

Přesnost ekonomicky dostupné metody 3D dokumentace movitého kulturního majetku

Pavel HÁJEK; Hana KUBÍČKOVÁ; Karel BOBEK; Karel JEDLIČKA

ABSTRAKT: Příspěvek zkoumá potenciál ekonomicky dostupné metody rekonstrukce třídimenzionálního tvaru předlohy v digitálním prostředí, založené na průřezové fotogrammetrii z perspektivy evidence movitého kulturně hodnotného majetku. Zkoumanou metodu nejprve zasazuje do kontextu současných i historických způsobů evidence movitého kulturního majetku. Poté stručně popisuje principy jejího fungování a srovnává ji s velmi přesným způsobem dokumentace formou laserového skenování. Srovnání je založeno na hodnocení objemových rozdílů a ukazuje, že z hlediska přesnosti má metoda SfM svoje místo mezi metodami dokumentace tvaru zájmového objektu. Studie v závěru diskutuje i limity metody, zejména pro tvarově složité a/nebo nekонтрастní předlohy.

KLÍČOVÁ SLOVA: dokumentace; movitý majetek; 3D model; skenování; SfM

Possibilities of 3D documentation of movable cultural property

ABSTRACT: The article examines the potential of an economically available method of reconstructing a three-dimensional shape of an original in a digital environment based on intersecting photogrammetry from the perspective of registering movable culturally valuable property. It first places the method into a context of current and historical methods of recording movable cultural property. It then briefly describes the principles of its operation and compares it with the very accurate method of documentation using laser scanning. The comparison is based on the evaluation of volume differences and shows that in terms of accuracy, this method has its rightful place among the methods of documenting the shape of an item of interest. The study concludes by describing the limits of the method, especially for complex and/or non-contrasting originals.

KEYWORDS: Keywords: documentation; movable property; 3D; model; scanning; SfM

Úvod

Cílem článku je podrobně prozkoumat potenciál ekonomicky dostupné metody rekonstrukce třídimenzionálního tvaru předlohy v digitálním prostředí, založené na průřezové fotogrammetrii z perspektivy dokumentace a evidence movitého kulturně hodnotného majetku.

Dokumentace movitého kulturního majetku má bezesporu zásadní význam jak pro kulturně-historický výzkum, tak i pro uchování informací o zájmových objektech pro další generace. Moderní technologie umožnily přesun od písemného popisu předmětu a analogově zpracované dokumentace k její elektronické formě, avšak stále ve dvourozměrné formě zachycení tvaru a vzhledu dokumentovaného objektu, tj. nákresů, řezů či fotografií. Rozměry a tvary zájmových objektů byly získávány především pomocí analogových měřidel, nicméně i při využití počítačových technologií pro tvorbu dvou- i třírozměrných zákresů objektů se v drtivé většině jednalo o jejich manuální tvorbu. Navíc prezentování kulturně hodnotných objektů ve formě dvourozměrných nákresů nemusí vést ke zvýšení atraktivnosti a zájmu o kulturní dědictví jako oboru. Proto se v tomto článku chceme

zaměřit na představení vybraných metod, které umožní vytvoření relativně rychlé, ale dostatečně kvalitní trojrozměrné dokumentace zájmového movitého kulturního majetku spolu s atraktivní formou jeho virtuálního 3D modelu se zohledněním časové a finanční náročnosti využití takovýchto metod.

Pro tvorbu virtuálního 3D modelu je třeba získat data o rozměru a tvaru dokumentovaného objektu. V článku budou rozebrány dvě metody sběru dat umožňující jak zaměření objektu, tak i softwarově řízenou tvorbu jeho 3D modelu na základě naměřených dat. Jde o metodu laserového skenování a o fotogrammetrickou metodu sběru dat měřickou kamerou za využití technologie Structure from Motion (SfM). Cílem tohoto článku je představení možnosti vyhotovení 3D dokumentace movitých objektů, které je relativně jednoduché a levné, nicméně přináší dostatečně kvalitní výsledky, když jiné, sofistikovanější metody nejsou v danou chvíli dostupné. Pro dosažení tohoto cíle je nejprve metoda zasazena do kontextu existujících metod dokumentace památkově hodnotných objektů a dále je navržen, popsán, realizován a vyhodnocen experiment zaměřený na určení

přesnosti výpočtu objemu zkoumaného tělesa.

Historie evidence movitého kulturního majetku v ČR

Počátky péče o kulturní dědictví v tom smyslu, jak ji chápeme dnes, spadají až do 18. století, kdy osvětský absolutismus vytvořil nosnou plochu pro stanovení obecně závazných pravidel tehdejší památkové péče. Rakousko-uherské památkové instituce byly ve své době nejmodernější v Evropě, což dokládá i ta skutečnost, že tzv. Ústřední komise pro zajišťování a zachování stavebních památek byla zřízena nejvyšším rozhodnutím z 31. 12. 1850 při Ministerstvu obchodu, průmyslu a veřejných prací. Ovšem teprve v roce 1872 byla její působnost rozšířena i na památky movité.

Nově vzniklé Československo v roce 1918 převzalo normy rakousko-uherské monarchie a doplnilo památkové předpisy nařízením Národního výboru č. 13/1918 Sb. o zákazu vývozu uměleckých a historických památek. Po skončení 2. světové války měly pro památkovou péči a její následnou právní úpravu naprosťo zásadní význam dekrety prezidenta republiky (tzv. Benešovy dekrety) č. 108 a zejména

č. 12. Po roce 1945 v jejich důsledku přešly stovky zámeckých a hradních objektů i řada objektů ve městech a obcích, obzvláště pak v pohraničí, do státního vlastnictví, a proto se péče o hrady, zámky a historická jádra měst stala hlavním úkolem památkové péče poválečného období.

Technicky tedy byly první fondy převzaty do správy státu po roce 1918 při konfiskaci majetku příslušníkům habsburské rodiny, předměty byly označeny jako movitý majetek či inventář. Byly využity k vybavení vládních úřadů, zahraničních zastupitelství, část předmětů přešla do sbírek veřejných institucí. Po 2. světové válce Národní kulturní komise přijímaly do své správy jako státní kulturní majetek nejvýznamnější hrady a zámky a účastnily se vyřizování kulturního mobiliáře v objektech, které přešly do státního vlastnictví.

Samotný termín „mobiliární fond“ se poprvé objevuje v Instrukci o správě kulturních památek určených ke kulturně výchovnému využití, kterou vydalo Ministerstvo kultury v lednu 1974. Instrukce zavedla Základní evidenci mobiliárního fondu, která se skládala z vedení základní a průběžné evidence. Evidence obsahovala inventární knihu, která je tvořena evidenčními listy movitých kulturních památek svázanými do pevné vazby, dále kartotéku inventárních listů a ložnicí katalog. Průběžná evidence byla vedením záznamů o výpůjčkách a zápůjčkách.

K evidenci patřily i tzv. černé knihy – původní inventární knihy pořízené Národní kulturní komisí v poválečném období, obsahující soupis mobiliárního fondu nebo knihovny historického objektu. V těchto černých knihách ani v předchozích soupisech neexistovala obrazová dokumentace. Obrazová dokumentace se poprvé objevuje v Základní evidenci mobiliárního fondu v podobě černobílé fotografie velikosti 6 × 6 cm, kdy se archivují jak fotografie, tak jejich negativy.

V roce 1989 byla evidence mobiliárních fondů převedena do softwarového systému MobSys, který byl nasazen jako jediný evidenční nástroj v oblasti správy státních památkových objektů. Mobiliární fondy byly prohlášeny v roce 1991 Ministerstvem kultury jako celky za kulturní památky, stejně tak i jednotlivé knihovny fondy na památkových objektech. V roce 1992 byla prostřednictvím výzkumného úkolu v památkových objektech spravovaných státem pořízena dokumentace jednotlivých mobiliárních předmětů na barevný kinofilmový dia pozitiv, který se následně digitalizoval.

Dalším vylepšením obrazové dokumentace – zatím stále jen vizualizace – se stal tzv. virtuální pohyb, kdy byl předmět snímán dvanácti záběry dle vybrané osy a pomocí SW nástroje byly tyto záběry spojeny v souvislý válec, což

umožňuje plynule předmět prohlížet ze všech stran, přičemž v každém místě je možný obrazový výstup ve fotografické kvalitě. Poprvé se tento postup realizoval v roce 2006 při inventarizaci mobiliáře SZ Kozel.

V roce 2010 bylo experimentálně odzkoušeno 3D zdokumentování mobiliárního předmětu a jeho zpracování do evidenčního nástroje movitého kulturního majetku zvaného CastIS¹ (ten v druhé polovině 90. let navázal na zmíněný MobSys). 3D zachycení jednotlivých mobiliárních předmětů umožňuje – na rozdíl od předchozích způsobů obrazové dokumentace, resp. pouhé vizualizace – kompletní zdokumentování předmětu v prostoru a vytvoření případné repliky předmětu při ztrátě nebo zničení. Při praktické prezentaci movitého kulturního majetku v expozicích zpřístupněných památkových objektů lze data pořízená metodou 3D dokumentace využít k vytištění replik jako upomínkových předmětů a tím vytěžit tuto dokumentaci i ke komerčním účelům.

Vybrané metody sběru dat pro 3D dokumentaci movitého kulturního majetku

Vhodnost trojrozměrné dokumentace movitého i nemovitého kulturního majetku byla dále zkoumána v celé řadě literárních pramenů, které jsou v této práci postupně citovány. Autoři se shodují, že použití 3D dokumentace má své přednosti, ale i své limity.² Nejde totiž jen o zachování a zpřístupňování kulturního majetku, ale zásadní stránkou pořízení jakékoliv dokumentace je cena jejího pořízení.

Metod pro 3D dokumentaci zájmového majetku je celá řada, od stereofotogrammetrie, holografie až po manuální tvorbu modelu. Tento článek se však zaměřuje na porovnání postupu pro digitalizaci kulturního majetku již poměrně využívaného, a to laserového skenování, s metodou získávání trojrozměrného modelu objektu na základě fotogrammetrické metody, která využívá obrazovou korelaci, tzv. Structure from Motion (SfM, též označované jako Image-Based Modeling and Rendering IBMR). Principy obou těchto metod jsou popsány v metodice NPÚ nazvané *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*,³ ale její autoři se zaměřili na nemovitý kulturní majetek. Tento článek naopak obrací pozornost k movitému majetku a porovnává obě metody nejen z pohledu finančního, ale především z pohledu přesnosti obou metod, což dokládá praktickou studii, a také z hlediska konkrétní použitelnosti.

Obě zvolené metody mají mnoho společného. Jsou bezkontaktní, poskytují velké množství podrobných bodů pro tvorbu co nejdetailejší 3D reprezentace objektů. Jak bylo zmíněno výše, výhodou SfM metody jsou výrazně nižší

Obr. 1. *Předmět sběru dat – transportní bedna na teodolit. Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

Obr. 2. *Příklad konfigurace stanovisek a přímky pro sběr dat pozemním laserovým skenováním. Převzato z práce Hany Kubičkové, Rekonstrukce 3D tvaru movitého předmětu zvolenou technikou (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

Obr. 3. *Leica Nova MS50 MultiStation, předmět sběru dat a zobrazení skenů na displeji přístroje. Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

Obr. 4. *Definice skenované oblasti zobrazená na displeji použitého přístroje. Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

Obr. 5. *Části modelovaného předmětu, které bylo nutné z dat odstranit. Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

Obr. 6. *Výsledný 3D model s přiřazenou texturou z programu Meshlab (vlevo) a Agisoft Metashape (vpravo). Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8). Foto: Hana Kubičková, 2016.*

náklady na hardware i software. Metoda je poměrně dobře přijímána,⁴ ovšem většinou jen na základě vizuální věrnosti výsledku, nikoli na základě přesnosti zachycení předlohy. V této práci se proto zaměřujeme na ověření této druhé kvality. Jeden konkrétní objekt snímáme jak metodou laserového skenování, tak metodou SfM a následně obě metody porovnáváme mezi sebou i s analyticky vypočteným tvarem předlohy.

Sběr dat pozemním laserovým skenováním

Z celé řady typů metod laserového skenování⁵ vybíráme pozemní systémy s krátkým dosahem používající laserový skener. Laserový skener se skládá z laserového dálkoměru a skenovacího mechanismu.⁶ V dálkoměru je zabudován pulsní laser emitující záblesky infračerveného světla. Paprsek vyslaný dálkoměrem

■ Poznámky

1 Ladislav Bezděk et al., *Metodika pro elektronický pasport zpřístupněné památky*, Praha 2011, s. 38, příloha D.

2 Ibidem. – Marcel Brejcha et al., *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*, Ústí nad Labem 2015.

3 Brejcha et al. (pozn. 2).

4 Srov. např. Efstratios Stylianidis – Fabio Remondino, *3D recording, documentation and management of cultural heritage*, Dunbeath [2016]. – Fabio Remondino – Alessandro Rizzi, *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites – techniques, problems, and examples*, *Applied Geomatics* 2, s. 85–100.

5 Brejcha et al. (pozn. 2), s. 13.

6 Ibidem, s. 14.



1

TPS 0001

S 0003

S 0002

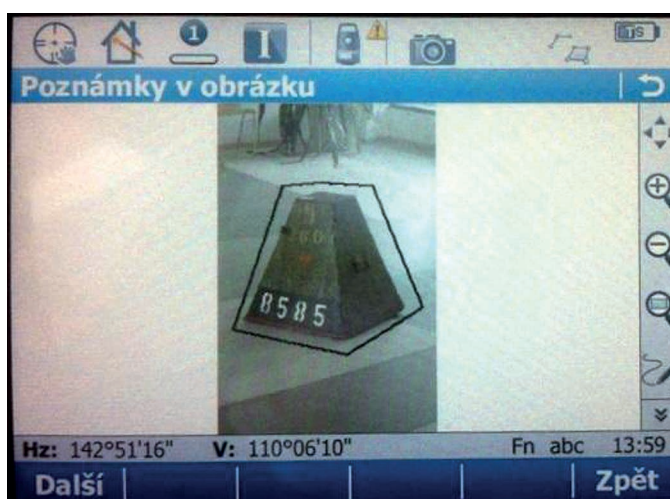
S 0001

TPS 0002

2



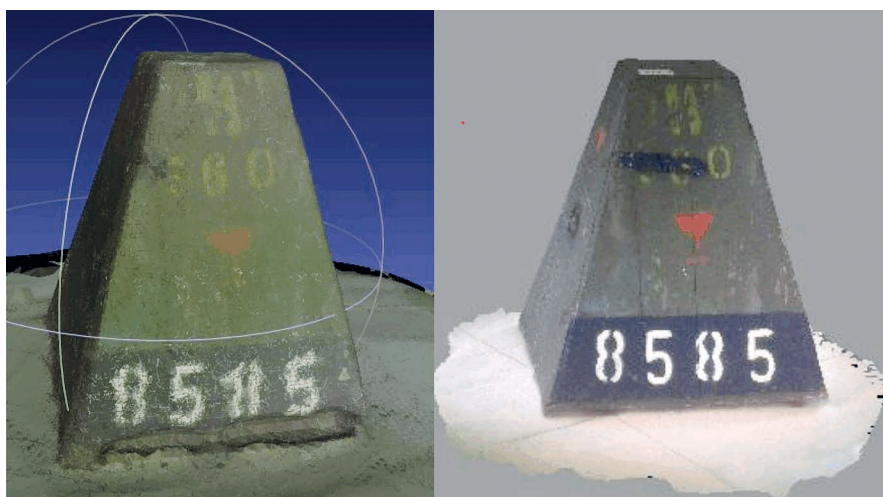
3



4



5



6

je odražen od povrchu skenovaného objektu a vrací se zpět. Pomocí senzoru se zaznamenává doba letu převedená do vzdálenosti laser–objekt (time of flight), nebo se určuje fázový posun vyslaného paprsku. Fázové skenery jsou až o řád přesnější a hodí se ke skenování předmětů, např. soch, u kterých je nutno dokumentovat detaily.

Takto získané mračno bodů reprezentuje tvar měřeného objektu a je s úspěchem kombinováno s fotografickým záznamem měřeného objektu, který umožňuje jednotlivým bodům mračna přiřadit hodnoty RGB, tj. barvu, čímž lze získat barevné trojrozměrné bodové reprezentace objektu.

Pro kompletní trojrozměrný model movitého předmětu či objektu je většinou třeba provést skenování z více stanovišť okolo měřeného objektu. Spojením překrývajících se jednotlivých skenů je v patřičném programu vytvořen následně kompletní 3D model zájmového objektu.

Příkladem zaměření objektu může být schéma (obr. 1), kde je uprostřed skenovaný objekt (fialový jehlan), stanoviště, ze kterých byl pořízen sken objektu (stativy s totální stanicí opatřené laserskenery) a dva odrazné hrany (body TPS0001 a TPS0002) vymezující přímku, k níž bylo vztaheno měření z každého stanoviště. Tento způsob je typický pro zvolenou aparaturu typu multistation. Při laserovém skenování za použití (auto)korelace skenů není třeba používat žádných dalších pomůcek, anebo se pro automatické spojení skenů používají kulové signály, rozmístěné kolem objektu a fungující jako vlčívací body.⁷

Sběr dat neměřickou kamerou za využití technologie SfM

Při samotném sběru dat, tedy snímkování, je nutné postupovat podle několika zásad. Zprv je třeba snímkovat za vhodných světelných podmínek při rozptýleném světle, tzn. vyhnout se přímému slunečnímu či umělému světlu, aby snímávaný objekt nebyl příliš přesvětlený nebo aby na něj naopak nedopadl stín, což by mělo nežádoucí vliv nejen na samotnou rekonstrukci 3D modelu, ale také na jeho výslednou texturu. Dále je vhodné omezit výskyt nechtěného popředí a pohybujících se objektů uvnitř snímávané scény. Pro pořízení snímků objektu je důležité použít stejné nastavení ohniskové vzdálenosti, neboť při její změně se mění i prvky vnitřní orientace použité kamery. Samotné snímkování by mělo probíhat systematicky kolem snímávaného objektu přibližně ve stejné vzdálenosti a z různých úrovní tak, aby kolem objektu vytvořili jakousi sféru (obr. 2).

Obecně platí, že čím více snímků pořídíme, tím lépe. Měly by být komponovány tak, aby

požadovaný objekt zabíral co největší plochu snímku. V případě, že nastane situace, kdy není možné zachytit celý objekt, lze zaznamenat jeho chybějící části na další snímek. Například při pořizování snímků rozměrově velkého objektu se zaznamenávají nejen přehledové snímky celého objektu či jeho části, ale i jednotlivé části objektu, u kterých se zachycené snímky vzájemně překrývají, aby na minimálně dvou z nich bylo možné najít stejné části objektu a vytvořit z takto pořízených snímků kompletní trojrozměrný model objektu.

Aby bylo později možné rekonstruovat skutečnou velikost objektu, je potřeba současně nasnímat spolu s objektem délkový etalon nebo na objektu změřit vzdálenosti mezi dobře identifikovatelnými body. Tím lze dát vznikajícímu modelu měřítko.⁸

Porovnání vybraných metod pro sběr dat za účelem vytvoření 3D dokumentace zájmového objektu

Tato kapitola se zaměřuje na experimentální ověření přesnosti vybraných metod při zaměření téhož objektu, provedeném v roce 2016 v prostorech Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.⁹ Tento objekt byl vybrán tak, aby bylo možné analyticky vypočítat jeho skutečný objem a zároveň aby obsahoval i potřebnou texturu. Díky tomu bude možné ověřit nejen vizuální uspokojivost, ale i přesnost obou metod. Pro účely pokusu byl proto vybrán ne zcela typický zástupce movitých kulturních předmětů, transportní bedna na teodolit (obr. 3) ve tvaru komolého jehlanu. Jeho rozměry byly určeny opakovaným měřením délek všech stran a jejich zprůměrováním. V budoucích studiích, které postoupí v ověřování dále, by bylo vhodné se zaměřit i na tvarově složitější objekty, protože členitost a struktura povrchu objektů movitého kulturního majetku může mít vliv na věrnost reprezentace výsledného 3D modelu.

Podrobný popis vytvoření virtuálního 3D modelu za použití zvoleného softwarového vybavení nejen z pohledu zpracování získaných dat je dostupný v manuálu výrobce,¹⁰ v následujících podkapitolách budou uvedeny postupy při zaměření vybraného objektu oběma zmíněnými metodami s ukázkami výsledných virtuálních 3D modelů. Poslední podkapitola pak porovnává 3D modely na základě jejich objemů.

Měření objektu pozemním laserovým skenerem

Pro pořízení mračna bodů pozemním laserovým skenováním byl použit přístroj Leica Nova MS50 MultiStation (obr. 4), který spojuje funkci totální stanice (geodetický přístroj pro digitální měření úhlů a délek) s 3D laserovým skenerem.

Při maximálním dosahu 300 m a rychlosti skenování 1000 bodů/s vykazuje dle informací od výrobce 3D skener následující parametry: šum v datech měřených délek za ideálních podmínek (zatažená obloha, objekt ve stínu, přímá viditelnost, statický cílový objekt) hodnotu 1 mm na 50 m. Absolutní polohová přesnost skenování do 500 m je dle výrobce 2 mm + 2 ppm.¹¹ Prvním krokem při pořizování dat bylo navržení vhodné konfigurace stanovišť přístroje. Stanoviště by měla být nejméně dvě, ale určitě raději tři, v minimální vzdálenosti cca 1,5 m od skenovaného objektu (konkrétní hodnota odstu- pu je uvedena v manuálu použitého přístroje) a rozmístěna tak, aby byl naskenován celý objekt zájmu.

Po přípravě přístroje na prvním stanovišti, založení nové zakázky v přístroji a provedení orientace měření k přímce bylo přikročeno k samotnému nastavení skenování. Výhodou tohoto přístroje je možnost definovat nepravidelnou oblast skenované mřížky. Tato skutečnost usnadnila práci při zpracování naskenovaného mračna bodů, jelikož se laserový paprsek pohybuje pouze v námi definované oblasti, čímž se redukuje nadbytečný počet bodů mračna (obr. 5). Po definování skenované oblasti se pořídí její snímek, ze kterého jsou po naskenování objektu přiřazeny barvy jednotlivým bodům mračna.

V dalším kroku bylo třeba definovat rozlišení skenování, a to buď na základě délky, nebo úhlu. V našem případě byla zvolena možnost definice rozestupu bodů mračna na základě délky. Vzdálenosti mezi registrovanými body, tj. body reprezentujícími celé naskenované mračno spojené z měření na všech stanovištích, byly nastaveny na hodnotu 0,005 m jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru, abychom získali husté mračno bodů. Při takovémto nastavení bylo dosaženo počtu více jak 16 000 bodů z jednoho stanoviště.

■ Poznámky

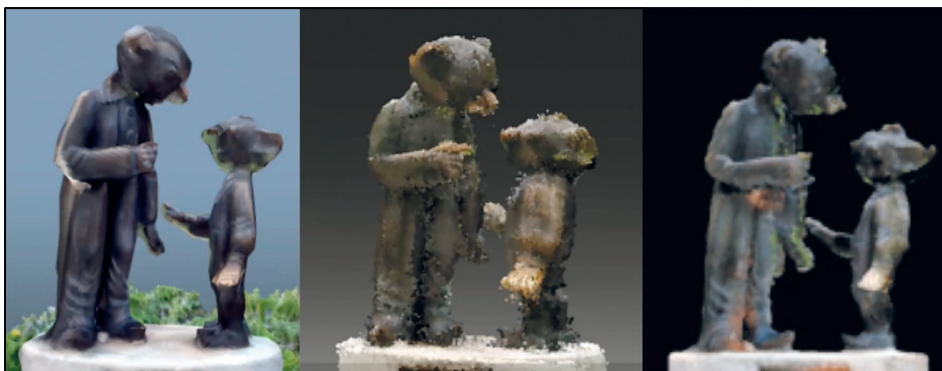
⁷ Monika Hrádková, *Studie možností sběru a zpracování podrobných 3D dat pro účely památkové péče* (diplomová práce). Fakulta aplikovaných věd, ZČU v Plzni, Plzeň 2009, s. 46.

⁸ Srov. Hana Kubičková, *Rekonstrukce 3D tvaru movitého předmětu zvolenou technikou* (bakalářská práce), Fakulta aplikovaných věd ZČU v Plzni, Plzeň 2016, s. 27.

⁹ Ibidem, s. 59.

¹⁰ Leica Nova Series. *Technical Reference Manual*. Heerbrugg 2013, dostupné z: <http://www.fltgeosystems.com/uploads/tips/documents/151-1400698848.pdf>, vyhledáno 2. 6. 2021.

¹¹ Leica MS50/TS50/TM50. *User Manual*. Heerbrugg 2013, s. 53, dostupné z: <https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/219>, vyhledáno 2. 6. 2021.



7

Obr. 7. 3D model sousoší Spejbla a Hurvíňka v Plzni získaného za použití technologií (zleva): Google Tango, Matterport Scenes a Open Constructor. Převzato z prezentace Hany Kubičkové (pozn. 16). Foto: Hana Kubičková, 2017.

Obr. 8. 3D model repliky hlavy Davida vytvořený metodou SfM. Převzato z publikace Mariána Marčíše (pozn. 17). Foto: Marián Marčíš, 2013.

Měření objektu neměřičkou kamerou

Při výběru kamery pro pořízení snímků byla hlavní prioritou její dostupnost (jak z hlediska hardwaru, tak její ceny) a taktéž aktuální situace ohledně již vlastněného vhodného hardwaru, a proto byla vybrána taková, která je součástí mobilních telefonů. Volba mobilního telefonu závisela na dodržení doporučených parametrů fotoaparátu uvedených v uživatelské příručce softwaru PhotoScan Pro, kde uvedenými podmínkami pro použitý fotoaparát jsou jeho minimální rozlišení 5 MPix a ohnisková vzdálenost objektivu pohybující se v rozmezí 20–80 mm.¹² Pro snímkování byl použit mobilní telefon Apple iPhone 4, který disponuje fotoaparátem s rozlišením 5 MPix a ohniskovou vzdáleností objektivu přepočtenou na full-frame ekvivalent cca 30 mm. Kamery tohoto typu jsou obecně dostupné v mobilních telefonech a lze předpokládat, že jejich kvalita se bude dále zvyšovat. Pro využití při tvorbě modelů s nimi lze počítat.

Co se týče etalonu pro určení velikosti výsledného modelu, byla spolu s transportní bednou na teodolit nasnímána podlaha z dlažby, jejíž rozměry byly změřeny po pořízení snímků.

Aby byl získán dostatečný počet snímků, bylo provedeno snímkování ze 3 vodorovných rovin, a to ve výšce přibližně 20 cm, 40 cm a 100 cm od podlahy bez použití digitálního nebo optického zoomu, pro zachování stejných parametrů komory. Celkem jsme takto získali 86 snímků ve formátu JPEG. Software Agisoft PhotoScan, nyní nazývaný Metashape, umí pracovat pouze s originálními snímky, které nebyly žádným způsobem modifikovány (oříz-

nutí, geometrická úprava fotografií – zejména otočení). Kdyby k tomuto došlo, mohlo by to vést k nepřesnému výsledku při následné tvorbě 3D modelu, nebo by snímky nebylo možné zpracovat vůbec.

Porovnání výsledných 3D modelů na základě jejich objemu

V této části článku se zaměříme na porovnání objemů a povrchových odchylek vybraného movitého objektu. Jedná se o reprezentativní a porovnatelné vlastnosti vytvořených 3D modelů. Právě objem modelů je z našeho pohledu klíčový pro správnou reprezentaci zkoumaného objektu ve 3D.

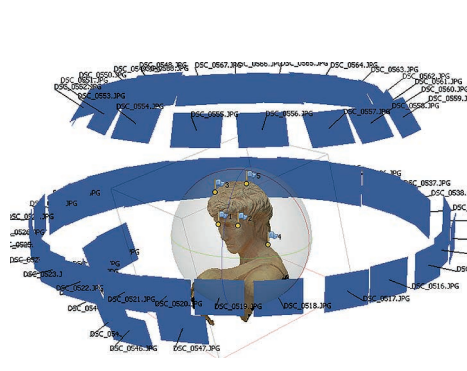
Pro porovnání výsledků experimentu byl nejprve vypočten objem modelovaného objektu analyticky,¹³ kdy za předpokladu, že se jedná o komolý jehlan, je vzorec výpočtu objemu komolého jehlanu uveden v rovnici:

$$V = \frac{1}{3} \cdot v \cdot (S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2)$$

Dalším krokem byl výpočet objemů vytvořených 3D modelů v programech Meshlab¹⁴ (využívající data z laserového skenování, tj. mračno bodů) a Agisoft Metashape¹⁵ (využívající množinu pořízených fotografií libovolnou digitální kamerou pro tvorbu 3D modelu). Výsledný model vytvořený z laserového skenování je na obrázku 6 vlevo, model vytvořený z fotografií je na stejném obrázku vpravo. (obr. 6)

Pro získání co nejspolehlivějších výsledků bylo nutné již v průběhu zpracování dat v programech Meshlab a Agisoft Metashape odstranit body, které dělaly model členitým. Příkladem jsou body reprezentující úchyty bedny na teodolit nebo spony na její uzavření (viz žlutě označené části zájmového objektu na obr. 7), se kterými jsme při analytickém výpočtu nepočítali. Snahou bylo tedy získat pouze obecný tvar objektu, jehož objem byl předem vypočten analyticky z oměrných délek.

Oba softwary, ve kterých byly vytvořeny virtuální 3D modely zájmového objektu, disponují funkcí výpočtu objemu modelů a jejich výsledky spolu s analytickým výpočtem objemu komolého



8

ho jehlanu a výpočtem objemu ze surového mračna bodů získaného při skenování jsou uvedeny v tabulce 1. Porovnávané modely byly složeny z řádově 4×10^3 bodů pro model z laserového skenování, resp. z řádově 5×10^3 bodů pro model z neměřičké kamery. Počet těchto bodů, ze kterých jsou modely vytvořeny a na jejichž podkladě byl vypočten a porovnán jejich objem, si řádově odpovídá a lze je tímto způsobem porovnat. Detailnost výsledného modelu záleží zejména na zvolené přesnosti měření a kvalitě výsledného produktu především z pohledu počtu bodů, resp. finálně trojúhelníků reprezentujících objekt. Je vhodné mít po celou dobu měření stále fyzikální podmínky a dodržovat určitá geometrická pravidla (zaměření kontrolních oměrných délek, vhodná konfigurace míst, ze kterých se snímkuje – definování překryvu, pořízení záznamu celého objektu atp.).

Pro účely porovnávání jednotlivých objemů byl za referenční zvolen analytický výpočet (viz výše popsanou metodu výpočtu). Z výše uvedené tabulky (tab. 1) je patrné, že analytický výpočet je velmi blízký objemu z laserového měření spočtenému přímo v přístroji po získání naskenovaného mračna bodů. Odchylna objemu získaného ze SfM v SW Metashape je o řád horší: 0,001 m³.

Diskuse

Při pořizování dat mobilním telefonem za využití metody SfM a zpracování snímků v progra-

■ Poznámky

¹² Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.2 (online), dostupné z: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf, vyhledáno 2. 6. 2021.

¹³ Měření délek potřebných pro výpočet objemu bylo provedeno vystudovaným geodetem, každá hrana byla určena pětinasobně, pro podrobný popis postupu a určené hodnoty viz Kubičková (pozn. 8), tabulka 6.1.

¹⁴ Meshlab V 1.3.3 (online), dostupné z: <https://www.meshlab.net>, vyhledáno 3. 6. 2021.

¹⁵ Agisoft Metashape version 1.7 (online), dostupné z: <https://www.agisoft.com>, vyhledáno 5. 6. 2021.

Tab. 1

Zvolená metoda výpočtu objemu

	Analytický výpočet	Laserové skenování	SfM neměřickou kamerou	
		Objem z mračna bodů spočtený přímo v přístroji	3D model Meshlab	3D model Agisoft PhotoScan Metashape
Objem [m ³]	0,08750	0,08763	0,08664	0,08650
Absolutní odchylka od analyticky vypočteného objemu [m ³]	0	0,00013	0,00086	0,00100
Relativní odchylka od analyticky vypočteného objemu [%]	0	0,15	- 0,98	- 1,14

Tab. 1. Výsledné porovnání na základě objemů. Převzato z práce Hany Kubičkové (pozn. 8).

mu Agisoft Metashape byly zjištěny povrchové odchylky mezi takto vytvořeným výsledným 3D modelem a čistým mračnem bodů. Procentuální odchylka 1,14 % (0,001 m³) od analyticky vypočteného objemu byla podle našeho názoru způsobena tím, že modelovaný předmět neměl v některých místech příliš bohatou texturu, a svoji roli jistě sehrála i kvalita kamery a distorze objektivu. Porovnáním objemu ze SfM s objemem z laserového skenování určeného přímo přístrojem nám vychází, že objem určený metodou SfM je o řád méně přesný.

Naproti tomu výhodou techniky sběru dat neměřickou kamerou za využití technologie SfM je bezpochyby cenová dostupnost, rychlost sběru dat, automatizovanost a jednoduchost ve zpracování pořízených snímků. Navíc umožňuje pořídit snímky i drobných movitých objektů, protože s mobilem lze fotografovat z malé vzdálenosti. Další výhodou je vysoce realistický vzhled 3D modelu, neboť výsledná textura je přejímána z pořízených snímků (předpokladem je vhodná textura povrchu, kterou ne všechny objekty mají, např. sádrové busty, skleněné či kovové předměty apod.). To může být na druhou stranu vyváženo potenciálně nižší přesností výsledného 3D modelu a požadovanými nároky na výpočetní techniku, s čímž souvisí delší doba zpracování. V našem případě měl použitý hardware následující parametry – 1.8 GHz CPU, 2 GB GPU, 6 GB RAM a proces zpracování 86 pořízených snímků trval přibližně 4 hodiny.

Tato finančně nenáročná metoda má v posledních letech široké uplatnění i v oblasti správy kulturních památek, péče o ně, a především jejich prezentace. Například trojrozměrný model sousoší Spejbla a Hurvíňka v Plzni získaný za použití tří různých mobilních aplikací či technologií – Google Tango, Matterport Scenes a Open Constructor (obr. 8) – byl využit v příspěvku Hany Kubičkové na konferenci Geomatika

ka v projektech,¹⁶ replika hlavy Davida od Michelangela (obr. 9) v publikaci Mariána Marčiše¹⁷ nebo rozličné 3D modely kulturně-historických předmětů od drobných pečeti přes hodiny, šaty, sochy až po modely koňských povozů v projektu 3D Sbírký prezentujícím prostorové modelování.¹⁸

Co se týče druhé metody, statického pozemního laserového skenování, jeho výhodou je nepochybně přesnost dat pořízených na relativně velkou vzdálenost, protože laserový paprsek má dosah až 1 000 m. Nevýhodou této techniky sběru dat oproti snímkování neměřickou kamerou za využití metody SfM je v první řadě cena laserového skeneru, nutná jistá míra erudovanosti měřiče a také fakt, že není vhodná pro skenování příliš blízkých či drobných předmětů, protože minimální vzdálenost přístroje od skenovaného objektu je 1,5 m. Takováto minimální vzdálenost může navíc skýtat problém při potřebě skenování v malých prostorech. Dále v případě rekonstrukce 3D tvaru příliš členitých nebo bohatě texturovaných movitých předmětů nelze sledovat vizuální kvalitu výsledného 3D modelu vytvořeného na základě dat získaných pouze laserovým skenováním jako dostačující. To je způsobeno tím, že je barva textury výsledného 3D modelu přejímána z pořízeného mračna bodů a následně je přiřazována jednotlivým polygonům tvořícím povrch modelu, což může vést k vizuální nejednoznačnosti povrchu modelu. Dále na rozdíl od metody SfM není laserové skenování vhodné pro drobné movité objekty, u kterých by potenciální počet nasnímaných bodů z minimální vzdálenosti přístroje od objektu byl příliš nízký pro získání reprezentativního 3D modelu zájmového objektu.

Z výše zmíněných nevýhod laserového skenování proto vyplývají případy, ve kterých by bylo možné nahradit laserové skenování technikou sběru dat běžně dostupným hardwarem za využití metody SfM. To znamená situace, kdy z důvodu malých prostor, ve kterých se nachází předmět sběru dat, není možné dodržet minimální vzdálenost laserového skeneru od skenovaného

objektu 1,5 m. Dále pak okolnosti, za kterých není možné použít laserový skener z důvodu možnosti poškození předmětu laserovým paprskem, a nakonec také případy, kdy požadujeme výbornou vizuální kvalitu výsledného 3D modelu.

Článek vznikl v rámci dílčího cíle „Metodika řádné správy památkového fondu zpřístupněného veřejnosti“ výzkumné oblasti XII. Tvorba metodik pro naplňování řádné správy památkového fondu zpřístupněného veřejnosti financované z institucionální podpory Ministerstva kultury na dlouhodobý koncepční rozvoj (IP DKRVO).

Ing. Pavel HÁJEK, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni
gorin@kgm.zcu.cz

Ing. Hana KUBÍČKOVÁ
Plan 4All z.s.
hana.kubickova@plan4all.eu

Karel BOBEK
NPÚ, Generální ředitelství v Praze
bobek.karel@npu.cz

Ing. Karel JEDLIČKA, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni
smrcek@kgm.zcu.cz

Poznámky

¹⁶ Hana Kubičková, Představení platformy pro tvorbu 3D modelů Google Tango. Příspěvek přednesený na konferenci Geomatika v projektech, zámek Kozel, 4.–5. října 2017.

¹⁷ Marián Marčiš, Quality of 3D Models Generated by SfM Technology, *Slovak Journal of Civil Engineering* 21, 2013, č. 4, s. 13–24.

¹⁸ Pro detailní fotogrammetrické 3D modely kulturně-historických předmětů a přírodních zajímavostí viz 3D sbírký (online), AFORTI IT s. r. o. – 3D Johny, <http://www.3dsbirky.cz/>, vyhledáno 22. 11. 2021.