z analogové informace do digitální. V případě digitalizace objektů, jak již bylo napsáno dříve, se jedná o proces snímání vizuální stránky objektu a jeho převedení do digitální podoby (také binární virtuální podoby). Prostorová digitalizace ještě přidává informace o poloze objektu, rozměrech, dispozicích a struktuře (Brejcha a kol., 2015). Metod digitalizace je více a jsou vybírány podle typu předmětu či objektu, který je digitalizován.

³ Využití digitalizace pro muzea v rámci tzv. virtuálního muzea. Části sbírek jsou „přeneseny“ řes prostředí počítačů a internetu k širší veřejnosti a představují vizuální komunikaci s multimediálním obsahem (Stanco a kol., 2011).

⁴ První virtuální rekonstrukce v archeologii byly použity v 90. letech a jednalo se pouze o prázdné prostory bez objektů (Remondino, Campana, 2014).

Mezi příklady metod patří:

- digitalizace modelováním v prostředí specializovaného programu (např. Blenderu) na základě předlohy,
- digitalizace 2D (skenování mapových předloh, knih, rukopisů, dopisů apod. za pomoci například knižních skenerů nebo fotoaparátu),
- digitalizace 3D (metoda 3D skenování, metoda fotogrammetrie k získání 3D modelu reálného objektu (Brejcha a kol., 2015) nebo RTI metoda.

Metoda fotogrammetrie umožňuje zachycení geometrických vlastností předmětů, jejich tvaru a struktury povrchu a barvy z fotografií. Nástrojem nebo zařízením pro fotogrammetrii je fotoaparát. Metoda 3D skenování využívá skenery a lze ji rozdělit na skenování pomocí laserových skenerů, které vysílají paprsek a měří dobu jeho letu k objektu a dobu po odrazu paprsku zase zpět (Pavelka a kol., 2017) a na skenery se strukturovaným světlem, které promítají na objekt světelné vzory a jejich projekci snímají kamery (Stančíc a kol., 2012). V diplomové práci jsou skenery popsány v samostatné kapitole 1.2.3 „3D skenery a další nástroje určené k pořízení digitalizátu.“

Metoda RTI (Reflectance Transformation Imaging) funguje na principu pořízení sekvence fotografií. Na každém snímku je předmět nasvícen z jiného úhlu. Vedle předmětu je umístěn malý lesklý objekt a ten odráží zdroj světla, který mění pozici. Po vytvoření modelu povrchu předmětu se jedná o 2D snímek ještě i s trojrozměrnými informacemi. Metoda je vhodná pro drobné předměty, např. pro dokumentaci mincí nebo k digitalizaci starověkých nápisů (Plzák, 2016).

Metody se od sebe liší například finanční náročností. Metoda fotogrammetrie a metoda RTI jsou méně finančně náročné co se týče vybavení i možností využití programů zdarma oproti metodě 3D skenování a to kvůli vysoké ceně skenerů. Každá metoda navíc funguje na jiném principu a je vhodná pro různě velké předměty. V práci jsou podrobněji popsány dvě metody. Metoda fotogrammetrie a metoda 3D skenování pomocí strukturovaného světla.

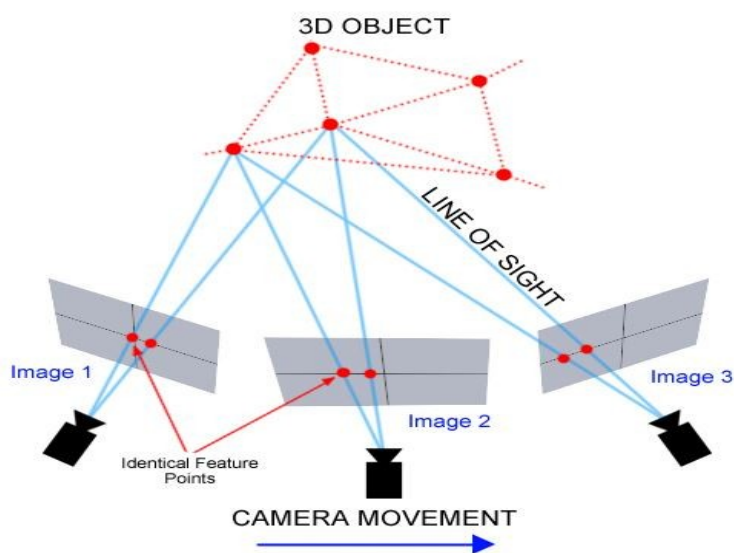
1.2.1 Metoda fotogrammetrie

Fotogrammetrie (Photos = světlo, Gramma=záznam a Metron= měřit), nebo také SFM (Structure from Motion), je technologie či metoda, která získává informace o fyzických objektech z fotografií. Původ této metody sahá až do roku 1851. Objevil ji Aimé Laussedat. V průběhu jejího vývoje se využívala nejdříve analogová fotogrammetrie (k měření se používaly optické nebo mechanické

nástroje a výstupem byly topologické mapy). Později přibyla analytická fotogrammetrie (místo některých zařízení se používaly počítače) a kromě topologických map vznikaly i digitální mapy. Ve druhé polovině 80. let 20. století se začala používat digitální fotogrammetrie (Pavelka a kol., 2017). Fotografie, která je základem celého procesu, představuje dvourozměrné zobrazení (2D) nějakého předmětu. V rámci fotogrammetrie jsou 2D data převedena na 3D data.

Princip fotogrammetrie

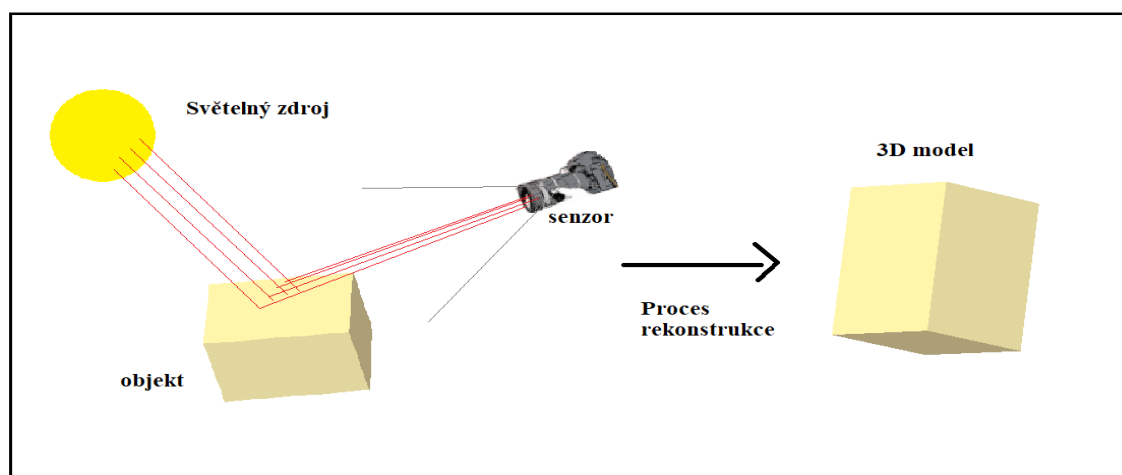
Fotogrammetrie je metodou bezkontaktní. Při získávání potřebných dat nedochází k poškození foceného objektu či předmětu. Tato metoda pracuje s měřením a následným vypočítáváním prostorových souřadnic bodů a horizontálních paralax ze snímků. O fyzickém objektu jsou získány potřebné geometrické informace – tvar, velikost, poloha i informace o jeho povrchu. Je to technika trojrozměrného měření, využívající centrální projekce. Základem celého procesu je fotografie - ne pouze jedna, ale celá sada fotografií. Sada snímků je pořízena s dostatečným překryvem sousedních snímků (60% - 80% překryv). Ten umožňuje najít identické body a následně jsou vypočítávány jejich prostorové souřadnice (Pavelka a kol., 2017). Například je doporučeno pořídít v rámci jedné sady alespoň 50 – 100 snímků (Zuza, 2018). Na obr. 2 je znázorněn pohyb kamery okolo objektu a zachycení bodů reálného objektu na snímcích. Každý sousední snímek obsahuje i část předchozího (tzv. překrytí) a tak vznikají identické body. Získaná obrazová data jsou pak zpracována kalibrací obrazu a jsou odvozena tzv. mračna bodů⁵ (Luhmann a kol., 2014).



Obr. 2 Princip fotogrammetrie (zdroj: Luhmann, 2014).

⁵ Mračno bodů představuje digitální povrchový model (DSM). Hustota bodů určuje mřížku, ve které bodové rozdělení může mít strukturu pravidelnou nebo nepravidelnou (obsahuje mezery). Lomené čáry, představující okraje objektu pak bývají reprezentovány jako speciální bodové kódy nebo jako vektorová data, polygony (Luhmann a kol., 2014).

Na rekonstrukci objektu z fotografií má vliv i optický proces, který je znázorněn na obr. 3. Je definována poloha virtuální kamery a požadovaná geometrická projekce. Pokud paprsek narazí na povrchový prvek, hodnota odpovídajícího pixelu je definována funkcí lokálního odrazu. Je-li to nutné, geometrická transformace výsledného obrazu bere v úvahu vstupní intenzitu nebo hodnotu barvy, vícenásobné odrazy a účinky stínování. Na rekonstrukci z fotografií má vliv i optický proces, kterým se vytváří obraz. K tomuto procesu přispívají světelné zdroje, vlastnosti povrchu objektu, technologie senzorů a kamer, zpracování obrazu a vlastnosti média, kterým prochází světlo (Luhmann a kol., 2014).



Obr. 3 Vliv světla (zdroj: vlastní).

Dělení metod fotogrammetrie

Mezi metody základní fotogrammetrie se řadí následující:

- **jednosnímková fotogrammetrie** - používají se jednotlivé snímky (z jedné nebo i více fotografií rovinného objektu je transformován obraz geodetickým měřením), výsledný obraz je rovinný (2D), příklad využití metody: slouží k tvorbě fotoplánů, k dokumentaci rovinných objektů (rovinné fasády),
- **vícenásobná fotogrammetrie** – je potřeba více snímků, nejméně dva (se vzájemným překryvem), tato metoda se využívá k vytváření 3D modelů,
- **stereofotogrammetrie** - vstupními daty jsou stereo-dvojice, dva snímky s rovnoběžnými osami záběru, na objektu není potřeba mít značky, signální body, dochází k využití stereo-vjemu s měřickou značkou, přiložené na objekt, příklad využití metody: mapování, vyhodnocování složitějších fasád (dokumentace historických objektů),

- **průseková fotogrammetrie** - pracuje se třemi i více snímky, objekt je nafocen z různých míst, osy záběrů sousedních snímků by měly svírat úhel 30-60 stupňů, příklad využití metody: dokumentace historických objektů, tvorba 3D modelů, je využívána u objektů prostorově členitějších⁶ (Pavelka, 2017).

Fotogrammetrii můžeme rozdělit také na leteckou, pozemní a blízkou. Pozemní fotogrammetrie má nepohyblivé stanoviště a k měření se využívá měřičská komora se známými prvky vnitřní orientace. Slouží k měření malých územních ploch (např. lomy, archeologická naleziště) a k tvorbě ortosnímků malé části území nebo ke tvorbě objektů skládaných z tzv. ortogonalizovaných snímků.⁷ U letecké fotogrammetrie nese měřičskou komoru letadlo, komory jsou upraveny k pořizování sady snímků. Využívají se k měření velkých ploch a oblastí. Blízká fotogrammetrie je používána u menších objektů (Pavelka, 2017).

Výhody a nevýhody metody fotogrammetrie

Všechny metody a fotogrammetrie není výjimkou, mají svá místa užití a také své výhody i nevýhody. Pro přehlednější popis zmíněných výhod a nevýhod je níže uveden základní seznam.

Výhody fotogrammetrie jsou:

- bezkontaktnost s objektem,
- rychlost při sběru dat,
- možnost zachytit objekt detailně a s vysokou přesností,
- nenáročnost na pořizování dat,
- dostupnost ke složitějším objektům,
- kvalita výsledných modelů,
- cenová dostupnost (Pavelka, 2017; Cardaci a kol. 2019).

Nevýhody fotogrammetrie jsou:

- mohou se objevit nepřesnosti v hranách a liniích,
- chybovost závislá na různých typech povrchu (Kosmelova a kol., 2019),
- různá kvalita vstupních dat (málo ostré snímky, stíny, pohybující se předměty na pozadí apod.) ovlivňuje zpracování a výsledný 3D model (Pavelka, 2017).

⁶ Dříve bylo potřeba znát geodetické souřadnice stanovišť, dnes stačí pro referencování do souřadnicového geodetického systému označit alespoň tři vřícovací body na objektu pro následné vyhodnocení prostorové polohy objektu (Pavelka, 2016).

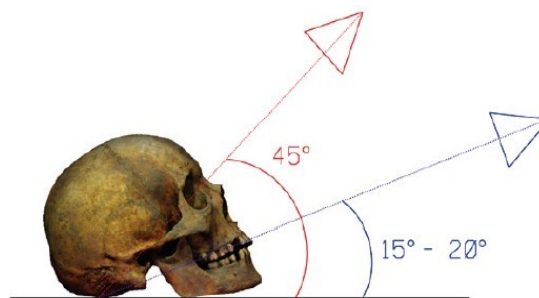
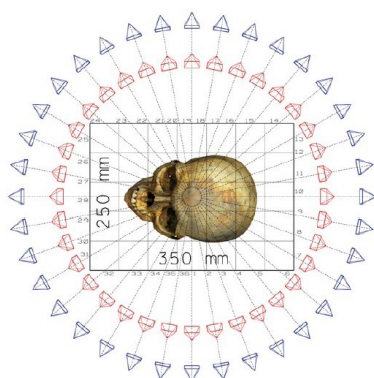
⁷ Středové promítání je převedeno na ortogonální, jsou k tomu potřebné informace o prvcích vnitřní i vnější orientace fotoaparátu a informace o prostorovém členění bodů v záběru (informace jsou sloučeny ze snímků s mapou). Zároveň jsou georeferencované do souřadnicového systému (Pavelka, 2017).

Využití průsekové fotogrammetrie při digitalizaci

Fotogrammetrie se využívá v různých oborech, v geodézii (mapování terénu), při 3D modelování měst, ve strojírenství, v průmyslu k vytváření videoher nebo ve filmovém průmyslu, v lékařství, či v historických oborech k digitalizaci předmětů nebo objektů kulturního dědictví a představuje účinnou digitalizační metodu (Stanco a kol., 2011). V práci je metoda použita k digitalizaci historických hodin, které jsou rozděleny podle velikosti do tří kategorií. Podrobně je toto rozdělení popsáno v kapitole 3 „*Proces digitalizace předmětů sbírky*.“ Využití fotogrammetrie pro digitalizaci kulturního dědictví a v archeologii je popsáno na konkrétních příkladech v různých metodikách.⁸ Rozebírají celý postup a popisují využití technické vybavení, průběh digitalizace, problémy a jejich řešení. I v rámci problematiky Digital Humanities, či česky digitálních humanitních věd je představena celá řada případových studií, zejména z oblasti archeologie a muzejnictví. Jsou dobrým zdrojem při hledání inspirace a cenných rad.

Často se objevují nové nápady, jak vylepšit proces sběru dat. Například výroba a využití podložky (markeru). Marker představuje arch papíru, například o velikosti 250 mm x 350 mm (obr. 4 A). Celá jeho plocha je rozčleněna na čtverce (5x5 cm), ve středu je vyznačen prostor pro položení drobnějšího předmětu (šperk, lebka, zbraň) a od středu vedou pomocné přímky po 10 stupních. Podle nich je postupně posouvána kamera k předmětu (na obrázku archeologický nález lidské lebky). Při pořizování snímku jsou získány alespoň dvě sady kolem předmětu (každá s jinou osou záběru s podložkou, např. 20° a poté 45° (obr. 4 B)) po min. počtu 36 snímků (Šindelář a kol., 2019).

⁸ Příklady některých vydaných metodik z českého prostředí: Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu (J.Šindelář a kol., 2019), Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek (M. Brejcha a kol., 2015), Metodika pro elektronický pasport zpřístupněné památky (Bezděk a kol., 2011), ze zahraničních např.: Seal and imprint Digitization procedures guidelines (Ju-Chun Chu a kol., 2010).



A

B

Obr. 4 Ukázka podložky (markeru) s lebkou umístěnou ve středu podložky (A) a znázornění dokumentace lebky ve dvou úhlech (B), 36 snímků v úhlu 45° - červeně a 36 snímků v úhlu 15° - 20° modře (zdroj: Šindelář a kol., 2019).

Pořizování vstupních dat

Vstupní data představují nafocené snímky, fotografie. „Fotografie je záznamem středového průmětu objektu či krajiny do ohniskové fotografické kamery.“ (Pavelka, 2017, s. 15) V dnešní době digitálních fotoaparátů jsou využívány k záznamu obrazu elektronické senzory CCD CMOS (Pavelka, 2017).

Fotografie se následně nahrají do specializovaného programu (např. 3DF Zephyr). V něm jsou automaticky zpracovány a vzniklý model je ještě upravován (zčištěn) až do výsledné podoby. Protože fotogrammetrie vychází ze základů matematiky a geodézie, má samotné fotografování svá pravidla a doporučení. Dodržení několika základních pravidel zaručuje, že získaná data jsou použitelná. Pokud jsou snímky pořízeny nahodile, vznikne na jejich základě nekvalitní, nepoužitelný 3D model (Šindelář a kol., 2019). Při pořizování dat u větších objektů (zdi, části budov) se musejí vyznačit tzv. vřícovací body. Dále je definována na objektu svislice nebo horizontála. Informace slouží k vyhodnocení správné orientace u os X, Y a Z (Šindelář a kol., 2019).

Pro inspiraci lze čerpat z již zmiňovaných metodik nebo zahraničních článků. Například se jedná se o autory: Karel Pavelka a kol. - „Exaktní metody průzkumu památek“⁹, Jiří Šindelář a kol. - „Přehled výzkumů – Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii“¹⁰, Marcel Brejcha

⁹ Karel PAVELKA - Jan ŘEZNÍČEK – Zdeňka BÍLÁ – Milan PAVLÍK – František KAŠIČKA, *Exaktní metody průzkumu památek*, Praha, Česká technika- nakladatelství ČVUT, 2017, s. 9-13.

¹⁰ Jiří ŠINDELÁŘ – Lumír POLÁČEK – Šárka KRUPIČKOVÁ, *Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu*, *Přehled výzkumů*. 60(2), 2019, s. 201-224.

a kol. - „Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek”,¹¹ Mikolas Zuza – „Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu“¹² a Robert P Barratt - „Photogrammetry in Archaeology: Methodology and Uses“¹³.

Zmiňovaní autoři ve svých pracích uvádějí potřebné informace pro správné pořizování snímků. Týkají se umístění objektu, doporučení počtu snímků i samotného postupu při vlastním focení. Tato pravidla napomáhají k získání dat, která se dají dále použít. Jednotlivé metodiky jsou níže popsány a následně porovnány. „*Předpokladem kvalitní 3D fotogrammetrie pro vědecké účely je aplikace takových pravidel, která zajistí metricky správné výstupy.*“ (Šindelář a kol., 2019, s. 203)

V metodice s názvem „*Exaktní metody průzkumu památek*“ se uvádí následující rady:

- jednotná sada snímků musí být nafocena s rovnoběžnými osami záběru,
- mezi sousedními snímky je doporučován překryv 70 %,
- snímky jsou nafoceny z více míst,
- parametry zařízení zmiňovány nejsou (Pavelka a kol, 2017).

V Přehledu výzkumů „*Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii*“ se uvádí následující rady:

- s objektem se nehýbe,
- fotografujeme větší množství snímků z různých míst okolo objektu (v různých polohách a výšce),
- zajistíme velký překryv sousedních snímků snímků (minimálně 60 %, ale doporučený překryv je 80 %),
- sadu snímků máme s rovnoběžnou osou záběru,
- sada snímků má být nafocena s kolmou osou záběru, šikmou a diagonální,
- nastavené parametry na fotoaparátu zachováme po dobu focení celé sady,
- nepoužíváme zoom,
- při focení menších objektů nastavíme velkou hloubku ostrosti,
- je potřebný dostatek světla, žádné kontrasty osvětlených částí,
- pořízená sada je použitelná i při budoucím zpracování¹⁴ (Šindelář a kol., 2019).

¹¹ Marcel BREJCHA – Vladimír BRŮNA – Zdeněk MAREK – Bára VĚTROVSKÁ, Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek. [online]. Ústí nad Labem, Národní památkový ústav, FF Univerzity J. E. Purkyně, 2015, s. 7-10.

¹² Mikolas ZUZA, Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu [online]. 2018 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu>.

¹³ Robert P BARRATT, Photogrammetry in Archaeology: Methodology and Uses, with Particular Regards to Accuracy.

V „*Metodice digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*“ se doporučují následující rady:

- doporučené zařízení fotoaparát s rozlišením 5 Mpix a více,
- pro lepší rekonstrukci lze použít i širokoúhlý objektiv,
- nefotografujeme nevhodné povrchy, jako lesklé bez struktury a průhledné,
- zajistíme velké překrytí snímků, alespoň 60%,
- metodika vychází z poznatků procesu dokumentace objektů¹⁵(Brejcha a kol., 2015).

V textu „*Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu*“ se uvádí:

- vhodné zařízení je mobilní telefon nebo digitální zrcadlovka (parametry: clona 7-8),
- důležitá je dobrá ostrost snímků,
- doporučeno je pořídit minimálně 20 snímků, ideální 50 – 80 snímků,
- nepohybujeme s objektem, ale fotografujeme okolo něj a v kruhu,
- překryv sousedních snímků je doporučen 60 - 80 %,
- žádné ostré kontrasty ani stíny,
- nefotografujeme objekty s leklým nebo průhledným povrchem (Zuza, 2018).

V textu „*Photogrammetry in Archaeology: Methodology and Uses*“ je doporučeno:

- je potřebné zvážit fotografovaný objekt (velikost, vlastnosti jeho povrchu, např. odrazivost světla),
- zásadní je osvětlení, rovnoměrné; důležité je získat fotografie s ostrými hrany,
- kvalita osvětlení je určující pro kvalitu získané textury (detaily, barva povrchu atd.), např. halogenové žárovky mohou způsobit zkreslení barev,
- obcházíme objekt při fotografování několikrát k získání fotografií z různých výšek a úhlů,
- lze použít otáčivý stolek, ale je důležité zvolit vhodné pozadí,

¹⁴ Ve studii jsou využita jako základ pravidla fotogrammetrie, která byla přednesena na sympoziu Mezinárodní společnosti pro fotogrammetrii a dálkový průzkum Země z roku 1994. V souvislosti se samotnou studií byla upravena na základě aktuálních zjištění a nově doplněna o další možnosti fotogrammetrické metody. „Tato pravidla určují správný postup při fotografování, tedy to, jak budeme objekt našeho zájmu fotografovat a co je nutné na objektu fyzicky měřit.“ (Šindelář a kol., Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu, Přehled výzkumů. 60 (2), 2019, s. 205).

¹⁵ Zvolena byla geodetická metoda pozemní fotogrammetrie, tzv. průseková metoda fotogrammetrie (Brejcha a kol., 2015).

- problémy nastávají u průsvitných materiálů, kdy dochází ke změně kontrastu na základě změny úhlů a osvětlení (Barratt, 2017).

Pokud jednotlivé metodiky mezi sebou porovnáme, můžeme podotknout, že se shodují v postupu, jak nafotit objekt (ze všech stran, měnit úhly a nevynechat pohledy i nadhledy; každou sadu vždy vyfotografovat kolem celého objektu) a je kladen důraz na dostatečný překryv snímků. V metodikách se nejčastěji objevuje doporučení alespoň 80 %. Dále autoři uvádějí i problémy s různými materiály. Metodiky se nijak nerozcházejí v bodech doporučeného postupu fotografování, pouze v rozsahu informací, kdy některé z nich uvádějí podrobnější informace, například nastavení parametrů fotoaparátu. V tabulce 2 je stručný souhrn.

Tab 2 *Stručný souhrn metodik.*

Název metodiky	Autor, kolektiv autorů	Informace týkající se postupu nafocení sady snímků	Podrobnější informace k parametrům
„ <i>Exaktní metody průzkumu památek</i> “	K. Pavelka a kol.	shodné s ostatními	-
„ <i>Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii</i> “	J. Šindelář a kol.	shodné s ostatními	Nastavení hloubky ostrosti, použití zoomu (nedoporučuje); poznámka k osvětlení.
„ <i>Metodika digitalizace...</i> “	M. Brejcha a kol.	shodné s ostatními	Doporučení rozlišení fotoaparátu, užití objektivu.
„ <i>Fotogrammetrie a 3D skenování ...</i> “	M. Zuza	shodné s ostatními	Nastavení hloubky ostrosti, doporučený počet snímků; poznámka k osvětlení.
„ <i>Photogrammetry in archeology: Methodology and uses</i> “	Robert P. Barrat	shodné s ostatními	Doporučení k prozkoumání vlastností objektu před fotografováním a poznámky k osvětlení.

Vliv vlastností objektů na pořizování snímků

Vlastnosti povrchů digitalizovaných objektů ovlivňují výsledný 3D model. Přesnost a úplnost záznamu závisí na interakci mezi světlem a povrchem objektu. Rozhodující je materiál, kterým je tvořen povrch předmětu (různé povrchy reagují jinak na světlo, pohlcují ho nebo rozptylují). Níže uvedené typy povrchů způsobují potíže při digitalizaci:

1. Lesklý povrch:

- odráží světlo, mění jeho odraz, proto se těžko zachytávají potřebné body pro následné výpočty geometrických informací
- program může zobrazit nahodilé tvary a nepřesnosti

- lze s využitím polarizačních filtrů v nastavení fotoaparátu částečně eliminovat odraz světla

2. Průhledné materiály:

- povrch tohoto typu je těžko „zapisovatelný“
- program má problém zobrazit průhledný povrch správně

3. Hladké povrchy:

- chybí výraznější struktura s detaily
- zobrazení v polygonální síti obsahuje chyby, protože nelze najít identické body (např. tvary, které nejsou na reálném objektu nebo díry)
- je možné promítnout na povrch nějaký vzor, nafotit ho s předmětem a následně bez vzoru a do softwaru nahrát obě sady fotografií (Warvick a kol., 2012)

4. Tmavé povrchy:

- při špatném osvětlení způsobují problémy

5. Materiály pískovec a hlína:

- tyto materiály vytváří rozptýlené odrazy a následně nepřesnosti na 3D modelu (Warvick a kol., 2012)

Vzniku některých nepřesností či chybějících informací textury na 3D modelu je možné předejít. Využít se dá lesklá malířská páska (zabrání odrazům světla), nebo barvy ve spreji ze speciálního materiálu, např. antireflexní křídový sprej (křídový sprej MR200, 500 ml), barvy ředitelné vodou nebo barvy, které se odpařují na vzduchu (Reflecon Tarnish 11 HC, 500 ml).

U předmětů s historickou hodnotou se těžko volí konkrétní způsob, protože nesmí dojít k zásahu do jejich struktury a k poškození.

1.2.2 Metoda 3D skenování

Metoda 3D skenování¹⁶ i metoda fotogrammetrie patří společně s dalšími metodami jako geodézie, kartografie a metody dálkového průzkumu mezi tzv. geotechnologie. Postupně se tyto metody, původně využívané v oblasti inženýrství a průmyslu, rozšířily i do dalších oborů, např. památkové péče, lékařství, filmového a herního průmyslu a archeologie. Metoda 3D skenování využívá

¹⁶ Metoda 3D skenování je využívána ke sběru dat a informací o objektech. Prostorové souřadnice jsou získávány automaticky, bezkontaktně a neselektivně a jsou důležité pro výsledné mračno bodů, z kterého jsou vytvářeny 3D modely a jejich vizualizace (Pavelka a kol., 2017).

k získání potřebných dat o objektu 3D skenery. Skener je zařízení, které zaznamenává vizuální stránku objektu (Brejcha a kol., 2005). O předmětu nashromáždí data týkající se tvaru i vzhledu a prostorové souřadnice X, Y, a Z. Získané a zpracované údaje poté převede do virtuální podoby ve formě 3D modelu. Prostorové souřadnice jsou důležité pro výsledné mračno bodů (z něj jsou pak vytvářeny 3D modely) a jsou získány bezkontaktně, neselektivně a automatizovaně. Stačí nastavit na skeneru potřebné parametry, jako jsou oblast skenování, hustota bodů určující, jak podrobně bude zachycen povrch objektu a přesnost určování polohy podrobných bodů k zachycení detailů (Pavelka a kol., 2017). Pro skenery je důležitá kalibrace¹⁷. Kalibrační postup zajišťuje přesnou charakteristiku vztahů mezi zařízením a objektem pomocí sady vnitřních parametrů. Jako kalibrační objekt se využívá obrázek se vzorem (např. rovinný šachovnicový vzor). Vzor je zařízením postupně zaměřen z různých úhlů i vzdáleností a přitom dochází ke kalibraci kamery a projektoru (intenzita projektoru, geometrie projektoru a směr projekce). Při kalibraci kamery je obnovena kalibrační rovina kamerového souřadnicového systému. Následně je kamerou promítnut a zachycen kalibrační obraz se vzorem (např. vzor šachovnice). Přitom dochází ke kalibraci rohových bodů a jejich reprojekci na správnou pozici (Geng, 2011).

3D skenování využívá různé technologie, např. laserové 3D skenování, optické skenování nebo CT skenování (Kosmelova, Nosek, 2019). 3D skenování lze rozdělit podle užití skenerů, např. Na laserové skenery a skenery se strukturovaným světlem, které patří mezi optické skenery využívající princip triangulace (princip je vysvětlen v další části práce). Skenery se liší svým dosahem, přesností měření a rychlostí. Právě dosah zařízení je zásadní pro rozdělení skenerů dle technologického principu (Pavelka a kol., 2008). Laserové skenery vysílají paprsek a měří dobu jeho letu k objektu a dobu po odrazu paprsku zase zpět. V případě laserových 3D skenerů je vzdálenost až stovky metrů (Pavelka a kol., 2008). Při procesu laserového skenování jsou navíc využívány vlastnosti monochromatického světla, které má definované vlastnosti laseru (Brejcha a kol., 2015). Skenery se strukturovaným světlem promítají na objekt světelné vzory a jejich projekci snímají kamery. Promítnutí a snímání světelných vzorů umožňuje přesnou geometrickou rekonstrukci tvaru povrchu, tzv. světelný řez (Stančic a kol., 2012). V případě triangulačních 3D skenerů, kam se řadí i skenery se strukturovaným světlem, je používána vzdálenost do 25 metrů (Pavelka a kol., 2008).

¹⁷ Zobrazovací skenovací zařízení obsahující kameru a projektor musí být zkalibrováno. Kalibrace je nezbytná pro správné měření zařízení a provádět by se měla častěji než pouze před prvním použitím zařízení, jinak hrozí, že bude zařízení za nějakou dobu měřit nepřesně. Záleží na typu zařízení.

Princip metody 3D skenování

V této kapitole je popsána metoda laserového skenování a triangulační metoda. Každá z nich funguje na jiném principu. V případě metody laserového skenování je měřena doba pohybu paprsku vyslaného zařízením („*time of flight*“) pomocí laserového dálkoměru a skenovacího mechanismu. Celková doba letu paprsku je změřena senzorem a je zaznamenán i vertikální a horizontální úhel paprsku. Prostorové informace o objektu jsou získávány díky emitoru a detektoru otáčejících se ve 2 na sebe vzájemně kolmých rovinách. Výsledkem je mračno bodů, které představuje digitální povrchový model, tedy shluk bodů v prostoru se souřadnicemi X, Y, Z (Zachar a kol., 2017; Pavelka a kol., 2017).

Laserové skenery¹⁸ se dělí na pulsní a fázové a dále na pozemní¹⁹ a letecké.²⁰ U obou typů je konstrukce zařízení podobná (Brejcha a kol., 2015). Rozdíl mezi pulsními a fázovými skenery je v dosahu a přesnosti měření.

To zároveň určuje i jejich použití:

- pulsní skenery mají dosah stovky metrů až kilometry, menší přesnost měření vzdálenosti (několik milimetrů až centimetry),
- fázové skenery²¹ mají menší dosah 5-50 metrů, jsou přesnější na menší vzdálenosti (desítky metrů s přesností pod 1 milimetr)

Dělit se také dají podle pohybu na statické a dynamické (lze s nimi pohybovat z místa) a dle dosahu²² (Pavelka a kol., 2017).

Triangulační metody, kam se řadí také metody využívající strukturované světlo, fungují na principu základny o známé délce. Na jednom konci se nachází digitální kamera a na opačném je laserový značkovač. Vzniká tak trojúhelník určený zdrojem světla, bodem definovaným laserovou stopou a zachyceným obrazem pozorovaného bodu (Zachar a kol., 2017). Poloha bodu ze známé základny je vypočítána užitím goniometrie ze vzniklého trojúhelníku a ze směrů vstupního i výstupního

¹⁸ „Důležitou vlastností u laserových skenerů je tvar zorného pole. Jedná se o maximální úhlový rozdíl krajních výstupních laserových paprsků a udává se ve stupních. Liší se u jednotlivých typů 3D laserových skenerů.“ (Brejcha a kol., 2015, s. 14)

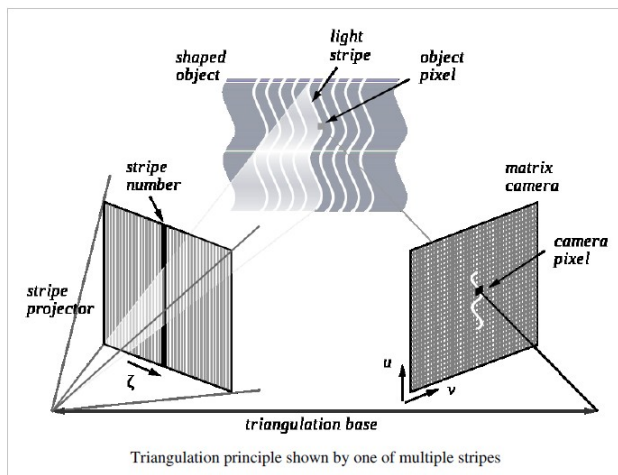
¹⁹ Dále se dělí podle místa využití na mobilní, které se používají v terénu a na stacionární, které jsou umístěné v laboratořích (Brejcha a kol., 2015).

²⁰ Skenerů je velké množství a podle zvoleného zařízení je možné skenovat i celé plochy měřené leteckým laserovým skenováním, komplexy budov měřené laserovým skenováním i středně velké a drobné předměty měřené pozemním laserovým skenováním (Pavelka a kol., 2017).

²¹ Příklad využití fázového laserového skeneru: zaměření podpovrchových nálezů v kostele Stětí sv. Jana Křtitele, Dolní Chabry a jejich dokumentace (Pavelka a kol., 2017).

²² Skenery s krátkým dosahem (do 100 m), se středním dosahem (150 – 350 m) a s dlouhým dosahem (do 6 km) (Pavelka a kol., 2017).

paprsku. Na základě využití triangulace (znázorněné na obr. 5) je určena geometrie předmětu a jeho prostorové informace (Pavelka a kol., 2017).



Obr. 5 Princip triangulace (zdroj: Samadi, 2011).

3D skenery využívající tento typ měření mohou být sestaveny různě. Například jde o sestavu kamera a laser umístěné na základně, dále dvě kamery a projektor strukturovaného světla vysílající světlé a tmavé pruhy pro určení polohy snímaného objektu a kvůli interpolaci. Další variantou jsou dvě kamery rovnou snímající stopu po laseru, který rotuje (Brejcha a kol., 2015).

Původně se využívalo 3D skenování hlavně v průmyslu. Nověji je metoda využívána i v archeologii (dokumentace nálezů, 3D modely historických předmětů a jejich dokumentace) a také v historii a pomocných vědách (např. digitalizace pečeti), ale kvůli vysoké ceně skenerů není toto využití příliš rozšířené (Kosmelova, Nosek, 2019).

Mezi další oblasti využívající tuto metodu patří:

- průmysl (dokumentace aktuálního stavu vodních toků, železnic, silnic),
- reverzní inženýrství (měření objemů např. spalovací komory, získávání přesných dat předmětů, klasifikace brusných materiálů atd.),
- geologické a geomorfologické modely terénu,
- lékařství (zobrazování lidského obličeje, částí těla, 3D model ušního naslouchacího zařízení),
- historie – dokumentace kulturních předmětů (Kosmelova, Nosek, 2019).

Výhody a nevýhody metody 3D skenování

Metody 3D skenování mají své výhody i nevýhody.

Výhody metody jsou:

- automatizovaná činnost (na základě nastavených parametrů skeneru),
- bezkontaktní získávání dat,
- vysoké rozlišení vytvářených 3D modelů,
- rychlost a jednoduchost (v krátkém čase lze získat velké množství dat),
- přesnost (je skenováno více bodů nebo celé zorné pole),
- komplexní a přesné zaměření, vysoká hustota naměřených bodů,
- lze ji využít i v případě hůře dostupných částí objektů (např. jeskyně, klenby kostelů) a složitě členěných budov, exteriérů i interiérů (Pavelka a kol., 2017),
- má přínos pro hodnotnou dokumentaci v památkové péči díky přesnosti a objektivitě dat,
- v případě skenování se strukturovaným světlem je velká přesnost (nanometry až milimetry), ale malý dosah (milimetry až desítky metrů),
- snímání objekt je v procesu skenování dostatečně osvětlován (Brejcha a kol, 2015).

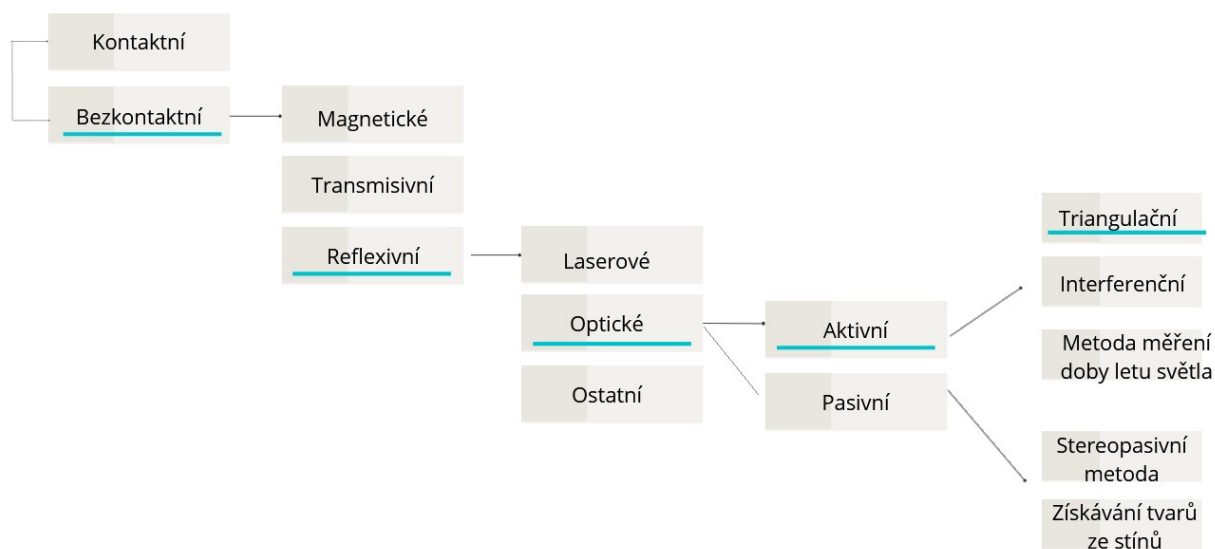
Nevýhody metody jsou:

- vysoká cena přístrojů,
- nutnost použití specializovaných programů (Brejcha a kol, 2015),
- náročnost při zpracování dat (provádí se velké množství početních operací náročných na hardware),
- problémy při zachycení textury některých povrchů, zejména lesklých a tmavých povrchů (Kosmelova, Nosek, 2019).

1.2.3 3D skenery a další nástroje určené k pořízení digitalizátu

Skenery jsou zásadní pro získávání 3D informací pro tvorbu digitalizátu (3D model vytvořený z jednotlivých skenů, ještě nezačištěný) a následného 3D modelů. Různá zařízení využívají rozdílné technologie strukturovaného světla. Na obr. 6 je znázorněn přehled dělení skenerů. Obecně jsou 3D skenery rozdělovány na základě toho, jestli jsou v kontaktu s digitalizovaným objektem (dotykové) a na bezkontaktní. Skenery se strukturovaným světlem se řadí do bezkontaktních skenerů a spadají pod tzv. reflexní zařízení (společně s laserovými a akustickými skenery) a následně do kategorie optických skenerů využívajících optické zařízení pro digitalizaci (Čermák, 2015).

Optické skenery je dále možné rozdělit na aktivní a pasivní. Zásadní rozdíl se týká zdroje světla a emitováním nebo přijímáním energie. Skenery s pasivní metodou nemají zdroj světla zabudovaný v systému, energie není vydávána. Pasivní metodou se měří tvary s využitím například zoomování nebo stereo-vidění. Skenery s aktivní metodou mají zabudovaný zdroj světla ve svém systému a dochází u nich k emitování energie (elektromagnetického záření). Na povrch skenovaného objektu jsou vyslány pruhy strukturovaného světla (Čermák, 2015).



Obr. 6 Taxonomie představuje zařazení skenerů podle autorů Kosmelová a Nosek, 2019. Modře je zvýrazněné, kam se řadí v rámci této taxonomie skenery, které jsou používány při digitalizaci historických předmětů v praktické části práce (zdroj: vlastní).

Skenery použité v praktické části diplomové práce jsou 3D skener Artec Leo a Artec Spider. Oba tyto skenery jsou blíže popsány v samostatné kapitole (kapitola 2.3 „Hardware a software pro zpracování dat 3D skenováním“). Vzhledem k různé velikosti digitalizovaných předmětů jsou využity oba skenery.

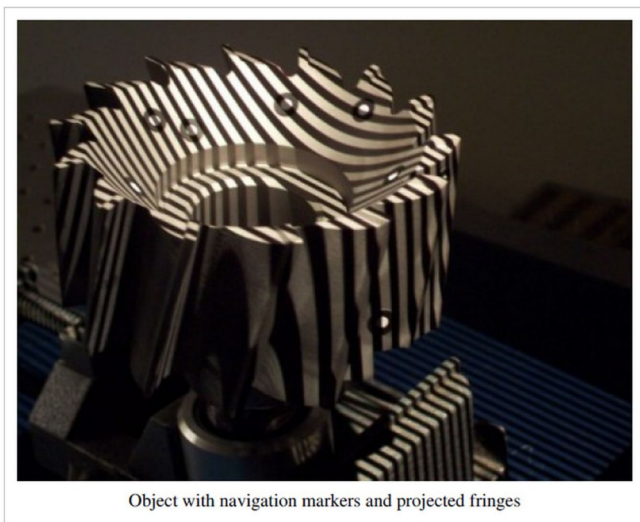
1.2.4 Digitalizace za využití skenerů se strukturovaným světlem

V této kapitole je podrobněji popsána metoda 3D zobrazování využívající skenování pomocí strukturovaného světla, která je zvolena k digitalizaci historických předmětů v této práci. Princip skenování zde spočívá v aktivním osvětlování objektu či předmětu pomocí různých světelných

vzorů či pruhů světla (generovány jsou projektorem) do všech směrů. Na základě zkresleného promítnutého strukturovaného světla je získávána informace o 3D povrchu daného objektu. Dochází k porovnání struktury (vzniklé zkreslením) s nezkrasleným projekčním vzorem. Povrch objektu je vypočítán za pomoci algoritmů strukturovaného světla. Skenovací zařízení se skládá z 1 nebo 2 kamer a video projektoru, který promítá vzor pruhů na část skenovaného předmětu. CCD kamera představuje jednotku *zaznamenávající*, obraz a projektor jednotku *projekční* a počítač jednotku *analyzační*. Tato jednotka po skenování zpracovává a analyzuje data (Zachar a kol., 2017).

Video-projektor promítá na předmět vzor pruhů (obr. 7). Podle tvaru předmětu jsou pruhy ohýbány a deformovány. Tak vzniká nový vzor, který zachytí kamera. Podle vzdálenosti skeneru od předmětu se mění i tloušťka pruhů. Mění se šířka pruhů určuje hloubku. Získaná data slouží ke geometrické rekonstrukci tvaru i povrchu objektu. Je možné využít princip projekce různých vzorů na snímání 3D objekt. Proces snímání je rychlejší pro sběr dat a získává větší množství dat najednou. Generování vzorů proužků, které jsou promítány na povrch objektu, probíhá metodou laserové interference („*Laser interference*“) nebo projekce („*Projection*“). Jsou vysílány dva laserové paprsky, které navzájem interferují. Díky této interferenci vznikají pravidelné, stejně vzdálené linie vzorů. Velikost vzorů může být měněna při změně úhlů paprsků. Potřebná data o objektu jsou shromažďována s vysokou přesností a neomezenou hloubkou ostroty. Nevýhodou metody je hrozící skvrnitý šum i interference s částmi paprsku již odraženými od objektu. Metoda projekce využívá nekoherentní světlo a funguje jako video-projektor. Projektor zobrazuje generované pruhy (Samadi, 2011).

Při digitalizaci pomocí skeneru se strukturovaným světlem se pohybuje zařízením okolo předmětu nebo se předmět otáčí. Při promítání vzorů je potřeba měnit úhly a vzdálenost zařízení od předmětu. Skener může promítat různé vzory např. 3 – 10 projekcí za 1 úhel pohledu. V procesu skenování vznikají postupně části budoucího 3D modelu, které jsou následně v programu zkombinovány v jeden celek, jeden 3D model.



Object with navigation markers and projected fringes

Obr. 7 Promítání vzorů strukturovaného světla na objekt (zdroj: Samadi, 2011).

Přehled užívaných technik strukturovaného světla

Skenery využívající princip strukturovaného světla mají různé technické principy. Postupně se vyvíjejí další technologie promítaných vzorů. Cílem je neustále vylepšovat jejich přesnost měření, rychlost i kvalitu (Remondino, Campana, 2014). Různé skenery využívají rozdílné techniky promítání vzorů, které se skládají ze skupiny pixelů obsahujících odlišná kódová hesla. Každá z technik má své výhody i nevýhody. Pro přehled jsou stručně popsány techniky temporální kodifikace, přímé kodifikace a prostorové kodifikace (Geng, 2010).

1. Techniky sekvenční projekce (Temporální kodifikace)

Tato technika využívá sekvenční projekci vzorů, aby přiřadila kódovaným bodům určité hodnoty. Dochází ke změně vzorů, vždy za určitý čas. U promítaných pruhů dochází ke změně jejich parametrů.

Výhody techniky jsou:

- přesné měření,
- vysoké rozlišení,
- barevné povrchy jsou dobře snímány.

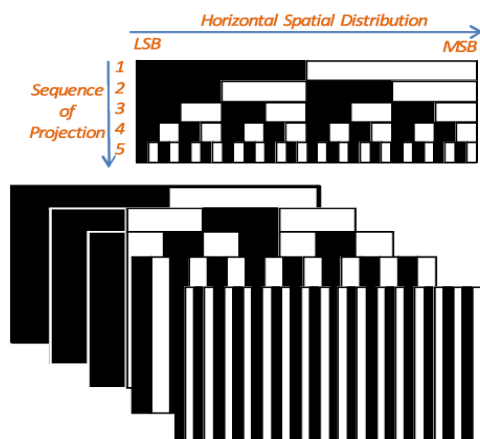
Nevýhody této techniky:

- lze ji použít pouze pro nehybné objekty a neživé objekty,
- vyšší přesnosti je dosaženo za podmínek promítání velkého počtu pruhů, tím ale se protahuje výrazně doba skenování (Geng, 2010).

Technika sekvenční projekce používá několik rozdílných způsobů projekce a vytváření sekvencí pruhů. Jedním z možných způsobů je např. užití sinusových černých a bílých pruhů s rozdílnou intenzitou. Tímto způsobem lze vytvořit pro každý bod jedinečný kód. Je možné i některé způsoby kombinovat mezi sebou. Níže je přehled několika variant této techniky s rozdíly v jejich projekci (Geng, 2010).

a) Binární vzory

Technika binárního kódování vytváří sekvenci projekce pruhů za pomoci černých a bílých pruhů (obr. 8). Pro každý bod na povrchu objektu existuje jediný, unikátní binární kód. S vysokou přesností dochází ke změření povrchu. S objektem by se ale nemělo hýbat, a proto celkové pořízení dat trvá déle (Akca, 2011).



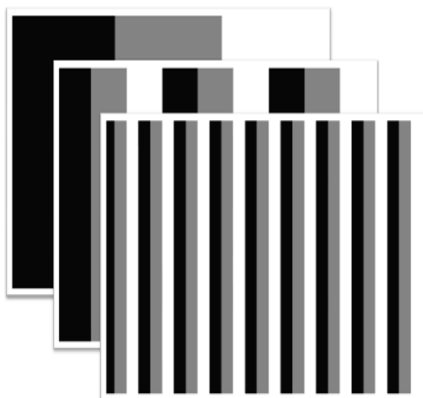
Sequential binary-coded pattern projections for 3D imaging.

Obr. 8 Binární kódování – strukturované světlo (zdroj: Geng, 2010).

b) Šedé vzory

Tyto vzory (obr. 9) umožňují za nižšího množství promítnutých vzorů na objekt získat za vysokého rozlišení potřebné informace o 3D objektu. Na rozdíl od binárních vzorů, kdy se využívá pouze

dvou úrovní intenzity, je možné použít M rozdílných úrovní intenzity pro vytvoření jedinečného kódování vzorů, které jsou promítány (Taubin, 2015).



Obr. 9 Šedé vzory strukturovaného světlo (zdroj: Geng, 2010).

c) Fázový posun

Fázový posun se řadí mezi metody okrajové projekce. Promítaná je sada sinusových vzorů na povrch objektu. Objevují se tak tři okrajové vzory o různých intenzitách pro každý pixel (Geng, 2010).

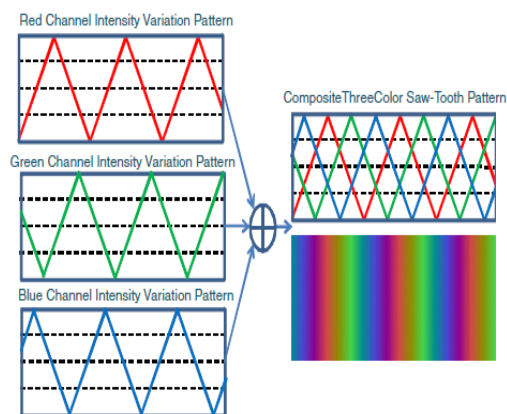
d) Hybridní metoda

Metoda představuje zkombinování fázového posunu a šedého kódování. Kombinací obou se předchází vzniku nesprávného či nejednoznačného kódování na povrchu objektu, které hrozí v případě využití techniky fázového posunu u objektů s povrchem s tzv. diskontinuitou. V kombinaci s šedými vzory je absolutní rozsah fáze určený přesněji a technologie fázového posunu umožňuje lépe rozlišit subpixely na počet pruhů šedého kódu (Geng, 2010).

2. Techniky využívající barevnou informaci (přímá kodifikace)

Tyto techniky využívají osvětlování objektu barevným vzorem a odvozují z něj potřebné informace o souřadnicích X, Y a Z všech viditelných bodů na povrchu. Podle barvy jednotlivých pixelů vzniká kódové slovo (Geng, 2010). Výhodou techniky je využití malého počtu pruhů a dosažení vysokého

rozlišení. Nevýhodou je častěji se objevující šum způsobený např. stíny okolo pixelů, potřebný speciální projektor a kamery a možnost využití metody pouze pro nepohyblivé objekty (Giancola a kol., 2018; Geng, 2010). Podle způsobu využití osvětlení promítaného na objekt (osvětlení s proměnlivou vlnovou délkou nebo užití plynulého barevného kódování) lze rozdělit techniky s barevnou informací na dva typy. Duhová 3D kamera promítá na povrch objektu osvětlení s proměnlivou vlnovou délkou. Dochází k získání identifikovatelných orientačních bodů na základě „korespondence“ mezi projekčním úhlem, rovinou světla a spektrální vlnovou délkou (Geng, 2010). Druhým typem je plynulé barevné kódování (obr. 10) využívající skládání rozdílných a souvisle se měnících barevných vzorů, ze kterých jsou kódovány informace o poloze objektu v prostoru. Například je vytvořen vzor, ve kterém existují variace intenzity pro jednotlivé barvy a po jejich sečtení tvoří souvislý měnící se barevný vzor (Giancola a kol., 2018; Geng, 2010).



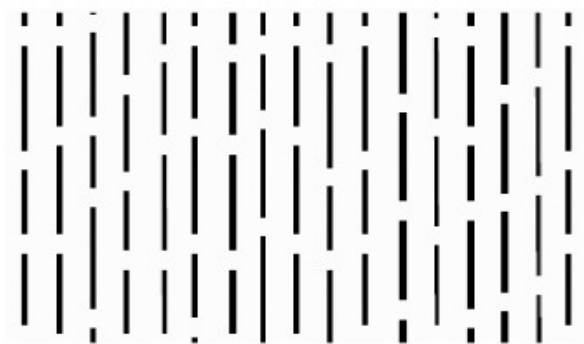
A continuously varying color coding scheme: three patterns of additive primary color sawtooth.

Obr. 10 Plynulé barevné kódování – strukturované světlo (zdroj: Geng, 2010).

3. Pásové indexování (prostorová kodifikace)

V případě pásového indexování jsou pruhy promítané na povrch v jiném pořadí, než ve kterém jsou pozorovány. Technika slouží k dosažení robustní rekonstrukce. Využívá segmentový vzor, ale nelze ho použít ve všech případech (např. v případě deformovaných a nesouvislých povrchů, které nejsou hladké). Podle možnosti využití segmentového vzoru se metoda dělí na prosté pruhované indexování a na pruhované indexování pomocí segmentového vzoru (Geng, 2010). U pruhovaného indexování jsou použity snímače, které mají tři nezávislé kanály s odpovídajícím pásmem spektra. Při kombinování hodnot barevných složek je vytvářeno velké množství barev a vysoká četnost barevné informace, které umožňují získat vysokou přesnost 3D zobrazení (Taubin, 2015).

U pruhovaného indexování pomocí segmentového vzoru jsou segmentové vzory přiřazeny k jednotlivým pruhům. Při procesu 3D rekonstrukce tak dochází při výpočtu algoritmů k jednoznačnému odlišení pruhů od sebe (obr. 11). Nevýhodou je využitelnost přiřazování segmentového vzoru pouze u hladkých a souvislých povrchů. Jinak je opětovná rekonstrukce povrchu příliš komplikovaná a vzory jsou složitými povrchy deformovány.



Obr. 11 Pruhované indexování (zdroj: Geng, 2010).

4. Indexování mřížky

Na objekt je promítán 2D vzor obsahující tzv. „pod-okna“, která jsou jedinečně označena a snadno identifikovatelná. Metoda využívá různé způsoby práce se strukturovaným světlem (např. pseudonáhodné binární pole a barevné označení mřížky²³, případně hybridní metody²⁴ (Geng, 2010).

Pořizování vstupních dat a jejich následné zpracování

Vstupní data představují skeny jednotlivých částí objektu. V průběhu promítání vzorů na předmět jsou kamerou získávány informace o povrchu, jeho barvě a tvaru. Informace o vzdálenosti povrchu jsou získávány v zorném poli skeneru²⁵. U každého zaznamenaného bodu je popsána vzdálenost k povrchu předmětu a je určena jeho trojrozměrná poloha. Podle pozice skeneru (vzdálenost od

²³ „Pseudonáhodné binární pole a barevné označení mřížky: k indexování mřížky je použit barevný kód u svislých i vodorovných pruhů.“
(Geng, 2010, s. 145 – 147)

²⁴ „Hybridní metody – představují kombinaci několika typů kódování, např. kombinace indexování mřížky a pruhovaného indexování.“
(Geng, 2010, s. 145 – 147)

²⁵ „Obrázek“ vytvořený 3D skenerem popisuje vzdálenost k povrchu v každém bodě obrázku. To umožňuje identifikovat trojrozměrnou polohu každého bodu na obrázku (Subramanian, 2012).

objektu, úhel snímání atd.) je v rámci tzv. „trasování“²⁶ („pozicování“) možné průběžně sledovat pomocí programu proces skenování. Skener snímá jednotlivé části objektu a program je zobrazuje (v podobě mračen bodů). V momentě, kdy se skener vzdálí a nedokáže zaznamenávat povrch objektu, hlásí program ztrátu „trasování.“ Po přerušení trasování je potřeba vrátit skener do předchozí polohy a pokračovat ve skenování (Subramanian, 2012).

Předmět se musí naskenovat ze všech stran a úhlů za pomoci vícenásobného skenování. S předmětem je možné pro snadnější skenování otáčet, například pomocí otáčecího stolku. Získané skeny²⁷ jsou následně ve specializovaném programu zarovnány ve společném referenčním systému a potom spojeny v jeden 3D model. Vzniklý model je ještě upravován (zčištěn) až do výsledné podoby. Získaná data tvoří mračno bodů, které obsahuje velké množství prostorových údajů, i stovky milionů (obr. 12). K jeho zpracování jsou využívány speciální programy. Podle velikosti skenovaného objektu je pořízeno jedno mračno bodů nebo několik mračen bodů (např. v případě rozsáhlejších objektů, kdy je potřeba provést skenování z více pozic).



Obr. 12 Na obrázku je vlevo znázorněné mračno bodů a vpravo model, který je už definovaný tzv. polygonovou sítí (zdroj: Brejcha a kol, 2015).

²⁶ Sledování zajišťují tzv. „tracker“ (pro polohu skeneru) a integrovaná kamera, která slouží k určení orientace skeneru (Subramanian, 2012).

²⁷ „Při rychlosti 10 000 vzorových bodů za sekundu mohou skenování s nízkým rozlišením trvat méně než sekundu, ale skenování s vysokým rozlišením, které vyžaduje miliony vzorků, může u některých skenerů s dobou letu trvat minuty. Problém, který to vytváří, je zkreslení způsobené pohybem. Vzhledem k tomu, že každý bod je vzorkován v jinou dobu, jakýkoli pohyb objektu nebo skeneru zkreslí shromážděná data. Obvykle je tedy nutné umístit objekt i skener na stabilní plošiny a minimalizovat vibrace. Použití těchto skenerů ke skenování objektů v pohybu je velmi obtížné.“ (Subramanian, 2012, s. 3)

Velikost dat odpovídající počtu prostorových bodů určuje dobu délky výpočtu a je zapotřebí mít výkonný hardware. Při samotném skenování mohou vzniknout chyby, jako např. nežádoucí body mezi objektem a skenerem, body vzniklé vícenásobným odrazem nebo objevující se mimo objekt. Proto je důležité zkontrolovat získané mračno bodů ještě před jeho zpracováním. Při samotném zpracování dat dochází k odstranění nepotřebných, odlehlých bodů a šumu pomocí filtrace a redukce dat²⁸. V případě použití externí nebo interní kamery je možné k mračnům bodů načíst také texturu (Pavelka a kol., 2017).

Po redukci a filtraci dat přichází na řadu transformace mračen bodů do jedné souřadnicové soustavy. Identické body jsou definovány korelací na základě překryvu sousedních skenů. Poté, co jsou spojeny skeny v jeden celek, objevuje se nadbytečný počet bodů v místech překrytí. Kvůli možnému zpomalení dalších procesů se takové body odstraňují. Samotné mračno bodů nemá obsažené informace o textuře. Takové informace může poskytnout sada obrazových dat pořízených z externí nebo interní digitální kamery a v takovém případě je možné k mračnům bodů načíst i texturu. Informace o textuře je možné získat i z intenzity odraženého signálu při měření délky (Pavelka a kol., 2017). Výstupem zpracování pořízených dat jsou upravená mračna bodů, aproximace objektů matematickými primitivy (válec, kužel, koule, rovina apod.). Aproximace se využívá v případě jednoduchých objektů, které lze částečně nahrazovat (např. sloup lze nahradit válcem atd.). Dalším typem výstupu zpracování dat je triangulace mračna bodů, při které je generována trojúhelníková síť (Pavelka a kol., 2017).

Na získaná data a jejich kvalitu má vliv řada věcí, např.:

- kvalita snímání (týká se zejména barevné hloubky skeneru, hustoty záznamu a ostrosti),
- citlivost zaznamenávání materiálů,
- generování metadat, které se děje automaticky,
- kvalita skeneru a jeho funkce,
- práce se softwarem,
- vnější vlivy, které mohou ovlivnit prostorovou trajektorii laseru (atmosférické podmínky),
- povrch objektu (jeho geometrické vlastnosti a materiál) ovlivňuje odrazivost optického záření,
- klíčové výkonnostní indexy – přesnost, rozlišení a rychlost (Brejcha a kol., 2015; Geng, 2010).

²⁸ Filtrace a redukce databáze při programovém zpracování dat dochází k jejich transformaci mračen bodů do společné souřadnicové soustavy. Jsou nacházeny identické body v sousedních skenech a poté, co jsou spojeny skeny v jeden celek, se objevuje nadbytečný počet bodů (Pavelka a kol., 2017).

Vlastnosti povrchu objektů a jejich vliv na zaznamenávání dat

Vlastnosti povrchů digitalizovaných objektů mají vliv na výsledný 3D model. Tak jako při pořizování fotografií a vytváření 3D modelů metodou fotogrammetrie, i při skenování nastávají problémy s některými druhy povrchů. Přesnost a úplnost záznamu závisí na interakci mezi světlem a povrchem objektu. Rozhodující je materiál, kterým je tvořen povrch předmětu (různé povrchy reagují jinak na světlo, pohlcují ho nebo rozptylují). Jak je uvedeno v části užití metody fotogrammetrie, i tady způsobují potíže podobné povrchy při digitalizaci:

- reflexní povrchy (dochází u nich k odrazu světla od kamery nebo přímo do její optiky a může dojít k tzv. dvojitým odrazům a promítnutý vzor překryje světlo, takže není správně rozpoznán),
- průhledné nebo poloprůhledné povrchy způsobují potíže při zobrazování,
- tmavé povrchy,
- povrchy s perforací (materiály, které mají povrch s otvory, je těžké zachytit skenováním).

Problémy mají skenery také při skenování malých předmětů nebo předmětů, které jsou tenké. V takovém případě totiž dochází k rozptylování nebo i pohlcování promítnutých vzorů (Kosmelova, Nosek, 2019).

1.3 Využití 3D skenerů při digitalizaci vybraných objektů kulturního dědictví

V této práci je metoda 3D skenování použita k digitalizaci historických hodin, které jsou rozděleny podle velikosti do tří kategorií (malé do 15 cm, střední do 50 cm a velké nad 50 cm). Podle velikosti hodin je ke skenování vybrán i konkrétní skener. Použity jsou dva typy skenerů využívající strukturované světlo (Artec Spider a Artec Leo). Každý z nich je vhodný pro jinou velikost předmětu. V tabulce 3 jsou uvedeny pro každou kategorii hodin příklady použitého 3D skeneru.

Tab. 3 Přehled použití skenerů pro jednotlivé kategorie.

Malé	Střední	Velké
do 15 cm	Do 50 cm	Nad 50 cm
Skener Artec Space Spider	Skener Artec Space Spider	Skener Artec Leo
Další příklady předmětů:		
mince, pečetě, ...	středně velké předměty, malé sošky, těžítka, vázy, hist. zbraně atd.	větší předměty, sochy

2 Vymezení a formulace cílů diplomové práce a metod výzkumu

Vymezené cíle představují aplikaci vybraných metod v procesu digitalizace, jejich porovnání a zhodnocení praktického využití pro paměťové instituce, konkrétně muzea. Pro účely diplomové práce jsou zvoleny metody fotogrammetrie a skenování pomocí strukturovaného světla. Fotogrammetrie je vybrána jako hlavní metoda zejména kvůli ceně. Předpokladem je, že pro vytvoření kompletně zdigitalizované muzejní sbírky nebo její části je vhodné fotogrammetrii kombinovat i se skenováním. Postup digitalizace vybrané části kulturního dědictví zahrnuje výběr historického předmětu, digitalizaci pomocí vybrané metody a tvorbu 3D modelů. Zajímavou částí práce je závěrečné porovnání vizuální podoby výsledných 3D modelů s originálem.

2.1 Popis zvolené sbírky určené k digitalizaci

Digitalizovanými předměty kulturního dědictví v této práci jsou historické hodiny zapůjčené z muzejní sbírky Městského muzea v Náchodě. Sběrka hodin náchodského muzea začala vznikat roku 1880 a postupně se rozrůstala. Například roku 1942 bylo v muzeu 66 hodin. Další nárůst sbírky byl v 60. a 80. letech 20. století a dnes čítá sbírka 267 hodin. Ty jsou rozděleny do 7 podsbírek obsahujících hodiny, hodinky a hodinové stroje. Nacházejí se mezi nimi stolní hodiny, stolní hodiny s figurami, budíky i kapesní hodiny. Kapesní hodiny jsou v rámci náchodské sbírky hodin tou nejcennější částí. Největší počet ve sbírce představuje typ nástěnných hodin, mezi nimi například hodiny rámové s hracími strojky z konce 19. století a nejméně je hodin tzv. věžních (celkem ve třech exemplářích, z věže kostela ve Velké Jesenici, z radnice v Polici nad Metují a z věže hronovské školy). V roce 1967 se do muzea převedly sbírky z městského muzea v Červeném Kostelci a v roce 1981 přibyly sbírky muzejního spolku v Novém Městě nad Metují. Dalšími sbírkovými předměty bylo muzeum obohaceno ještě sloučením s městským muzeem v Polici nad Metují a v Hronově (Tůma, 2019).

K digitalizaci je z této sbírky vybráno 18 hodin v různých velikostech (nejmenší mají okolo 6 cm a největší mají přes 80 cm). Hodiny jsou vyrobeny z různých materiálů (dřevo, kov, sklo) a některé jsou bohatě zdobeny. Vybrány jsou například: Stolní hodiny mosazné s plastikou rytíře, konec 19. stol., Stolní hodiny historizující, konec 18. stol. - 3. čtvrtina 19. stol., Cestovní budík, krabička, 2. pol. 19. stol., Budík skříňkový Junghaus, 1890 – 1920, Barokní anglické kapesní vřetenovky, kolem r. 1730, Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol. a další (viz příloha 4).

2.2 Hardware a software pro zpracování dat fotogrammetrií

V této kapitole je podrobněji popsáno zařízení, které je vhodné při fotogrammetrii ke sběru dat.

Zařízení

Vhodným zařízením k pořizování snímků touto metodou je digitální zrcadlovka. Detailní 3D model lze vytvořit i z fotografií pořízených na mobilních zařízeních s kvalitním fotoaparátem. Použit lze také kompaktní digitální fotoaparáty, které mají automatizované nastavení nebo mobilní telefon. Výhodou digitální zrcadlovky je kvalitní CCD/CMOS snímač a dále možnost automatického nastavení nebo ručního nastavení. Je možné měnit tři nejdůležitější parametry - rychlost závěrky, clonu (určuje hloubku ostrosti) a ISO (citlivost snímače). Ty přispívají k expozici snímače fotoaparátu. Navíc je možné ukládat fotografie ve formátu JPEG i ve formátu RAW, který je bezztrátový (Bezděk, Frouz, 2014). Při digitalizaci je použita digitální zrcadlovka Sony a200. Fotografie jsou ukládány ve formátech RAW a JPEG na paměťové karty Lexar premium o velikosti 16 GB a Emgeton o velikosti 4 GB. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry digitální zrcadlovky.

Tab. 4 Parametry digitální zrcadlovky Sony a200.

Name (Model name)	Equivalent 35 mm- format focal length (mm)	Lens groups elements	Angle of view	Minimum focus (m(feet))	Minimum f- stop	Filter diameter
DT 18-70 mm F 3,5 – 5,6	27-105	9-11	76°- 23°	0,38	f/22-36	55

Výsledky pořizování fotografií jsou ovlivněny například:

- vnitřními charakteristikami přístroje,
- charakteristikami materiálu snímaného objektu,
- odrazem světla a absorpcí světla,
- pracovním prostředím a koherencí zpětně rozptýleného světla (Stanco a kol., 2011).

Specializovaný program a proces rekonstrukce

Softwarů k využití fotogrammetrie je několik ve verzích zdarma i komerčních. Jedná se například o programy 3DF Zephyr²⁹, Meshroom, Colmap, Reality Capture nebo Agisoft Metashape. Tyto programy fungují na stejném principu a provádějí rekonstrukci 3D modelu za pomoci algoritmů z pořízené sady fotografií. Liší se svými požadavky na hardware (např. velikost RAM, typ grafické karty atd.) a software (podpora OS). Vždy jsou tyto informace uvedeny na webových stránkách jednotlivých programů.

Pro tvorbu modelů je vybrána neplacená verze programu 3DF Zephyr, který je kompatibilní se zvoleným zařízením pro zpracování dat (notebook s operačním systémem Windows 10). Tento program nepožaduje dedikovanou grafickou kartu nVIDIA s knihovnou CUDA, jako například Colmap nebo Meshroom a je možné ho využívat v několika verzích zdarma (např. 3DF Zephyr Free) nebo v placených verzích (např. 3DF Zephyr Lite, 3DF Zephyr Pro apod.). Program je vyvinutý a prodáváný italským softwarovým domem 3D FLOW a poprvé byl vydán v lednu roku 2014. Od té doby je neustále aktualizován (3DFlow, 2021).

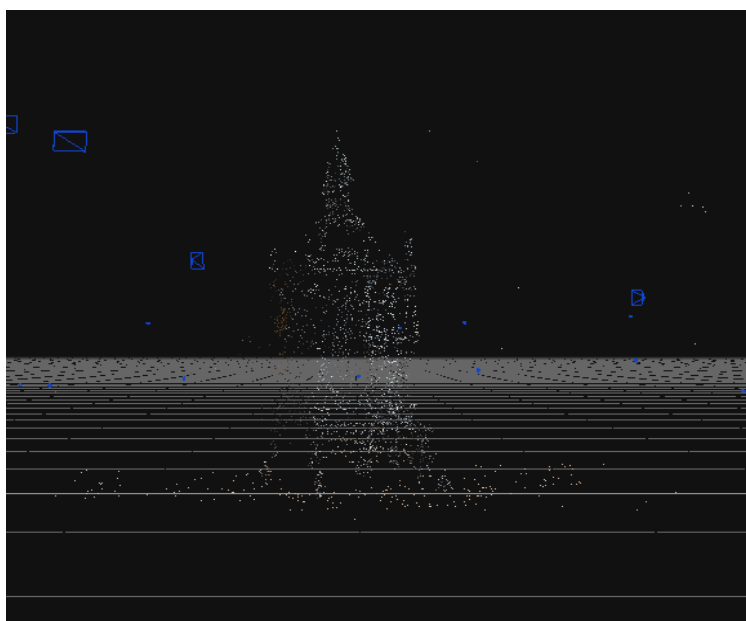
Zvolená verze softwaru 3DF Zephyr Free je ještě kombinována se zkušební verzí 3DF Zephyr Lite s platnou licencí na dobu 14 dní. Obě tyto verze programu dokáží vytvořit kvalitní 3D modely. Liší se v omezení počtu snímků, které lze nahrát ke zpracování. 3DF Zephyr Free má omezení max. 50 snímků a 3DF Zephyr Lite má omezení max. 500 snímků (3D Flow, 2021). Rekonstrukce 3D modelu probíhá způsobem SFM nazývaným Struktura z pohybu (Structure from Motion). Jedná se o proces, který rekonstruuje 3D strukturu z jejich projekcí do řady obrazů. V průběhu procesu dochází k výpočtům pomocí speciálních algoritmů³⁰ a jsou vypočítány souřadnice X, Y a Z (3DFlow, 2021). Měření prováděná z digitálních snímků odkazují na souřadný systém pixelů a na metrický souřadnicový systém odkazuje kolinearita³¹ (převod z pixelu na souřadnice). Obrázek je vytvořen pomocí transformace (díky známému rozměru senzoru a velikosti pixelu) a nalezený objekt vzniká tak, že jsou lokalizovány jednobodové prvky, čáry a hrany pomocí výpočetních algoritmů (Luhmanna a kol., 2014).

²⁹ Program 3D Zephyr je možné využívat v několika verzích (3DF Zephyr Free, 3DF Zephyr Lite, 3DF Zephyr Pro a Zephyr Aerial). Jedná se o komerční software, ale lze využít neplacenou verzi nebo verzi s omezením na dobu používání (3DFlow, 2021).

³⁰ „Algoritmus využívá skutečnosti, že každý bod (pixel) je společně se svým okolím unikátní, a proto platí předpoklad jeho nalezení i na dalších snímcích.“ (Brejcha a kol., 2015, s. 39)

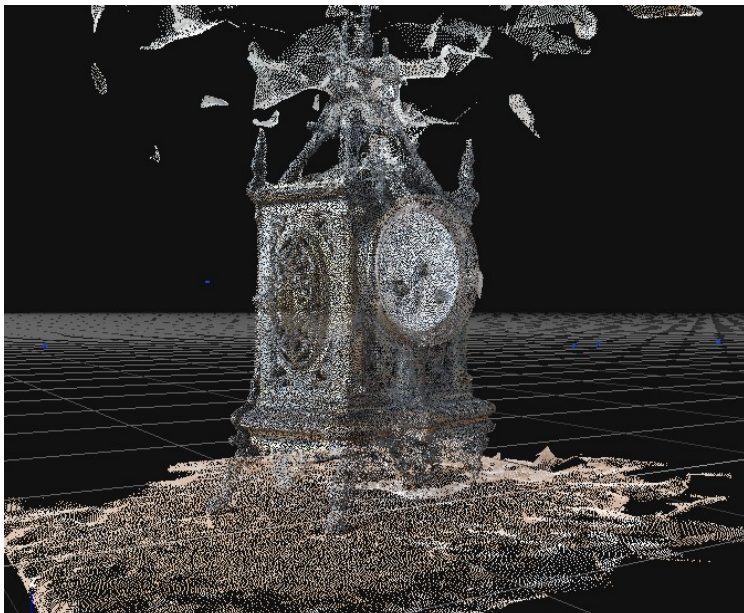
³¹ Princip kolinearit je stanovený mezi středem projekce kamery a bodem v obraze a odpovídajícím bodem v prostoru objektu. Více snímků jednoho objektu umožní, že lze 3D objekt rekonstruovat pomocí více paprsků kolinearit mezi odpovídajícími obrazovými body (Luhmann a kol., 2014).

Program provádí automatické výpočty a zpracování dat ze získaných fotografií. Hledá společné prvky, tzv. identické body a vypočítává, z jakých úhlů byly snímky pořízeny. Pomocí korelační analýzy jsou vyhledány shodné body na sousedních snímcích, pořízených z různého místa (každý bod, pixel, lze najít i na dalších snímcích). Podle polohy kamery při pohybu prostorem jsou odhadovány souřadnice os X, Y, Z. Díky ohniskové vzdálenosti fotografie program vypočítává i hloubku v prostoru (Remondino, Campana, 2014). Z bodů je vypočítáno řídké mračno bodů, anglicky sparse cloud a v něm jsou zaznamenány seznamy bodů i se souřadnicemi os X, Y a Z (obr. 13). Body lze dobře zjistit na jednotlivých snímcích a jsou důležité pro následující výpočty prvků vnitřní i vnější orientace snímků (Pavelka a kol., 2017).

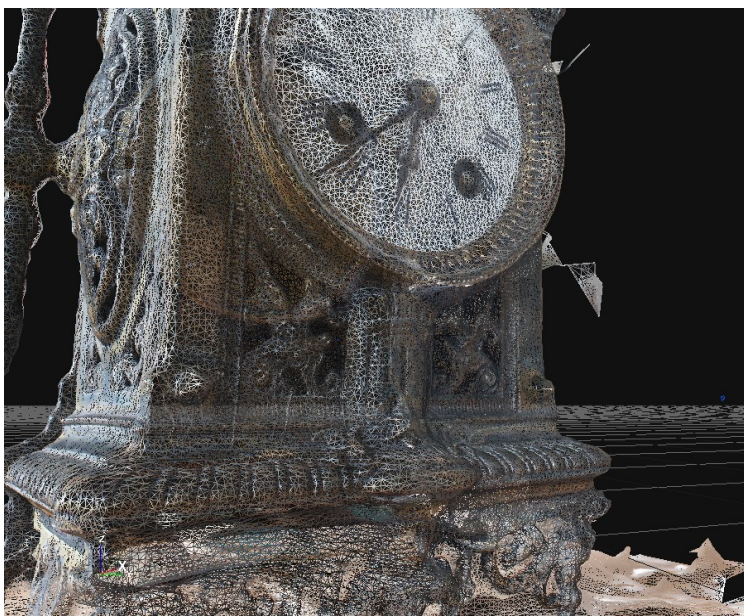


Obr. 13 Řídké mračno bodů - sparse cloud.

Poté je model převeden na mrak bodů s vysokou hustotou, anglicky dense cloud (obr. 14) a automaticky je připojen do polygonální sítě, představující souhrn hran, vrcholů a ploch tvaru objektu znázorněném už v 3D grafické podobě (obr. 15). Na závěr je nanesena na model textura (3DFlow, 2021). Vzniklý 3D model (obr. 16) je možné upravovat pomocí softwarových nástrojů, např. filtrovat hloubku, zaplnit vzniklé díry, začistit okolí, odstranit přebytečné prvky, případně nerovnosti na modelu (Remondino, Campana, 2014).



Obr. 14 *Husté mračno bodů – dense point cloud*



Obr. 15 *Polygonální síť – polygon mesh..*



Obr. 16 Výsledný model po dokončení všech fází rekonstrukce, hodiny Francouzské stolní, pol. 19. stol. Na spodní části modelu jsou viditelné i části desky, na které byly hodiny focené. Od těchto částí je následně model vyčištěn

2.3 Hardware a software pro zpracování dat 3D skenováním

V této kapitole jsou popsány užívané skenery (Artec Leo a Artec Space Spider) společně se specializovaným softwarem ke zpracování dat. (Artec Studio).

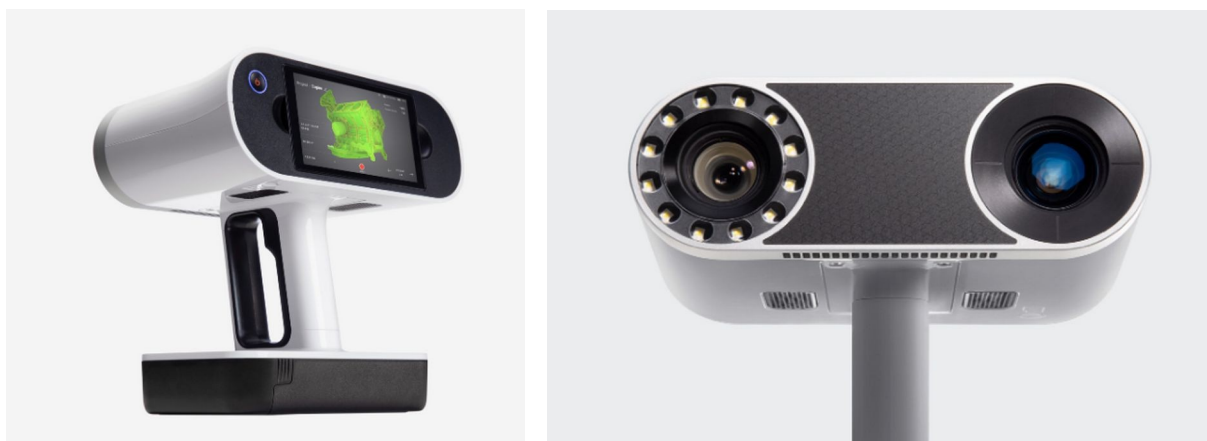
Skenery použité k digitalizaci

Při digitalizaci sbírkových předmětů v diplomové práci jsou použity 3D skenery Artec Leo a Artec Space Spider od firmy Artec 3D, která se zabývá výrobou ručních i přenosných skenerů. Ruční 3D skener Artec Leo (obr. 17) je profesionální skener, který snímá data rychle a ve vysokém rozlišení. Funguje na technologii VCSEL³² světla. V praktické části diplomové práce se osvědčil při digitalizaci předmětů v kategorii střední předměty (velikosti do 50 cm) a pro velké předměty (velikosti nad 50 cm). Po dobu skenování je možné sledovat průběžně jeho displej, na kterém se zobrazuje replika modelu v reálném čase. 3D skener může být připojený i ke cloudu (umožňuje vzdálený přístup k datům) a Wi-Fi. Při procesu skenování se skener Artec Leo nepřipojuje

³² Vertical-cavity surface-emitting laser je typ polovodičového laseru, který poskytuje mnohem lepší parametry a možnosti použití než EEL – Edge emitting laser (VCSEL, 2018).

k počítači, protože má integrovaný počítač. Artec Leo je využíván v celé řadě oborů jako jsou architektura, strojírenství, medicína, umění, design, věda a vzdělávání (Artec Leo, 2021).

3D skener Artec Leo je bezdrátové zařízení s vestavěnou baterií. Při skenování nemusí být zapojený přes datový nebo napájecí kabel. Skener je spárováný s pokročilým 3D skenovacím softwarem Studio Artec. Má automatizované funkce, včetně režimu autopilota a výkonného sledování. Obsahuje integrovaný procesor NVIDIA Jetson TX2 a HD vestavěný interaktivní dotykový panel. Využívá technologii AI a zachycuje pouze potřebná data. Při jejich získávání lze sledovat projekci a zpracování 3D modelu na obrazovce v reálném čase. V průběhu skenování je možné sledovat, které části jsou zachyceny a pomocí tzv. barevné mapy vzdáleností můžeme udržet správnou pozici skeneru od objektu³³. Při práci s texturou objektu se obejde bez značek či referenčních bodů. Zařízení má rozšířené zorné pole, které umožňuje zachycení velkých i malých objektů. Přístroj umožňuje pozastavit skenování a pokračovat později. Data jsou uložena a následně jsou k nim načtena nová při dalším skenování (Artec Leo, 2021).



Obr. 17 Ruční 3D skener Artec Leo (zdroj: Artec 3D, 2021).

3D skener Artec Leo dokáže snímat oblast o velikosti až 160 000 cm krychlových. Přitom zvládá dobře nasnímat středně velké objekty (okolo 20-50 cm) a velké objekty (50-200 cm) i celé plochy. V případě větších předmětů (nad 200 cm) a velkých prostor potřebuje být spárováný s výkonným počítačem. Skener snímá objekty rychlostí až 3 milionů bodů/s (Technické specifikace, 2021). Podrobné technické parametry viz příloha 7.

³³ Jedná se o červené, modré nebo zelené zbarvení povrchu modelu: červeně zbarvený povrch – skener je příliš blízko, modře zbarvený povrch – skener je daleko, zelené zbarvení – optimální vzdálenost k objektu (Artec Leo, 2021).

Druhým skenerem je ruční 3D skener Artec Space Spider (obr. 18) s vysokým rozlišením na bázi technologie modrého světla³⁴. Je vhodný k digitalizaci menších předmětů. Modré světlo je bezpečné i při skenování osob. Skener se osvědčil při digitalizaci předmětů v kategorii malé (předměty o velikosti do 15 cm) a střední (předměty o velikosti do 50 cm). Zařízení má zabudovaný interní termoregulační systém k rychlému rozptylu světla³⁵ a nepřehřívá se.



Obr. 18 Ruční 3D skener Spider (zdroj: Artec 3D, 2021).

Skener při snímání povrchu předmětu dokáže získávat data dlouhodobě a opakovaně. Vzniklé 3D modely digitalizovaných předmětů mají přesnost 0,05 mm a rozlišení 0,1 mm. Využití skeneru je obdobné jako u skeneru Artec Leo. Používá se v oborech jako reverzní inženýrství, průmyslový design a výroba, ve zdravotnictví, ve vědě a vzdělávání, umění a designu. Ve filmovém a herním průmyslu se často používá při tvorbě modelů pro aplikace VR (Artec Space Spider, 2021). Podrobné technické parametry viz příloha 8.

Software pro zpracování dat

Základní programy jsou dodávány přímo se zařízením. Zvládají základní funkce jako načtení dat, vizualizace surových dat, čištění a úprava nepotřebných dat z okolí objektu. Dále umožňují spojení skenů pořízených z různých stanovisek do lokálního souřadného systému s definovanými

³⁴ Technologie modrého strukturovaného světla využívá ke sběru dat kombinováním projektoru (vysílá vzory na povrch), kamery a objektivu. Modré světlo má výborné rozlišení (vzdálenost mezi jednotlivými body mračna bodů, vytváří drobné detaily a neovlivňují ho okolní světelné podmínky). Tato technologie vyhledává konkrétní frekvence modrého světla, k tomu mají skenery speciálně nastavené čočky (High-Resolution Structured Light Scanning, 2020).

³⁵ Název „Space“ získal skener kvůli svému původnímu účelu, kdy měl být využíván Mezinárodní vesmírnou stanicí. Nově se liší od svého předchůdce zabudovaným aktivním chladičím systémem (Artec Space Spider, 2021).

souřadnicemi pro body X, Y a Z. V neposlední řadě umožňují samotný export dat v různých formátech. Dodávány mohou být i archivační programy, které ukládají surová a neupravená data (Brejcha a kol., 2015). Zmiňované 3D skenery Artec Leo a Artec Space Spider používají ke zpracování získaných dat specializovaný program Artec Studio (verze 15), ve kterém vznikají výsledné 3D modely. Při skenování modelu i se spodní částí (vzniká více projektů) je nutné spojit jednotlivé části objektu. Lze to provést manuálně nebo automaticky (automatické spojování). Pokud se nepřipojí spodní část objektu, vznikne v tomto místě vydutý útvar. Ten se musí odstranit, nechat zaplnit prázdné místo a nanést automaticky texturu (Rybenská, Borůvková, 2020).

V programu jsou data zobrazována v reálném čase a mohou být zpracovány datové sady s počtem až 500 milionů polygonů. Prostředí programu je uživatelsky snadné na ovládání. Program je každoročně aktualizován. Při skenování program provede analýzu povrchu předmětu a mění nastavení citlivosti 3D skeneru (Artec Studio, 2021). Součástí programu jsou i potřebné nástroje pro úpravu a začišťování 3D modelů, např. nástroje k oříznutí plochy nebo skenu, vyhlazovací nástroje a nástroje k upravování povrchu. 3D model lze také uložit ve formátu SPROJ. Jedná se o nativní formát a umožňuje další práci s modelem v programu (Rybenská, Borůvková, 2020).

Data je možné nahrát do Artec Cloudu a pracovat na dálku (data si prohlížet a sdílet je). Výsledné modely je možné exportovat v mnoha formátech, jako jsou OBJ, PLY, WRL, STL, AOP, ASC, Disney PTEX, E57, XYZRGB. Prostředí programu a práce s daty a nástroji je blíže popsáno v praktické části práce v kapitole 3 „*Proces digitalizace předmětů sbírky.*“

3 Proces digitalizace předmětů sbírky

V následující části práce je popsána tvorba 3D modelů metodou fotogrammetrie. V jednotlivých krocích celého procesu je popsán postup digitalizace historických objektů (doplňených pro lepší názornost obrázky a fotografiemi), některé problémy a návrhy na jejich řešení, případně možnosti, jak se jim vyhnout.

Tvorba modelů metodou fotogrammetrie

Metoda fotogrammetrie umožňuje tvorbu 3D modelů z fotografií. Při dodržení zásad popsaných v kapitole 1.2.1 „Metoda fotogrammetrie“, jsou pořízeny sady snímků pro jednotlivé objekty. Tím však práce na tvorbě 3D modelu nekončí a následuje až několika hodinový proces „začišťování“ a oprav. Celý postup je popsán v následujících krocích.

- 1) Popis předmětů k digitalizaci a stanovení vlastního postupu
- 2) Fotografování historických předmětů
- 3) Program 3DF Zephyr
- 4) Proces rekonstrukce
- 5) Úprava digitalizátů v prostředí 3DF Zephyru
- 6) Úprava modelu v programu Blender
- 7) Problémy a jejich řešení

Popis předmětů k digitalizaci a stanovení vlastního postupu

Metodou fotogrammetrie jsou digitalizovány historické hodiny, které jsou rozděleny podle velikosti do tří kategorií³⁶ (malé do 15 cm, střední do 50 cm a velké nad 50 cm). Na všechny tyto velikosti je metoda fotogrammetrie dobře aplikovatelná. Jednotlivým kategoriím odpovídá minimální množství snímků potřebných pro tvorbu dostatečně kvalitního 3D modelu. Předpokládaný minimální počet snímků u menších předmětů je 50, u středně velkých předmětů ca 100 a u velkých předmětů je odhadovaný minimální počet snímků ca 140 až 200. Jednotlivé velikostní kategorie objektů jsou uvedeny v tabulce 5. Z celkového počtu 18 historických předmětů jsou v kategorii „malé“ 4

³⁶ Za drobné objekty jsou označovány například sochy podle „Metodiky dokumentace drobných památek“ od autorů P. Hrubý, E. Altová a A. Kadlec. Drobné památky, přestože představují velké předměty (volně stojící sochy, boží muka atd.), jsou takto charakterizovány pro svou přístupnost nikoliv podle velikosti (Hrubý a kol., 2015). Exponáty hodin použité v této práci jsou do příslušných kategorií rozděleny z praktických důvodů s ohledem na postup digitalizace.

exponáty, v kategorii „střední“ je 12 exponátů a v kategorii „velké“ jsou 2. Na obrázku 19 jsou ukázky zástupců hodin z jednotlivých kategorií. Uveden je také počet snímků v sadě pro tvorbu modelu pro konkrétní případ.

Tab. 5 Rozdělení historických předmětů do kategorie „malé“, „střední“ a „velké.“

Malé	Střední	Velké
do 15 cm	Do 50 cm	Nad 50 cm
50-100 snímků	110 – 130 snímků	140 – 200 snímků
Další příklady předmětů:		
mince, pečetě atd.	středně velké předměty, malé sošky, těžítka, vázy, hist. zbraně atd.	větší předměty, sochy atd.

Malé

6,4 cm

83 snímků



Střední

32,6 cm

134 snímků



Velké

80,9 cm

174 snímků



Obr. 19 Ukázka rozdělení hodin (zleva Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol., Rakousko; kategorie „Malé“, 6,4 cm, 83 snímků; Stolní historizující hodiny, konec 18. stol. až 3. čtvrtina 19. století, Rakousko, Francie; kategorie „Střední“, 32,6 cm, 134 snímků a Kyvadlové hodiny závěsné Victoria, před r. 1899, Německo, kategorie „Velké“, 80,9 cm, 174 snímků).

Pro přehlednější záznam průběžně získávaných dat je vytvořena tabulka (tabulka 6) obsahující informace o hodinách (v rámci tabulky mají přidělené číslo), jejich zařazení do kategorie a informace o počtu fotografií v programu (nahrané vs. zpracované programem). Tyto informace jsou dále doplněny o popis výsledku rekonstrukce, který může být nápomocný v případě následných úprav modelu. Zápisy do tabulky slouží primárně jako přehled postupných kroků. Zároveň je na jejím základě možné provést výsledné vyhodnocení fotogrammetrie.

Tab. 6 Ukázka tabulky sloužící k vedení záznamů o průběhu digitalizace.

Číslo hod.	Cm/ kategorie	Počet fotografií (3DF Zephyr limit.) nahrané/ zpracované	Počet fotografií (3DF Zephyr Lite) nahrané/ zpracované	Výsledný model	Nutné úpravy	Potřeba nové sady snímků/ dofocení
01 ³⁷	41, 6 cm/ „střední“	50 / 44	80 /72	Textura v pořádku; kyvadlo není celé; kostrbaté sloupky; chybějící textura ve spodní části hodin	začištění okolí modelu; spodní část hodin	spodní část dofotit a kyvadlo
02 ³⁸	32, 1 cm/ „střední“	50 /50	75 /75	Chybějící spodní část; sklo na ciferníku v pořádku; detail obličejů viditelný	začištění okolí modelu; spodní část hodin	spodní část hodin

³⁷ Stolní hodiny altánové se sloupky, 1859 - 1860.

³⁸ Stolní hodiny mosazné s plastikou rytíře, konec 19. stol.

Fotografování historických předmětů

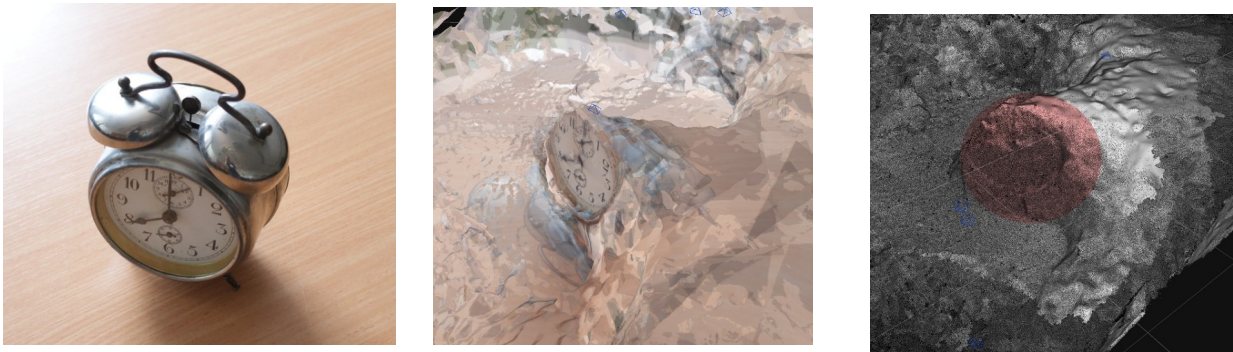
Použitý postup při pořizování fotografií vychází z práce „*Doporučené metodiky fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu*“³⁹ a je ověřený i při samotném pořizování dat.

- 1) Objekt je potřeba vyfotografovat ze všech stran, kolem dokola (je dobré měnit polohu i výšku fotoaparátu) a z více úhlů. Dbáme na dostatečnou ostrost snímků, rozmazané fotografie nelze použít k rekonstrukci prostorových vlastností objektu.
- 2) Pořizujeme větší množství snímků podle velikosti objektu.
- 3) Objekt je stále ve středu, v centru snímku a s objektem nehýbeme.
- 4) Překryv sousedních snímků je min. 60 %, ale ideální je 80 %. Zajistí se tím existence shodných bodů minimálně na třech sousedních snímcích.
- 5) U fotoaparátu nastavíme potřebné parametry a po celou dobu je neměníme.
- 6) Při fotografování je důležité mít po celou dobu dobré osvětlení, aby byl objekt bez ostrých přechodů, kontrastů nebo stínů.
- 7) Nejdůležitější části či detaily objektu je možné vyfotografovat v samostatné sérii snímků (Šindelář a kol., 2019).

Jako první krok po rozdělení hodin do třech kategorií jsou hodiny postupně nafoceny pomocí digitální zrcadlovky Sony alpha 200. Protože s hodinami nehýbeme, ale obcházíme okolo nich a snímky pořizujeme z různých pozic, nepoužívá se stativ. Před začátkem fotografování je potřeba připravit vhodné místo s dobrým osvětlením. Nejlepší variantou je přirozené světlo namísto umělého osvětlení. Hodiny jsou umístěny na stolní desku v místnosti s dobrým denním světlem. V tomto případě není potřebné instalovat bílé pozadí. Předmětem se po celou dobu nesmí hýbat, protože by to způsobilo změny na pozadí. To znamená, že by měl program velké problémy v hledání potřebných bodů a nedokázal by zrekonstruovat 3D model⁴⁰. Hodiny, které spadají do kategorie „malé“, tedy o velikosti do 15 cm musejí být podloženy nějakým předmětem, např. krabičkou, aby kolem nich nebyla na fotografiích pouze deska stolu. To způsobuje při rekonstrukci modelu problémy (obr. 20).

³⁹ Jiří ŠINDELÁŘ – Lumír POLÁČEK – Šárka KRUPIČKOVÁ, *Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu*, Přehled výzkumů. 60(2), 2019, s. 201-224.

⁴⁰ Jednou z možností je umístit předmět na otáčivý stolek do foto stanu s černým pozadím, pak lze předmětem otáčet.



A

B

C

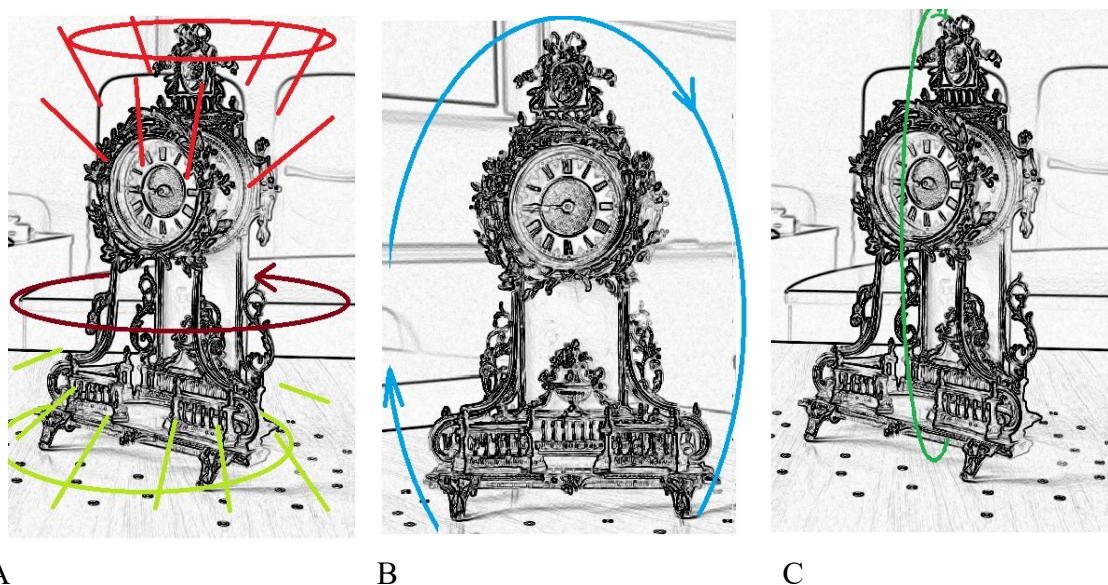
Obr. 20 Na obrázku (zleva) jsou vidět hodiny, které stojí přímo na desce stolu (A). Celé pozadí tvoří jednotvárná deska stolu. To způsobilo úplnou deformaci v textuře a hodiny se prolínají s deskou stolu (B). V polygonové síti 3D modelu je červeně znázorněno místo, kde se nacházejí hodiny (C).

Kromě pořízení sady snímků v rovině, se dále pořizuje sada snímků v s podhledem a následně ve výšce a kolmo k předmětu s nadhledem. Důležité je postupovat v kruhu a posouvat se po malých úsecích umožňujících dostatečný překryv sousedních snímků. Od věci není ani vytvoření kruhu na zemi okolo stolu s malými značkami ležícími od sebe ve stejné vzdálenosti. Často se stává, že nafocení snímků ve všech potřebných úhlech je zdlouhavé a nemusí být vždy dodržen dostatečný překryv (to odhalí až program, který provádí rekonstrukci). Značky na zemi v kruhu zajistí pravidelný posun a potřebný překryv. V případě doporučených 70 % - 80 % se jedná o poměrně značnou část, ve které se musejí sousední snímky překrývat. Vyfotografovat se dále musí sada v předozadním směru a sada ve směru z jednoho boku na druhý (obr. 21). Dbáme na to, aby se při přesunu fotoaparátu přes vrchní část předmětu zařízení nepřetočilo a stále udržujeme vrchní díl fotografovaného předmětu v horní části snímků. Kvalitní fotografie zajistí správné nastavení parametrů na digitální zrcadlovce.

Při fotografování se osvědčily tyto parametry:

ISO 200 – 400, f (clona) 6,3 a délka expozice 1/30 s – 1/50 s. Formáty k ukládání snímků jsou nastaveny v RAWu i JPEGu. Formát RAW zajišťuje „surovost“ snímků, jejich nejvyšší kvalitu a slouží nejlépe k případné archivaci. Formát JPEG je naopak dostačující pro vytvoření 3D modelu a celý proces je rychlejší. Při fotografování je potřeba zkontrolovat ostrost a kvalitu světla na snímcích. Ideální je provést kontrolu vždy po dokončení každé sady a předejít tak nashromáždění množství snímků, které ve výsledku nejsou použitelné. Rozostřené snímky, či snímky nezabírající

celý předmět jsou hned vymazány. Tato průběžná kontrola dává možnost okamžité zpětné vazby ohledně kvality získávaných dat. Celkem vzniká 5 sad. Sada pořízená okolo předmětu v rovinném úhlu, nadhledová sada, podhledová sada, boční sada a předozadní sada. Dohromady tvoří celkovou sadu s minimálním počtem snímků doporučených pro jednotlivé kategorie historických objektů rozdělených podle velikosti. Aby světlo bylo na všech snímcích podobné, je nutné nafotit všechny sady snímků vztahujících se k jednomu předmětu v jednom „zátahu“. Po pořízení úplné sady snímků stojících objektů se musí ještě objekt položit zadní částí na desku stolu a nafotit jeho spodní díl. Nejedná se však o doplnění původních sad k vytvoření 3D modelu, ale o další sadu snímků sloužící ke tvorbě samostatného modelu, pouze spodního dílu.



Obr. 21 Na obrázku jsou znázorněné směry pohybu fotoaparátu okolo předmětu: směrem v rovině okolo objektu (hnědou), okolo objektu z pohledu (zelenou) a okolo objektu z nadhledu (oranžovou) (A), dále nafocení předmětu směrem z jedné strany boku na druhou stranu (B) a nafocení v předozadním směru (C).

Program 3DF Zephyr

Předtím, než začneme pracovat s programem, je potřeba roztřídit fotografie. V počítači vytvoříme složky a pojmenujeme je podle jednotlivých hodin. Do každé složky nahrajeme z paměťové karty digitální zrcadlovky všechny fotografie v obou formátech (RAW i JPEG). Snímky je možné v této fázi oddělit podle formátů, ale tento krok lze provést i později přímo v programu. Zvolený program 3DF Zephyr je používán na notebooku Lenovo s dostatečným výkonem umožňujícím plynulé zpracování dat. Podrobnější informace k zařízení jsou uvedeny v tabulce 7.

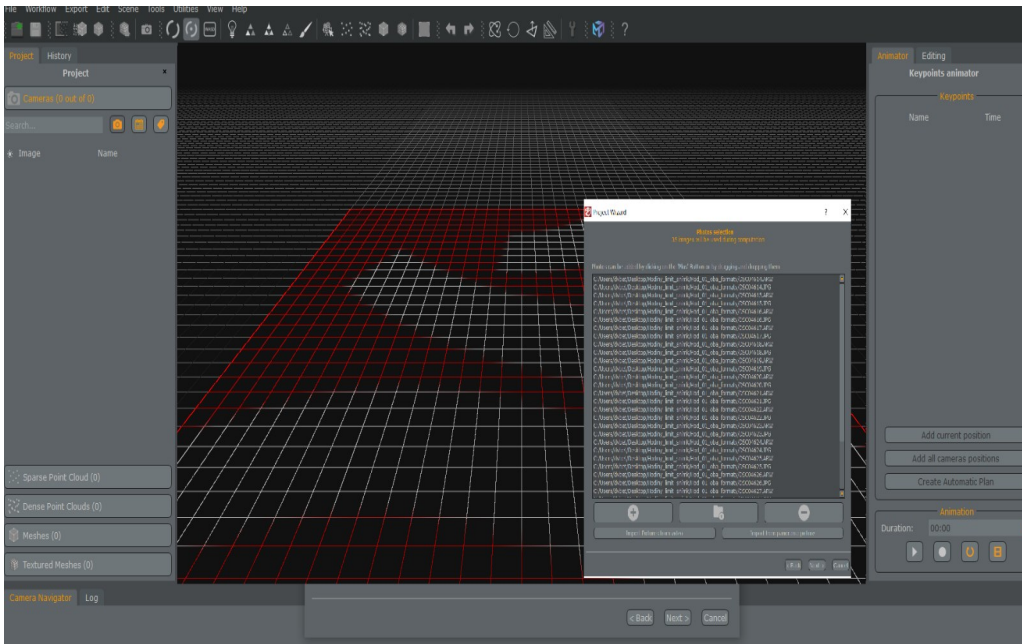
Tab. 7 Specifikace zařízení, na kterém jsou zpracována data programem 3DF Zephyr.

Název zařízení:	LAPTOP-50JA33AO
Procesor:	Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1,80GHz 2,30 GHz
Nainstalovaná paměť :	RAM 16,0 GB (použitelné: 15,8 GB)
Typ systému:	64bitový operační systém, procesor pro platformu x64
Operační systém:	Windows 10

Program lze využívat v několika verzích (3DF Zephyr Free, 3DF Zephyr Lite, 3DF Zephyr Pro a Zephyr Aerial). Jedná se o komerční software, ale lze využít neplacenou verzi nebo verzi s omezením na dobu používání. Pro tvorbu modelů byla zvolena neplacená verze softwaru, s omezením na počet fotografií (max. 50 snímků) a verze 3DF Zephyr Lite (max. 500 snímků), která poskytuje bezplatnou licenci na dobu 14 dní. Obě verze programu dokážou vytvořit kvalitní 3D modely s texturou. Program lze i zakoupit, nejlevnější verzí je 3DF Zephyr Lite (cena programu je 149 euro). Tato verze zahrnuje i jednorocní updaty v programu, limitní počet snímků je max. 500. Omezení freewarové verze limituje jeho využití na tvorbu malých nebo středně velkých modelů, u kterých postačuje max. 50 snímků k zachycení vyhovujícího množství shodných bodů (dostatečné překryvy mezi snímky). U větších objektů se složitějším povrchem (členitost, reliéfy na povrchu) je potřeba počet snímků zvýšit (50 – 200 snímků) a je nutné použít placenou verzi programu. To umožňuje vypočítat potřebné mračno bodů a vygenerovat přesněji výslednou texturu modelu.

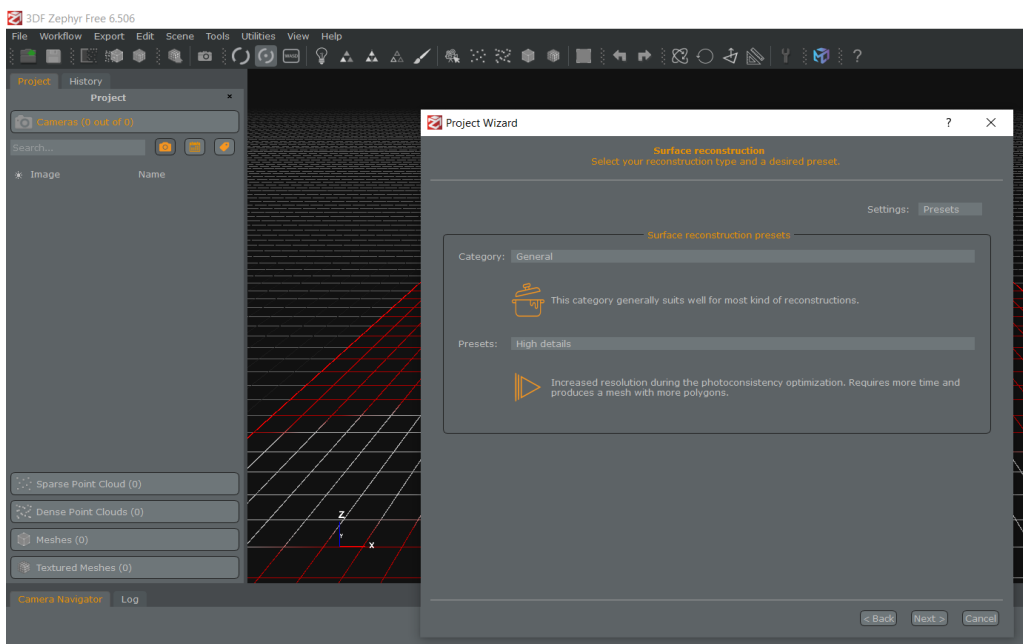
Proces rekonstrukce

Po pořízení sady snímků a jejich rozřídění jsou v programu provedeny automatické výpočty a zpracování. Při tomto procesu je důležité předpokládat, že program nevybere všechny snímky. Z toho důvodu je potřeba mít sadu o větším počtu fotografií (namísto 50 snímků poříditi raději 60 atd.). Po spuštění se zobrazí pracovní prostor programu a panely nabídky a nástrojů po obou stranách. Uprostřed je okno, které vykresluje 3D scénu. V ní vzniká výsledný 3D model. Je možné zobrazit i jednotlivé fáze rekonstrukce, jako je řídké mračno bodů (sparse point cloud), husté mračno bodů (dense point cloud), síť (mesh reconstruction) a výslednou texturu (textured mesh). Pokud načteme najednou oba formáty, RAW i JPEG (obr. 22) můžeme se po jejich načtení rozhodnout pouze pro jeden z nich a druhý odstranit. Pro rychlejší průběh celé rekonstrukce je vhodnější ponechat formát JPEG.



Obr. 22 Ukázka prostředí programu 3DF Zephyr.

Další fáze rekonstrukce je provedena způsobem Structure from Motion (Struktura z pohybu). V program jsou vypočítány souřadnice X, Y a Z povrchu objektu za užití speciálních algoritmů. Všechny potřebné informace jsou určeny ze snímků (je provedena automatická kalibraci vnitřních částí pro sběr zkreslení řádků). Jsou propočteny další parametry potřebné k rozpoznání použití objektivu, pozice a otáčení fotoaparátu ve 3D prostoru. Program vyhledává a vypočítává shodné body. V Zephyru jsou již přednastaveny hodnoty pro výpočty rekonstrukce a vyhovují většině „scénářů“. Uživatel pak volí a upravuje hodnoty u jednotlivých fází procesu. Lze vybrat kategorie General (vhodná pro většinu typů rekonstrukcí), Aerial, Urban, Human body, Surface scan (osvědčila se u malých předmětů do 10 cm) nebo Vertical. Dále se volí přednastavení (obr. 23) pro orientaci fotoaparátu (volba „General“), pro předvolbu vytváření hustého mračna bodů (volba „General“), pro předvolbu rekonstrukce povrchu (volba „High details“) a pro texturu (volba „High details“).



Obr. 23 Ukázka volby přednastavení v programu 3DF Zephyr.

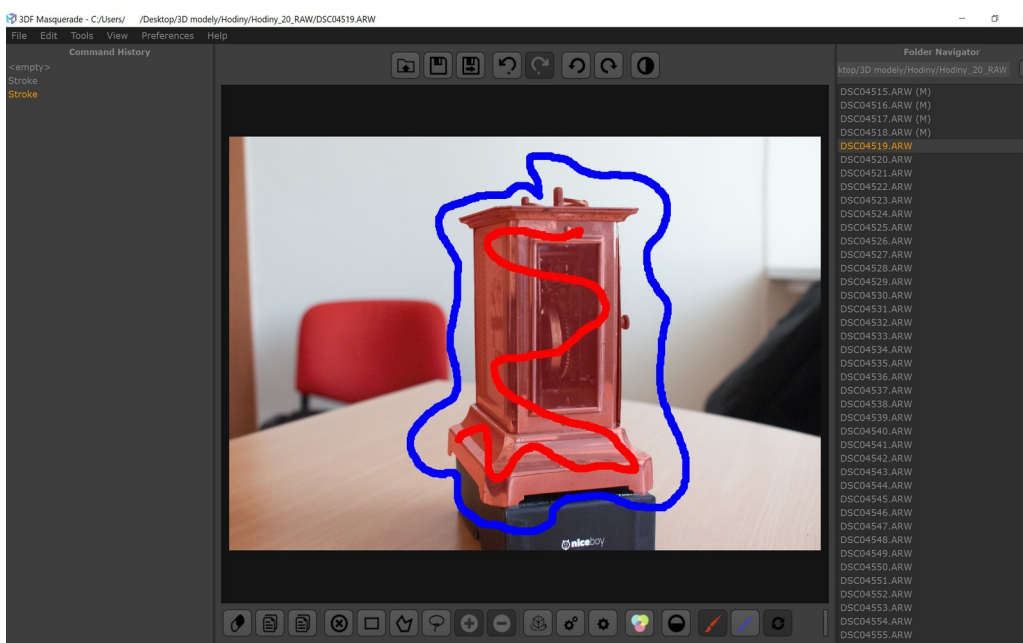
Jednotlivé fáze rekonstrukce jsou:

1. fáze je „Struktura z pohybu“. Zajišťuje extrahování shodných bodů na snímcích a propojuje jednotlivé snímky na základě překryvů, vyhledává identické body na sousedních snímcích a spouští proces geometrické rekonstrukce (Getting started with 3DF Zephyr, 2021). Na konci této fáze je vygenerováno řídké mračno bodů (sparse point cloud). Lze už provést první „začištění“ okolo rýsujícího se modelu (pro rychlejší výpočet další fáze rekonstrukce).
2. fáze představuje generování hustého mračna bodů (dense point cloud). Při této fázi dochází ke generování a spojování „map“ dohromady. Tato fáze je náročnější na výpočet a vyžaduje dostatečně výkonný hardware. Proces je možné i několikrát zopakovat a získat tak lepší výsledný model.
3. fáze je rekonstrukce povrchu (mesh reconstruction) a generování sítě za pomoci speciálního algoritmu. Délka rekonstrukce je opět závislá na výkonu hardwaru.
4. fáze provádí generování textury (textured mesh reconstruction). Textura může být vygenerována buď ze všech snímků nebo můžeme odstranit ty, které mají například výrazně odlišné osvětlení. Program vyhledává barevné informace pro každý pixel a automaticky vypočítává jejich vyvážení (Getting started with 3DF Zephyr, 2021).

Po poslední fázi se znázorní na 3D modelu textura. V programu jsou přesně zaznamenány i jednotlivé snímky v návaznosti na polohu fotoaparátu (kolem objektu jsou rozmístěné modré pyramidky, které znázorňují pozice fotoaparátu). Je možné si tak prohlédnout, které snímky náležejí jednotlivým částem 3D modelu. Dobře se dají identifikovat špatně nafocené snímky, které způsobily například díru v 3D modelu. Může jít o špatně osvětlené snímky nebo snímky

s nedostatečným překryvem. Programem vyřazené snímky jsou označené a nejsou použity pro vlastní rekonstrukci.

Před zahájením rekonstrukce modelu můžeme využít nástroj MASKING a rozlišit na fotografiích pozadí od předmětu (obr. 24). Nejprve se ručně označí na každém snímku pozadí modrou barvou a objekt červenou barvou. Zephyr následně označenou část pozadí nepoužije k hledání funkcí a vytváření shody mezi snímky. Při rekonstrukci tuto část automaticky vynechá a výpočet je rychlejší. Nástroj je velmi užitečný v případě malých předmětů do 15 cm nebo u předmětů s příliš členitým povrchem. Výhodou nástroje je rychlost a přesnost při následné rekonstrukci. Nevýhodou je, že se vše musí provést manuálně, po jednom snímku.



Obr. 24 Ukázka využití maskování, budík skříňkový Junghans, 1890–1920, Německo.

Úprava digitalizátu v prostředí 3DF Zephyr

V programu je možné provést úpravy 3D modelu. Můžeme začistit přebytečnou texturu („šum“), která se objevuje okolo modelu a v jeho okolí za pomoci nástrojů ručního výběru (nástroj BY HAND), např. čtvercový výběr, polygonový výběr, výběr pomocí lasa anebo boxu. Výběr můžeme provést i pomocí označení celé plochy (nástroj PLANE) nebo výběrem jednotlivých bodů v čištění. Před tím je ale vytvořena kopie modelu a je zachována původní verze, ke které se můžeme vrátit.

Po úpravách provedeme export modelů (celé hodiny a spodní díl) do formátu OBJ/MTL⁴¹ a jeho texturu ve formátu PNG.

Úprava modelu v programu Blender

Program 3DF Zephyr neumožňuje spojit více objektů dohromady. Je nutné zvolit si k dokončení 3D modelu další program. Zvoleným programem může být například Blender. Jedná se o bezplatný open source program nezávislé organizace The Blender Foundation (2002), ve kterém lze modelovat, animovat, tvořit simulace, vykreslovat, upravovat videa nebo vytvářet hry. Je vybaven řadou užitečných nástrojů pro dotváření 3D modelů. Blender je multiplatformní a kompatibilní s operačními systémy jako Linux, Windows a MacOS. Spadá pod projekt GNU (General Public License), a tak může k jeho vylepšení přispět kdokoliv z veřejnosti. To umožňuje rychle provádět opravy v programu a přináší to různá vylepšení (Blender, 2022).

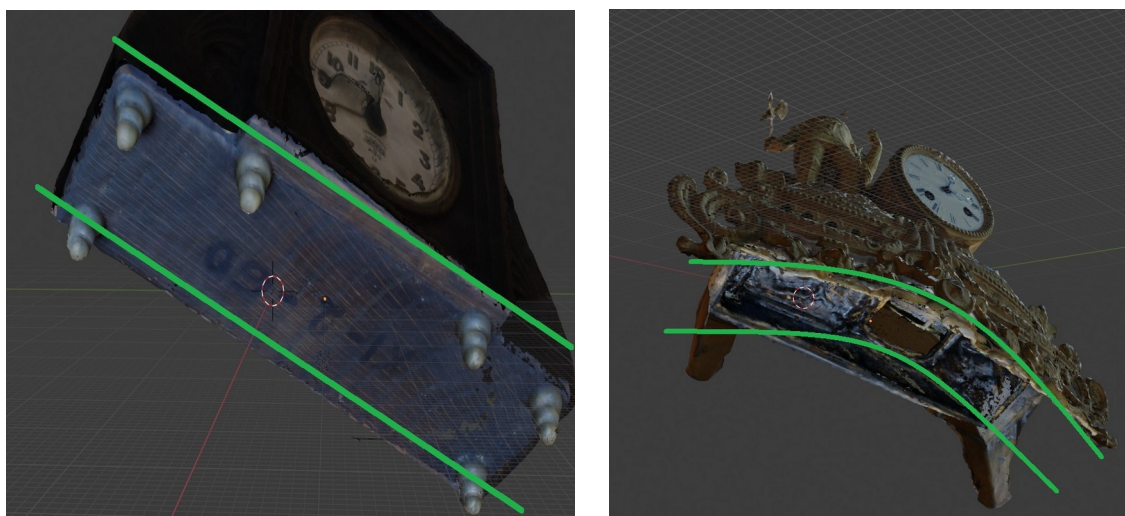
V této části jsou uvedeny používané nástroje při úpravách konkrétních modelů z jednotlivých kategorií. Konkrétně jsou to Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol., Rakousko (dále jako miniaturní hodiny) spadají do kategorie „malé“ a jejich velikost je 6,4 cm; Stolní hodiny s barometrem, konec 19. stol., Uhry (dále jako hodiny s barometrem) o velikosti 32,3 cm, spadají do kategorie „střední“ a hodiny závěsné Kyvadlové hodiny Victoria z 19. stol., Německo (dále jako hodiny závěsné) o velikosti 80,9 cm, zařazené do kategorie „velké.“

Fotografie hodin jsou načteny do programu 3DF Zephyr a probíhají všechny fáze rekonstrukce.

V případě miniaturních hodin je načteno 83 fotografií a kvůli jejich malé velikosti a členitému povrchu je hned na začátku použit nástroj MASKING. U zbylých dvou hodin tento nástroj použit není. Po dokončení poslední fáze je na polygonovou síť nanášena textura a je vytvořena kopie 3D modelu. Následně je model začištěn od přebytečné textury v okolí pomocí čtvercového výběru a lasa. Zachištěné 3D modely jsou exportovány do příslušného formátu (OBJ/MTL) a uloženy. Celý proces opakujeme i se spodními díly k příslušným hodinám. Spodní díl u miniaturních hodin má počet snímků 27. Spodní díl u hodin s barometrem má počet snímků 28 a počet snímků u závěsných hodin je 50, ale v programu jich je zpracováno pouze 22.

⁴¹ Wavefront OBJ formát definuje geometrii pro povrchy různých objektů za využití polygonálních sítí, definuje barvy a texturu určitého tvaru z přidruženého souboru knihovny MTL. Formát OBJ používá americký standardní kód ASCII (Wavefront OBJ File Format, 2020). Formát MTL (Wavefront MTL) je doprovodný k formátu Wavefront OBJ. Jsou v něm popsány vlastnosti povrchu (barva, textura a vlastnosti odrazu) aplikované na polygonální plochy nějakého tvaru (ten je definovaný v souboru OBJ) a pro výměnu informace využívá ASCII, americký standardní kód (Wavefront Material Template Library (MTL), 2020).

U hodin je možné spodní díly rozdělit do dvou kategorií (obr. 25). První z nich představují spodní díly rovného typu a jejich nasazování na celý model je jednodušší. Druhou kategorií jsou spodní díly členité, které se musejí vsadit dovnitř a jejich zpracování je podstatně náročnější.



A

B

Obr. 25 Ukázka rozdělení spodních dílů hodin na rovné (A) a členité (B).

Do Programu Blender importujeme 3D model ve formátu OBJ nejprve celých hodin a provádíme úpravy v editačním módu a sculpting módu. Provedené úpravy u hodin miniaturních:

- odstranění přebytečné textury ze spodní části hodin (v editačním módu),
- odstranění „šumu“ v okolí hodin (v editačním módu),
- po začištění a odstranění některých částí vznikají na hranách a ploškách modelu ostré části a je potřeba je zahladit pomocí nástroje SMOOTH (ve sculpting módu),
- kontrola případných nedostatků, např. díry,
- v případě menších chybějících částí postupné kopírování částí u nejbližšího okolí a zacelení mezer,
- import 3D modelu spodního dílu,
- začištění a spojení obou dílů podle fotografické předlohy,
- pomocí nástrojů ve sculpting módu provedeme konečné zahladění hran, plošek a vrcholů v místech, kde se oba díly propojují,
- v úplném závěru jsou obě části modelu sjednoceny v jeden celek funkcí JOIN a před exportem je 3D model v pracovním prostoru správně rovně natočen,
- export modelu do formátu OBJ (obr. 26).



A

B

C

Obr. 26 *Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol., Rakousko (A), jejich 3D model (B) a 3D model se spodním dílem (C).*

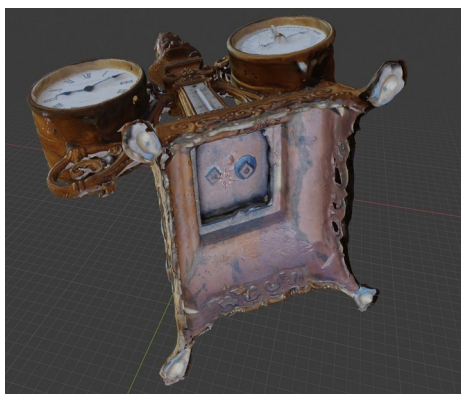
Postup na druhých hodinách s barometrem z kategorie „střední“ začíná zpracováním fotografií v programu 3DF Zephyr. Nahráno je celkem 144 fotografií ve formátu JPEG. V případě těchto hodin je programem z celkového počtu fotografií zpracováno 122 a nestačí to k vytvoření kvalitního modelu (obr. 27). Je nutné znovu nafotit hodiny s větším počtem snímků a pečlivějším překryvem, který zajistí dostatečné množství shodných bodů. Nová sada snímků o počtu 160 snímků (program zpracoval 145) už zajistila kvalitní zpracování. Do Programu Blender importujeme 3D model ve formátu OBJ nejprve celých hodin a provádíme úpravy a následně přidáme spodní díl. Nástroje použité k úpravám hodin s barometrem jsou stejné jako u miniaturních hodin. Rozdíl je při nasazování spodního dílu. U těchto hodin se jedná o typ členitý.



A



B



C

Obr. 27 Neúplný a nekvalitní 3D model vytvořený v důsledku nedostatečného počtu snímků (A), úplný 3D model po zpracování početnější sady snímků (B) a 3D model se spodním dílem (C).

Hodinami ze třetí kategorie „velké“ jsou závěsné hodiny o velikosti 80,9 cm. Do programu 3DF Zephyr je nahráno celkem 137 fotografií ve formátu JPEG. V případě těchto hodin je programem z celkového počtu fotografií zpracováno pouhých 85 a zrekonstruovaný 3D model má značné nedostatky. Například textura není kvalitní, v hodinách jsou díry a sklo není celé. Hodiny je nutné znovu nafotit s větším počtem snímků a pečlivějším překryvem. Nová sada snímků o počtu 235, kdy program zpracoval 228 snímků, už zajistila kvalitní zpracování (obr. 28). Nástroje použité k úpravám 3D modelu závěsných hodin jsou stejné jako u miniaturních hodin. Na hodiny se nasazovala celá zadní část (kvůli způsobu nafocení hodin naležato).



A



B



C

Obr. 28 *Kyvadlové hodiny Victoria z 19. stol., Německo (A), jejich 3D model (B) a spodní díl (C).*

Při úpravách na 3D modelech průběžně porovnáváme model s fotografií předmětu. Zabráníme tím opravování zdánlivých defektů na povrchu. Při nasazování spodních částí tato kontrola pomáhá ve správném natočení. Oba 3D modely (celé hodiny stojící a jeho spodní díl) je nutné propojit, aby vznikl úplný 3D model, který představuje digitální kopii historického originálu. V přílohách diplomové práce jsou názorné ukázky 3D modelů, které mají defekty, a to v důsledku chybných snímků (ukázány jsou chyby způsobené v důsledku nedostatečných překryvů, rozostřených a tmavých snímků a sady snímků obsahující nafocené spodní díly).

Problémy s metodou a jejich řešení

Zapůjčené hodiny z muzejní sbírky umožnily díky své rozmanitosti (různé velikosti hodin, různé materiály a různě členité povrchy) vyzkoušet aplikovatelnost této metody a odhalit při procesu některé problémy:

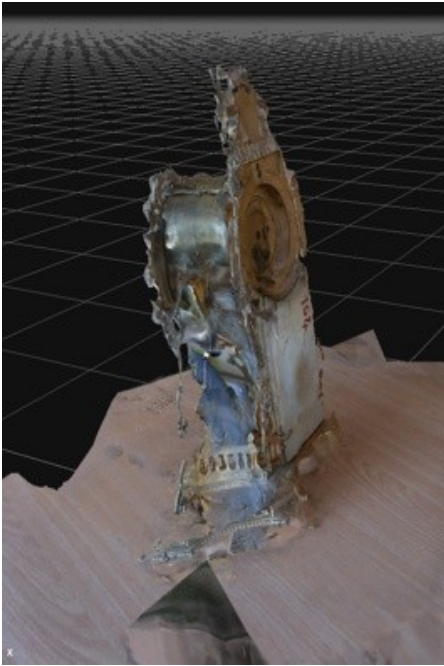
1. Funkčnost fotogrammetrického programu

Problémy mohou nastat už při začátku, kdy hledáme vhodný software pro práci s daty. Možností výběru je více a vlastnosti různých fotogrammetrických programů jsou popsány v textu výše. Volba programu je jednou z prvních věcí, kterou je potřeba řešit hned na začátku. I přes velké možnosti programů ve verzích zdarma mohou nastat problémy s kompatibilitou s naším zařízením. Proto je dobré zvážit, jaký program zvolit s ohledem na velikost RAM, operační systém a typ grafické karty.

2. Nekvalitní sada fotografií

Jedná se o nekvalitní fotografie (roztřené snímky, snímky se stíny, nedostatečný překryv apod.) nebo o sadu s nedostatečným počtem snímků. V prvním případě program snímky vyřadí z procesu rekonstrukce hned na začátku. Ve druhém případě pracuje program s malým počtem snímků a nenachází dostatek shodných bodů. Výsledkem jsou chybné a neúplné 3D modely (viditelné na obr. 29 a 30). Na modelech vznikají deformace a díry nebo chybí celé části.

Řešením je pečlivě si prohlédnout po vzniku zdeformovaného modelu jednotlivé snímky. V programu máme možnost vidět je s polohou přiřazenou přímo k místu na modelu. Každý snímek si můžeme nechat promítnout na 3D model a tak přesně identifikovat problémovou část. Pokud se nepodaří model zrekonstruovat v důsledku nekvalitních snímků, v programu 3DF Zephyr jsou nekvalitní snímky označeny černobíle.

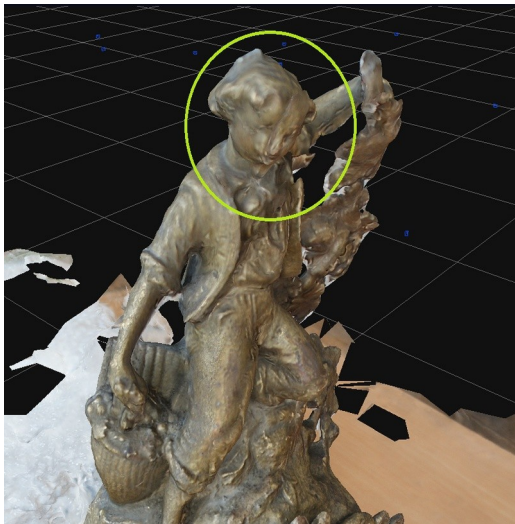


A

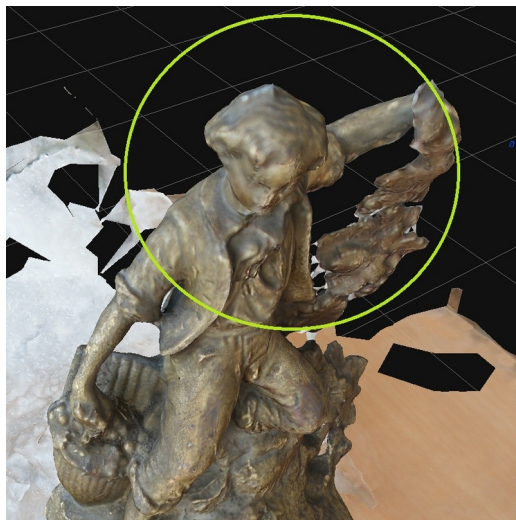


B

Obr. 29 Na obrázku je vidět výsledný 3D model po zpravování sady snímků. Z původní sady o počtu 67 fotografií program zpracoval pouhých 56 fotografií (A). Vytvořený model z nově nafocené sady (B) o počtu 91 snímků (program zpracoval počet 90 snímků). Jedná se o stolní hodiny historizující, výrobce neznámý, konec 18. stol. až 3. čtvrtina 19. stol., Rakousko, Francie .



A



B

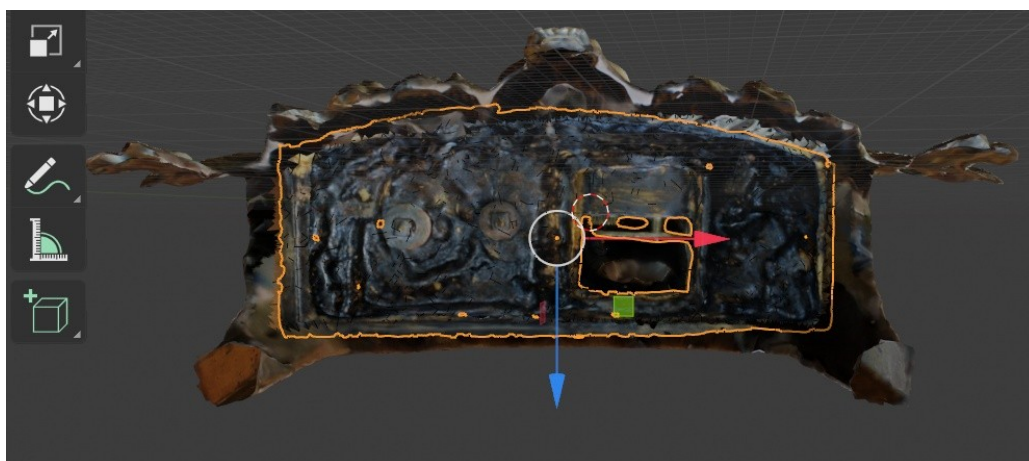
Obr. 30 Rozštěpení obličeje u sošky hodin v důsledku nedostatečného počtu snímků (A) a již správně zrekonstruovaný obličej 3D modelu (B), stolní hodiny figurální ve stylu druhého rokoka, 1860 – 1880, Francie, Rakousko.

3. Chybějící spodní díl objektu

Při vytváření modelů se nejdříve nahrály do programu snímky s celými hodinami společně se sadou snímků se spodním dílem. V programu je tato sada vytvořena samostatně a do výsledného modelu je promítnuta jako slabý obrys ležících hodin. U hodin spodní díly chybí. V programu je možné spustit funkci „fill holes“ a spodní díl tak nechat zacelit, ale toto řešení není dostatečné, pokud jde o vytváření 3D modelu historického předmětu. Spodní část představuje důležitý díl k zachování historického kontextu předmětu. Předmět má na spodním díle různá značení, porušení, nápisy atd., které jsou důležitou součástí jeho historie. Spodní díly je potřeba nafotit zvlášť (obr. 31) a na model hodin „nasadit“ v programu, který umožňuje následnou úpravu modelů, např. Blender (obr. 32).



Obr. 31 Pořízení sady snímků spodního dílu hodin (stolní hodiny s aneroidem a teploměrem, výrobce Hatscheck Miksa, konec 19. stol., Uhry).



Obr. 32 Nasazování spodního dílu na 3D model hodin v programu Blender

4. Vliv rozdílných materiálů na proces rekonstrukce

Různé materiály digitalizovaných objektů ovlivňují výsledný model, nejvíce lesklé a průhledné materiály. Důvodem je odrazivost světla těchto povrchů, jak je zmíněno v kapitole 1.2.1 „Metoda fotogrammetrie - Vliv vlastností objektů na pořizování snímků“. V důsledku toho se objevují nerovnosti na povrchu nebo díry (obr 33). Tento problém je řešitelný dvěma způsoby. Pokud použijeme např. sprej nebo krycí prášek, který nepoškodí historický předmět, zabráníme už při fotografování odrazu světla, zachytíme povrch s mírně matným leskem a následná rekonstrukce bude v pořádku. Druhý způsob představuje spíše řešení už vzniklých chyb na modelu. Pomoci nám mohou nástroje v Blenderu a to konkrétně nástroj SMOOTH.



Obr. 33 Ukázka nedokonalostí na povrchu 3D modelu z důvodu lesklého povrchu objektu, budík skříňkový Junghans, 1890 – 1920, Německo.

Povrch objektů hodin se skládá ve většině případů z kovových materiálů, většinou „bez lesku“ s velmi členitým povrchem s bohatým reliéfem. Některé části jsou nafoceny zvlášť kvůli zachycení detailu (zákruty, miniatura hlavy atd.). U hodin ze skla nebo dřevěných je povrch hladší, ne však úplně (nerovné plochy, struktura dřeva a rýhy). Na hodinách se objevuje i sklo chránící ciferník, které představuje problematickou část kvůli své transparentnosti.

5. Limitující počet fotografií

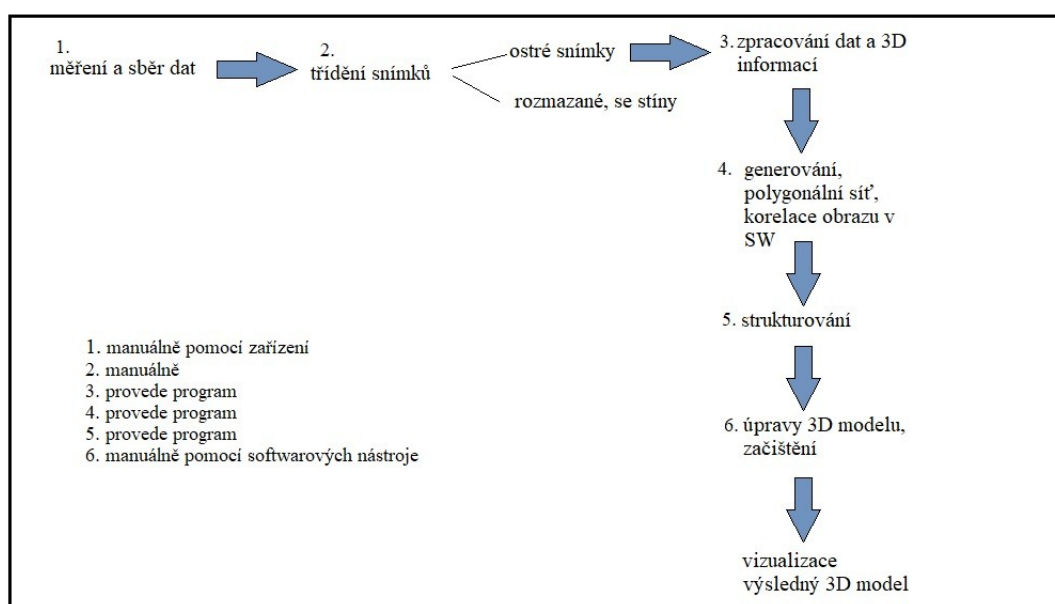
Tento problém s metodou je aktuální u programových verzí zdarma, které mají určený maximální možný počet fotografií na jeden objekt. U malých předmětů o velikosti do 15 cm toto omezení nepředstavuje problém. U středně velkých předmětů do 50 cm se při kvalitních snímcích daří modely zrekonstruovat velmi dobře, ale už se mohou objevit nedostatky při zobrazení detailů

u členitějších povrchů. Limitní počet fotografií omezuje užití programu na tvorbu modelů menších a středních. V práci je použitý 3DF Zephyr free na rekonstrukci spodních dílů, kdy je počet max. 50 snímků dostačující.

6. Ztráta textury již exportovaných modelů

Při práci s programem se na jednom zařízení ukládají průběžně všechny soubory do jednoho místa na disku. Program vytváří textové soubory (název.3db) a obrázkové soubory s texturou ve formátu PNG. Výsledný export do formátu OBJ/MTL zobrazuje 3D model s texturou za využití absolutní cesty (ta lokalizuje potřebný adresář se soubory). Pokud potřebujeme model přesunout a nahrát do jiného místa či úložiště, ztrácí se informace o cestě k souborům a dochází ke ztrátě textury. Nápravu je nutné provést tím, že v souborech MTL a OBJ opravíme absolutní cestu na relativní. Při digitalizace vybraných historických objektů zvolenou metodou se podařilo vytvořit jejich 3D modely v dobré kvalitě.

V procesu bylo třeba řešit některá úskalí, aby výsledný model představoval věrnou podobu s reálným objektem. Nevýhodou této metody jsou již zmiňované problémy, které mohou nastat např. v závislosti na pořízených snímcích. Důležitá je i volba programu, který provádí samotnou rekonstrukci modelu. Přehled postupu od sběru dat až po výsledný 3D model je znázorněn na obr. 34 a v tabulce 8 je rozepsán pro přehled časový odhad procesu digitalizace.



Obr. 34 Postup procesu digitalizace metodou fotogrammetrie.

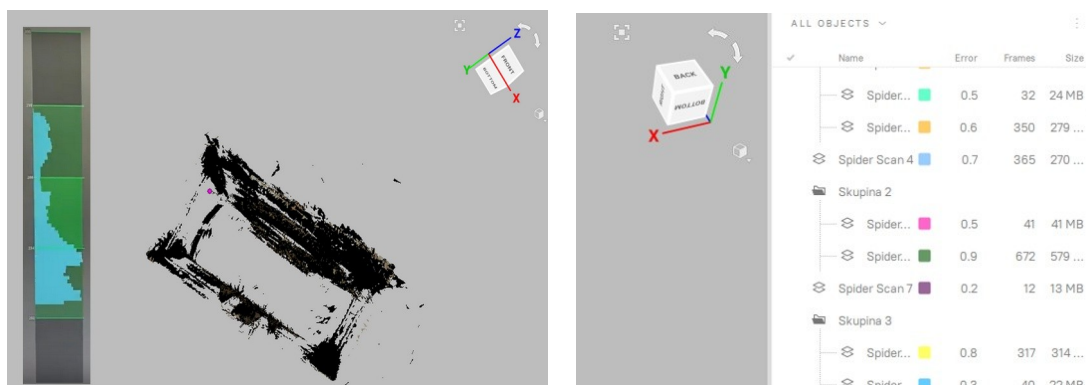
Tab. 8 *Přehled délky trvání jednotlivých fází. Celý proces se provádí dvakrát (pro celý objekt a jeho spodní díl).*

Časový odhad jednotlivých fází tvorby 3D modelu:	
a) Příprava a sběr dat	ca 25 minut
b) Třídění dat	ca 10 minut
c) Práce s programem a fáze rekonstrukce	ca 20 – 30 minut
d) Zajištění 3D modelu v programu 3DF Zpehyr	ca 20 – 30 minut
e) Úpravy 3D modelu (celý přednět)	několik hodin
f) Úpravy 3D modelu (spodní díl)	
g) Přidání spodního dílu	

Proces digitalizace skenováním se strukturovaným světlem

Sběr dat a jejich zpracování v programu se liší od fotogrammetrie. Nejdříve si připravíme otočný stolek, na který umístíme předmět skenování. Při použití skenerů lze s předměty otáčet. Skener Artec Space Spider je vhodný na malé a středně velké předměty. Skener je přes USB kabel připojený k počítači a předmět osvětluje a promítá na něj vzory. Před začátkem skenování samotného předmětu se osvědčilo nejdříve namířit skener na plochu stolku a následně pokračovat skenováním předmětu. V reálném čase sledujeme na obrazovce PC co se děje v programu Artec Studio (v diplomové práci je použita verze 15). Zobrazí se nám histogram znázorňující vzdálenost mezi skenerem a předmětem (obr. 35 A). V průběhu skenování lze sledovat náhledy naskenovaných částí. Předmět se snažíme skenovat ze všech stran a z různých úhlů, otáčíme stolkem a přibližujeme a oddalujeme skener podle potřeby. Pokud se skenerem manipulujeme správně, je vidět aktivita ve střední části histogramu v zeleném poli. Jakmile se vzdálíme od předmětu příliš, přesouváme se v histogramu do krajních částí a program hlásí ztrátu trasování. Pokud se nám podaří udržet skener na vzdálenosti uprostřed histogramu, získáme kvalitní data. Oproti fotogrammetrii můžeme rovnou skenovat předmět ze všech částí v rámci jednoho projektu. Předmět si položíme na stolek a pokračujeme skenováním jeho spodní části. Výstupem skenování je mračno bodů, které obsahuje velké množství prostorových dat. Pokud jsou součástí povrchu skenovaného objektu lesklé nebo transparentní plochy, je potřeba ošetřit je speciálním práškem nebo sprejem určeným pro tyto účely. V průběhu skenování lze proces přerušit. Může se to stát v případě ztráty trasování nebo se pro to můžeme rozhodnout sami. Skener je možné kdykoliv znovu spustit a pokračovat ve snímání.

Průběžně vznikají digitalizáty a ukládají se do jednotlivých „skupin“. Po ukončení procesu skenování procházíme jednotlivé skupiny (obr. 35 B) a vybereme si jen ty digitalizáty, které budou zpracovány do podoby 3D modelu. Ostatní můžeme smazat.

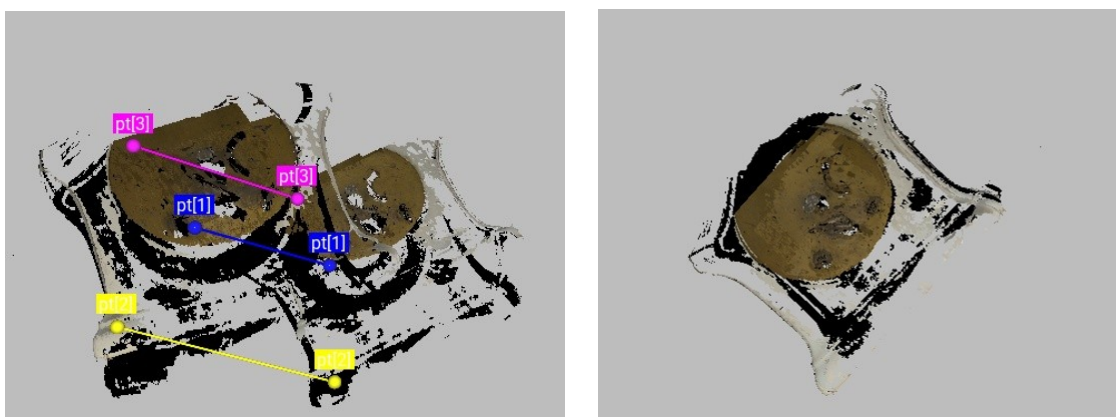


A

B

Obr. 35 Pohled na průběh skenování (A) a záznam jednotlivých digitalizátů do skupin (B).

Ve vybraných skupinách můžeme provádět začišťování digitalizátů pomocí softwarových nástrojů zvoleného programu. Nástroj ERASE umožní začistit okolí modelu a oříznout podložku. Takto začištěné digitalizáty je nutné zarovnat do jednoho celku. Lze to provést automaticky nebo ručně. Automatické zarovnání však nemusí být přesné. Ruční zarovnání nám umožní jednotlivé digitalizáty přesně posouvat a pospojovat. Dalším možným nástrojem je využití automatického zarovnání pomocí bodů. Na digitalizátech určíme alespoň tři stejné body a program podle nich provede zarovnání (obr. 36). Tento způsob může být oproti ručnímu zarovnání rychlejší.



A

B

Obr. 36 Vyznačení stejných bodů na dvou digitalizátech (A) a následné zarovnání v jeden celek (B).

Následuje zpracování a výpočty, které provádí program automaticky. Výsledný 3D model je vidět na obr. 37. Model můžeme v této fázi začistit pomocí nástrojů (štetce) a vyhladit hrany nástrojem SMOOTH BRUSH nebo odstranit ještě přebývající šum okolo modelu. V dalším kroku je na model nanášena textura (obr. 37). Pokud jsou v modelu díry, je možné použít nástroj FILL HOLES, který je automaticky vyhledává a zaplňuje. Výsledný 3D model exportujeme ve formátu OBJ/STL a je-li to potřeba, upravujeme 3D model v programu Blender za užití již zmíněných nástrojů. 3D model se může uložit i ve formátu SPROJ a dále na něm pracovat v programu Artec Studio.

Skener Artec Leo je použit na středně velké a především na velké předměty⁴². Výhodou je, že nemusí být připojen přes USB kabel k počítači. Průběh skenování je možné sledovat v reálném čase na jeho vlastním displeji. Obcházíme okolo předmětu a různě skener natáčíme, přibližujeme a oddalujeme. Na displeji se zobrazuje barevná mapa 3D modelu, která znázorňuje zachycené části předmětu. Červené zbarvení znamená, že je skener moc blízko k předmětu a modré zbarvení upozorňuje na velkou vzdálenost od předmětu. Zelené zbarvení představuje optimální vzdálenost. Naskenovaná data se ukládají jako jeden projekt a následně se uloží do počítače z paměťové karty skeneru. Případně lze využít síťový kabel k připojení skeneru s počítačem a k přímému ukládání dat. Načtená data se zpracovávají v programu Artec Studio (verze 15). Postup je stejný jako v předešlém případě.



Obr. 37 3D model Budíku zn. Georg Beker se dvěma cimbály, Čechy, před1926 (nalevo je vidět model bez textury, v okolí jsou stále části „šumu“ a vpravo je již 3D model s texturou).

Výsledky skenování mohou být ovlivněny různými faktory:

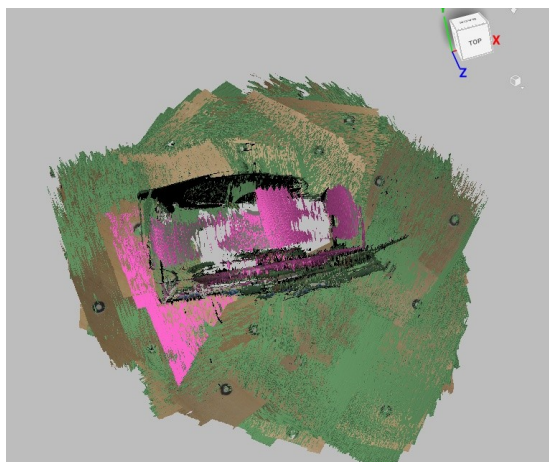
- vnitřními charakteristikami přístroje,
- charakteristikami materiálu snímaného objektu,

⁴² Velikost středně velkých předmětů je do 50 cm a velikost velkých předmětů nad 50 cm.

- odrazem světla a absorbcí světla (problém je stejný jako u fotogrammetrie s transparentními a lesklými povrchy).

Problémy mohou také nastat, pokud skener často v průběhu skenování ztrácí trasování. K tomu může dojít například při přechodu z širší části hodin na část, která se zužuje. Skeny nemusejí být dostatečně kvalitní a při zarovnávání se nemusí podařit vytvořit jednotný 3D model (obr. 38). Při práci se skenery je důležitá předchozí zkušenost odborného pracovníka se skenováním. Pokud má dostatečné zkušenosti, je schopen skenovat správně od začátku procesu a získaná data jsou použitelná ke zpracování a tvorbě kvalitního modelu.

3D skenery mají problémy také s perforací a nepravidelnými povrchy. Těžko snímají povrchy, které jsou proděravělé (objevují se u některých hodin s členitým zdobením). Při otáčení s objektem mohou nastat problémy s pohyblivými částmi, skener je nemusí zachytit. Při získávání dat je práce se skenery rychlejší než při fotogrammetrii za podmínky, že se daří zachovat trasování. Naskenovat se dají rovnou i spodní díly a při následném zpracování spojit do jednoho modelu.



Obr. 38 Nekvalitně nasnímaná data, která tvoří nedostatečné skeny pro zpracování 3D modelu.

4 Vizualizace vzniklých 3D modelů

Vytvořené 3D modely je možné zobrazit, ukládat, třídit a dokumentovat (např. vytvořením digitální kartotéky popisu exponátů a jejím propojením s výslednými modely). Dále je možné 3D model zobrazit v prostředí Internetu v rámci již zmíněné platformy Sketchfab a 3D modely sdílet s odkazem na paměťovou instituci, ze které pochází originální historické exponáty. Dalším využitím je například vytvoření celé expozice a nabídnutí virtuální prohlídky muzejních exponátů i těch, které nejsou fyzicky zpřístupněné, ale jsou někde uloženy a nepřístupné. Vizualizace 3D modelů mají výhodu, že mohou přilákat zájemce z řad veřejnosti, badatele nebo odborníky a zaujmout svou interaktivitou a přístupností. Model lze různě přibližovat a natáčet, jednoduše přes webové rozhraní. Hotové modely je možné si prohlédnout na následující webové adrese anebo na QR kódu níže.

<https://sketchfab.com/KPVHA-FF-UHK/collections/students-work>



Obr. 39 QR kód odkazující na 3D modely hodin nahraných na Sketchfabu.

5 Srovnání a možnosti kombinace užitých metod digitalizace

V této kapitole jsou porovnány 3D modely historických předmětů digitalizované metodou fotogrammetrie a metodou skenování pomocí strukturovaného světla. Pro lepší názornost obou metod jsou rozdíly porovnány na výsledných modelech (obr. 39 až obr. 48). Na 3D modelech je výrazný rozdíl ve vzhledu textury. Skenery vytvářejí texturu, která má tlumenější barvy a spektrum posunuté více do teplých odstínů. Na některých modelech vytvořených pomocí fotogrammetrie je textura detailnější a přesnější (např. detail malby, struktura povrchu atd.). U fotogrammetrie záleží na typu spodního dílu, který je nutné na model nasadit, a to může být při nedokonalém začištění a zahlazení znát. V případě modelů tvořených skenováním je možné přímo v programu spodní díly připojit a vzniklý 3D model je jednotný.

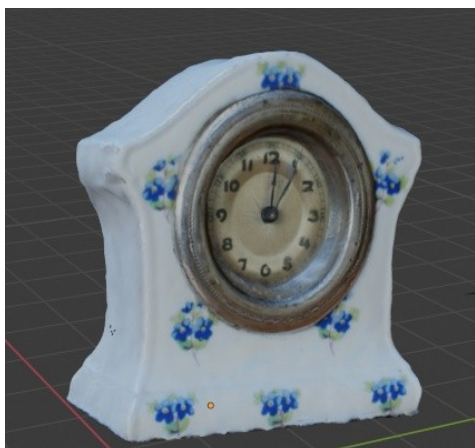


A



B

Obr. 40 *Miniaturní stolní hodiny, pol. 19 stol., Rakousko: 3D model (A – fotogrammetrie) má ostřejší a detailnější texturu s viditelnou malbou na přední straně než druhý 3D model hodin (B – skenování strukturovaným světlem). Problémem se zde bude jevit zřejmě velikost objektu. Na 3D skenování drobnějších objektů je nutné mít specifický skener.*



A



B

Obr. 41 Porcelánový budíček Kienzle, 1925 – 1931, ČSR:

3D model (A – fotogrammetrie) má „kotrbatou“ hranu v dolní části hodin, 3D model hodin (B – skenování strukturovaným světlem) má hrany zarovnané. Výrazný je rozdíl ve zbarvení textury, u modelu A jsou barvy jasnější, u modelu B jsou barvy tlumené. U obou modelů je poměrně kvalitní textura a ciferníky hodiny.



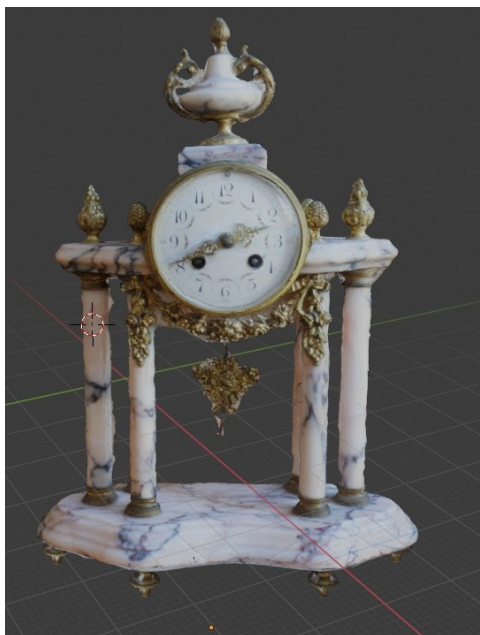
A



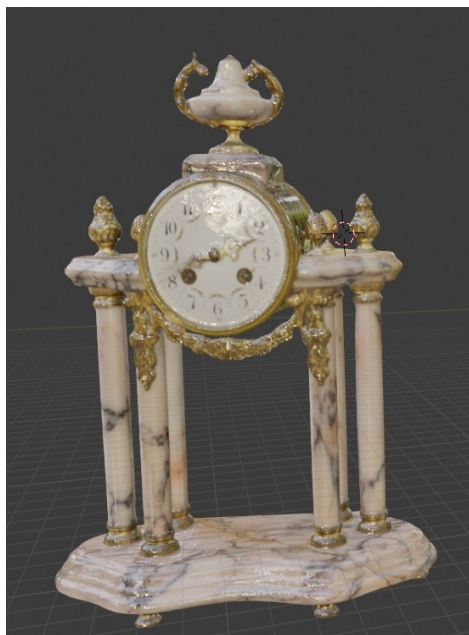
B

Obr 42 Budík ve tvaru domku, 1888 – 1890, Německo: 3D model (A – fotogrammetrie) má výraznější texturu i s detailem malby na přední straně, hrany okolo nožiček jsou ostré, ale pohledem do okének jsou vidět výčnělky směrem dovnitř. 3D model hodin

(B – skenování strukturovaným světlem) má méně výraznou texturu a zbarvení je posunuto do teplých odstínů.



A



B

Obr. 43 Stolní altánové hodiny se sloupky, Lenzkirch, 1859 – 1860, Německo: 3D model (A – fotogrammetrie) má nerovné a mírně zdeformované sloupky, kyvadlo u hodin není celé, textura je však mnohem věrnější a barevně přesněji odpovídá předloze, zdobení je dobře viditelné, druhý 3D model hodin (B – skenování strukturovaným světlem) má sloupky zarovnané, zdobení je celé, kyvadlo chybí (kvůli pohybu s hodinami není nasazené, lze jej přidat v programu pro 3D modelování, pokud bude naskenované také, případně jej vymodelovat), textura jeví barevný posun směrem k teplým odstínům oproti původní předloze. Možná vlivem odstínu světla ze skeneru či jeho okolí.



A



B

Obr. 44 Budík Lenzkirch v dřevěné schránce, 1893 – 1894: 3D model (A – fotogrammetrie) je tmavší a nemá výraznou strukturu oproti druhému 3D modelu s lépe osvětlenou přední stranou (B – skenování strukturovaným světlem) a s dobře viditelnými detaily.



Obr. 45 Zadní strana předchozích hodin, na prvním snímku jsou nožičky rozostřené, ale je lépe osvětlený povrch (fotogrammetrie), druhý model je tmavší. Lze jej mírně nasvítit v programu Sketchfab.



A

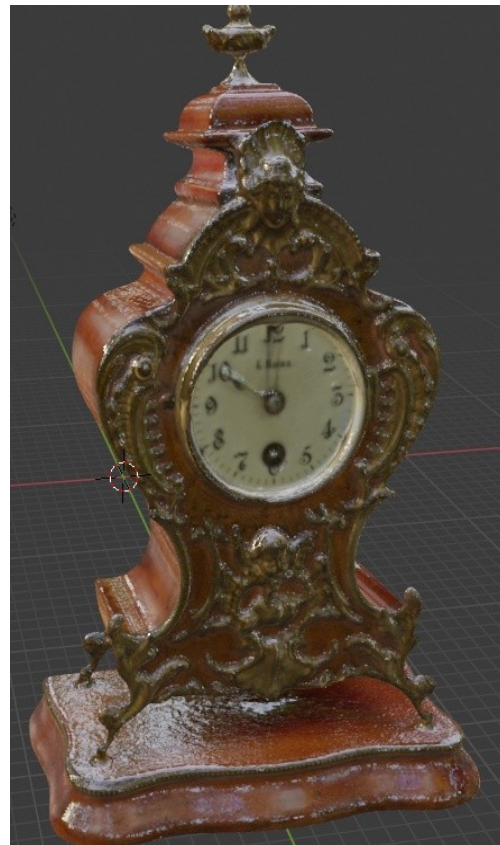


B

Obr. 46 Stolní hodiny mosazné s plastikou rytíře, konec 19. stol., Německo: Oba 3D modely (A – fotogrammetrie; B – skenování strukturovaným světlem) mají viditelnou členitou strukturu povrchu, opět je znát rozdíl v osvětlování předloh. Opět je patrný rozdíl u textury obou modelů. Složitější zdobení těchto hodin vyžaduje pečlivější focení a větší překryv pro zachycení všech detailů. Fotogrammetrie lépe vystihuje barevně předlohu.



A



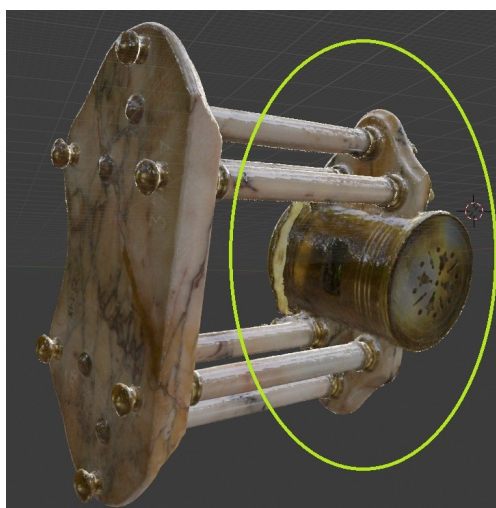
B

Obr. 47 Stolní hodiny Lenzkirch, 1875 – 1876, Německo: oba 3D modely jsou kvalitní. Hodiny jsou dřevěné s kovovým zdobením. Na povrchu modelů je vidět rozdíl v osvětlení, kdy je předmět v osvětlen nerovnoměrně v případě A (fotogrammetrie) a v případě B (skenování strukturovaným světlem) rovnoměrně. Skener způsobil větší odraz světla a v případě fotogrammetrie je povrch matnější.

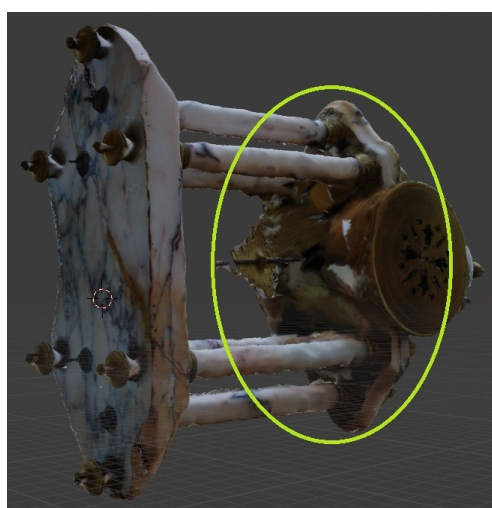
Souhrnně k oběma metodám lze říci, že se velmi dobře doplňují. V některých případech jsou lepší 3D modely vytvořené fotogrammetrií, ale mohou mít nedostatky v určitých částech modelu. Například chybějící spodní díly, jak je zmíněno v předchozí části (v případě fotogrammetrie), se musejí vytvořit samostatně a nasadit. Ve výsledném modelu je tato úprava u některých modelů poznat, hrany jsou mírně „roztřepené“. Některé 3D modely jsou kvalitnější ze skenerů a jejich velkou výhodou je i možnost (v rámci funkce zarovnání) nasadit spodní díl v programu přímo na celý model. Výsledek vytváří jednotný celek. 3D modely se od sebe liší ve zbarvení. Fotogrammetrické modely mají barvy živější a lépe představují předlohy. U modelů skenovaných je třeba věnovat velkou pozornost další úpravě světla buď ve 3D modelovacím programu anebo ve Sketchfabu.

V obou případech se okolo 3D modelů vyskytuje „nepořádek“ nebo přebytečná textura ve spodní části (část stolní desky na které předmět stál). Pomocí softwarových nástrojů lze tyto nedostatky odstranit a začistit. Problematické je čištění částí, kde je textura „nalepená“ na kovovém zdobení. Při odstraňování nedostatků mohou vznikat další defekty v textuře modelů. Na druhou stranu má 3D skenování často problémy s některými typy povrchů, které fotogrammetrie zachytí snadněji (například perforované, drobné detaily malby atd.) na základě informací získaných z fotografií.

3D skenery Artec Leo a Artec Spider zvládají naskenovat různě velké předměty a kombinace obou dvou tak představuje velkou výhodu. Osvětlování předmětů skenery je předpokladem pro rovnoměrné zachycení textury povrchu, jak je vidět na modelech. Při skenování natáčíme předmětem i skenerem a sbíráme data ze všech úhlů. Například v rámci toho můžeme porovnat modely na obr. 48 (podhled hodin). Skener zachytí i tuto oblast velmi podrobně, ale v rámci fotogrammetrie je potřebné ještě detailně nafotit tuto část samostatně.



A

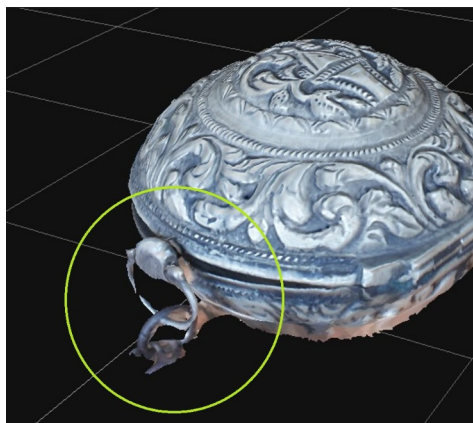


B

Obr. 48 Pohled na spodní část hodin, viditelná textura nad sloupky (A - skenování strukturovaným světlem) a chybějící textura vzhledem k malému počtu fotografií v pohledu v této části hodin (B – fotogrammetrie).

Pokud nastane problém s nekvalitní sadou fotografií a 3D model je zdeformovaný nebo neúplný, lze to řešit u fotogrammetrie vytvořením sady nové a u skenování zopakováním procesu. Pokud jde pouze o malou část modelu, je možné ji domodelovat. Záleží na rozsahu zdeformované části. Například u hodin na obr. 49 se nepodařilo dostatečně v prostředí používaného programu zrekonstruovat kovové kroužky. Zbýlý model je ale v dobré kvalitě a bez defektů. Navíc u takto

malých hodin (do 6 cm) je pravděpodobné, že výsledek bude i po dalším doplnění sady snímků podobný. V tomto případě je lepší variantou chybějící část domodelovat podle fotografické předlohy, např. v programu Blender.



Obr. 49 3D model s neúplnými částmi a jejich následné domodelování (Barokní anglické kapesní vřetenovky, kolem r. 1730, Anglie).

Diskuse

V rámci diplomové práce bylo převedeno do digitální podoby 18 exponátů historických hodin různých velikosti a tvarů za použití dvou rozdílných metod a byly vytvořeny jejich 3D modely. Jako základní metoda byla zvolena fotogrammetrie a jako druhá byla použita metoda skenování strukturovaným světlem. Na rozmanitém vzorku vybraných předmětů byly ověřeny možnosti obou metod, jejich využitelnost při tvorbě modelů, výhody i různá omezení. Všechny 18 exponátů hodin bylo zdigitalizováno metodou fotogrammetrie a 8 z nich také s použitím skeneru se strukturovaným světlem. V těchto případech tak bylo možné porovnat nejen postupy digitalizace a tvorby 3D modelů oběma metodami, ale i výsledné 3D modely.

Při postupu metodou fotogrammetrie se dbalo na dodržování již vyzkoušených zásad a pravidel, které byly čerpány ze zmíněných metodik⁴³. Po nastudování si jednotlivých kroků a nafocení sad snímků byl stanoven předpoklad, že postačuje zpracovat data ve specializovaném programu. Proces ale ukázal, že mohou nastat hned na začátku nemalé problémy. Například zkušenosti s nedostatečně nafocenými sadami snímků ukázaly, že se celý postup může zkomplikovat. Pokud totiž neprovedeme včas kontrolu fotografií, zejména jejich kvality, ukáže se jejich nedostatečnost až po zpracování dat programem. V praktické části diplomové práce je doporučováno si sadu snímků zkontrolovat hned po jejím nafocení. Tato kontrola zaručí ostrost snímků, ale nelze pouhým pohledem zjistit, zda je dostatečný překryv mezi snímky.

Dále je tu samotný program, který na základě vlastních algoritmů a propočtů provádí celý proces rekonstrukce, ale před jeho spuštěním vyřazuje některé snímky. I v tomto případě je těžké odhadnout, které z nafocených snímků program nebude akceptovat. Ze zkušeností s programem 3DF Zephyr vyplývá, že téměř vždy vyřadí určitý počet snímků. Účinným řešením by mohlo být sadu snímků nechat nahrát do programu ihned po nafocení a zadat do programu zpracování pouze první fázi rekonstrukce. Tato fáze není zdlouhavá a zjistíme přesný počet fotografií, které program zpracuje a které naopak vyřadí.

⁴³ Například Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu (Šindelář a kol., 2019), Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek (M. Brejcha a kol., 2015) a Metodika pro elektronický pasport zpřístupněné památky (L. Bezděk a kol., 2011).

Za úvahu také stojí možnost lepšího osvětlení předmětů, které fotografujeme. Výsledné modely ukázaly, že jedna polovina je vždy tmavší. Tmavší části 3D modelů mají hůře viditelné detaily na textuře. Pro lepší výsledek by bylo dobré zvážit, jak rovnoměrně osvětlit předlohu. Možností je vyzkoušet lepší fotografické vybavení zahrnující například foto stan, bílé pozadí a speciální fotografické osvětlení a na nových 3D modelech ověřit, jestli je zachycená textura kvalitní ze všech stran.

Dalším problémem je i nutnost dotváření části 3D modelu (v tomto případě spodní díly hodin). Pokud by se podařilo předmět vyfotografovat rovnou v co nejširším záběru (tedy i spodní části), pak by fotogrammetrický program dokázal vytvořit ucelený a kvalitní model. To by ale vyžadovalo předmět umístit například na matnější průhlednou desku místo skla. Nejlepším řešením se zatím jeví model sjednotit ze dvou samostatně nafocených částí (vlastní model a spodní díl). Při spojování spodní části k vlastnímu modelu je důležité pečlivě zhladit místa spojení obou dílů.

Druhou digitalizační metodou bylo skenování 3D skenerem využívající strukturované světlo. Práce se skenery vyžaduje zkušenosti, jak co nejlépe naskenovat určitý předmět. Při skenování často docházelo ke ztrátě trasování a vzniklo tak množství nepoužitelných digitalizátů. Po dostatečné praxi je práce se skenerem rychlá a za krátký čas je možné získat velké množství dat. Další výhodou je, že objekty digitalizace jsou rovnoměrně osvětleny skenerem, který má vlastní zdroj světla. Na rozdíl od fotogrammetrie můžeme objekty otáčet. Prostředí programu Artec Studio (verze 15) je vytvořené tak, aby uživatelé mohli nenáročným způsobem pracovat se všemi nástroji užívanými při tvorbě 3D modelu. Zpracování dat však trvá poměrně dlouho.

Jedním z cílů diplomové práce bylo určit, která metoda je vhodnější v případě digitalizování muzejních sbírek. Porovnat se dají navzájem z hlediska práce (obtížnost, časová náročnost), cenové dostupnosti a také kvality výsledných 3D modelů. S dostatečnými zkušenostmi používání skenerů je proces získávání dat rychlý a lze tak získat více času na tvorbu 3D modelů. Sběr dat trvá v případě fotogrammetrie déle. Metoda skenování je ale cenově náročnější než fotogrammetrie, a to vzhledem k nutnosti pořízení skenerů. Například cena používaných skenerů je v případě skeneru Artec Leo 26 700 euro a v případě skeneru Artec Space Spider 19 700 euro (Artec 3D scanners, 2021). Cena kvalitní digitální zrcadlovky se pohybuje například mezi 20 000,- Kč až 30 000,- Kč (Zrcadlovky, 2022). V rámci možností lze i zakoupit komerční software pro fotogrammetrii, který umožní kvalitně zpracovat data bez časového omezení nebo limitu počtu snímků. Cena programu 3DF Zephyr Lite je například 149 euro (3DF Zephyr Lite, 2021).

S ohlédnutím zpět za celým procesem a s ohledem na předem stanovené cíle lze konstatovat, že při digitalizaci se osvědčily obě metody. Metoda fotogrammetrie však ve srovnání s metodou skenování vychází cenově mnohem výhodněji. Obě metody je možné s úspěchem kombinovat obzvláště u pracovišť, které již disponují zakoupenými skenery.

Závěr

Při digitalizaci vybraných historických předmětů zvolenými metodami se podařilo vytvořit jejich 3D modely v dostatečně dobré kvalitě. V průběhu procesu byly ověřeny možnosti obou metod, jejich využitelnost při tvorbě modelů, výhody i různá omezení. Vybrané sbírkové exponáty jsou velmi rozmanité a při jejich digitalizaci nastaly různé problémy. Jejich řešení umožnilo nastavit několik pravidel, které jsou cenné při další práci. Jedná se o upřesnění postupu při procesu digitalizace (ať už se jedná o fotogrammetrii nebo 3D skenování) na základě získaných zkušeností.

V případě fotogrammetrie se jedná o důsledné dodržování výše zmíněných fotogrammetrických pravidel s důrazem zejména na ostrost snímků a jejich překryv a na získání dostatečně početné sady snímků. Problémy, které nastávají při pořízení menšího počtu snímků, jsou těžko řešitelné a opakovat celý proces znovu je zdlouhavé. Místo toho kontrola celé sady snímků hned na místě znamená výraznou úsporu času.

Fotogrammetrie je metodou bezkontaktní a cenově dostupnou. Při získaných zkušenostech s pořizováním sad fotografií, jejich dostatečného počtu a kvalitě, ostroty a vyhovujícího překryvu sousedních snímků, lze konstatovat, že výsledné 3D modely jsou velmi dobré. Samotné zpracování je však časově náročné. Modely objektů digitalizace jsou věrné a dokáží zachytit i jemné detaily a členitosti povrchů a tvarů. Rozhodujícím faktorem využitelnosti metody je jednoduchost zařízení. K pořizování snímků může posloužit jakýkoliv dostatečně kvalitní digitální fotoaparát. I programy potřebné ke tvorbě 3D modelů jsou cenově dostupné. Jistou nevýhodou metody je potřeba dostatečně výkonného hardwaru k výpočetním operacím při zpracování snímků do výsledného modelu. Nevýhodou je také nutnost naučit se pracovat s osvětlením v průběhu focení. Na kvalitě fotografií je metoda silně závislá. Předměty zpracovávané fotogrammetrií musí být rovnoměrně nasvíceny ze všech stran. Nutností je i práce ve specializovaném programu.

Podmínka kvalitních fotografií neplatí při používání skenerů. Skenování je rychlé a za krátký čas nasbírá skener velké množství dat. Také skenování strukturovaným světlem je metodou bezkontaktní. U některých povrchů (např. ciferníky hodin) je tato metoda citlivější než fotogrammetrie s horšími výsledky u zobrazení povrchu vytvářených 3D modelů. Stejně problémy vznikají při skenování povrchů s perforací. Některé lesklé a transparentní povrchy působí problémy u obou metod.

Obě metody, testované v diplomové práci, tj. fotogrammetrie a skenování, nejsou výjimkou. Mají své možnosti využití a také své výhody i nevýhody. Mezi výhody obou metod patří bezkontaktnost, možnost zachytit objekt detailně a s vysokou přesností. To umožňuje tvorbu kvalitních 3D modelů. Nevýhodou fotogrammetrie jsou některé problémy, které mohou nastat např. v závislosti na kvalitě a počtu pořízených snímků. Nevýhodou skenování může být cenová náročnost či nedostupnost potřebného zařízení. Důležitá je i volba programů, které slouží ke zpracování pořízených dat a k samotné tvorbě a úpravě 3D modelů. Nakonec lze konstatovat, že metoda fotogrammetrie je pro většinu uživatelů dostupnější a lze s ní pracovat i mimo specializovaná pracoviště. Navíc, jak již bylo dříve napsáno, ji lze s velkým úspěchem použít i na pracovištích, kde se dosud používá hlavně metoda skenování, a to jako vhodný doplněk a posílení metody využití skenerů.

Vytvořený 3D model historického exponátu se tak stává zajímavým virtuálním doplňkem samotného historického předmětu s mnoha možnostmi využití (interaktivní pojetí historického předmětu, možnost upoutání větší pozornosti, dostupnost prohlížení exponátů on-line, ať již pro badatele či pro zájemce z řad odborné veřejnosti atd.). Nezanedbatelným přínosem celého procesu je také možná archivace muzejních exponátů a obecně předmětů kulturního dědictví naší společnosti ve virtuálním prostředí. Doplnění o 3D modely poskytuje výhody při zpětné rekonstrukci vlastních exponátů při případném poškození nebo zničení. Proto je důležité, aby výsledný model představoval věrnou podobu reálného objektu.

Prameny a literatura

AKCA, Devrim, 2011. 3D MODELING OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS WITH A STRUCTURED LIGHT SYSTEM. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* [online], **12**(1), 140-152 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:

<http://maajournal.com/Issues/2012/Vol12-1/Full11.pdf>

BARRATT, Robert. 2013. Photogrammetry in Archaeology: Methodology and Uses, with Particular Regards to Accuracy [online]. 1-55 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:

https://www.academia.edu/9677591/Photogrammetry_in_Archaeology_Methodology_and_Uses_with_Particular_Regards_to_Accuracy

BEZDĚK, Ladislav a Martin FROUZ, 2014. *Digitální a digitalizovaná fotografie pro vědecké účely v praxi památkové péče* [online]. Praha: Národní památkový ústav. ISBN 978-80-7480-017 7. Dostupné z:

<https://www.npu.cz/cs/npu-a-pamatkova-pece/npu-jako-institute/publikace/7698-digitalni-a-digitalizovana-fotografie-pro-vedecke-ucely-v-pamatkove-peci>

BREJCHA , Marcel, Vladimír BRŮNA, Zdeněk MAREK a Bára VĚTROVSKÁ, 2015. *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*. [online]. [cit. 2021-11-19]. Národní památkový ústav, FF Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, ISBN 978-80-7414-954-2.

BURDICKOVÁ, Anne, Johanna DRUCKEROVÁ, Peter LUNENFELD, Todd PRESNER a Jeffrey SCHNAPP, 2018. *Digital Humanities: Digitální metody a laserové skenování*. Praha: Academia. ISBN 978 80 200 2865 5.

CARDACI, Alessio, Antonella VERSACI a Pietro AZZOLA, 2019. 3D LOW-COST ACQUISITION FOR THE KNOWLEDGE OF CULTURAL HERITAGE:: THE CASE STUDY OF THE BUST OF SAN NICOLA DA TOLENTINO. *ISPRS - International Archives of the*

Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online]. Strasbourg, 93 - 100 [cit. 2022-06-12]. ISSN 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-93-2019. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/337642337_3D_LOW-

COST_ACQUISITION_FOR_THE_KNOWLEDGE_OF_CULTURAL_HERITAGE_THE_CASE _STUDY_OF_THE_BUST_OF_SAN_NICOLA_DA_TOLENTINO

CHU, Ju-Chun, Hsiu-Hua CHEN a Chin-Tung KAO, 2011. *Seal and Imprint Digitization Procedures Guideline* [online]. Taiwan: Taiwan e-Learning and Digital Archives Program, [cit. 2022-06-11]. ISBN 978-986-02-7218-5. Dostupné z:

<https://culture.teldap.tw/culture/images/collection/20120820/Seal%20and%20Imprint.pdf>

CUBR, Ladislav, 2010. *Dlouhodobá ochrana digitálních dokumentů*. Praha: Národní knihovna České republiky. ISBN 978-80-7050-588-5.

ČERMÁK, Jan, 2015. *Metody 3D skenování objektů*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

GENG, Jason, 2011. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Optical Society of America* [online], (3), 130 - 147 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z:

<https://opg.optica.org/aop/fulltext.cfm?uri=aop-3-2-128&id=211561>

GIANCOLA, Silvio, Matteo VALENTI a Remoa SALA, 2018. *A Survey on 3D Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies*. Switzerland: Springer. ISBN 978-3-319-91761-0.

HORÁK Petra a Vratislav NEJEDLÝ, 2013. *Základní pojmy v péči o kulturní dědictví*. 1. vydání. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 978-80-7395-717-9

HRUBÝ, Petr, Eva ALTOVÁ a Antonín KADLEC, 2015. *Metodika dokumentace drobných památek* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, [cit. 2022-07-16]. ISBN 978-80-7414-953-5. Dostupné z:

<https://www.npu.cz/publikace/metodika-dokumentace-drobnych-pamatek.pdf>

HUTAŘ, Jan, Marek MELICHAR a Tomáš GEC, 2016. *Národní koncepce dlouhodobé ochrany digitálních dat v knihovnách*.

(Dostupné z: https://kkpce.cz/content/wys_pro_knihovny/KoncepceUchovDigit2016.pdf)

KOSMELOVÁ, Natália a Vojtěch NOSEK, 2019. Porovnanie digitálnych a klasických archeologických dokumentačných metód na príklade stredovekých šachových figúrok. *Studia Archaeologica Brunensia* [online], 2(24), 29-74 [cit. 2022-06-12]. ISSN 10.5817/SAB2019-2-2. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/342684318_Porovnanie_digitalnych_a_klasickych_archeologickych_dokumentacnych_metod_na_priklade_stredovekych_sachovych_figurok)

[342684318_Porovnanie_digitalnych_a_klasickych_archeologickych_dokumentacnych_metod_na_priklade_stredovekych_sachovych_figurok](https://www.researchgate.net/publication/342684318_Porovnanie_digitalnych_a_klasickych_archeologickych_dokumentacnych_metod_na_priklade_stredovekych_sachovych_figurok)

LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON, Stephen KYLE a Jan BOEHM, 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* [online]. 2nd. Walter de Gruyter, [cit. 2021-11-19]. str. 445 – 447, ISBN 978-3-11-030278-3.

NAJAR, J.Kabir a J.Ahmad WANI, 2019. Digital Preservation: An Overview. *Library Philosophy and Practice (e-journal)* .2989 [online]. Lincoln: University of Nebraska [cit. 2022-07-16]. ISSN 1522-0222. Dostupné z: https://www.academia.edu/66708067/Digital_Preservation_An_Overview

NEILSON, Tai, 2018. *Research Methods for the Digital Humanities*. Switzerland: Palgrave Macmillan,. ISBN 978-3-319-96713-4.

PATOČKA, Jiří a Eva HEŘMANOVÁ, 2008. *Lokální a regionální kultura v České republice: kulturní prostor, kulturní politika a kulturní dědictví*. Praha: ASPI. ISBN 978-80-7357-347-8.

PAVELKA, Karel a Jindřich HODAČ, 2008. *Fotogrammetrie 3: Digitální metody a laserové skenování*. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-03978-6.

PAVELKA, Karel, Jan ŘEZNÍČEK, Zdeňka BÍLÁ, Milan PAVLÍK a František KAŠIČKA, 2017. *Exaktní metody průzkumu památek*. Praha: Česká technika- nakladatelství ČVUT, str. 9, str. 21, ISBN 978-80-01-05260-0.

PLZÁK, Jindřich, 2016. Dokumentace mincí výpočetní fotografickou metodou RTI. *Numismatické listy* [online]. Národní muzeum ve spolupráci s Českou numismatickou společností, 71(3-4), 169-174 [cit. 2022-06-12]. ISSN 0029–6074. Dostupné z: https://publikace.nm.cz/file/e0f574bb021e7201c12517822d20e158/20661/ISSN%200029-6074_2016_3-4_p169%E2%80%93174.pdf

REMONDINO, Fabio, 2011. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing [online]*, 3, 1104-1138. ISSN 2072-4292. Dostupné z: https://www.academia.edu/27459496/Heritage_Recording_and_3D_Modeling_with_Photogrammetry_and_3D_Scanning

REMONDINO, Fabio a Stefano CAMPANA, 2014. *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and best practices*. BAR International Series 2598. ISBN 978-1-4073-1230-9.

RIDGE, Mia, 2014. *Crowdsourcing our cultural heritage*. England: Ashgate Publishing Limited. ISBN 978-1-4724-1024-5.

RYBENSKÁ, Klára, Barbora BORŮVKOVÁ, 2020. Vybrané metody 3D digitalizace aplikované na příkladech hodinových exemplářů Náchodského muzea. *Muzeum: muzejní a vlastivědná práce*, 58 (2), 19-31. ISSN 1803-0386.

SAMADI, Ali, 2011. *Structured-light 3D scanner [online]*, 1-8 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1107159/Structured_light_3D_scanner_Samadi

SMITHIES, James, 2017. *The Digital Humanities and the Digital Modern*. London: Palgrave Macmillan. ISBN 978-1-137-49944-8.

SUBRAMANIAN, Bala. 2012. 3D Scanner.[online]. 1-9 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://www.academia.edu/4044224/3d_scanner

STANČIĆ, Ivo a Vlasta ZANCHI, 2012. *Improved structured light 3D scanner with application to anthropometric parameter estimation, Measurement*, [online]. *Measurement*, 46(1), 716-726 [cit. 2022-06-12]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224112003594>

STANCO, Filippo, Sebastiano BATTIATO a Giovanni GALLO, 2011. *Digital Imaging for cultural heritage preservation: Analysis, restoration and reconstruction of ancient artwork [online]*. Taylor & Francis Group, [cit. 2021-11-19]. str. 56 – 57, ISBN 978-1-4398-2174-9.

ŠINDELÁŘ, Jiří, Lumír POLÁČEK a Šárka KRUPIČKOVÁ, 2019.

Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu. *Přehled výzkumů*, 60(2), str. 201 - 224. ISSN 1211-7250.

TAUBIN, Gabriel, 2015. Unsynchronized Structured. *Light. ACM Trans. Graph* [online]. Association for Computing Machinery, 34(6) [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: https://www.academia.edu/74578178/Unsynchronized_structured_light

Tůma, Jan, 2019: *V ZAJETÍ ČASU* – výstava historických hodiny ze sbírek Muzea Náchodska. Texty pro výstavu, která proběhla 13. prosince 2019 – 5. ledna 2020 ve staré škole Dřevěnce v Polici nad Metují, rkps.

WARWICK, Claire a Julianne NYHAN, 2012. *Digital Humanities in Practice*. London: Facet Publishing. ISBN 978-1-85604-766-1.

ZACHAR, Ján, Milan HORŇÁK a Predrag NOVAKOVIČ, 2017. *3D DIGITAL RECORDING OF ARCHAEOLOGICAL, ARCHITECTURAL AND ARTISTIC HERITAGE*. Ljubljana: University of Ljubljana.

ZUZA, Mikolas, 2018, *Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu* [online] [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>

Internetové zdroje

3DF Zephyr Tutorials. *Www.3dflow.net* [online]. 2021 [cit. 2022-06-16]. Dostupné z:

<https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-tutorials/>

Agisoft: Features. *Www.agisoft.com* [online]. 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z:

<https://www.agisoft.com/features/cloud/>

An Intro to Artec Studio 15 [online]. [cit. 2022-06-16]. Dostupné z:

<https://aipworks.fi/wp-content/uploads/2020/12/AS15ForNewUsers-NoPrice-A4-ENGLISH.pdf>

Artec 3D scanners. *Www.artec3d.com* [online]. 2021 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z:

<https://www.artec3d.com/prices>

Artec 3D unveils Artec Studio 15: with new scan-to-CAD features for inspection and reverse engineering. *Www.artec3d.com* [online]. 2020 [cit. 2022-06-16]. Dostupné z:

<https://www.artec3d.com/news/artec-studio-15-scan-to-cad-release>

Artec Space Spider: Industrial 3D scanner of metrological accuracy. *Www.artec3d.com* [online]. 2022 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider>

Artec Space Spider technical specs. *Www.artec3d.com* [online]. 2022 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider>

Colmap: About. *Www.colmap.github.io* [online]. 2016 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z:

<https://colmap.github.io/>

Find the best 3DF Zephyr for you: 3DF Zephyr Lite. *Www.3dflow.net* [online]. 2021 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>

Getting started with 3DF Zephyr. *Www.3dflow.net* [online]. Verona: 3Dflow SRL, 2021 [cit. 2021-11-19].

Dostupné z: <https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-tutorials/convert-photos-3d-models-3df-zephyr/>

High-Resolution Structured Light Scanning: Blue and White Light Scanning. *Www.3d-engineering.net* [online]. 2020 [cit. 2022-07-16].

Dostupné z: <https://3d-engineering.net/engineering-services/3d-scanning-digitalizing/blue-and-white-light-scanning/>

JAVŮREK, Karel, 2018. VCSEL: laserová technologie, která umožní tvorbu brýlí pro rozšířenou realitu. *Www.connect.zive.cz* [online], [cit. 2022-07-16].

Dostupné z: <https://connect.zive.cz/clanky/vcse-laserova-technologie-ktera-umozni-tvorbu-bryli-pro-rozsirenou-realitu/sc-320-a-191720>

Kulturní dědictví. *Www.nulk.cz* [online]. 2016 [cit. 2022-05-16].

Dostupné z: <https://www.nulk.cz/kulturni-dedictvi/>

Meshroom Manual. *meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16].

Dostupné z: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/>

Reality Capture. *www.capturingreality.com/* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z:

<https://www.capturingreality.com/realitycapture>

Reflecon Tarnish 11 HC, 500 ml, křídový sprej MR200, 500 ml. *Www.3d-creator.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.3d-creator.cz/antireflexni-uprava-povrchu>

Rozšířená realita. *Www.zive.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16].

Dostupné z: <https://www.zive.cz/rozsirena-realita/sc-561/default.aspx>

Sketchfab. *Www.sketchfab.com* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16].

Dostupné z: <https://sketchfab.com/blogs/community?ref=header>

Technical specs. *Www.artec3d.com* [online]. 2022 [cit. 2022-07-16].

Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo>

Virtuální realita. *Www.zive.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16].

Dostupné z: <https://www.zive.cz/virtualni-realita/sc-384/default.aspx>

Wavefront Material Template Library (MTL) File Format. *Www.loc.gov: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections* [online]. 2019 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000508.shtml>

Wavefront OBJ File Format. *Www.loc.gov: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections* [online]. 2020 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000508.shtml>

What is 3DF Zephyr Free?. *Www.3dflow* [online]. 2021 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-free/>

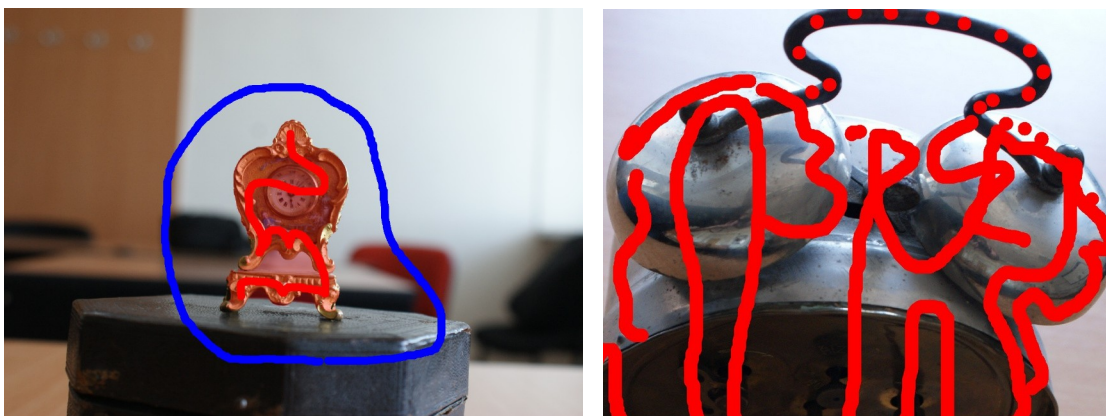
Why Leo?. *Www.artec3d.com* [online]. 2021 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo#why-leo>

Zrcadlovky s objektivem. *Www.alza.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/zrcadlovky-s-objektivem/18851891.htm>

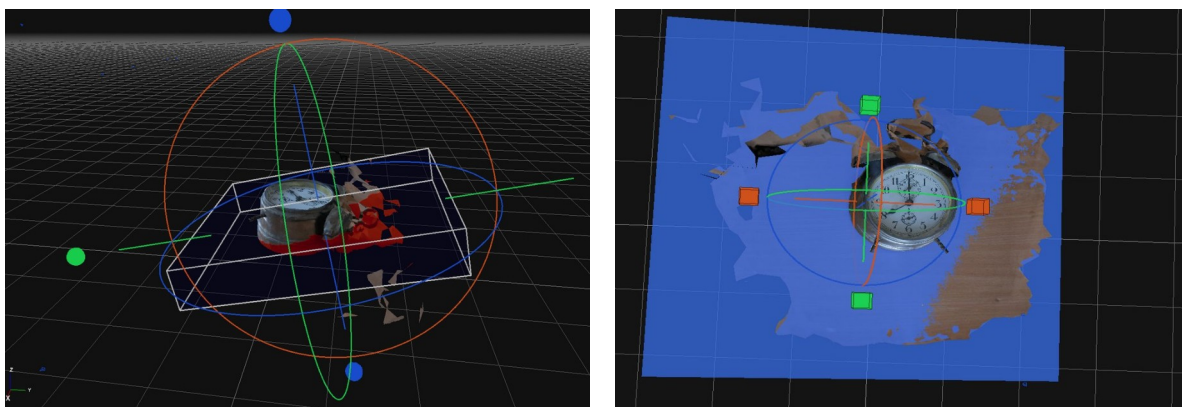
Seznam příloh

Příloha A Ukázka použitých nástrojů.....	98
Příloha B Ukázka 3D modelů bez spodního dílu a po následné úpravě.....	100
Příloha C Ukázky chybných 3D modelů.....	104
Příloha D Přehled vybraných exponátů použitých pro digitalizaci.....	106
Příloha E Jednotlivé fáze rekonstrukce zpracované fotogrammetrickým programem.....	111
Příloha F Technické specifikace 3D skeneru Artec Leo.....	118
Příloha G Technické specifikace 3D skeneru Artec Space Spider.....	119
Příloha H Porovnání specifikací obou 3D skenerů.....	120

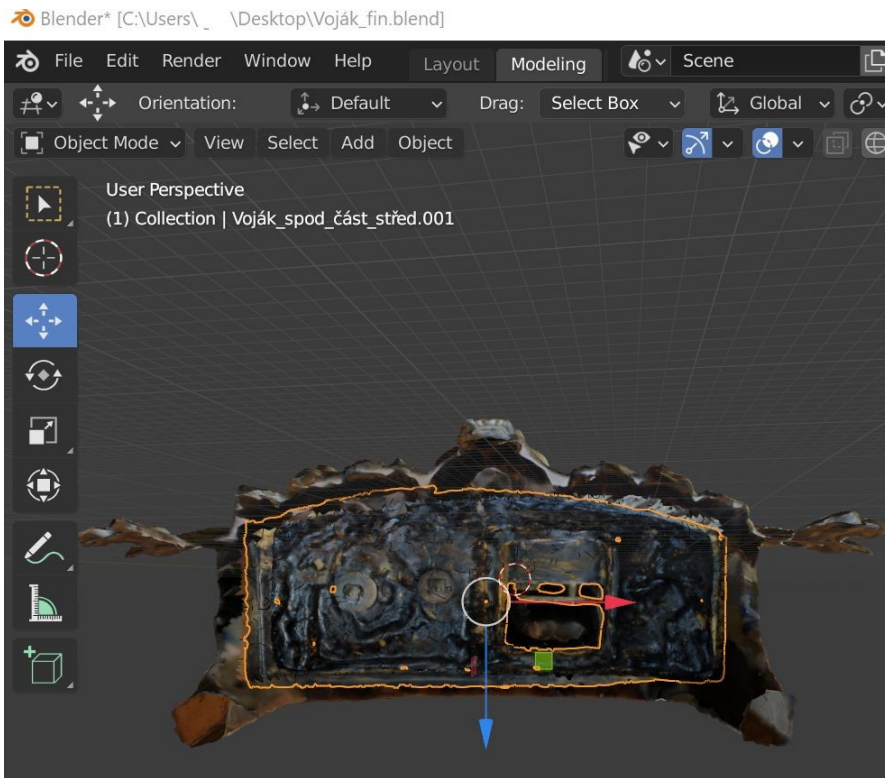
Příloha A Ukázka použitých nástrojů



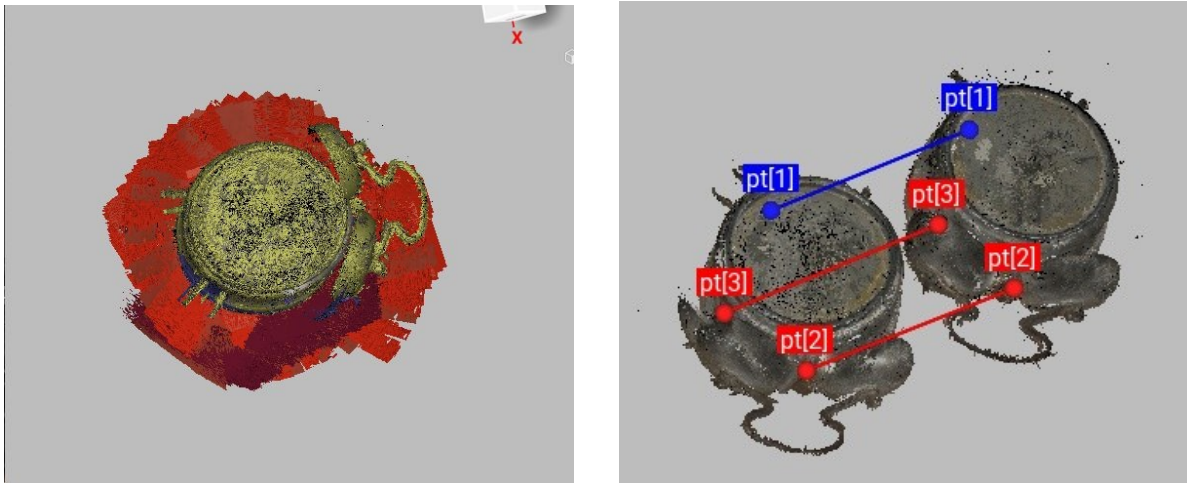
Obr. 50 Ukázka nástroje MASKING z programu 3DF Zephyr.



Obr. 51 Ukázka nástrojů BOX a PLANE z programu 3DF Zephyr.

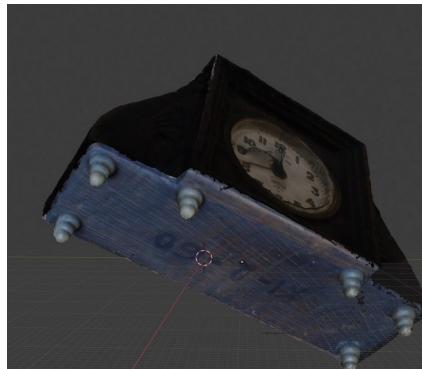
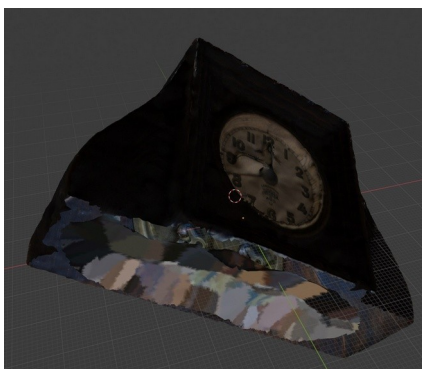


Obr. 52 Nasazování již upraveného spodního dílu pomocí nástrojů MOVE, ROTATE a SCALE v programu Blender.

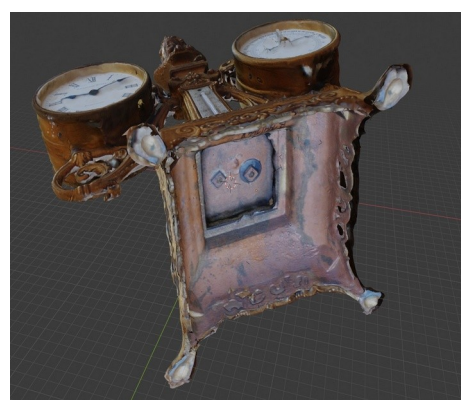


Obr. 53 Nástroje k začištění okolí modelu ERASE a zarovnávání digitalizátů pomocí bodů (program Artec Studio 15).

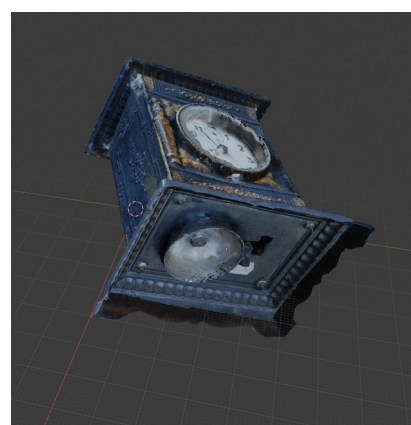
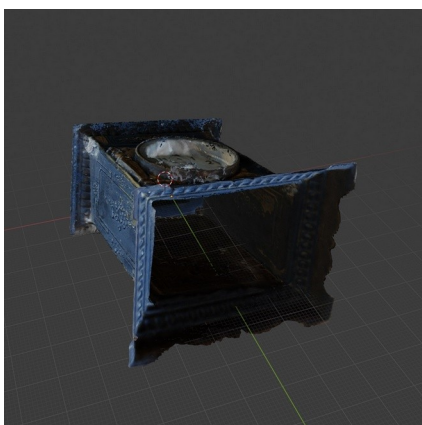
Příloha B Ukázka 3D modelů bez spodního dílu a po následné úpravě



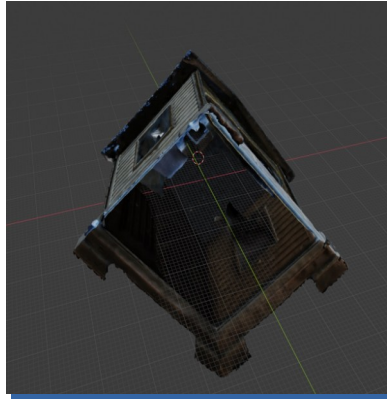
Obr. 54 Budík Lenzkirch ve dřevěné schránce, 1893 – 1894, spodní díl z 23 snímků (program 3DF Zephyr Free).



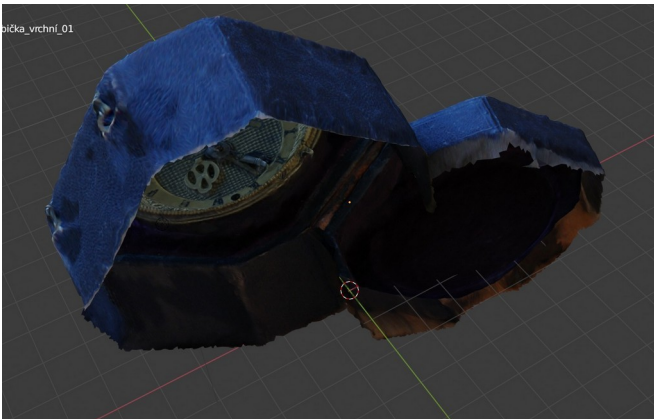
Obr. 55 Stolní hodiny s barometrem, konec 19. stol., Uhry, spodní díl z 28 snímků (program 3DF Zephyr Free).



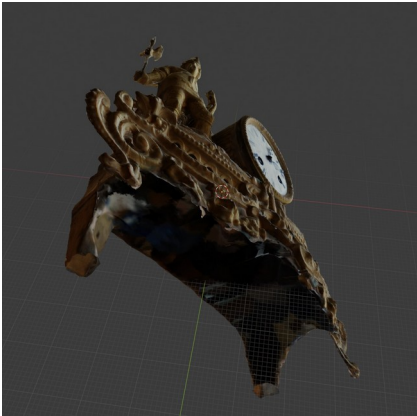
Obr. 56 Budík skříňkový Junghaus, 1890 – 1920, Německo, spodní díl z 26 snímků (program 3DF Zephyr Free).



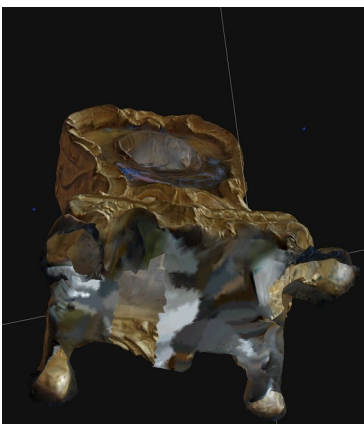
Obr. 57 Budík ve tvaru domku, 1888 – 1890, Německo, spodní díl z 24 snímků (program 3DF Zephyr Free).



Obr. 58 Cestovní budík, krabička, 2. pol. 19. stol., Německo, spodní díl z 38 snímků (program 3DF Zephyr Free).



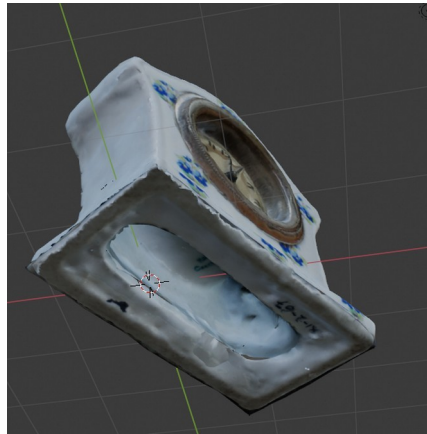
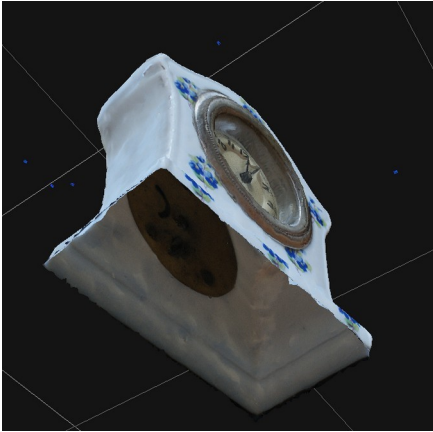
Obr. 59 Stolní hodiny mosazné s plastikou rytíře, konec 19. stol, Německo, spodní díl z 83 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).



Obr. 60 Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol., Rakousko, spodní díl z 27 snímků (program 3DF Zephyr Free).



Obr. 61 Stolní hodiny historizující, konec 18. stol. - 3. čtvrtina 19. stol, spodní díl z 90 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).



Obr. 62 Porcelánový budíček Kienzle, 1925 – 1931, ČSR, spodní díl z 18 snímků (program 3DF Zephyr Free).



Obr. 63 Barokní anglické kapesní vřetenovky, kolem r. 1730, Anglie, spodní díl z 32 snímků (program 3DF Zephyr Free).

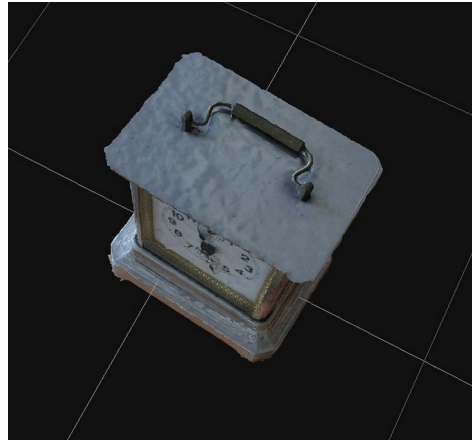
Příloha C Ukázky chybných 3D modelů



Obr. 64 Chybné modely v důsledku nedostatečně početné sady snímků.



Obr. 65 Chybné modely s „obtiskem“ hodin nafocených naležato v rámci jedné sady.







Obr. 66 *Chybné modely v dôsledku odrazu svetla od lesklého povrchu.*




Příloha D Přehled vybraných exponátů použitých pro digitalizaci

V tabulce 9 jsou popsány jednotlivé muzejní exponáty podle (Tůma, 2019).

Tab. 9 Popis muzejních exponátů.

	<p>Stolní hodiny mosazné s plastikou rytíře, konec 19. stol, Německo; vel. 32 cm; z počtu 75 snímků byla rekonstrukce provedena z 75 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.1</p>
	<p>Stolní hodiny historizující, konec 18. stol. - 3. čtvrtina 19. stol., vel. 32,6 cm, z počtu 217 snímků byla rekonstrukce provedena z 204 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.2</p>
	<p>Cestovní budík, krabička, 2. pol. 19. stol., Německo, vel. 24 cm; z počtu 50 snímků byla rekonstrukce provedena z 20 snímků (program 3DF Zephyr Free).</p> <p>Hodiny č.3</p>
	<p>Budík zn. Georg Beker se dvěma cimbály, před 1926, Čechy; vel. 32 cm; z počtu 119 snímků byla rekonstrukce provedena z 89 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.4</p>

Tab. 10 Popis muzejních exponátů (pokračování).

	<p>Stolní hodiny s barometrem, konec 19. stol., Uhry; vel. 32,3 cm; z počtu 137 snímků byla rekonstrukce provedena z 129 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.5</p>
	<p>Stolní figurální hodiny ve stylu druhého rokoka, 1860 – 1880, Francie, Rakousko; vel. 33,1 cm; z počtu 92 snímků byla rekonstrukce provedena z 92 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 6</p>
	<p>Budík skříňkový Junghaus, 1890 – 1920, Německo; vel. 21 cm; z počtu 102 snímků byla rekonstrukce provedena ze 102 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 7</p>
	<p>Barokní anglické kapesní vřetenovky, kolem r. 1730, Anglie; vel. 6 cm x 3,6 cm; z počtu 44 snímků byla rekonstrukce provedena z 44 snímků (program 3DF Zephyr Free).</p> <p>Hodiny č. 8</p>

Tab. 11 Popis muzejních exponátů (pokračování).

	<p>Budík ve tvaru domku, 1888 – 1890, Německo; vel. 18,9 cm; z počtu 139 snímků byla rekonstrukce provedena z 132 snímků.</p> <p>Hodiny č. 9</p>
	<p>Skříňkový budík Junghans, r. 1890 - 1920, Německo; vel. 32 cm, z počtu snímků 114 byla rekonstrukce provedena ze 100 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 10</p>
	<p>Barokní anglické kapesní vřetenovky, kolem r. 1730, Anglie; vel. 6 cm x 3,6 cm; z počtu 66 snímků byla rekonstrukce provedena z 66 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 11</p>
	<p>Miniaturní stolní hodiny, pol. 19. stol., Rakousko; vel. 6,4 cm; z počtu 83 snímků byla rekonstrukce provedena z 83 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 12</p>

Tab. 12 Popis muzejních exponátů (pokračování).

	<p>Budík Lenzkirch v dřevěné schránce, 1893 - 1894; vel. 9,5 cm; z počtu 77 snímků byla rekonstrukce provedena ze 70 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 13</p>
	<p>Porcelánový budíček Kienzle, 1925 – 1931, ČSR; vel. 10,9 cm; z počtu snímků 103 byla rekonstrukce provedena ze 77 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 14</p>
	<p>Stolní hodiny barokní skříňkové, kolem r. 1775, Rakousko; vel. 68 cm; z počtu 150 snímků byla rekonstrukce provedena z počtu 60 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.15</p>
	<p>Stolní hodiny Lenzkirch, 1875 – 1876, Praha, Německo; vel. 34,1 cm; z počtu snímků 116 byla rekonstrukce provedena ze 70 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.16</p>

Tab. 13 Popis muzejních exponátů (pokračování).

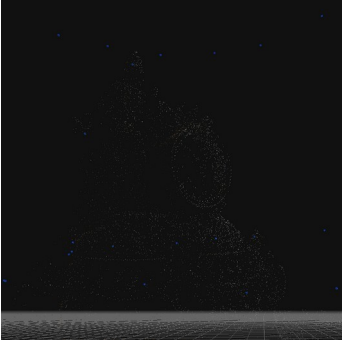
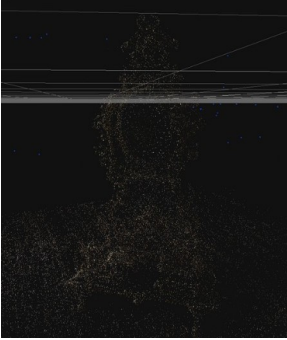
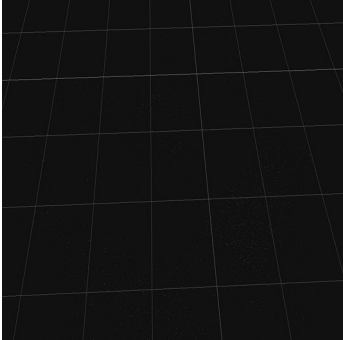

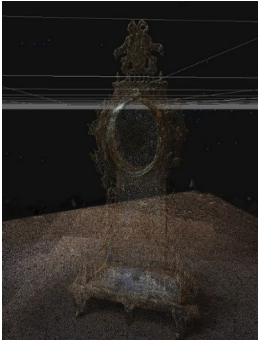
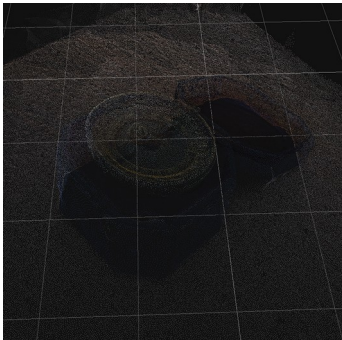






	<p>Stolní altánové hodiny se sloupky, 1859 - 1860, Německo; vel. 32 cm; z počtu 80 snímků byla rekonstrukce provedena z počtu 72 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č.17</p>
	<p>Kyvadlové hodiny Victoria, před 1899, Německo; vel. 80,9 cm, z počtu 1137 snímků byla rekonstrukce provedena z počtu 85 snímků (program 3DF Zephyr Lite, 14 denní licence zdarma).</p> <p>Hodiny č. 18</p>

Příloha E Jednotlivé fáze rekonstrukce zpracované fotogrammetrickým programem

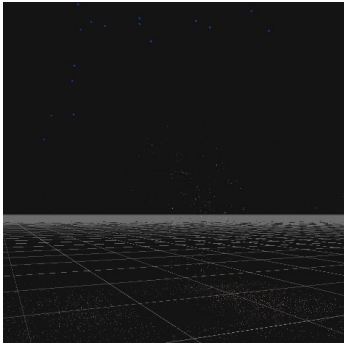
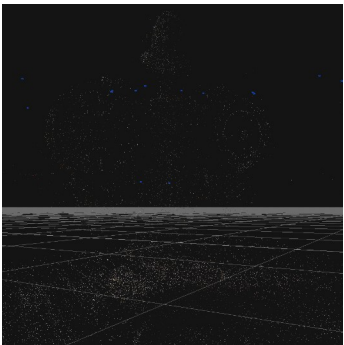
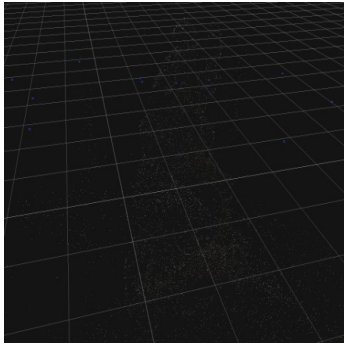
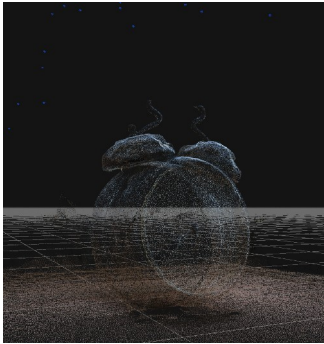
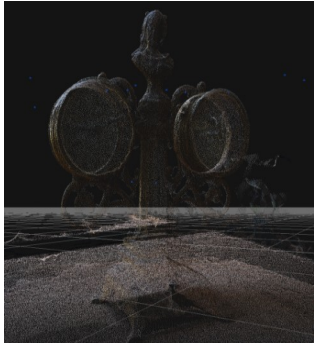
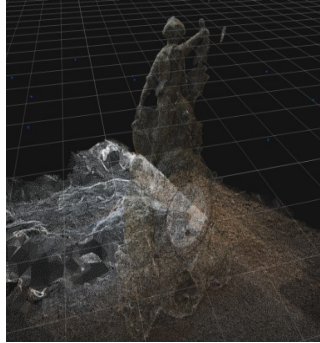


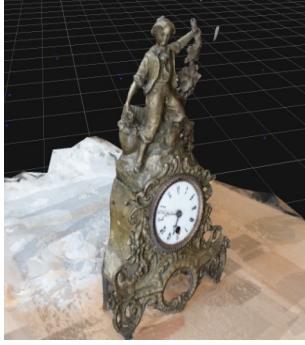

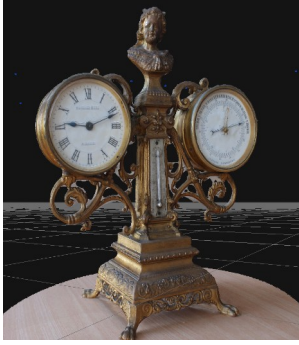
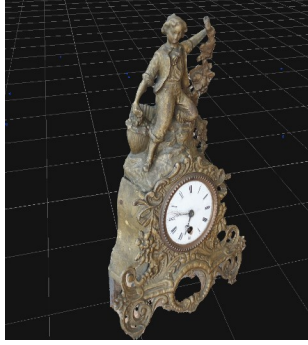
Tab 14 Popis fází rekonstrukce.

Fáze rekonstrukce 3D modelů (SFM – Struktura z pohybu)	
1. Fáze (F. 1)	Zajišťuje extrahování shodných bodů na snímcích a propojuje jednotlivé snímky na základě překryvů, vyhledává identické body na sousedních snímcích a spouští proces geometrické rekonstrukce. Na konci této fáze je vygenerováno řídké mračno bodů (sparse point cloud).
2. Fáze (F. 2)	Je generováno husté mračno bodů (dense point cloud). Při této fázi dochází ke generování a spojování „map“ dohromady. Fáze je náročná na výpočet a vyžaduje dostatečně výkonný hardware. Proces je možné i několikrát zopakovat a získat tak lepší výsledný model.
3. Fáze (F. 3)	Probíhá rekonstrukce povrchu (mesh reconstruction) a generování sítě za pomocí speciálního algoritmu. Délka rekonstrukce je opět závislá na výkonu hardwaru.
4. Fáze (F. 4)	Provádí generování textury (textured mesh reconstruction). Textura může být vygenerována buď ze všech snímků nebo můžeme odstranit ty, které mají například výrazně odlišné osvětlení. Program vyhledává barevné informace pro každý pixel a automaticky vypočítává jejich vyvážení (Getting started with 3DF Zephyr, 2021).

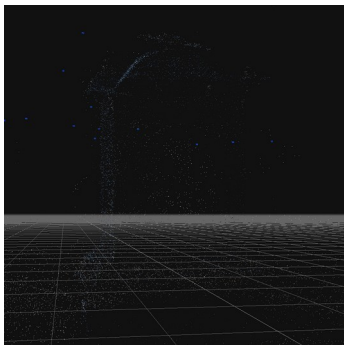
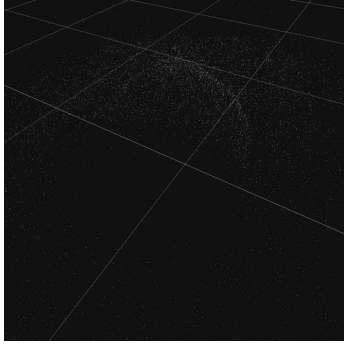
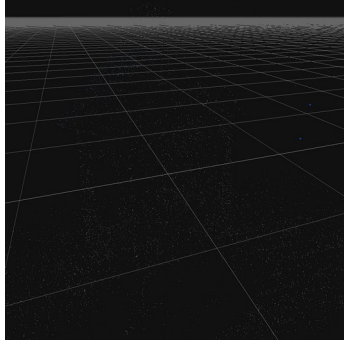
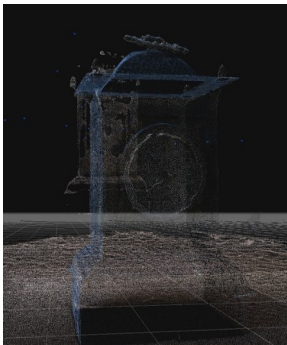
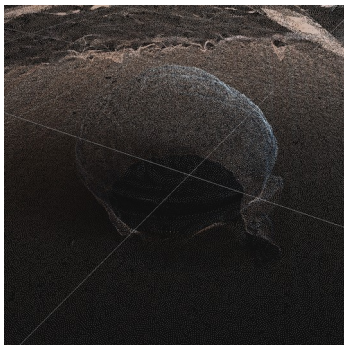
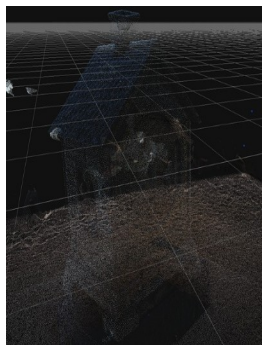





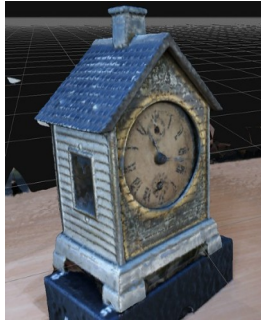
Tab. 15 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 1 – č. 3.

	Hodiny č. 1	Hodiny č. 2	Hodiny č. 3
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

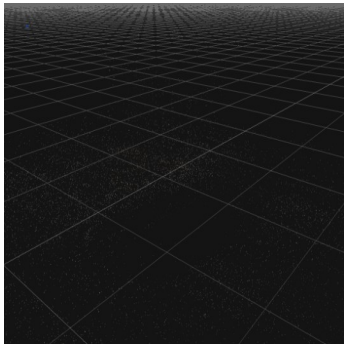
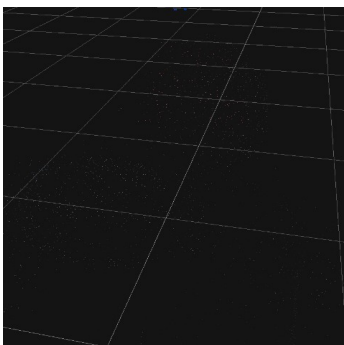
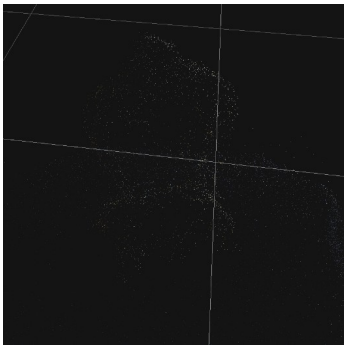
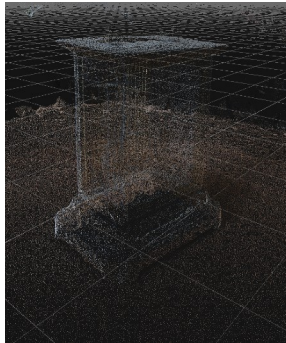
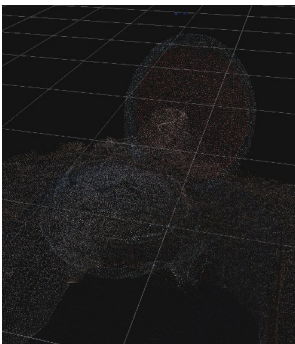


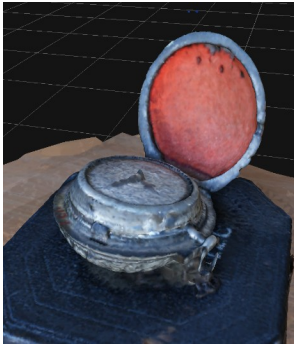




Tab. 16 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 4 – č. 6.

	Hodiny č. 4	Hodiny č. 5	Hodiny č. 6
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

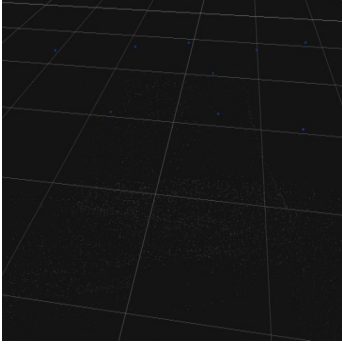
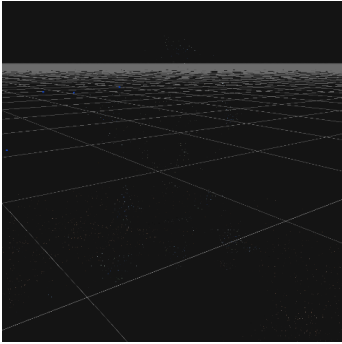

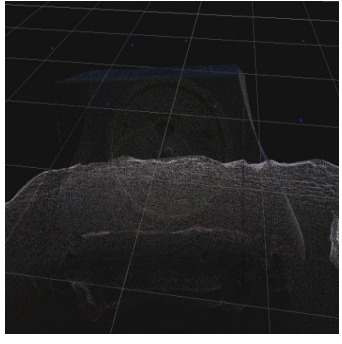
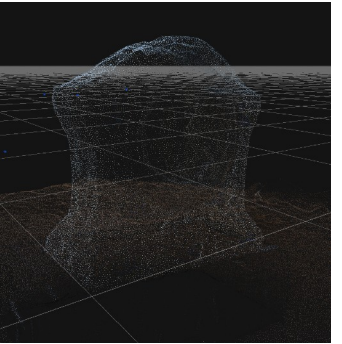


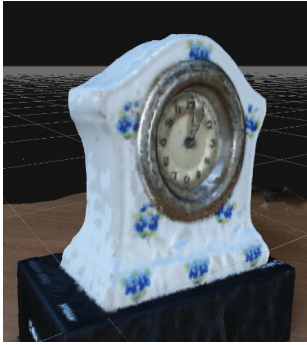

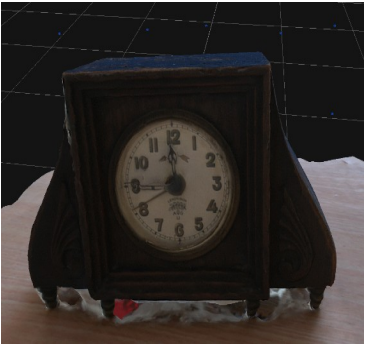
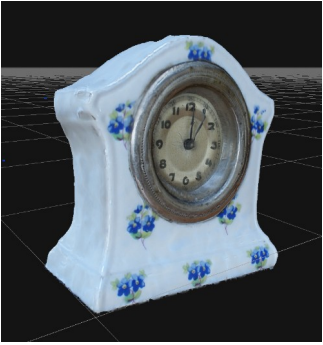

Tab.17 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 7 – č. 9.

	Hodiny č. 7	Hodiny č. 8	Hodiny č. 9
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

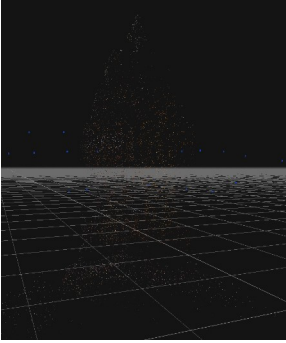
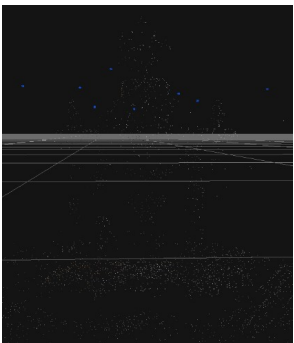
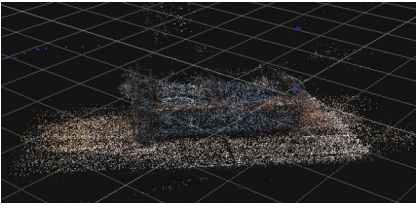
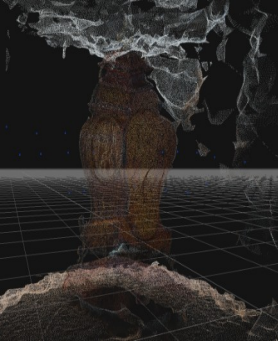
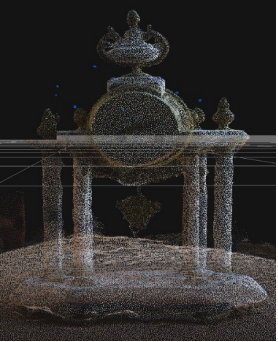







Tab. 18 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 10 – č. 12.

	Hodiny č. 10	Hodiny č. 11	Hodiny č. 12
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

Tab. 19 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 13 – č. 15.

	Hodiny č. 13	Hodiny č. 14	Hodiny č. 15
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

Tab. 20 Popis fází rekonstrukce u hodin č. 16 – č. 18.

	Hodiny č. 16	Hodiny č. 17	Hodiny č. 18
F. 1			
F. 2			
F. 3			
F. 4			

Příloha F Technické specifikace 3D skeneru Artec Leo

Tab. 21 *Technické specifikace skeneru Artec Leo.*

Ruční skener Artec Leo
<ul style="list-style-type: none">• přesnost 3D bodu: až 0,1 mm,• 3D rozlišení: až 0,2 mm,• 3D přesnost na vzdálenost: až 0,1 mm + 0,3 mm/m,• hybridní geometrie a sledování textur,• algoritmy zpracování dat založené na geometrii a texturách,• automatické odstranění pozadí,• pracovní vzdálenost 0,35 – 1,2 m,• objem snímací zóny: 160 000 cm³,• textura rozlišení: 2,3 mp a barvy 24 bpp (bits per pixel)• schopnost používat fotografickou texturu-rychlost zachycení (frames per second; počet snímků za sekundu): až 22 fps (3D rekonstrukce pro fúzi v reálném čase),• 3D zdroj světla VCSEL,• 2D zdroj světla bílé pole 12 LED,• výstupní formáty jsou OBJ, STL, PLY, WRL, 3ds Max, Blender
<p>Požadavky na software počítače jsou v případě skeneru Artec Leo pouze na zpracování dat (skenování probíhá bez připojení k počítači) a jedná se o Windows 7, 8, 10 x64.</p> <p>Požadavky na hardwarové vybavení jsou Intel Core i7 nebo i9, 64+ GB RAM, NVIDIA GPU s 8+ GB VRAM, CUDA 6.0+ (Technické specifikace, 2021).</p>

Příloha G Technické specifikace 3D skeneru Artec Space Spider

Tab. 22 *Technické specifikace skeneru Artec Space Spider.*

Ruční skener Artec Space Spider
<ul style="list-style-type: none">• přesnost 3D bodu: až 0,05 mm,• 3D rozlišení: až 0,1 mm,• 3D přesnost na vzdálenost: až 0,5 mm + 0,3 mm/m,• pracovní vzdálenost: 0,2 – 0,3 m,• objem snímací zóny: 160 000 cm³,• rozlišení: 1,3 mp a barvy 24 bpp (bits per pixel),• schopnost používat fotografickou texturu,• rychlost zachycení (frames per second; počet snímků za sekundu) : až 7,5 fps,• 3D zdroj světla modré světlo,• 2D zdroj světla bílé pole 6 LED,• výstupní formáty jsou OBJ, STL, PLY, WRL, 3ds Max, Blender
<p>Požadavky na software počítače jsou v případě skeneru Artec Space Spider Windows 7, 8 nebo 10 x64 a na hardware jsou požadavky na Intel Core i7 nebo i9, 32 GB RAM, GPU s 2 GB RAM (Technické specifikace, 2021).</p>

Příloha H Porovnání specifikací obou 3D skenerů

Tab. 23 *Technické specifikace skenerů Artec Leo a Spider.*

Typ skeneru: <ul style="list-style-type: none">• Spider: ruční skener• Leo: ruční skener
Přesnost: <ul style="list-style-type: none">• Spider: 0,05 mm• Leo: 0,1 mm
Rozlišení: <ul style="list-style-type: none">• Spider: 0,1 mm,• Leo: 0,2 mm,
3D přesnost na vzdálenost až : <ul style="list-style-type: none">• Spider: 0,05 mm + 0,3 mm/m,• Leo: 0,1 mm + 0,3 mm/m,
Možnost užití hybridní geometrie a sledování textur: <ul style="list-style-type: none">• Spider: Ano• Leo: Ano
Algoritmy zpracování dat: <ul style="list-style-type: none">• u obou skenerů založené na geometrii a texturách,
2D zdroj světla: <ul style="list-style-type: none">• Spider: White 6 LED array• Leo: White 12 LED array
3D zdroj světla: <ul style="list-style-type: none">• Spider: Modré Led světlo• Leo: VCSEL (Technické specifikace, 2021)