

Vybrané metody 3D digitalizace aplikované na příkladech hodinových exemplářů Náchodského muzea

Klára Rybenská, Barbora Borůvková

Selected Methods of 3D Digitization Applied on the Examples of Clock from the Náchod Regional Museum Collection

Abstract: *The aim of the article is to present the possibilities of the digitization of 3D objects using both professional and publicly accessible methods. The article also aims to focus on selected tools of 3D digitization and their possible use in the memory institutions, such as museum, libraries and archives.*

Key words: *3D digitization, museum, digital humanities, Trnio, Artec, RTI, Photogrammetry*

Úvod

Současnost přináší nepřehledné možnosti digitalizace a následného uchování nejen listinných ale i trojrozměrných památek. Určitý digitální boom se nevyhnul ani kulturním a paměťovým institucím a umožňuje zpřístupňovat veřejnosti i takové exempláře, jež nejsou z restaurátorského hlediska vhodné k vystavování, či je jejich podoba zachována pouze v dobových pramenech. V tomto ohledu lze zmínit například užívanou metodu 3D modelování, kde na základě historických pramenů lze vytvořit trojrozměrný počítačový model. Prostřednictvím něj můžeme nejen propagovat, ale hlavně zpřístupňovat odborné i široké veřejnosti památky, které již neexistují (anebo byly významně poničeny). Podobných možností užití moderních technologií je skutečně mnoho, stejně tak přístupů k jejich využití.

Můžeme říct, že se ve světě digitalizace kulturního dědictví v současnosti řeší mnoho otázek týkající se nejen dvojrozměrných objektů (knih, spisů, listin a podobných dokumentů), ale hlavně trojrozměrných, jak již bylo dříve napsáno. Všechny tyto památky se dokumentují a archivují nejen tradičními způsoby, ale také skrze pokročilé metody digitalizace pomocí špičkových moderních technologií. Stále častěji

jsou v jisté podobě skloňována „digitální muzea“ podporující nejen možnosti veřejného porozumění kulturnímu dědictví, ale těšící se oblíbenosti hlavně u mladší generace zvyklé trávit svůj čas v digitálním prostředí (Giakalaras, 2020).

V článku se budeme zaměřovat na 3D digitalizaci a využití vybraných technologií, které jsou v současné době k dispozici nejen pro profesionální uživatele. Popíšeme tyto technologie a jejich možnosti uplatnění. V neposlední řadě se zaměříme i na problémy, se kterými se může potenciální digitalizační pracovník v oblasti paměťových institucí setkat.

Objekty, které budou v rámci praktické části převedeny do digitální podoby, jsou hodiny zapůjčené ze sbírky Náchodského muzea. Jejich digitalizace probíhá skrze projekt specifického výzkumu s názvem *3D digitalizace vybraných historických hodin z Náchodského muzea* pod záštitou *Filozofické fakulty Univerzity Hradec Králové*, který zapojuje i studenty. Sbírkových předmětů tohoto druhu je několik desítek. Z této sbírky vzniká taktéž online 3D webová databáze objektů, které si budou moci jednotliví návštěvníci prohlížet. Pro výzkumnou část tohoto článku jsou voleny takové hodiny, které poslouží jako modelové příklady digitalizace s ohledem na svou barvu, strukturu, tvar, velikost

digitalizace

Mgr. Klára Rybenská, Ph.D.

Katedra pomocných věd historických a archivnictví
Filozofická fakulta
Univerzity Hradec Králové
klara.rybenska@uhk.cz

Mgr. Barbora Borůvková

Katedra pomocných věd historických a archivnictví
Filozofická fakulta
Univerzity Hradec Králové
barbora.boruvkova.2@uhk.cz

a podobně. Tyto objekty budou digitalizovány zvolenými metodami, které mohou být za určitých okolností využívány i v paměťových institucích. Způsobů, jak převést fyzický objekt do digitální podoby, je samozřejmě více. Naším cílem je představit takové možnosti, které jsou dle našeho názoru a na základě našich zkušeností po více stránkách efektivní.

Sbírka hodin náchodského muzea

Jak již bylo v úvodu řečeno, digitalizační činnost zahrnovala konkrétní vybrané hodiny ze sbírky Náchodského muzea. Tato digitalizace by měla sloužit nejen jako metoda pro uchování exponátů v digitální podobě, a tudíž i jako jisté preventivní opatření proti poškození, ale zároveň i jako plánovaná součást budoucí výstavy těchto hodin. Výstava by měla probíhat ve dvou částech – fyzická a online. Právě online část by měla být přístupná skrze webovou databázi, a také s odkazem na modely zobrazitelné prostřednictvím QR kódu. Ten bude umístěn u fyzických exponátů. Po načtení tohoto kódu chytrým telefonem či tabletem (s internetovým připojením) by se návštěvník měl dostat na stránku s daným trojrozměrným exponátem. Součástí digitalizace je i částečná (o)úprava modelů, která spočívá v domodelování chybějících částí či opravení částí poškozených. Tyto zásahy budou probíhat na základě znalosti pramenů a pod odborným dohledem správce sbírky. Nicméně součástí tohoto článku není polemika nad modelováním a úpravou jednotlivých trojrozměrných modelů. Zabývat se budeme hlavně první částí, která je dle našeho názoru často nejpodstatnější – samotnou digitalizací, jinak řečeno 3D skenováním a hlavně jeho základním popisem.

Než k této problematice přistoupíme, dovolme si napsat alespoň několik málo slov o samotné sbírce, jejíž část byla převáděna z fyzické podoby do digitální.

Bezmála před sto čtyřiceti lety byly položeny základy sbírky náchodského muzea. Do přírůstkové knihy tehdejšího Městského muzea v Náchodě byly

první hodiny zapsány v roce 1880. Již Šedesát šest hodin a hodinek mělo náchodské muzeum ve své sbírce již v roce 1942. Významný růst kolekce hodin se uskutečnil v 60. a 80. letech 20. století. Do muzea, tehdy již se statusem – okresní –, byly v roce 1967 převedeny sbírky ze zrušeného městského muzea v Červeném Kostelci. V roce 1981 je následovaly sbírky muzejního spolku tentokrát v Novém Městě nad Metují. S Okresním muzeem v Náchodě byla krátce nato sloučena také městská muzea v Polici nad Metují (1987) a Hronově (1989). Dnes se díky tomu může Muzeum Náchodska pochlubit rozsáhlou sbírkou, která čítá 267 hodin, hodinek a hodinových strojů, jež jsou dále rozděleny do sedmi podsbírek (Tůma, 2019). Nyní přibližme některé vybrané exponáty, které jsou součástí sbírek Náchodského muzea.

Mezi nejstarší artefakty celé sbírky patří sluneční hodiny, kde mezi devíti hodinami tohoto typu lze například najít diptychové slonovinové hodiny vyrobené v Norimberku 1613. Nebo prstencové hodiny, které údajně patřily hraběti Františku Antonínovi Šporkovi (1662 až 1738). Přesýpací hodiny jsou zastoupeny ve sbírce pouze dvěma kusy, přičemž jedny z nich pochází z pozůstalosti vévodkyně Kateřiny Vilemíny Zaháňské (1781 až 1839) známé v obecném povědomí jako literární postava paní kněžny z Babičky Boženy Němcové. Nejcennější část sbírky představují kapesní hodiny. Mezi sedmdesáti exempláři jsou v několika kusech zastoupeny také vzácné barokní věténové hodinky z 18. století (vesměs práce známých rakouských a anglických hodinářů). Lze zmínit například zlaté hodinky z poloviny 18. století signované Josefem Lechmaýerem z Vídně či stříbrné hodiny od Daniela Kaddena (od roku 1717 člena londýnského hodinářského společenstva). Nejhojněji zastoupený typ hodin představují hodiny nástěnné. Muzeum jich má ve sbírce sto patnáct. Výhradně mezi nimi převažují různé varianty dřevěných hodin ze Schwarzwaldu. Jejich celou vývojovou řadu – od hodin lihyřových z počátku 18. století až po hodiny

se schottenským strojkem z poloviny 19. století – dokumentuje náhodská sbírka. Obsahuje nicméně také jiné typy závěsných hodin, například celokovové malované hodiny z 18. století, případně hodiny pilové, hodiny zakomponované do obrazů, kuchyňské hodiny nebo pendlovky. Nejvíce přitažlivé se návštěvníkům jeví bohatě zdobené rámové hodiny s hracími strojky z poslední čtvrtiny 19. století (Tůma, 2019; Klikar, 2005).

Celkem šedesáti třemi kusy jsou ve sbírce zastoupeny stolní hodiny a budíky, kde k nejstarším patří barokní skříňkové bicí hodiny z poloviny 18. století. Dále lze zmínit hodiny z inventáře benediktinského kláštera v Polici nad Metují, které vyrobil hodinář Johannes Lukawecy z Brna kolem roku 1753). Taktéž najdeme ve sbírce empírové sloupkové hodiny či hodiny ve stylu druhého rokoka. V neposlední řadě i běžné budíky, často vyrobené v Broumově (Chronotechna, Georg Becker, bratři Junghansové). Ne tak obvyklé jsou záznamové hodiny nočního hlídače z továrny Spiegler a synové v Hronově, stolní kalendářní hodiny Datumatic či bronzové hodiny s teploměrem a aneroidem. Co se týče věžních hodin, ty jsou v muzejní sbírce zastoupeny ve třech exemplářích. K nejstaršímu stroji hodin patří ten z věže kostela ve Velké Jesenici, mladším strojem jsou hodiny z radnice v Polici nad Metují a nejmladší je hodinový stroj z věže hronovské školy (Tůma, 2019).

Ze sbírky, kterou jsme popsali, jsme nicméně digitalizovali pouze vybrané hodiny. Soustředili jsme se na varianty dřevěných nástěnných (závěsných) hodin ze Schwarzwaldu. Dále jsme měli zapůjčené některé kyvadlové hodiny, hodiny závěsné s kukačkou i bez ní. Digitalizovali jsme dále stolní hodiny či budíky, hodiny s barometrem a také jedny kapesní hodiny. Pro výzkum jsme učinili selekci na základě našich znalostí v oblasti digitalizace. V další kapitole se zaměříme na informace o samotném procesu 3D skenování a úskalích, se kterými jsme se při digitalizaci některých objektů setkali.

Pohled na problematiku 3d digitalizace

Vývoj, růst výkonu počítačů či vznik nových moderních technologií má exponenciální křivku. Jednotlivé přístroje se dostávají do různých oblastí lidského života – pomáhají ve zdravotnictví, v lékařství, vědě a dalších odvětvích. Staly se součástí našich domácností, běžným komunikačním prostředkem (Zimmermann, 2017). Oblast historických věd a paměťové instituce nejsou výjimkou. I přesto, že se tomu možná některá místa více či méně cíleně snažila vyhybat, vývoj a s ním přicházející technologie je zřejmě již nezastavitelný.

V současné době je často zmiňován pojem digitalizace ve spojení s institucemi typu knihovny, archivy, památkové ústavy a muzea. Pojem, jenž je spojován kromě herního či filmového průmyslu také s kulturním dědictvím, odkazem památek zděděných po minulých generacích. Ne vždy hmotně uchovaných, někdy již pouze v podobě písemného záznamu, na základě kterého i v tomto případě lze památku oživit v podobě trojrozměrného počítačového modelu (Giakalaras, 2020). Památky stále hmotně existující, kompletní či s chybějícími částmi ale již také podléhají postupnému působení zubu času, a to si často neuvědomují jen odborníci, ale i široká veřejnost (Rybenská, 2020).

Mluvíme-li o digitalizaci, pak se jedná v základu o proces, prostřednictvím kterého se snímá objekt do digitální podoby. A to buď do formy 2D skenu, nebo do 3D digitalizátu (neboli 3D skenu), kterému se budeme věnovat v tomto textu. Samotná prostorová digitalizace je také rozšířena o informace o poloze snímaného objektu, jeho struktuře, rozměrových proporcích a dispozicích. Často opomíjenou informací je vedle prostorové polohy snímaného bodu charakteristika, jakási vlastnost materiálu, který je popisován nejčastěji densitou plochy ve stupních šedi. Je důležité, aby byla digitalizace provedena vždy na nejvyšším stupni, jaké je daný přístroj určený pro digitalizaci, schopen. To z toho důvodu, aby digitalizační pracovník

získal ta nejlepší data. Toto je velmi důležité často u specifických objektů určených k digitalizaci, s jejímiž následnými modely se bude dále pracovat. Samozřejmostí je, že vždy záleží také na úloze vznikajícího skenu. Zvolená digitalizační metoda by měla být ideálně bezkontaktní (aby nedošlo k potenciálnímu poškození objektu) a ověřená. Samotné skenování je proces, kdy skener převede vizuální stránku objektu do podoby binární a virtuální. Poté je výsledkem 3D prostorového skenování obvykle tzv. mračno bodů. Každý z těchto bodů je známý svou polohou vůči skenované pozici (Brejcha a kol., 2015).

Digitalizace má nepopíratelně mnoho výhod, a to jak 2D, tak i právě 3D. Nejedná se zde jen o ochranu památek a zpřístupnění takových děl veřejnosti ačkoli právě tato skutečnost je velice významná. Výhody digitalizace můžeme spatřovat i v oblasti pedagogiky a možnosti využít trojrozměrné objekty jako učební pomůcky v rámci možné motivace k dalšímu studiu historie anebo příbuzných oborů či přímo oborů digitalizace, které se specializují na práci s památkami. V neposlední řadě digitalizované sbírky mohou být poutavým způsobem, jak přitáhnout širokou veřejnost do muzeí či jiných paměťových institucí a více přizpůsobit výstavu současnému „*homo digitalis*“ (Barbuti a kol., 2020).

K tvorbě 3D objektů je možné v podstatě dojít dvěma způsoby. Buď můžeme objekt vymodelovat (na základě dochovaných pramenů, technických výkresů, plánů, fotografií anebo po konzultaci s odborníkem), nebo přichází na řadu právě digitalizace čili v tomto případě 3D skenování. Zde se nejčastěji využívají 3D skenery, měřicí stroje nebo různé metody fotogrammetrie či RTI (*Reflectance Transformation Imaging*), a to vždy v závislosti na digitalizovaném objektu, dostupných zařízeních, finančních možnostech a znalostech či schopnostech digitalizačního pracoviště (Giakalaras, 2020).

Pokud bychom měli mluvit o 3D skeneru, pak se jedná o zařízení umožňující analýzu objektu nebo prostředí reálného času pomocí shromažďování údajů o tvaru a vzhledu (případně i barvě; v tom

případě mluvíme o tom, že je skener schopný zachytit i texturu). Údaje takto získané mohou být použity k sestavení digitálních trojrozměrných objektů (Giakalaras, 2020).

Skenerů, které umožňují zachytit trojrozměrný objekt, je velmi mnoho druhů. Jmenujme například skenery optické, laserové, kontaktní či bezkontaktní. Dále můžeme zmínit skenery se strukturovaným světlem nebo modrým světlem GOM (což je více měřicí zařízení než skener). Teoreticky sem můžeme zařadit i počítačovou tomografii, různé senzory jako jsou například LiDAR jeho předchůdce ToF senzor a mnohé další. Krom jiného bychom v tomto případě taktéž mohli (a později i více budeme) mluvit o možnosti digitalizace skrze moderní *smart* zařízení (smartphony, tablety) za užití specifických programů určených ke skenování trojrozměrných objektů. K těmto programům patří například Qlone (pro operační systémy Android (Google), iPadOS a iOS (Apple) nebo Trnio (pro operační systémy iPad OS a iOS). Zmíněné programy jsou ale závislé nejen na operačním systému daného zařízení (například Trnio pracuje pouze na zařízeních od společnosti Apple), ale i na vhodném hardware (čím kvalitnější zařízení, tím lepší výsledky lze obvykle očekávat).

Závěrem ještě nezapomeňme i na již dříve zmíněné metody fotogrammetrie a RTI, kde se nejedná o 3D skenování jako takové. Skrze fotogrammetrii lze dosáhnout trojrozměrného objektu, a to díky výpočtu umístění bodu v trojrozměrném prostoru za použití fotografií, které jsou pořizovány z více úhlů (Zuza, 2018).

Metoda RTI je pak častěji využívána k digitalizaci všude tam, kde 3D skenování či fotogrammetrie selže (příliš drobný objekt s velice členitým povrchem, například mince, malá pečeť, šperk, hieroglyfické písmo na stěnách...), ale přesto je třeba daný objekt digitalizovat. Tato metoda využívá sekvenci digitálních fotografií objektu, ze kterých lze posléze syntetizovat matematický model povrchu snímaného předmětu (Plzák, 2016).



Obrázek 1 Francouzské stolní hodiny v historizujícím slohu (vlevo) z poloviny 19. století mají poměrně bohaté zdobení a chybějící nožičku. Stolní historizující hodiny (vpravo) z konce 18. století – 3. čtvrtiny 19. století. Oboje hodiny mají pro skener velmi komplikované zdobení, navíc levé hodiny jsou tmavé a lesknoucí se, hodiny vpravo jsou příliš světlé a lesknoucí se. Podobné objekty bývají často velkou výzvou pro digitalizaci běžným 3D skenerem.

Metody 3d digitalizace užité na příkladech vybraných exponátů

Než přistoupíme k popisu metod digitalizace, které jsme využívali pro skenování vybraných objektů, popíšeme v základu právě dané objekty, se kterými jsme pracovali a vytvářeli jejich skeny a modely. Jednalo se, jak bylo již zmíněno dříve, o historické kousky hodin. V tomto případě jsme měli k dispozici hodiny různých velikostí (od výšky cca 15 cm po cca 100 cm). Digitalizovali jsme hodiny nástěnné i stolní, se závěsným mechanismem (často v podobě šišek), s nezakrytým ciferníkem i s proskleným krytem chránícím ciferník. Hodiny různých materiálů od dřeva, porcelánu až po kov a různé slitiny. V tomto ohledu byly objekty příliš světlé a lesklé nebo naopak tmavé. Hodiny uzavřené, i ty s různými průřezy (nejčastěji s možností sledovat hodinový strojek). Dále samozřejmě jak matné hodiny, tak i lesklé, hodiny, které měly velice sofistikované zdobení nebo zcela hladké stěny. Takové, které měly vlivem stárí a poškození různé pohyblivé části (doslova zůstávaly v rukou).

Jak již bylo dříve napsáno, v oblasti 3D digitalizace je mnoho cest, po kterých lze kráčet a na jejich konci získat 3D sken a posléze model. Ovšem ne každá z těchto

možností je využitelná v daném případě. Použité metody a techniky 3D digitalizace v oblasti kulturního dědictví souvisí s konkrétními potřebami toho kterého objektu a té které instituce.

V naší technologické laboratoři disponujeme různými zařízeními, která jsou určena ke 3D digitalizaci či měření. Jedná se hlavně o optické bezkontaktní skenery. Není cílem tohoto článku popisovat všechna zařízení, s jakými pracujeme, zmíníme proto jen ta zařízení, která se nám v oblasti digitalizace naší sbírky nejvíce osvědčila a z jakého důvodu. Pro lepší přehlednost rozdělíme základní popisy zařízení do tabulky 1 a poté budou následovat informace o tom, z jakých důvodů jsme s těmito zařízeními pracovali.

Zařízení uvedená v tabulce 1 byla využita pro digitalizaci hodin. Samozřejmě ne každé zařízení bylo schopno digitalizovat veškeré exponáty. Navíc digitalizaci skrze smartphone a Trnio nelze považovat v současnosti ještě za nejlepší řešení pro modely, které by měly být později archivované. Na druhou stránku i přes to, že se jedná o pouhý telefon s doinstalovaným software, digitalizuje překvapivě dobře.

Právě Trnio je jednou z volně dostupných metod digitalizace objektů. Jedná

1 ARKit je v podstatě druh frameworku, který vývojářům umožňuje pracovat s reálným světem kolem nás. Jeho největší výhodou je skutečnost, že tento framework nepotřebuje žádný speciální hardware. Často je využíván hlavně pro práci s rozšířenou realitou (Apple Developer, 2021).

2 U nejmenší velikosti objektu 5 mm uváděné výrobcem jsme skeptičtí. Například minci s průměrem cca 15–20 mm sice zachytí, ale nezdigitalizuje dobře a čitelně písmo či kresbu. Pro drobné objekty výrobce doporučuje využívat skener Artec Micro (Artec 3D Europe, 2021). Též nutno dodat, že objekty, které jsou větší než 200–250 mm se pomocí tohoto skeneru digitalizují problematictěji. Řešením je možnost digitalizovat je po částech či využít kombinaci skenerů a jiných metod (např. fotogrammetrie).

3 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) je druh laserové diody. Světlo je zde vyzářováno kolmo k úrovni polovodičového čipu. Jedná se o laser, který emituje světelné paprsky kolmo na objekt. S těmito technologiemi se můžeme setkat například i u zařízení typu LiDAR (Paolo, 2019).

4 V tomto případě se jedná o vlastní zařízení spoluautorky článku. Naše pracoviště ale disponuje iPadem PRO 2020, který pracuje v podstatě takřka shodně s iPhone. Cílem bylo poukázat, že digitalizovat v současnosti lze i podobným zařízením, které může mít pracovník stále u sebe. Samozřejmě se nejedná o zařízení profesionální a k 3D skenování určené.

5 Jedná se o metodu dálkového měření na základě výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku, který se odrazí od snímaného objektu. Nejčastěji je tento senzor využíván všude tam, kde je potřeba měřit vzdálenosti, mapovat terén, případně měřit atmosférické jevy a podobně. Výsledkem takového mapování je mračno bodů, které lze po zpracování interpolovat do podoby digitálního modelu povrchu nebo 3D modelů budov či jiných takto „naskenovaných“ objektů (Bhupendra, 2021).

Tabulka 1 Vybraná zařízení našeho pracoviště, která jsme využili k digitalizaci.

Název zařízení (výrobce)	Technologie skenování	Základní popis
Artec Space Spider (Artec)	Princip digitalizace skrze strukturované modré světlo.	Velikost digitalizovaného objektu může začínat na 5 mm ² , bez uvedené největší možné velikosti u výrobce (Artec 3D Europe, 2021). Snímá texturu.
Artec Leo (Artec)	Digitalizace probíhá skrze využití metody strukturovaného světla VCSEL ³ .	Skener umožňuje digitalizovat hlavně větší objekty (i v terénu díky externí baterii a vlastnímu displeji). Minimální rozměry pro digitalizovaný objekt 214 x 148 mm (Artec 3D Europe, 2021).
iPhone 12 PRO ⁴ (Apple)	Digitalizace zde může být uskutečněna díky senzoru LiDAR (Light Detection And Ranging ⁵).	Smartphone od společnosti Apple není ze své podstaty 3D skener ani měřicí zařízení. S příslušným software (Trnio v tomto případě) jej lze ale díky tomu, že disponuje senzorem, pomocí kterého umožňuje dálkové měření vzdálenosti, využít jako 3D skener.

se o mobilní aplikaci vyvinutou v USA. Software je kompatibilní pouze pro operační systémy iOS a iPadOS (Apple) a jeho základní verze je zdarma.

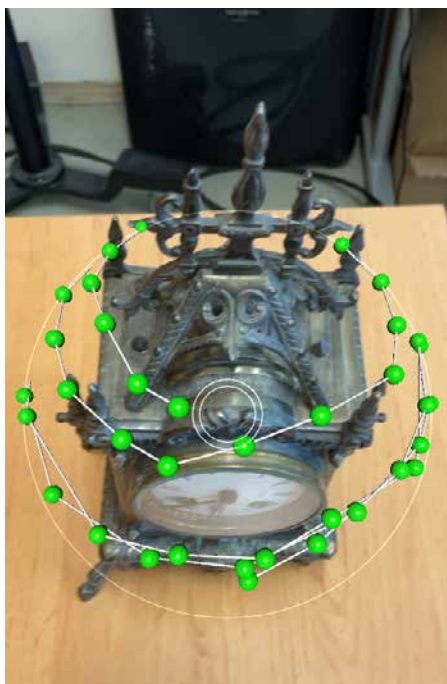
Digitalizace objektů funguje na způsobu fotogrammetrie, tedy skládáním snímků, ze kterých je nadále vytvořen výsledný 3D sken. Aplikace využívá dostupné technologie, kterými využíváný nástroj (v našem případě iPhone 12 PRO) zrovna disponuje. Jedná se ARKit¹ a LiDAR. Kombinací těchto dvou technologií je umožněno dosažení vysoké kvality 3D skenu ve velmi krátkém čase (Chambers, 2021).

Uživatel může volit ze dvou módů snímání objektu:

- **Object mode**, který pořizuje snímky během plynulého obcházení skenovaného objektu. Objekt je nutné fyzicky obejít, nikoli otáčet podstavou či objektem samotným.

- **ARKit mode** je vhodný převážně pro vyšší řady zařízení s iOS či iPadOS, protože využívá hlavně technologii LiDAR, díky níž je aplikace schopna nejen změřit vzdálenost zařízení od objektu (Chambers, 2021). Objekt je opět nutné obejít.

Po ukončení snímání jsou data odeslána na externí server, kde probíhá tvorba výsledného modelu. Tento proces může zabrat až 45 minut. Finální model lze zobrazit přímo v aplikaci a je možné jej exportovat do formátu .obj (běžně využívaný formát k uchování či prezentaci 3D modelu, obsahující informace o textuře) či uložit na Skechfab (online webová databáze umožňující zdarma či za poplatek nahrávat/stahovat/sdílet 3D modely a prohlížet je tak na internetu; Sketchfab, 2021). Základní verze Trnia neumožňuje v aplikaci model jakkoli upravovat, přestože



úpravám modelu se lze málokdy vyhnout. Ideální je tak stáhnout přímo .obj formát a dále pracovat na úpravách v příslušném 3D editoru (například Blender, 3D Max, AutoCAD a jiné).

Jaké jsou potenciální výhody skenování prostřednictvím aplikací? V první řadě to je cena (tedy pokud již vlastníme dané zařízení, iPhone či iPad, které jsou ale i tak mnohdy levnější než profesionální skener). Na trhu je řada aplikací, které jsou zcela zdarma anebo jejich základní verze zdarma bývá. Profesionální špičkové skenery se mohou vyšplhat až do řádů milionu korun, s čímž souvisí také jejich dostupnost. Mobilní aplikace jsou dostupné na většině chytrých mobilních zařízení (tedy i na OS Android) a práce s nimi nebývá náročná. Výsledek je poté poměrně rychle k dispozici.

Rovněž aplikace nesou několik záporů. Většina z nich je vhodná převážně na malé a střední objekty, protože základní verze obvykle nabízí omezenou velikost skenu. Výsledný model je taktéž nutné upravit v dalším programu, který nemusí být tak intuitivní jako aplikace.

Naše práce ale nespočívá výhradně v digitalizaci mobilním zařízením, ačkoli její využití může být zajímavým zpestřením a též lze najít objekt, který bude i skrze mobilní telefon s příslušnou aplikací zdigitalizován více než důstojně. V naší digitální laboratoři disponujeme více profesionálními zařízeními, z nichž dva skenery, uvedené v tabulce 1, tedy Artec Space Spider

a Artec Leo, slouží našim potřebám nejlépe. Z hlavní části proto, že se jedná o zařízení profesionální a přímo k digitalizaci určená. Také z důvodu, že samotný proces 3D skenování a následná úprava digitálního je alespoň v základu velmi uživatelsky nenáročná a poskytuje velice profesionální výsledky. Samozřejmě i při této digitalizaci se často neobejdeme bez dalšího zásahu do 3D modelu, který získáme v základní podobě. Často musíme řešit domodelování částí, které skener nedovedl zachytit (například pohyblivé části, kyvadla, závěsný systém, lesklé části, jako je například zasklený ciferník a podobně). Mnohdy je přímo žádoucí domodelovat i místa zcela chybějící, pokud to například i správce sbírky doporučí (například chybějící kousek, který odpadl léta před tím; poničená část nebo nějak zdeformovaná a podobně). Toto domodelování je samozřejmě práce, která může zabrat mnoho hodin. Tedy i přes to, že samotný sken je hned ze začátku bez nějakých významných vad a navzdory tomu, že jej mnohdy musíme komponovat dohromady po částech (pokud digitalizujeme objekt i se spodkem anebo složitější objekt skládáme z dat ze dvou či více skenerů). Zabere to tak desítky minut nebo i hodiny. Výsledná práce i s domodelováním a finalizací 3D modelu není otázkou chvilky, ale mnohých hodin někdy i dnů (v závislosti na komplikovanosti objektu a podobně).

Zmiňme ještě částečně problematiku autentičnosti modelu a způsobu, jakými je

Obrázek 2 Ukázka digitalizace pomocí softwaru Trnio na iPhone. Vlevo Object mode, uprostřed ARKit mode, vpravo hotový 3D model. Jak je vidět na obrázku, výsledný 3D model má mnoho nedostatků, které by bylo nutné opravit v počítači po vygenerování a stažení souboru ve formátu .obj. I přes to se ale domníváme, že na to, že k digitalizaci došlo skrze smartphone, nepatří 3D model mezi nejhorší výsledky.

možné domodelované části odlišit od reálných segmentů objektu. I pokud domodelujeme součásti, které se nenaskenovaly, přesně podle předlohy (anebo v případě, že modelujeme chybějící části na základě informací správce sbírky či dobových pramenů), je nutné brát v potaz, že se nebude jednat o reálný objekt. Tím nakonec není ani samotný 3D model. Je tedy vhodné domodelované (na objekt původně nepatřící) části například barevně označit a držet se tzv. restaurátorských zásad. Toto snažení můžeme přirovnat k demontáži neboli snaze o návrat původní podoby předmětu pomocí lepení či dotvoření nové části. Ta je prováděna takovým způsobem, aby bylo jasné a zřetelně na první pohled odlišitelné, která část je originální a která už nikoliv. Doplněné nové části předmětu jsou obvykle tvořeny ze stejných materiálů a postupy, jenž vychází z dobových pramenů (Pecenová, 2015). Což v programu pro 3D modelování lze dodržet minimálně, avšak tvar a podobu je možné na základě znalostí zachovat.

Výše zmíněné barevné značení někdy může u trojrozměrných počítačových modelů narušovat celkový vzhled objektu. Nabízí se myšlenka prezentovat data dvojího charakteru. Taková, jak vypadají nyní ve skutečnosti, a taková, jak je pracovníci upravili v programu pro zpracování 3D objektů.

Průběh 3d digitalizace

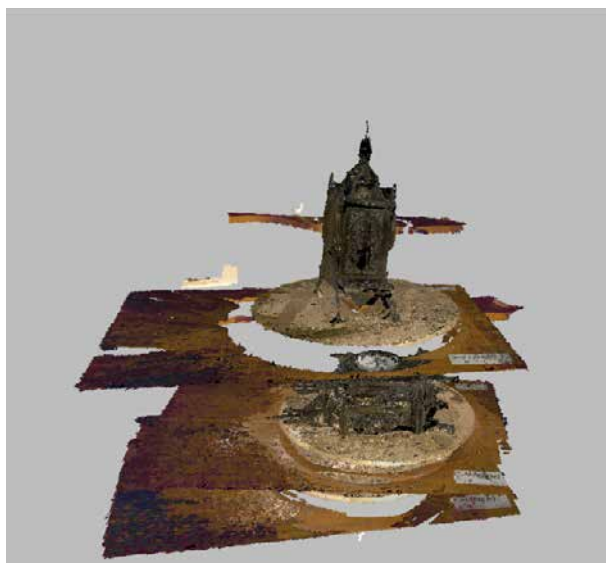
Jak tedy samotná 3D digitalizace probíhá? I přes to, že známe práci s našimi skenery a digitalizace je pro nás již celkem rutinní záležitostí, nebo možná právě proto, první krok, který děláme je, že si prohlédneme sbírku a vyřadíme ty exponáty, které digitalizovat nebudeme. Často nedigitalizujeme takové objekty, na které jednoduše nemáme prostředky. V současnosti jsou to velmi drobné objekty. I když digitalizace i našimi skenery je v nějaké podobě možná, pro potřeby archivace anebo dalšího bádání, aby byl daný objekt skutečně ostrý a skener zachytil všechny detaily i s texturou, u menších objektů, než

je cca 100 mm, se nám zatím nabízí k dispozici řešení pouze skrze fotogrammetrii. A ani ta ne vždy dovede zachytit všechny potřebné části objektu.

Dále si exponáty rozřadíme podle velikosti, materiálu a jeho vlastností s čímž jdou ruku v ruce místy se vyskytující problémy s digitalizací. Pokud je totiž objekt až příliš tmavý (např. černý), je lesklý či dokonce průhledný anebo naopak zcela bílý, perforovaný třeba díky složitému zdobení anebo obnaženému hodinovému strojku (případně kombinace zmíněného), může mít skener problém zachytit některé části, protože se od nich špatně odráží světlo anebo se neodráží vůbec (sklo). I přes snahu skeneru postřehnout objekt co nejméně, vznikají posléze různé deformace na modelu. V závislosti na tom, jak moc rozsáhlé změny na modelu jsou, je pak třeba zvážit nutnost znovu naskenovat objekt (například jiným zařízením či metodou) nebo jej přímo domodelovat.

Některé části hodin takto není ani žádoucí digitalizovat. Například řetízek, na kterém mohou viset šišky či jiná závaží. Řetízek lze slušně naskenovat v minimu případů a mnohem lepší je počítat s případným domodelováním v některém ze specifických programů pro to určeném (například Blender).

Samotnou digitalizaci jsme tedy prováděli předně 3D skenery od společnosti Artec. Menší hodiny, případně komplikovaně vyvedené zdobené na hodinách jsme digitalizovali skrze 3D skener Artec Space Spider (dále jen Spider). Větší exponáty jsme digitalizovali skenerem Artec Leo (dále jen Leo). Data z obou těchto skenerů je možné kombinovat, ale neobejde se to bez dobré znalosti software Artec Studio (u nás ve verzi 15) případně dalších programů specializujících se na 3D modelování a práci s formáty .obj. Nepopíratelnou výhodou obou těchto zařízení je digitalizace a jakási tvorba digitalizátu v reálném čase. V podstatě v průběhu skenování se buď na malém digitálním displeji (Leo), anebo na monitoru (Spider) tvoří objekt a digitalizační pracovník může vidět, které části je potřeba znovu naskenovat anebo jen doplnit.



Software Artec Studio je velice intuitivní a navede uživatele krok za krokem až k vytvoření finálního modelu. Ovšem i přes tyto pozitivní zprávy je občas nutné počítat i s problémy. Příkladně musí uživatel umět se softwarem natolik dobře pracovat, aby byl schopný skládat dohromady objekt z jeho jednotlivých částí sám. To se hodí hlavně v případě, když digitalizujeme opravdu celý exponát, tedy i se spodní částí, na které je položen. V tomto ohledu vzniknou dva projekty, ze kterých je nutné udělat jeden model. Dále je potřeba umět pracovat s nástroji k ořezu plochy nebo částí skenu, aby bylo možné jej zčistit. Také nástroji k vyhlazení a základní úpravě povrchu.

Po zapojení Spideru k počítači a zapnutí Artec Studia zbývá již jen digitalizovat. Z vlastní zkušenosti doporučujeme k tomuto počínání pořídit ještě otočnou podstavu (nám se osvědčil zcela běžný dřevěný otočný stojan například na dort). Po skončení digitalizace je možné spojovat objekty buď manuálně (to je zpravidla nutné v případě, že máme více projektů), anebo lze zapnout automatické spojování (ne vždy bývá zcela v pořádku výsledný model, hlavně když nemáme připojenou spodní část objektu, vytváří se místo ní již dříve zmíněná vyduťá spodní část, kterou je poté nutné smazat, takto vzniklý otvor zaplnit a znovu nechat automaticky

polepit texturou). Výsledný model je možné poté uložit v nativním formátu Artec Studio (pro další možnou práci, tedy .SPROJ) anebo ve standardních formátech určených pro uchování, zpracování v jiných 3D grafických programech anebo pro tisk (jmenujme již zmiňovaný .obj formát, který je schopný uchovávat texturu, či například .stl formát, který primárně slouží pro 3D tisk a je bez textury).

S Leem se pracuje takřka stejně s tím rozdílem, že vzhledem k tomu, že disponuje externí baterií a integrovaným displejem, není nutné jej připojovat k počítači dříve, než je třeba přetáhnout data do programu Artec Studio v počítači. Získání dat ze skeneru je možné buď prostřednictvím paměťové karty, nebo skrze síťový kabel s koncovkou RJ-45 a nechat pomocí programu Artec Studio skener Leo najít a vybraná data importovat. Poté je s daty práce podobná, jako u jakékoliv jiné úpravy skenu získaných ze Spideru.

Způsoby řešení 3d digitalizace problematických exponátů

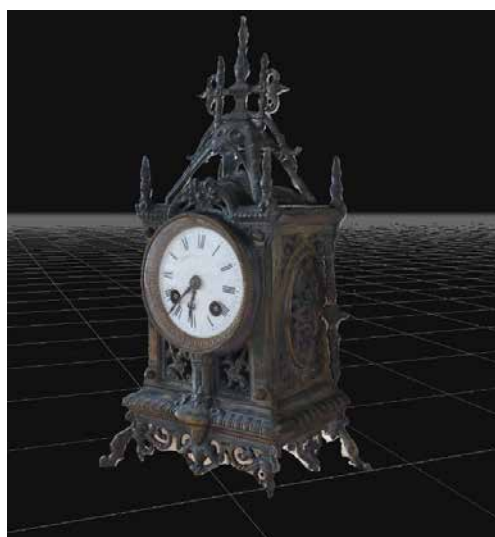
Při digitalizaci jsme se, jak bylo již napsáno dříve, setkali s mnohými překážkami. Jaké možnosti řešení těchto problémů se nabízí? Předně znovu zmiňme, o jaké záležitosti se v našem případě jednalo.

Obrázek 3 Vlevo hodiny v procesu skenování v programu Artec Studio 15. Uprostřed model bez textury, vpravo s texturou. Jedná se o již dříve na obrázku zmíněné francouzské stolní hodiny v historizujícím slohu. I přes to, že kvalitní textura dovede mnohdy zamaskovat dost nedostatků, neplatí to v tomto případě. Krom na první pohled patrné bubliny, kterou program automaticky přidal do spodní části hodin, neboť nedošlo k digitalizaci spodka (bublina lze samozřejmě smazat), je jasně patrné špatné provedení ciferníku. Zde nedošlo ke správné digitalizaci vlivem skla zakrývající ciferník, od kterého se odrážely paprsky světla. Hodiny bude nutné buď znovu naskenovat, vyzkoušet jinou metodu digitalizace nebo domodelovat.

V první řadě je to velikost digitalizovaného objektu. Pakliže digitalizační pracoviště nedisponuje skenerem pro digitalizaci příliš malého předmětu, nabízí se zde vyzkoušet metodu fotogrammetrie. Tu lze využít teoreticky i v případě, že daný objekt má průřezy a je například vidět dovnitř na hodinový strojek. Ten je skoro nemožné zachytit skenerem tak dobře, aby byl strojek skutečně precizně vyveden a daly si rozpoznat jednotlivé části a ozubená kolečka. V tomto případě je možné strojek vyndat a naskenovat jej zvlášť. To ale mnohdy historické exponáty neumožňují (nehledě na skutečnost, že digitalizační pracovník obvykle nedisponuje znalostmi hodinářskými). Navíc by bylo nutné strojek poté v počítači umístit zpět do hodin, což může být v určité chvíli komplikované. V tomto ohledu se nabízí možnost strojek vymodelovat, což sebou nese ale mnoho dalších hodin práce a nutnost disponovat znalostmi takovými, aby daný digitalizační pracovník uměl modelovat v některém ze programů pro 3D modelování. Existuje i možnost udělat 3D model a umístit na něj fotografii (texturu). Zde je ale riziko, že výsledný 3D model nemusí vypadat tolik reálně.

Na řadu tedy může přijít již zmíněná metoda fotogrammetrie.

Fotogrammetrie, která zde již byla zmíněna, je možností, jak digitalizovat nejen menší, ale mnohdy i veliké a rozsáhlé objekty (například sochy, kříže či dokonce boží muka, kam se často díky okolí, ve kterém jsou umístěna, pracovník se skenerem dostává pouze těžko). Fotogrammetrie, někdy známá také pod zkratkou SFM (*Structure From Motion*) je proces umožňující vypočítat umístění bodů v trojrozměrném prostoru. Dochází k tomu skrze využití fotografií objektu zachycených z více úhlů prostřednictvím fotoaparátu nebo smartphonu. Nám se v tomto ohledu osvědčil i dron, a to při digitalizaci větších objektů v krajině, jako jsou například kříže, sochy či boží muka. V případě užití této metody fotografujeme objekt ze všech úhlů tak, aby se fotografie částečně překrývaly (je rovněž velice důležité, aby se okolí digitalizovaného objektu pokud možno neměnilo). Platí, že čím více fotografií pořídíme, tím lépe. Ovšem minimální počet snímků pro vznik modelu je kolem 20–30 snímků. Takto pořízené obrázky nahrajeme do specifického software, který hledá společné prvky na všech



Obrázek 4 Již dobře známé francouzské stolní hodiny v historizujícím slohu (vlevo i vpravo). Tento model byl vytvořen pomocí metody fotogrammetrie (fotografie Dvořáková, 2021). Kvalita je srovnatelná se 3D skenováním. Snad jen s tím rozdílem, že model obsahuje kvalitně vyfocené ciferník, přestože se nachází za sklem. Na druhou stranu i zde je nutné pamatovat na zásah v 3D programu a promazat přebývající texturu ve spodní části hodin.

fotografiích (snaží se vypočítat, z jakého úhlu byl předmět vyfotografován), a tak nám umožňuje automaticky vytvořit 3D objekt (Zuza, 2018). K podobným programům patří například Colmap, Zephyr či Agisoft Photoscan (jedná se o neplacené i placené programy v závislosti na druhu programu či užitých službách a existuje jich samozřejmě mnohem více). V ideálním případě získáme bezchybný trojrozměrný model, který lze importovat do formátů .obj či .stl a dalších. Ovšem ani zde se často neobejdeme bez alespoň základní opravy daného modelu.

Pokud máme k dispozici skenery určené k digitalizaci menších objektů, ale je nutné digitalizovat větší exponát, lze jej digitalizovat po částech a ty poté v konkrétním programu složit dohromady v jeden celek. Některé skenery anebo měřicí stroje (například takto pracuje Leo či měřicí stroj GOM ATOS 2M) dokážou seskupovat jednotlivé části dohromady již v procesu digitalizace. Samozřejmě je takřka vždy třeba sken upravit. Pak se opět jako v předchozím případě nabízí metoda fotogrammetrie.

Exponáty, které digitalizujeme, mohou být často lesklé. K utlumení odlesků objektu lze dosáhnout speciálním sprejem určeným pro zmatnění povrchu, jmenovat lze například sprej AESUB Blue spray (podobných značek je na trhu mnoho). Nespornou výhodou některých těchto sprejů může být skutečnost, že obsahují zmatňující látku cyklohexan. Matný povrch se za několik málo okamžiků vypaří a samotná látka by neměla působit škodlivě na povrch digitalizovaného objektu. Obdobné spreje se liší cenou, dostupností i kvalitou.

Pokud je exponát lesklý a k tomu ještě tmavý, v současnosti existují skenery, které dovedou pracovat i s takovými povrchy (například od společnosti Artec, skener Eva (Artec 3D, 2021)). V každém případě je dobré myslet na dobré nasvícení objektu. V tomto ohledu, a i v případě perforovaných exponátů nebo takových, které mají příliš složitě vyvedené zdobení, je možné zvážit i kombinaci modelu a fotografie či fotogrammetrie. Tyto metody lze mezi sebou kombinovat, vždy je ale třeba mít

k tomu příslušný software, výkonný hardware, znalého digitalizačního pracovníka a v neposlední řadě mít na paměti, že tato cesta může zabrat poměrně dost času.

Na závěr kapitoly napíšeme několik slov o metodě RTI, která byla také již dříve zmíněna. Metoda RTI neboli *Reflectance Transformation Imaging* by měla být způsobilá zobrazení i špatně viditelných detailů na fotografiích. Využívá sekvenci statických digitálních fotografií objektu z konstantní polohy fotoaparátu. Každá z fotografií je osvětlena z jiného úhlu a z této snímkové sekvence je poté syntetizován matematický model povrchu snímkovaného objektu (Plizák, 2016; Břejcha a kol., 2015). RTI metoda je využívána tam, kde klasická 3D digitalizace anebo fotogrammetrie selže. Často tedy u velice jemných, drobných objektů (například mince) s bohatým či komplikovaně vyvedeným zdobením (například šperky). Případně u objektů velice členitých, kde je potřeba sledovat každou jednotlivou část (například pečeti, nápisy). K využití této metody je vhodné mít k dispozici opravdu kvalitní digitální zrcadlovku a sérii světel či rovnou specifickou konstrukci ve tvaru kopule. Ta zajišťuje perfektní nasvícení ze všech stran a možnost pořízení špičkových a ostrých snímků.

Závěr

Žijeme v době masivního rozmachu počítačů, internetu a různých technologií. Modernizace je fenoménem. Nezaměnitelným trendem současnosti jsou nejen v herním a filmovém průmyslu 3D technologie. Tak zvaná 3D digitalizace a následná dokumentace těchto vzniklých trojrozměrných, ale přitom zcela binárních a virtuálních objektů kulturního dědictví, již poměrně obstojně hýbe světem archivářů, muzejníků, historiků, archeologů i jiných badatelů. Vznikají nová odvětví, obory a společnosti, které se v této problematice pohybují a na tyto záležitosti orientují.

3D digitalizace je náročný proces využívající moderních technologií a specifických znalostí odborníků. Díky skloubení techniky a humanitních věd začínají po světě

vznikat různé obory a vědní disciplíny zabývající se specifickým, jakým jsou digitální historické vědy anebo častěji se v angličtině objevujícím *Digital Humanities*.

Nástroje určené ke 3D digitalizaci umožňují pořizovat 3D skeny v různé kvalitě. Odborník, věnující se této problematice, se málokdy obejde bez kombinace rozličných přístupů a metod, které mohou sloužit k pořízení vhodného modelu určeného k archivaci, propagaci anebo dokonce edukaci.

Naším záměrem bylo seznámit čtenáře s vybranými možnostmi 3D digitalizace, kterých je velké množství. My jsme se zabývali jen několika z nich. Cílem bylo poukázat na jejich možné využití a potenciální klady, ale i zápory. Ukázat metody, jak dosáhnout v současnosti ceněných a populárních trojrozměrných objektů historických památek.

V textu jsme naznačili, že proces digitalizace nemusí být vždy zcela určen profesionálním laboratořím. Vždy záleží na tom, k jakým účelům by měl být výsledný 3D model použitý, a podle toho je možné určit, jakou technologii je třeba využít. K digitalizaci tak lze použít třeba chytrý telefon s některým ze softwarů, kterých je na současném trhu skutečně mnoho. Popsali jsme základní problematiku a také možné nepříjemnosti s jakými se lze v oblasti 3D skenování setkat. Nastínili jsme, jak se s podobnými komplikacemi vypořádat. Nejčastější řešení digitalizace složitějšího objektu spočívá v kombinaci digitalizačních metod, získaných mračen bodů z více zdrojů (tedy například data pořízená 3D skenerem, fotogrammetrií a vlastní modelací, k čemuž se uchylujeme takřka pokaždé, když je objekt příliš členitý či jinak komplikovaný).

Celý projekt je realizován dlouhodobě (již druhým rokem), a to vzhledem k poměrně vysoké vytíženosti našeho digitalizačního pracoviště a týmu (a také takřka dva roky trvající pandemii covid-19). Nicméně můžeme usoudit, že digitalizace, úprava 3D modelů a tvorba webové databáze, pokud by dané pracoviště mělo za úkol věnovat se pouze těmto a žádným jiným povinnostem, by mohla (dle zručnosti

jedinice či počtu jednotlivců) trvat pravděpodobně 1–2 měsíce.

Dle našich zkušeností je rozhodující nepodceňovat přípravu, mít přehled o digitalizované sbírce a na základě toho zvolit vhodné metody. Připravit se na nutnost domodelování chybějících částí či dalších úprav digitalizátu. Ať již využíváme špičkový 3D skener anebo fotogrammetrii, prozatím nejsou technologie tak vyspělé, abychom získali skutečnosti ve všech směrech odpovídající model jen například díky 3D skenování. Bez dalších (často hodin) práce na každém modelu anebo nutnosti znovu digitalizovat objekty se projekt tohoto druhu obvykle neobejde.

Svět počítačů, techniky, skenerů, digitalizace, zkrátka moderních technologií se bude i nadále vyvíjet. Nejde jen o to, že 3D skenování je stále poměrně mladé odvětví, jedná se i o celkový vývoj. Digitalizační pracovník musí stále sledovat trendy a způsoby, jak by mohl vylepšit a zefektivnit svojí práci. Můžeme se těšit, že budeme brzy součástí velkých online bází dat, které budou obsahovat mnoho objektů, a přiblíží tak historii více současným trendům a digitální populaci. Bez naší pomoci se to ale neobejde.

Prameny a literatura

Artec 3D Scanners, USA: Artec 3D Europe, 2021. URL: <https://www.artec3d.com>

Artec Eva: Fast 3D scanner for professionals. Artec 3D [online]. Europe: Artec Europe, 2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: <https://1url.cz/nKGqX>

BARBUTI, N., G. DEFELICE, A. DIZANNI, P. RUSSO a A. VALENTINI. Creating Digital Culture by co-creation of Digital Cultural Heritage: the Crowddreaming living lab method, *Um. Dig.*, 2020. Vol. 9, pp. 19-34.

BHUPENDRA, Sharma. What is LiDAR technology and how does it work? *Geospatial World* [online]. India: Geospatial media and communication, 2021 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-lidar-technology-and-how-does-it-work/>

- BREJCHA, Marcel, Vladimír BRŮNA, Zdeněk MAREK a Bára VĚTROVSKÁ. *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek: certifikovaná metodika*. Ústí nad Labem: Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem, 2015. Odborné a metodické publikace (Národní památkový ústav). ISBN 978-80-85036-61-9.
- DI PAOLO, E. M. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers for 3D Depth Detection. Ednasia [online]. USA: Aspencore: EDN: Asia, 2019 [cit. 2021-8-23]. Dostupné z: <https://www.ednasia.com/vertical-cavity-surface-emitting-lasers-for-3d-depth-detection/>
- DVOŘÁKOVÁ, Beata. Fotogrammetrické snímky: Vlastní sbírka. 2021. Framework: ARKit. Apple Developer [online]. USA: Apple, 2021 [cit. 2021-8-23]. Dostupné z: <https://developer.apple.com/documentation/arkit>
- GIAKALARAS, M. *3D Technologies for Cultural Heritage: Gaming Engines*. Lesvos 81100 Greece. Department of Cultural Technology and Communication, University of Aegean, 2020.
- CHAMBERS, Jerome. *All You Need Is a Smartphone: BEST 3D SCANNER APPS (ANDROID, IPHONE & IPAD)*. All3DP [online]. 2021, 23. 4. 2021 [cit. 2021-8-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/5-best-3d-scanner-apps-for-your-smartphone/>
- KLIKAR, Miloš. *Hodiny ze Schwarzwald*. Praha, 2005. str. 32-37, 44-47, 70-81.
- PECENOVÁ, Zuzana. Základní principy konzervování a restaurování. MUNI [online]. Česká Republika: MUNI Brno, VŠCHT Praha, 2015 [cit. 2021-9-26]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1421/podzim2015/AEA_07/um/61438642/manual_zaklady_konzervace.pdf
- PLZÁK, Jindřich. Documentation of coins via Reflectance Transformation Imaging (RTI). In: Numismatické listy [online]. Praha: Národní muzeum ve spolupráci s Českou numismatickou společností, 2016, s. 169-174 [cit. 2021-07-21]. ISSN 2533-5650. Dostupné z: doi:10.1515/nl-2016-0010
- RYBENSKÁ, Klára. 3D digitalizace vybrané sbírky hodin, 21. Konference: *Archivy, knihovny, muzea v digitálním světě*, Praha, 2020.
- Sketchfab [online]. USA: Sketchfab, 2021 [cit. 2021-8-23]. Dostupné z: <https://sketchfab.com/feed>
- Trnio [online]. Costa Mesa, United States, ©2021 [cit. 2021-8-16]. Dostupné z: <https://www.trnio.com>
- TŮMA, Jan. V ZAJETÍ ČASU - výstava historických hodin ze sbírek Muzea Náchodska: Texty pro výstavu, která proběhla 13. prosince 2019 – 5. ledna 2020 ve staré škole Dřevěnce v Polici nad Metují, rkps. Police nad Metují: Muzeum Náchodska, 2019. rkp.
- ZIMMERMANN, K. A. History of Computers: A Brief Timeline [online]. Live Science Contribution, 2017 [cit. 2021-8-23]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/20718-computer-history.html>
- ZUZA, Mikoláš. Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. Josef Průša [online]. Česká Republika: Josef Průša, 2018 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>