

METODIKA DIGITALIZACE, 3D DOKUMENTACE A 3D VIZUALIZACE JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PAMÁTEK

Marcel Brejcha – Vladimír Brůna – Zdeněk Marek – Bára Větrovská



NÁRODNÍ PAMÁTKOVÝ ÚSTAV
územní odborné pracoviště
v Ústí nad Labem

FILOZOFICKÁ FAKULTA
UNIVERZITY J. E. PURKYNĚ
v Ústí nad Labem

2015

**METODIKA DIGITALIZACE, 3D DOKUMENTACE
A 3D VIZUALIZACE JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PAMÁTEK**



NÁRODNÍ PAMÁTKOVÝ ÚSTAV
ÚZEMNÍ ODBORNÉ PRACOVIŠTĚ V ÚSTÍ NAD LABEM
odborné a metodické publikace, svazek 75

FILOZOFICKÁ FAKULTA
UNIVERZITY JANA EVANGELISTY PURKYNĚ
V ÚSTÍ NAD LABEM

Certifikovaná metodika

**METODIKA DIGITALIZACE, 3D DOKUMENTACE
A 3D VIZUALIZACE JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PAMÁTEK**

Marcel Brejcha – Vladimír Brůna – Zdeněk Marek – Bára Větrovská

Ústí nad Labem 2015

Certifikovaná metodika

Osvědčení č. 53 Ministerstva kultury ČR, odboru výzkumu a vývoje, č. j. MK 59775/2015 OVV, sp. zn. MK-S 10086/2015 OVV, ze dne 6. 10. 2015.

Metodika vznikla v rámci řešení grantového projektu *Dokumentace, digitalizace a prezentace ohroženého kulturního dědictví v příhraniční oblasti severozápadních Čech*, který je financován z prostředků aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI) Ministerstva kultury České republiky.

Identifikační kód projektu: DF12P01OVV009.

Metodika je určena pracovníkům odborných institucí, které se zabývají ochranou kulturního dědictví, mezi tyto instituce patří především Ministerstvo kultury ČR, Národní památkový ústav a orgány státní památkové péče, dále vysoké a střední školy s akreditovanými obory zaměřené na dokumentaci památek a muzea a galerie výtvarných umění.

Metodika byla schválena odborem vědy a výzkumu Ministerstva kultury. Ministerstvo doporučuje tuto metodiku pro využití při ochraně kulturního dědictví ČR.

Oponenti:

doc. PhDr. Ivana Ebelová, CSc.

doc. PhDr. Pavel Vařeka, Ph.D.

© Ing. Marcel Brejcha, 2015; Ing. Vladimír Brůna, 2015; Mgr. Zdeněk Marek, 2015; Mgr. Bára Větrovská, 2015

© Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem, 2015

ISBN: 978-80-85036-61-9

© Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Filozofická fakulta, 2015

ISBN: 978-80-7414-954-2

OBSAH:

ÚVOD.....	7
1. PROSTOROVÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ.....	9
1.1. Úloha digitalizace a dokumentace v památkové péči.....	9
1.1.1. <i>Definice pojmů</i>	9
1.1.2. <i>Výběr pojmů</i>	10
1.2. Současný stav využívání metody laserového skenování v ČR a ve světě.....	12
1.2.1. <i>Stav v České republice</i>	12
1.2.2. <i>Stav v zahraničí</i>	12
1.2.3. <i>Hodnocení a závěry současného stavu využívání laserového skenování v památkové péči</i>	13
1.3. Metoda laserového skenování.....	13
1.3.1. <i>Rozdělení metod laserového skenování</i>	13
1.3.2. <i>Používané systémy laserového skenování</i>	16
1.3.3. <i>Programové vybavení na zpracování 3D datových souborů</i>	18
1.3.4. <i>Základní programy</i>	19
1.3.5. <i>Vizualizační programy</i>	22
1.3.6. <i>Modelovací programy</i>	23
1.3.7. <i>Kritéria výběru předmětů a objektů pro 3D digitalizaci</i>	26
1.3.8. <i>Příprava projektu digitalizace a sběru prostorových dat</i>	27
1.3.9. <i>Realizace projektu digitalizace v terénu</i>	28
1.4. Ukázka možných publikací výstupů 3D digitalizace.....	30
1.4.1. <i>Socha svatého Antonína Paduánského (volně stojící drobná památka)</i>	30
1.4.2. <i>Vstupní kamenná brána hradu Ostrý u Milešova</i>	34
2. NÁVRH METODIKY PRŮSEKOVÉ FOTOGRAMMETRIE PŘI DOKUMENTACI PAMÁTEK.....	35
2.1. Úvod.....	35
2.2. Geodetická metoda fotogrammetrie z historického pohledu.....	35
2.2.1. <i>Stav využívání fotogrammetrie v ČR</i>	36
2.2.2. <i>Stav využívání fotogrammetrie ve světě</i>	36
2.3. Programové vybavení pro průsekovou fotogrammetrii.....	37
2.3.1. <i>Doporučené hardwarové vybavení</i>	38
2.4. Metoda průsekové fotogrammetrie.....	39

2.4.1. Zobrazení objektivem.....	39
2.4.2. Kalibrace objektivu v prostředí Agisoft Lens.....	40
3. TVORBA 3D MODELŮ OBJEKTŮ.....	46
3.1. Princip vytvoření prostorového modelu objektu.....	46
3.2. Pracovní postup vytvoření 3D modelu objektu.....	46
3.2.1. Úprava vstupních snímků.....	46
3.2.2. Vytvoření prostorového modelu.....	48
3.2.3. Filtrování hloubek.....	51
3.3. Tvorba textury 3D modelu.....	51
3.4. Úpravy vytvořeného modelu.....	53
3.5. Alternativní softwarové řešení Autodesk 123CATCH.....	53
ZÁVĚR.....	57
LITERATURA.....	58

ÚVOD

V současnosti je přístup k digitálnímu obsahu prostřednictvím médií, jako je internet či televize, nedílnou součástí života většiny lidí. Památkové a fondové instituce či soukromí majitelé spravují hmotný i nehmotný majetek, který představuje podstatnou část našeho kulturního dědictví. Obecným pravidlem a často i zákonnou povinností je zachovávat a zpřístupňovat tyto fondy odborné i laické veřejnosti.

V zahraničí i v tuzemsku se v současné době řeší velké množství programů, projektů a aktivit týkajících se digitalizace kulturního dědictví, a to jak na lokálních úrovních, tak také na úrovních mezinárodní spolupráce. Digitální knihovny a digitální archivy mohou kromě archivace také v budoucnu zjednodušit a zpřístupnit digitalizovaný obsah či virtuální modely objektů, včetně jejich odborných popisů. Největší obsah práce v oblasti digitalizace zatím provedly knihovny, které v rámci svých řízených programů již několik let systematicky digitalizují své sbírkové fondy. Dalšími již mladšími projekty jsou digitalizace výtvarného umění, které realizují posun do 3D prostorové digitalizace oproti digitálním archivům knih, které jsou vedeny a skenovány ve 2D.

Digitalizace „velkých“ objektů doposud probíhá pouze v pilotních projektech, ve spolupráci zejména akademických, vědecko-výzkumných pracovišť a dodavatelů technologií, které jsou primárně zaměřeny na aplikační studie jednotlivých skenovacích zařízení dostupných na trhu. Předkládaná metodika si klade za cíl sjednotit a publikovat vybrané postupy získané v praxi a aplikované na jednotlivé reprezentativní objekty dokumentované v rámci činnosti Národních památkových ústavů, které jsou dedikovány s působností jednotlivých krajů.

Předložená metodika nemůže a ani si neklade za cíl obsahově pojmut celou škálu prostorové digitalizace, proto je zúžena na hlavní a v praxi nejvíce využívanou metodu 3D laserového terestrického (pozemního) skenování, využívaného zejména na velké objekty typu hrad, kostel, zámek, budova, kamenosochařské dílo typu sousoší, socha, erb, římsa.

A protože jednotlivé geotechnologie, mezi které laserové skenování patří, nejsou izolované, ale naopak jsou vzájemně provázané, např. geodézie – laserové skenování – fotogrammetrie, zařadili jsme do metodiky i fotogrammetrii, resp. jednu z dílčích částí – fotogrammetrii průřezovou. Její teoretické základy a ukázky praktického využití jsou prezentovány v druhé části metodiky. I když obor fotogrammetrie má více než stoletou tradici, nástupem výkonných výpočetních systémů a programového vybavení se metoda průřezové fotogrammetrie začíná využívat při tvorbě 3D modelů při dokumentaci v archeologickém výzkumu a v památkové péči.

Tento manuál poskytuje stručný přehled o současných metodách a technologiích, jejichž přínos ukazuje na reálných aplikacích v dokumentační praxi památkové péče. Metodika je rozdělena do dvou částí, teoretické (popisné) a aplikační u obou metod (laserové skenování – průseková fotogrammetrie). V teoretické části je představena a vysvětlena odborná terminologie, rozsah, techniky, technologie, existující normy a standardy. V aplikační části je rámcově popsáno technické a postupové řešení projektu, kde je využita metoda prostorového laserového skenování a popsán postup, úskalí, rizika a klady vyskytující se v praktických aplikacích. Stejně tak je tomu u metody průsekové fotogrammetrie.

Vycházíme-li z předpokladu, že *metodika* je pracovní postup (Akademický slovník cizích slov, Academia 1995, str. 493), tak tento tvoří pouze část předkládaného materiálu. Pro pochopení metod laserového skenování a průsekové fotogrammetrie jsme text doplnili o další podstatné informace, které uživatelům rozšíří znalosti o nových dokumentačních metodách. Autoři byli omezeni rozsahem textu a to je přimělo k prezentování, podle nich, pouze důležitých textů, obrázků, tabulek a příloh. Další podstatnou skutečností je, že autoři metodiky nejsou vzděláni v památkové péči a prezentované praktické úlohy vznikaly postupně při dokumentaci vybraných památek v k. ú. Milešov. Specialista na památkovou péči určil objekt a vlastní postup sběru dat a jejich vyhodnocení stanovili autoři metodiky. Předkládaný materiál je v rámci tuzemska jeden z prvních pracovních postupů v oblasti laserového skenování a jeho aplikace v památkové péči. Lze předpokládat, že vyvolá mnoho polemik a otázek jak ze strany specialistů na prostorový sběr dat, tak i ze strany koncových uživatelů.

1. PROSTOROVÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

Laserové skenovací systémy patří v posledních dvou dekadách mezi rychle se rozvíjející technologie bezkontaktního sběru prostorových souřadnic. Získané geodatabázové soubory slouží jako datová základna pro 3D modelování a vizualizaci stavebních objektů a konstrukcí, podzemních prostor – důlních děl, interiérů, terénu ad. Vlastností těchto systémů je rychlost sběru dat, přesnost, komplexnost a také bezpečnost při terénních pracích. Laserové skenování patří stejně jako geodézie, kartografie, metody dálkového průzkumu, fotogrammetrie ad. mezi tzv. geotechnologie, které jsou, jak uvedeno výše, mezi sebou vzájemně provázány a částečně se překrývají. Jednotlivé metody nejsou proto izolované, a pokud například provádíme laserové skenování objektu, nutně potřebujeme zaměření vlíčovacích bodů.

Dokumentované objekty jsou následně pomocí specializovaných programů zobrazeny ve formě mračen bodů (*point clouds*), na jejichž základě se vytvářejí prostorové modely, se kterými se dále pracuje. Využití laserového skenování se postupem času dostalo z inženýrských oborů i do oblastí dokumentace v památkové péči, neboť důkladná znalost aktuálního stavu historického objektu je předpokladem pro jeho záchranu a uchování kulturního dědictví. Vedle památkové péče nelze zapomínat na *konzervativní* metodu archeologie, kde aplikace nových dokumentačních technologií má dnes již pevné místo jak v tuzemské, tak i v zahraniční archeologii. Předkládaná metodika využití laserového skenování si nenárokuje komplexní pokrytí jejího využití v památkové péči, ale představuje pouze základní část, která charakterizuje dokumentační metody v památkové péči.

1. 1. Úloha digitalizace a dokumentace v památkové péči

1. 1. 1. Definice pojmů

Digitalizace je proces, v rámci kterého se snímá do digitální podoby vizuální stránka dokumentovaného objektu. Prostorová digitalizace je také rozšířena o prostorovou informaci, tedy informaci o poloze snímaného objektu, jeho rozměrových proporcích, dispozicích a struktuře. Někdy opomíjenou informací je vedle prostorové polohy snímaného bodu charakteristika – vlastnost materiálu, charakterizovaná densitou plochy ve stupních šedi, místa kam dopadnul laserový paprsek. Využití této informace je ve stádiu výzkumu. Stanovená kvalita digitalizace by měla být v nejvyšším stupni a žádným způsobem nesmí být ve fyzickém kontaktu s digitalizovaným objektem, tedy na tomto objektu nesmí vytvářet dočasné či stálé změny, a to jak v době přípravy k digitalizaci, tak v jejím průběhu či po jejím skončení. Zvolená metoda digitalizace musí

být striktně bezkontaktní a ověřená, případně certifikovaná pro danou aplikaci.

Skenování je proces, při kterém zařízení zvané skener převádí vizuální stránku objektu do binární (numerické) virtuální podoby. Laserové skenování je pak ten samý proces, při kterém je však využíváno fyzikálních vlastností monochromatického světla o definovaných vlastnostech – laseru.

Výsledkem 3D prostorového skenování současnou technologií je vždy mračno bodů (*point clouds*). Pro každý bod tohoto mračna je známá jeho poloha vůči skenované pozici (poloha ohniska skeneru). Počet bodů jednoho skenu závisí, tak jako při 2D skenování, na šířce záběru, respektive úhlu snímání a na požadovaném rozlišení. Jeden sken z jedné pozice nepostačuje pro úplné 3D zobrazení celého snímaného objektu, neboť z ohniska je viditelná pouhá část povrchu objektu a jiná část je v zákrytu.

1.1.2. Výběr pojmů

- ▶ 3D sken – počítačový záznam trojrozměrného předmětu
- ▶ adjusted digital master – zpracovaná /postprodukovaná data určená pro archivaci
- ▶ archive – uložení a zálohování digitálního objektu na digitální médium
- ▶ CAD – jsou programy pro počítačem podporované projektování. Umožňují elektronicky rýsovat technické nákresy a modelovat objekty. Rozdělují se mezi 2D projekční nástroje a 3D modeláře.
- ▶ datace – série skenů jednoho objektu v časové řadě např. jeden rok
- ▶ digitalizační aparatura – soubor technologicko-technických prostředků potřebných pro zabezpečení vybraných digitalizačních prací – skener
- ▶ digitalizační tým – skupina pracovníků provádějících digitalizaci
- ▶ digitalizace – vytvoření digitálního záznamu informace v požadovaném formátu
- ▶ digitalizovaný objekt – snímaný objekt
- ▶ digitální médium – nejčastěji tzv. datasklad splňující nároky na archivaci, jako jsou např. duplicitní zálohování informací, práce pod záložními zdroji a zajištění dlouhodobé udržitelnosti uložených virtuálních dat
- ▶ digitální vizualizace – převod časoprostorových vizuálních vlastností (tvar, rozměry, druh povrchu, vnitřní struktura aj.) digitalizovaného objektu do digitálního záznamu v kvalitě, která umožní zprostředkovat úplnou informaci o zjevných nebo skrytých vlastnostech reálného objektu a umožní prohlížení či studium virtuálních dat

- ▶ digitální archiv – virtuální depozitář kulturních objektů
- ▶ digitální objekt – nejmenší nedělitelná množina digitální informace v daném systému aplikovaná na kulturní informační systémy. Jakýkoliv jednoznačně identifikovatelný objekt v digitálním uložišti obsahující data a metadata. Jedná se o vizuální data získaná snímáním daného objektu, zejména fotografický záběr, gigapixelový záběr získaný složením více klasických záběrů, stereofotografický záběr získaný složením dvou vůči sobě horizontálně posunutých klasických záběrů, 3D sken reprezentovaný plochou a nebo množinou bodů s příslušnou texturou povrchu ve formátu klasického záběru.
- ▶ digitální/vizuální zástupce – digitální objekt, který zprostředkovává informace umožňující percepci určitého komplexu zjevných a nebo skrytých vlastností (vizuálních, zvukových, prostorových) reálného objektu (nebo objektu existujícího v analogové podobě). Měl by být schopný poskytnout technicky maximum informací, které budou využitelné pro další vědecké zhodnocování, kulturní prezentaci nebo prezentaci a propagaci krajiny.
- ▶ LIDAR – „Light Detection and Ranging“, zařízení, které pracuje na podobném principu jako radar. Namísto rádiových vln využívá vln světelného záření, které se používá pro měření vzdálenosti laserovým paprskem snímaného bodu. Současná technologie umožňuje rychlost až 1 000 000 bodů za sekundu.
- ▶ metadata – data o datech, např. operátor skeneru, datum, čas, parametry skenů, apod.
- ▶ NURBS – Non-Uniform Rational Basis Spline (NURBS) je matematický model běžně používaný v počítačové grafice pro generování a reprezentování křivek a ploch, které nabízejí velkou flexibilitu a přesnost při manipulaci jak s analytickými, tak s volnými tvary.
- ▶ primary digital master – surová nezpracovaná data přímo ze skeneru
- ▶ postprocessing – následné zpracování získaných dat za účelem interpretace, prezentace, modelování a archivace
- ▶ virtuální rekonstrukce – vizualizace objektu na základě dobových záznamů a historických poznatků s využitím záznamu současného stavu. Rekonstruovaný záznam zobrazuje objekt tak, jak by vypadal v daném období.

1.2. Současný stav využívání metody laserového skenování v ČR a ve světě

Ačkoliv se vlastností laseru využívá v inženýrských oborech několik desetiletí, výrazný vzestup užití laserového skenování nastal na přelomu tisíciletí. Laserové skenovací systémy doplnily sestavu geodetických totálních stanic a staly se nedílnou součástí při dokumentaci prostředí, především se zvýšila přesnost a rychlost měření.

1.2.1. Stav v České republice

Historie laserového skenování v České republice se datuje od konce minulého století. Základem byl výzkum v oblasti laserů a moderní optiky (Vrbová et al. 1994) na půdě ČVUT Praha a jedno z prvních praktických využití laserové technologie v důlních podmínkách popisují Švec, Vitula (1986). Na přelomu století se využití laserového skenování rozšířilo v oblastech stavebnictví (Kašpar a kol. 2003) a metoda laserového skenování získala pevné místo v geodetických metodách, konkrétně v oblasti speciální geodézie (Štroner a kol. 2013). V současné době systémy laserového skenování disponuje většina společností zabývajících se geodézií, geologií, inženýrskými stavbami, důlním měřičtím, ad. (Kašpar, Křemen 2002). Stejně jako u ostatních geotechnologií se laserové skenování uplatňuje v oblasti dokumentace archeologického výzkumu a v památkové péči (Fišerová 2012). Postupně jsou realizovány dílčí úlohy v památkové péči, ve spolupráci s pracovníky památkové péče vznikají projekty laserového skenování a rozšiřuje se základna jednotlivých úloh (Bezděk a kol. 2011).

Na druhou stranu je dostupnost a především ekonomická náročnost této technologie omezená pro využití v památkové péči. Jednotlivé úlohy vznikají buď ve spolupráci s akademickou půdou, se specializovanými pracovišti, nebo jsou realizovány dílčí úlohy ve spolupráci s dodavateli skenerů, příp. se spolupracujícími subjekty.

1.2.2. Stav v zahraničí

Stav využívání laserového skenování v zahraničí je podstatně příznivější než v tuzemsku. Je to dáno větší dostupností nových technologií a také zkušenostmi z jejich využívání. Příkladů aplikací laserového skenování v oblasti památkové péče je velké množství a jednotlivé práce jsou dostupné na internetové síti. Uvedeme několik příkladů využití laserového skenování při dokumentaci hradů a jeskyní (Rüther, Chazan et al. 2009), základní teoretické postupy a případovou studii digitalizace soch popisují Pieraccini, Guidi et al. (2001), přehled aplikací laserového skenování v ochraně a dokumentaci památek podávají Yastikli (2007), Guarnieri, Milan et al. (2011), Haddad (2011), Mils (2011), Vacca, Deidda

et al. (2012). Významným subjektem v oblasti dokumentace památek, vývoje a aplikace nových metod při dokumentaci je světová organizace CIPA¹, která sdružuje jak jednotlivce, tak i subjekty z oblasti dokumentace. Souhrnnou prací využití metod při dokumentaci památek je práce Yahya Alshawabkeh, N. H. (2006).

1.2.3. Hodnocení a závěry současného stavu využívání laserového skenování v památkové péči

Implementace nových metod dokumentace v památkové péči přináší posun v poznání, zvýšení ochrany, objektivitu a přesnost dokumentovaných památek. Vedle těchto předností mají nové postupy i svá negativa. Jedním je finanční náročnost na aplikaci těchto nových dokumentačních metod. Jedná se o drahé přístroje, specializované programy a vysoké požadavky na výpočetní operace. Významnou roli hraje požadavek na informovanost pracovníků památkové péče o významu a dovednostech těchto geotechnologií. Není podmínkou a u laserového skenování to je skoro vyloučené, aby dokumentátor (památkář) ovládal skener, uměl prostorová data zpracovat a analyzovat. Tento přístup není běžný ani v zahraničí. Jak z analýzy zahraniční literatury vyplývá, naprostá většina publikovaných prací, které se zabývají aplikací laserového skenování při dokumentaci památek, je výsledkem vzájemné spolupráce specialistů na laserové skenování, na využití geotechnologií a odborných pracovníků památkové péče, kteří definují okruh otázek a stanoví zadání dané úlohy. Právě absence takovýchto zadání je v tuzemských podmínkách častým jevem a postup procesu je obrácen. Pořídí se prostorová data objektu a následně se *hledá a definuje zadání*.

1.3. Metoda laserového skenování

1.3.1. Rozdělení metod laserového skenování

Obecně lze říci, že ke skenování lze využít několik typů zařízení. Tato zařízení pracují na různých principech, mají různou přesnost, rychlost, dosah a využití. 3D skenery lze rozdělit do kategorií dle různých kritérií. Jednou z možností je dělení dle dosahu.

- ▶ letecké systémy (100 m – 1 km)
- ▶ pozemní systémy se středním dosahem (10 m až stovky m)
- ▶ pozemní systémy s krátkým dosahem (1 – 10 m)
- ▶ pozemní systémy s velmi krátkým dosahem (do 1 m)

Triangulační 3D skenery využívají měření z konců známé základny. Je několik technických řešení a kombinací, přičemž základní řešení jsou následující:

¹ <http://cipa.icomos.org>.

- ▶ jedna kamera a laser (laser a kamera jsou umístěny na základně, snímá se stopa laseru na objektu; otáčí se objekt nebo je otáčecím zrcátka vychylován laserový paprsek; je nutné měřit impulsním snímačem postup otáčení a vypočítat z něj patřičný úhel);
- ▶ dvě kamery a projektor strukturovaného světla (světlé a tmavé proužky pro usnadnění lokalizace a pro interpolaci);
- ▶ dvě kamery, které snímají rotující stopu laseru bez nutnosti znát úhel otáčení laserové stopy;
- ▶ jedna kamera pohybující se po určitém kroku na přesné základně (ryze optický princip využívající obrazovou korelaci).

Laserové skenery pro určení prostorové polohy bodu využívají obecnou prostorovou polární metodu. Na stanovisku skeneru je pro každý měřený bod automaticky zaznamenán horizontální a vertikální úhel a šikmá vzdálenost. Vzdálenost je měřena na základě vyslaného a předmětem odraženého paprsku laseru, přičemž je měření opakováno s vysokou frekvencí (umožněnou rychlostí světla). Pro měření prostorové vzdálenosti existují dvě základní technické modifikace:

- ▶ přímé měření vzdálenosti (tzv. „ranging scanner“) – čas letu laserového pulzu (je vyslán laserový pulz a měří se čas mezi vysláním pulzu a přijmutím odrazu, „time of flight“);
- ▶ porovnání fáze (je vyslán paprsek, který je modulován harmonickou vlnou a vzdálenost předmětu je vypočtena jako fázový rozdíl mezi vyslanou a přijatou vlnou).

Důležitou vlastností 3D laserového skeneru je tvar zorného pole. Zorné pole je maximální úhlový rozdíl krajních výstupních laserových paprsků a udává se ve stupních (ve vertikálním i v horizontálním směru). Zorné pole se u různých typů 3D laserových skenerů liší. Obecně je laserový paprsek naváděn dle programu na body rastru ve sloupcích a řádcích, přičemž se měří vzdálenost a vertikální a horizontální úhel. U kamerových skenerů je laserový paprsek naváděn pomocí systému dvou zrcadel či hranolů se vzájemně kolmými osami otáčení. Tento systém rozmítá laserový svazek do relativně malého zorného úhlu (podobné jako u fotoaparátů). Druhou možností je otáčení celé dálkoměrné součásti pomocí servomotorů. To umožňuje naskenovat téměř celé okolí a tyto skenery se nazývají panoramatické.

Laserový skener se skládá z laserového dálkoměru a skenovacího mechanismu. V dálkoměru je zabudován pulsní laser emitující záblesky infračerveného světla. Paprsek, vyslaný dálkoměrem, je odražen od povrchu měřeného objektu a vrací se zpět. Pomocí senzoru se zaznamená doba letu, respektive vzdálenost laseru a objektu. Světelné pulsy jsou vysílány vysokou frekvencí (až 120 000 Hz, neboli 120 000 měření/s). Skenovací mechanismus určuje směr vyslaného paprsku. K nasměrování

paprsku se používá např. rotující hranol s několika odraznými plochami. Druhý směr je u pozemních skenerů zajištěn otáčením celého přístroje kolem svislé osy, zatímco u leteckých systémů je druhý směr zajištěn pohybem letadla. Jeden řádek vznikne vychylováním paprsku v příčném směru vzhledem ke směru pohybu letadla a tím, jak se letadlo pohybuje, je další skenovaný řádek oproti předchozímu řádku v podélném směru posunutý. V poslední době je standardním vybavením laserového skeneru také digitální kalibrovaná kamera či přídatný digitální fotoaparát s vysokým rozlišením. Laserové skenery také dokáží při měření zaznamenat originální hodnoty odrazivosti od jednotlivých měřených bodů, čehož se dá využít při tvorbě věrného 3D modelu.

Z hlediska polohy stanoviště lze skenery rozdělit na letecké a pozemní, přičemž pozemní lze dále ještě dělit na mobilní či stacionární. Stacionární pozemní skenery bývají většinou součástí laboratoře, kdežto mobilní pozemní skenery se používají běžně v terénu, jsou snadno přenosné. Pozemní i letecké laserové skenery mají podobnou konstrukci (skener se skenujícím zrcátkem či hranolem). V případě leteckého skeneru však musí být vybavení doplněno ještě o GPS/IMU (kvůli pohybu letadla). Je to zařízení, kterým se zjišťuje přesná poloha a rotace skeneru během letu.

Na přesnost měření laserovým skenerem má vliv několik faktorů. Přesnost určení vzdálenosti a úhlů je ovlivněna kvalitou a funkcí samotného skeneru a zároveň vlivy vnějšími (např. atmosférické podmínky působící na prostorovou trajektorii laserového svazku). Na měření má vliv také povrch skenovaného objektu. Různé povrchy mají totiž různou schopnost odrazet optické záření, která závisí na vlastnostech dopadajícího záření (polarizace a vlnová délka), na materiálových vlastnostech povrchu (např. odrazivost a barva) a také na geometrických vlastnostech povrchu (zejména drsnost). Nejdůležitější složkou odraženého záření je záření odražené zpět. K odrazu zpět na skener dochází jen při difúzním odrazu, pomineme-li případ kolmo dopadajícího svazku na zrcadlový povrch. Také vliv geometrie skenovaných objektů na měření je třeba při uvažování přesnosti měření brát v potaz. Při měření laserovým skenerem může dojít ke stejné situaci jako při měření totální stanicí s pasivním odrazem. Jako příklad lze uvést měření na rovinu cíle, jejíž normála není rovnoběžná s dráhou svazku. V případě, že je odchylka normály a dráhy svazku příliš velká (blížíci se 90°), záření se neodrazí zpět směrem ke skeneru, popřípadě dojde k dvoj- a vícenásobnému odrazu. Se zvyšujícím se úhlem dopadu hodnota intenzity odraženého záření směrem ke skeneru klesá. Vzdálenost pak může být změřena chybně, či vůbec. Také měření ostrých hran objektu může být nepřesné. Skenovaný laserový svazek má v dané vzdálenosti určitý průměr a v případě dopadu na rozhraní ploch je určená vzdálenost průměrnou vzdáleností oblasti dopadu svazku.

Zejména při měření složitých či velkých objektů se měření skládá z několika set skenů, které se pomocí vřícovacích bodů spojí v jeden celek – mračno bodů. Proto také přesnost zaměření vřícovacích bodů má vliv na celkovou přesnost měření laserovým skenerem.

Prioritní vlastnosti technologie z hlediska snímání objektu jsou:

- ▶ bezkontaktnost;
- ▶ neškodnost osvětlovacího a snímáního média (laser);
- ▶ stálost fyzikálních podmínek před, po a během procesu skenování;
- ▶ zabezpečení dostatečného osvětlení snímáního objektu.

Z hlediska výstupu požadovaného pro tvorbu digitálního objektu jsou důležité:

- ▶ citlivost technologie na specifických materiálech;
- ▶ dosažitelná kvalita snímání (hustota záznamu, barevná hloubka, ostrost);
- ▶ normování a opakovatelnost celého procesu;
- ▶ možnost porovnání vizuálního záznamu s originálem přímo na místě;
- ▶ softwarové ovládání za účelem automatizace;
- ▶ automatické generování metadat;
- ▶ okamžité umístění dat do prostředí internetu nebo na externí datové médium.

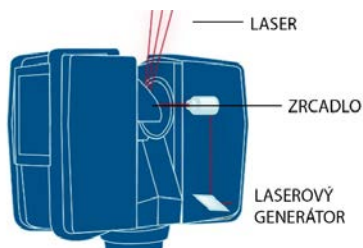
Z hlediska procesu jsou důležité:

- ▶ možnost automatizace procesu snímání,
- ▶ částečná mobilita – snadná instalace a deinstalace,
- ▶ částečná energetická nezávislost (externí napájení).

1.3.2. Používané systémy laserového skenování

V oblasti výrobců laserových skenovacích systémů zauímají ve světě přední místo společnosti zabývající se vývojem a výrobou geodetických přístrojů. Patří mezi ně švýcarská firma Leica, americká společnost Trimble, rakouská společnost Rigel a japonská Minolta. Mezi specializované firmy patří také společnosti Mensi, Optech, Breuckmann, Zoller + Fröhlich a další. Jmenované firmy vyrábějí prostorové skenery jak pro pozemní, tak i pro letecké skenování. Ne každý skener však lze využít pro oblast dokumentace památek. Po odzkoušení několika typů skenerů jsme se v naší metodice zaměřili na využití laserového skeneru od americké firmy FARO. Jeho výhodou je velikost, váha, mobilita, přesnost a jednoduché uživatelské prostředí.

Laserový skener lze v poslední době definovat jako kompaktní přístroj, který je mobilní a připravený pro práci v terénu. Nejvíce se osvědčil 3D skener společnosti FARO typové označení Focus, obr. 1. Nyní je na-



Obr. 1. Prostorový skener FARO Focus a jeho hlavní součásti.

bízen ve dvou modifikacích dle dosahu, a to 130 m a 330 m od stanoviště skeneru. Tento osvědčený přístroj je momentálně nejmenší a nejlehčí laserový pozemní skener na trhu a toto kritérium se výrazně promítlo do mobility a možností použití.

Výhody systému FARO Focus:

- ▶ laserový skener postavený na principu fázového posunu laserového paprsku (třída laseru 1);
- ▶ rychlost snímání až 976.000 bodů za sekundu;
- ▶ schopnost zachycení detailu je pod 1 mm;
- ▶ interní barevný fotoaparát s výsledným sférickým rozlišením 70 Mpix;
- ▶ celková hmotnost s interní baterií 5,2 kg, výdrž jedné baterie je 4,5 hodin;
- ▶ velikosti skeneru velmi kompaktní 24 x 20 x 10 cm;
- ▶ záznamové médium SD karta;
- ▶ interní senzory: GPS, kompas, výškoměr, teplotní čidlo;
- ▶ ovládání přes dotykový display na skeneru či bezdrátově pomocí WIFI;
- ▶ doba skenování od 50 vteřin po 2 hodiny na jeden skenovací cyklus.

Skener se dodává se sadou sférických terčů a 2D terčů, které se rozmísťují do okolního prostoru digitalizovaného objektu. Vždy musí být ale-

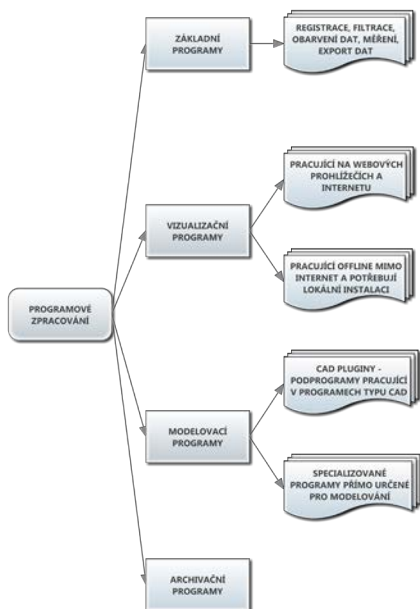
spoň tři terče viditelné z jedné pozice skeneru. Terče se později využívají v procesu zvaném registrace – pozicování, resp. georeference. Skener je možné používat i bez těchto sférických a plošných terčů. Absence jmenovaných pomůcek má vliv na výslednou přesnost spojení mračen bodů a následné zpracování, proto se doporučuje tyto vřícovací body (objekty) používat.

Ovládání skeneru je velmi intuitivní a rychlé. Skener není nutné vypínat při přesouvání na další pozici skenování, což zrychluje sběr dat. Přístroj není nutné horizontovat, pokud je postaven do maximální odchylky 5° od horizontální roviny. V případě přesahu 5° se před skenováním na displeji skeneru objeví upozornění, zda chce uživatel skenovat i z této pozice.

Interní GPS čip slouží primárně k procesu registrace, ale přesnost takto získané polohy je odvislá od síly a kvality GPS signálu v místě skenování, proto se doporučuje využít geodetické GPS s RTK korekcí v rámci přípravy projektu, která je popsána níže.

1.3.3. Programové vybavení na zpracování 3D datových souborů

Programové vybavení je nedílnou součástí celého procesu digitalizace, na kterém spočívá hlavní úloha, zpracování surových dat nasníma-

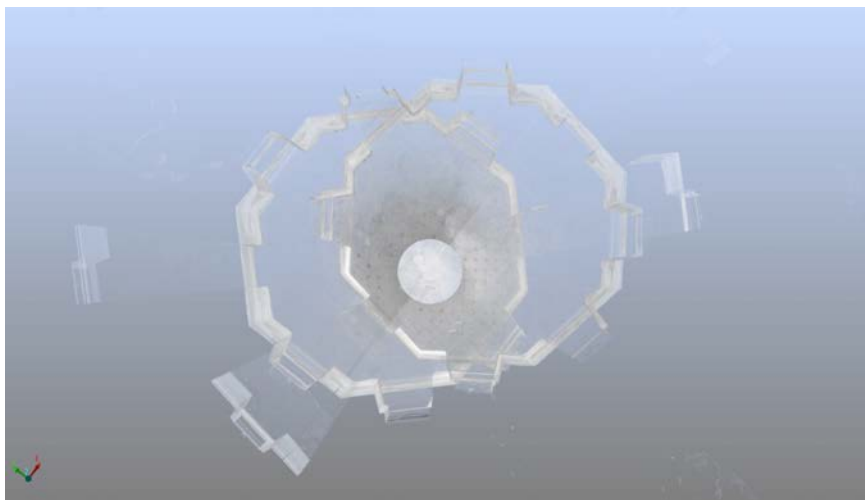


Obr. 2. Základní dělení programového vybavení používaného při zpracování 3D dat.

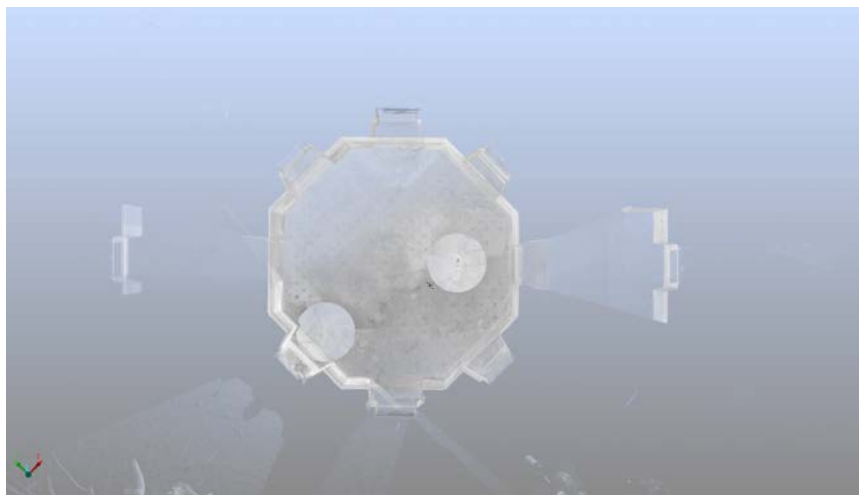
ných 3D skenerem. Je pravidlem, že před zpracováním dat se archivují veškerá surová data, tak jak byla získána ze skeneru, a to nejlépe před jejich prvním otevřením v jakémkoliv programu. Data se archivují na digitální médium, do prostředí datového skladu apod. Jsou úlohy, které nelze opakovat, proto je záloha dat velmi důležitá. Rozdělení programového vybavení je na obr. 2.

1.3.4. Základní programy

Základní programy jsou součástí dodávky u většiny laserových skenerů. Jejich primárním cílem je načtení a prvotní vizualizace nasnímaných surových dat, včetně základních operací (úprava, vyčištění, ad.). Druhým krokem při zpracování prostorových dat je takzvaný proces registrace skenů neboli spojení jednotlivých skenů z různých stanovisek do jednoho lokálního kartézského souřadného systému, který definuje každý bod souřadnicemi X, Y, Z ke středu souřadného systému a který je nejčastěji definován zadavatelem digitalizačních prací či GPS pozicí objektu, obr. 3 a 4.



Obr. 3. Dvě mračna bodů, která jsou před registrací (oba skeny jsou v jednom ohnisku).



Obr. 4. Stejná mračna bodů, po registraci.

Výstupem procesu registrace není pouze zapozicované mračno bodů, ale také protokol o registraci, který může mít různé podoby, a to od tabulky až po rozsáhlé statistiky o transformačním postupu a řešení, včetně informace o odchylkách transformace, obr. 5.

/Scans/ScanManager

ScanManager Scan Results Scan Point Tensions

Full Hierarchy ☐

Cluster/Scan 1	Cluster/Scan 2	Mean [mm]	< 4 mm [%]	Overlap [%]	Used Points	Details
Milesov_gloriet_002	Milesov_gloriet...	6.86	31.8	71.9	124203	
Milesov_gloriet_003	Milesov_gloriet...	1.194	93.5	67.6	109276	

Overall Statistics

Mean: [mm]

< 4 mm: [%]

Get Apply OK Cancel

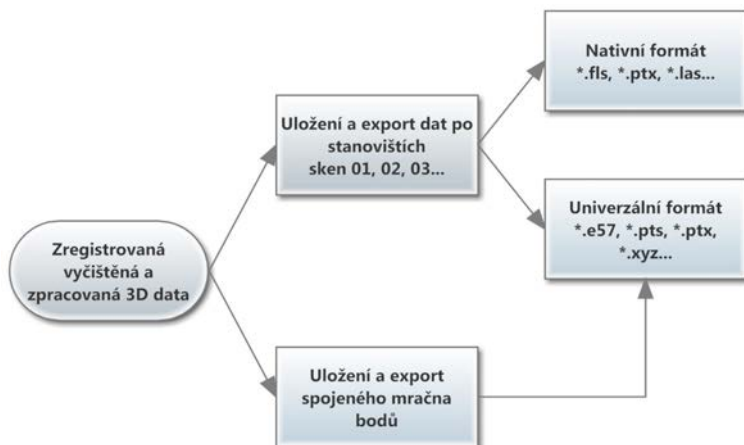
Obr. 5. Ukázka části registračního protokolu – výsledek provedené registrace.

Protokol o registraci musí však vždy obsahovat tyto údaje:

- názvy skenů, které byly registrovány;
- rozlišení a technická data skenů (datum, čas, pozice, operátor, projekt, nastavení skeneru atd.);
- zvolená metoda registrace a její popis (metoda RPS, metoda Best fit, jiná metoda);
- vlastní odchylka provedené registrace;
- maximální odchylka projektu.

Další funkcí základních programů je čištění dat. Čištěním se rozumí mazání nepotřebných dat, jako je mazání okolního prostředí či nepotřebných dat získaných v průběhu digitalizace objektu. Právě z důvodu odstranění virtuálních dat, který je často nevratný, je důležité archivovat data získaná přímo skenerem bez vnějšího zásahu, jakožto cenný zdroj surových informací. Pokud je zadána zakázka 3D digitalizace mělo by poskytnutí archivu surových dat být součástí smlouvy o dílo a tento archiv by měl být archivován na straně zadavatele.

Po základním zpracování dat je nutné celý projekt uložit a exportovat. Opět by měl být tlak na dodavatele 3D digitalizace, aby odevzdával zpracovaný projekt v několika podobách virtuálních dat. Následné programy, které umožňují modelování, vizualizaci a archivaci dat, většinou pracují přímo s daty výrobce, například pro 3D skenery FARO se jedná o formát *.FLS, u skenerů LEICA je to formát *.PTX, u skenerů OPTECH je to formát *.LAS, obr. 6. Je standardem, že dodavatel dodává data po jednotlivých stanovištích a dále spojený projekt, tedy jedno spojené mračno bodů. Důvodem je následná práce s daty, která je natolik různorodá, že je potřeba mít data v těchto podobách.

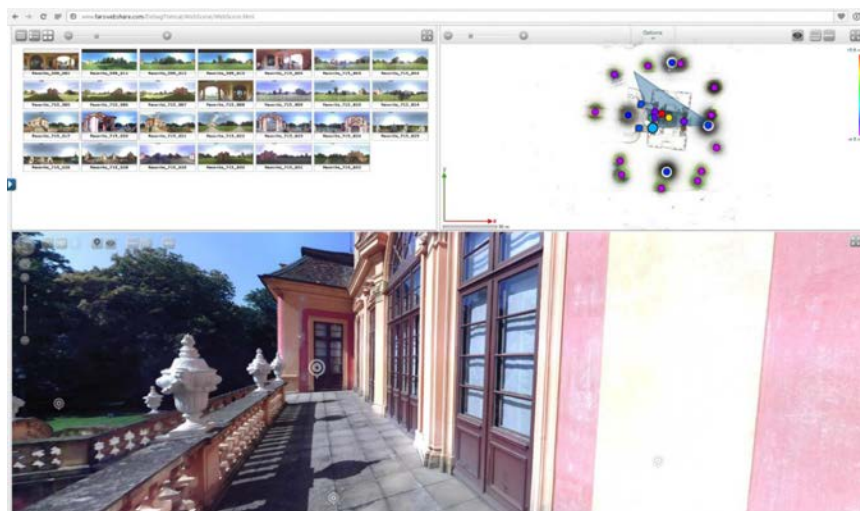


Obr. 6. Proces exportu dat ze základních programů.

1.3.5. Vizualizační programy

Hlavní funkcí vizualizačních programů je zobrazování přímo mračen bodů nebo již hotových prostorových modelů dokumentovaných objektů. Obecně je lze rozdělit do dvou skupin, a to na programy pracující v prostředí internetu či intranetu, k němuž uživatelé přistupují pomocí HTML protokolu – webového rozhraní, a programy pracující lokálně na počítači uživatele, u kterých je nutná jejich instalace a jsou obecně náročnější na výkon počítače.

Vizualizační webové programy generují po načtení mračen bodů HTML kód, který je následně odeslán na webový server. Tento kód umožňuje správu projektu a na základě dotazů klienta vizualizuje dané prostorové scény. Většinou jsou pro tyto webové prohlížeče typická tři okna, a to okno skenů, okno s mapovým podkladem a okno s panoramatickým snímkem generovaným jednotlivě z každého stanoviště skeneru, obr. 7. Vše je často postavené na interaktivní platformě. Virtuální prohlídka dále může mít další funkce, jako je vkládání ikon, takzvaných hotspotů, které se zobrazují na skenech a po kliknutí přesměrují uživatele například na fotografické galerie, popisy, dokumenty, plánovou dokumentaci, skiey a další informační materiál. Další funkcí může být měření délek a ploch v půdorysných či mapových oknech. Příkladem takových programů je PointCAB, Faro WebShare, Leica TruView a další.



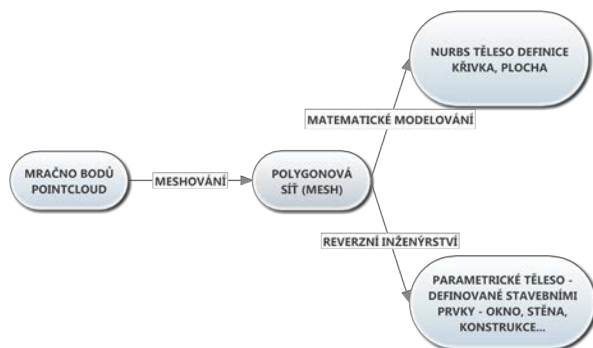
Obr. 7. Ukázka webového vizualizačního programu FARO WEBShare.

Ostatní vizualizační programy je nutné instalovat na pracovní stanici uživatele a chod programu je závislý na výpočetním výkonu stanice. Hlavní funkcí je přímá vizualizace 3D dat a tvorba virtuálních prohlídek. Jedná se například o produkty MeshLab, Faro Scene LT, Pointools, Arena4D, Autodesk RECAP a další. Tyto programy umožňují využívání základních funkcí jako je měření délek a ploch a také export označených částí dat do univerzálních formátů. Systémy jsou velmi vhodné pro profesionální vizualizaci mračen bodů jakožto základního produktu 3D digitalizace.

Samostatnou částí této oblasti je možnost generace interaktivních dokumentů jako je oblíbený formát 3D PDF, který umožňuje například program Adobe Acrobat PRO. Tento software poskytuje do předpřipravených šablon dokumentů ve formátu PDF vkládání 3D obsahu. Na straně uživatele pak již stačí instalace programu Adobe PDF Reader, který je dostupný zdarma a často je již na pracovní stanici využíván k jiným běžným účelům. Tento způsob vizualizace je vhodný pouze pro již hotové modely a existují velikostní limity, které neumožňují vizualizaci velkoobjemových mračen bodů a rozsáhlých objektů. Systém je velmi vhodný pro vizualizaci částí, detailů apod.

1.3.6. Modelovací programy

Hlavní funkcí modelovacích programů je vytvoření takzvaného 3D modelu. Mračno bodů je definováno velkým množstvím bodů, které byly zaměřeny a jsou vizualizovány v prostoru. Model je již těleso, které může být definováno takzvanou polygonovou sítí či nejvyšší formou – inteligentním modelem. Objekty, které jsou geometricky nerovné (socha) se modelují pomocí NURBS ploch (viz slovník pojmů), obr. 8. Objekty geometricky rovné (dům) se modelují pomocí parametrických těles. Ukázky výstupů v jednotlivých formách na obr. 9 a 10.



Obr. 8. Schéma druhů modelování a jeho postupu.



Obr. 9. Ukázka dat: mračno bodů (vlevo), polygonová síť (vpravo).



Obr. 10. Ukázka dat: finální model kalvárie v Milešově popsáný pomocí NURBS ploch.

Modelování přináší následující výhody:

- ▶ sníží se výrazně objem dat, a to až o 80 %;
- ▶ interaktivní prohlížení modelu není tak náročné na výpočet oproti polygonové síti či dokonce mračnu bodů;
- ▶ s inteligentními modely lze dále pracovat, vytvářet analýzy (statika, pevnost atd.);
- ▶ lze provádět výpočty objemů těles;
- ▶ výslednému modelu lze přiřazovat texturu;
- ▶ je možné model animovat a pracovat se světlem (nasvícení, simulace denní doby atd.);
- ▶ lze je tisknout pomocí 3D tisku.

Modelovací programy lze obecně rozdělit do dvou hlavních skupin. Jedná o skupinu podprogramů (pluginů) do kreslicích programů CAD (viz slovník) a skupinu specializovaných programů vytvořených přímo na práci s 3D daty z prostorových skenerů.

Zástupci CAD podprogramů jsou například německý program KUBIT, americký POINTCLOUD 4RHINO nebo švýcarský Leica CloudWorx. Tyto programy umožňují do již zakoupených a uživatelem používaných kreslicích programů nainstalovat další funkce a rozšířit tak jejich funkčnost. Hlavní výhodou jsou nižší pořizovací náklady a především to, že uživatel pracuje v jemu známém prostředí kreslicího programu, odpadá tedy nutnost seznamovat se s novým programem a učit se jej. Často jsou tyto podprogramy již specializované na určitý druh modelování (model terénu a jeho vizualizace, technologické celky, důlní činnost, ad.), a tak je jejich funkcionalita často omezena na vybrané aplikace.

Specializované programy lze dále dělit dle různých kritérií, například zda jsou zdarma šiřitelné (Opensource) a nebo placené. Zástupcem volně šiřitelných programů je MeshLAB či CloudCompare. Jedná se o velmi kvalitní programy, které komunita programátorů stále rozšiřuje a zdokonaluje. Nevýhodou těchto programů je podpora založená na uživatelských fórech, programy jsou bez záruky a pro profesionální použití jsou limitovány například velikostí načtených dat.

Zástupce placených profesionálních programů je 3D Geomagic Design X, který stojí na vrcholu modelovacích programů. V programu jsou obsaženy všechny funkce potřebné při zpracování 3D dat. Jádro programu bylo postaveno přímo pro zpracování dat z 3D skenů, a tak je program stabilní, výkonný a velmi funkční. Program umožňuje tvorbu velmi kvalitních polygonových sítí a dále modelování pomocí NURBS ploch či pomocí reverzního inženýrství. Program byl navržen pro používání jak na pracovní stanici, tak na přenosném počítači, limitující výkon počítače není tedy zásadní nevýhodou, jako je tomu u ostatních programů. Program se stejnými funkcemi je i PolyWorks.

Silným nástrojem pro tvorbu polygonových sítí a propojení s digitální vícesnímkovou fotogrammetrií je software slovenské společnosti pod názvem Capturing Reality. Jedná se o produkt, který propojuje dvě hlavní metody sběru dat, laserové skenování a fotogrammetrii, a umožňuje vytváření polygonových sítí s texturou. Tento produkt spojuje hlavní výhody obou metod.

1.3.7. Kritéria výběru předmětů a objektů pro 3D digitalizaci

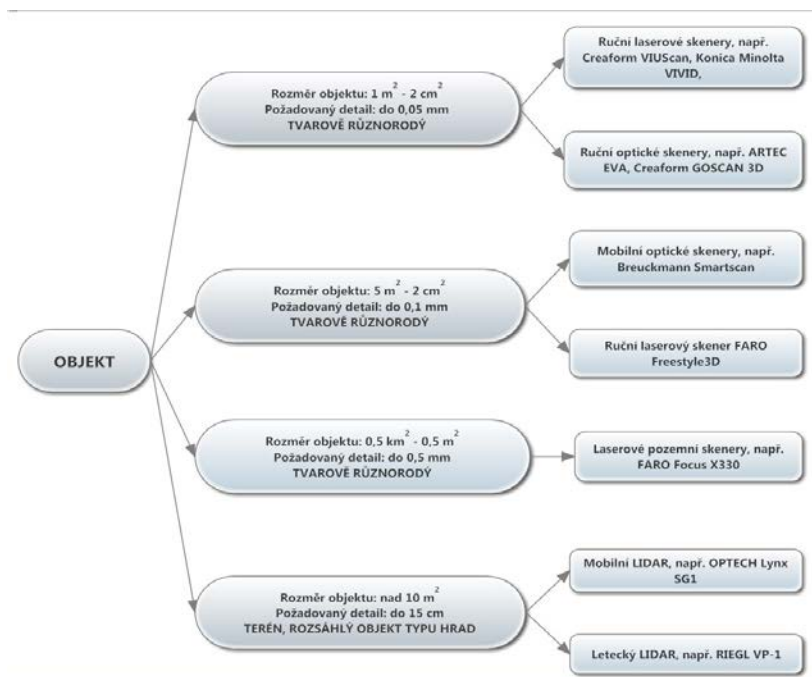
Obecná kritéria

Nelze nebo jen velmi omezeně lze skenovat:

- ▶ lesklé předměty – například sklo, porcelán, vyleštěný chrom;
- ▶ mokré objekty – které se lesknou;
- ▶ černé lesklé povrchy – laky, plasty a další.

Pokud je potřeba dokumentace uvedených předmětů, používají se pracovní postupy, při nichž se plocha pokryje speciálním práškem, a tím je umožněno skenování. Jedná se však o krajní případy, při kterých dochází k narušení předmětu a jeho možnému poškození.

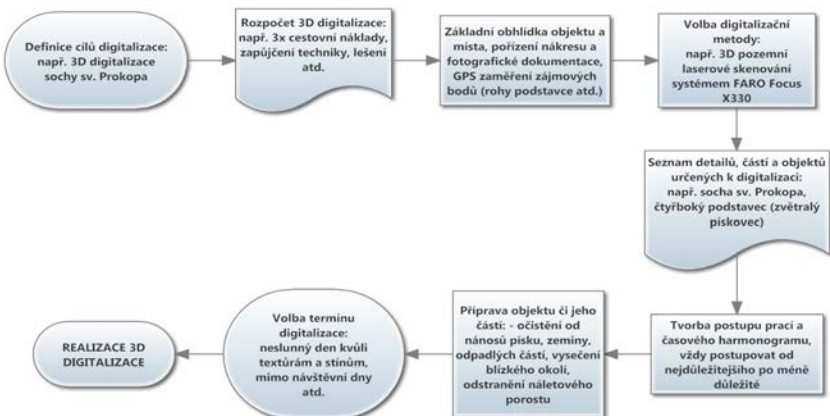
Kritéria závislá na zvolené metodě digitalizace, obr. 11.



Obr. 11. Schéma možné volby digitalizační metody.

1.3.8. Příprava projektu digitalizace a sběru prostorových dat

Sběr 3D dat je završením předem definovaného postupu prací a příprav, které musí předcházet samotnému skenování. Bez těchto přípravných prací jsou získaná data neúplná či nevhodná pro další zpracování. Ve schématu níže je stručně popsán postup přípravy pro sběr dat, obr. 12.



Obr. 12. Schéma přípravných prací.

Jednou z důležitých částí je zamezení pohybu osob u skenovaného objektu v době realizace. Pokud nelze tento bod splnit, je snaha alespoň o omezený pohyb osob. Získaná data budou jinak vykazovat značný šum, který ve většině případů lze odstranit programovým zpracováním dat, ale celý projekt se neúměrně časově a také finančně rozroste.

Nedílnou součástí přípravy 3D digitalizace je samotná prohlídka objektu, pořízení nákresů a fotodokumentace. Sběr dat také urychlí vytvoření geodetické sítě bodů, a to pomocí metody GPS nebo geodeticky pomocí totální stanice. Zaměřují se jednotlivé polohy skeneru (stanoviška), vlivovací body sloužící pro pozicování v daném souřadnicovém systému. Pro přesné určení středu skenování má například skener FARO speciální geodetický nástavec, na který se umístí odrazné hranoly a pomocí totální stanice se zaměří a následně se výpočtem určí souřadnice středu skenování.

Pozdějším zákresem předpokládaných stanovišť skeneru do půdorysných zákresů a odhadem překryvů skenů lze kvalitně připravit a zrychlit samotný sběr dat, a to až na polovinu. Výpočet překryvů může snížit celkový počet skenů.

Pokud je příprava sběru dat provedena správně, zrychlí se a především zkvalitní sběr dat. Vždy se doporučuje začínat skenovat od nejdůle-

žitějších částí (oltář, náhrobek, přední část sochy) a postupovat k méně důležitým (okolí sochy, přiléhající objekty a podobně).

1.3.9. Realizace projektu digitalizace v terénu

Projekt se provádí dle přípravy a v průběhu sběru dat se vyplňuje formulář, obr. 13, se zákresem situace, pozice postavení 3D skeneru a zaměřenými geodetickými body, který se archivuje. Doporučuje se formulář naskenovat a uložit u jednotlivých stanovisek skeneru.

ZÁZNAM O SBĚRU 3D DAT		č.	KÓD MĚŘENÍ
OZNAČENÍ PROJEKTU			
OZNAČENÍ OBJEKTU		ČÁST	
DATA 3D SKENOVÁNÍ - NÁZEV SOUBORU:			
GEODETIČKÁ DATA, DATA GPS - NÁZEV SOUBORU:			
POUŽITÁ TECHNIKA:			
NÁČRT:			
ORIENTACE			
POZNÁMKY:			
ZÚČASTNĚNÉ OSOBY:			
DATUM:		PROVEDL:	

© 2014 NPÚ, pracoviště

Obr. 13 Návrh formuláře.

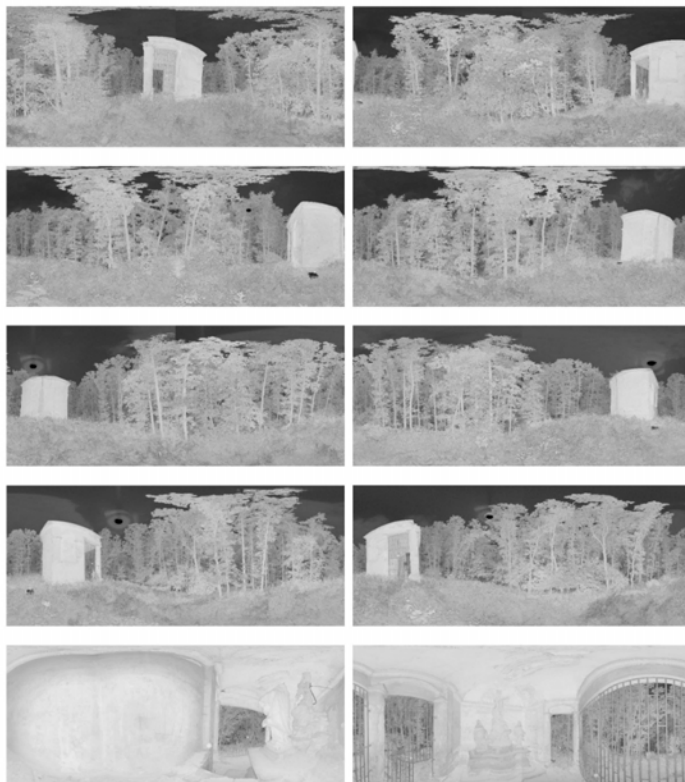
Po ukončení sběru dat se bezprostředně vyhotoví zpráva z terénního měření dle vzoru, ukázka na obr. 14. Důležité jsou informace o použitém skeneru, nastavení a rozsahu provedeného skenování, dále jsou součástí náhledy na data například ve sférickém rozvinu. Všechny tyto podpůrné informace slouží k objektivnímu vypracování projektu dokumentace pomocí laserového skenování, a to i v budoucnu, kdy se k datům musíme vrátit a provést nové vyhodnocení.

Zpráva z terénního měření

DATUM: 28.6.2013
MÍSTO: k.ú. Milešov - kalvárie
PRACOVNÍCI: mgr. Zdeněk MAREK

TECHNOLOGIE: FARO FOCUS 3DS
POZNÁMKY: ser. č. LLS235362142
rozlišení 3mm/10m
kvalita x4

Cílem terénního měření bylo 3D skenování vnějšího pláště kalvárie a doskenování vnitřního sousouší se zaměřením na vrchní struktury. Celkem bylo vytvořeno 20 skenů.



Strana 1/2

Obr. 14. Zpráva z terénního měření.

1.4. Ukázka možných publikací výstupů 3D digitalizace

Jedním z výstupů dokumentace laserového skenování je jejich vizualizace a publikace. Většinou se jedná o 2D prezentaci (tisková podoba), a pokud má uživatel příslušné programové vybavení, lze vizualizovat dokumentované objekty i ve 3D, např. 3D PDF formát, v prostředí počítače.

1.4.1. Socha svatého Antonína Paduánského (volně stojící drobná památka)

Sběr dat byl proveden v jednom termínu a trval včetně příprav dva pracovní dny. Celkové zpracování do finální podoby trvalo pět pracovních dnů, obr. 15–17.



Obr. 15. Finální model po nasvícení – pohled ze 45° na přední část a ze 45° na zadní část.



Obr. 16. Čtveřice ISO pohledů (ortogonálních) na finální model s měřítkem.



Obr. 17. Čtveřice ISO pohledů (ortogonálních) na detail modelu s měřítkem.

Sběr dat byl proveden ve dvou termínech a trval vždy dva pracovní dny. Digitalizace proběhla ve dvou termínech před a po restaurátorském zásahu. Celkové zpracování jednoho modelu do finální podoby trvalo pět pracovních dnů. Primárním cílem bylo dokumentovat stav památky před restaurátorským zásahem. Druhotný záměr byl porovnat stav památky před a po zásahu, tyto komparovat a určit míru změn na památce, obr. 18–21.



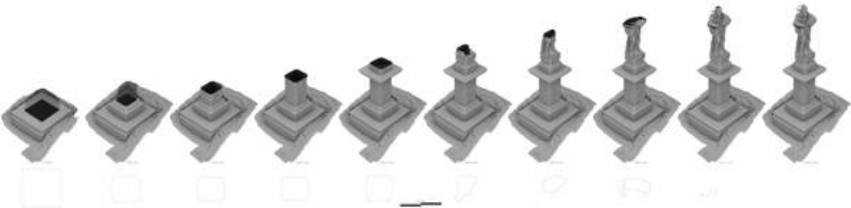
Obr. 18. Finální model po nasvícení – ortografické pohledy +/- 45°.



Obr. 19. Čtyři základní měrné ortografické pohledy na celek.



Obr. 20. Detail 3D modelu s texturou – tesaný německý nápis v oblasti podstavce.



Obr. 21. Série horizontálních řezů vedených ve vzdálenosti 50 cm od základní desky podstavce.

1.4.2. Vstupní kamenná brána hradu Ostrý u Milešova

Sběr dat byl proveden v jednom dni z celkem čtyř stanovisek. Cílem byla dokumentace vstupní brány hradu, její 3D vizualizace. Celkové zpracování měrných ortografických pohledů trvalo čtyři hodiny. Výstupy byly dále vektorizovány a získané výsledky slouží jako podklad pro zpracování dokumentace. Pro tvorbu dokumentace nebylo možné využít standardně využívané metody jednosnímkové fotogrammetrie, a to z důvodu špatných výhledových podmínek a komplikovaného přístupu k objektu digitalizace. Jedním z výstupů je fotoplán, který umožňuje měření objektu, obr. 22.



Obr. 22. Fotoplán vnitřní části vstupní brány.

2. NÁVRH METODIKY PRŮSEKOVÉ FOTOGRAMMETRIE

PŘI DOKUMENTACI PAMÁTEK

2.1. Úvod

Tato metodika je souhrnem poznatků získaných při dokumentaci památkových objektů v obci Milešov a jejím okolí. V rámci projektu byla pro dokumentaci současného stavu některých vybraných památkových objektů zvolena geodetická metoda pozemní fotogrammetrie, tzv. průseková metoda. Jedná o jednoduchý a rychlý způsob pořízení informací o zájmovém objektu s možností vytvoření kvalitních prostorových výstupů.

S rozvojem digitálních technologií a počítačové grafiky nastalo v posledních letech období zvýšeného zájmu o geodetickou metodu průsekové fotogrammetrie (PF) v její digitální podobě. Softwarové společnosti, které se zabývají vývojem specializovaného programového vybavení pro zpracování podkladů z fotogrammetrického měření, přinášejí na trh stále výkonnější a propracovanější řešení. S aplikováním této metody pořizování primárních dat je možné se v současné době setkat v širokém spektru technických i humanitních oborů.

Jedním ze současných trendů softwarových řešení je například aplikování *cloudových* technologií, kdy počítač slouží k ovládání programu a vlastní výpočty probíhají na aplikačním serveru. Toto řešení využívá při vývoji vlastního software i společnost Autodesk. Autodesk Catch123D je programový nástroj, který využívá metody digitální průsekové fotogrammetrie pro vytváření 3D modelů zájmových objektů z fotografií. Použití tohoto jednoduchého a na ovládání nenáročného programu je pro registrované uživatele bezplatné.

Po praktických zkušenostech zvolili autoři jako základní softwarovou platformu pro vytváření 3D modelů památkových objektů Agisoft Photoscan vytvářený ruskou společností Agisoft LLC a programový systém Autodesk Catch 123, který je uživatelům ve své základní verzi poskytován bezplatně.

V každém případě platí skutečnost, že v tomto textu popisované základní postupy a zákonitosti aplikované při pořizování primárních dat (snímky, měření souřadnic a vzdáleností) a jejich následné zpracování jsou univerzálně použitelné i v dalších k tomuto účelu určených programech.

2.2. Geodetická metoda fotogrammetrie z historického pohledu

První zmínky o využití fotografických snímků pro získání informací o měřených objektech pocházejí z období druhé poloviny 19. století.

V roce 1904 firma Zeiss Jena zkonstruovala fototeodolit 19/1318, který se pod názvem PhoTeo vyráběl až do šedesátých let minulého století, kdy byl nahrazen modernějšími kamerami typu UMK. V roce 1901 byl vytvořen první stereokomparátor, který umožňoval provádět stereoskopická měření (Pavelka 2001). Rozpoutání I. světové války a související rozvoj vojenského letectví byly startovacím impulsem pro bouřlivý vývoj vojenských aplikací leteckého mapování a průzkumu – aplikovanou leteckou fotogrammetrii, dále rozvíjenou v průběhu II. světové války, kdy jejím hlavním účelem byly sledování a vyhodnocování určených nepřátelských objektů.

Od té doby do současnosti zaznamenala technika pro pořizování měřických snímků i technologie jejich zpracování velký pokrok. Vedle letadel, která jsou používána k leteckému fotogrammetrickému snímkování je pro menší a speciální projekty stále více využíváno dálkově řízených malých letadel a vrtulníků (UAV – Unmanned Aerial Vehicle). Neustále se zlepšující parametry digitálních fotoaparátů, jejich cenová dostupnost a existence programů pro přímé vyhodnocení 3D modelů z fotografií – měřických snímků zvyšují možnost využití potenciálu digitální fotogrammetrie (DF) i širší odbornou veřejností.

2.2.1. Stav využívání fotogrammetrie v ČR

V oblasti dokumentace památek mají fotogrammetrické metody již několik desetiletí své pevné místo. Fotografie je od svého počátku metodou dokumentace stavu, tvaru, barvy a dalších vlastností snímáných objektů a prostředí. Často se využívá jednosnímková fotogrammetrie (Hodač 2011), stereofotogrammetrie k vytvoření 3D modelu objektu a jeho prostorového vyhodnocování a v posledních letech i metoda fotogrammetrie průsekové (Pavelka 2001).

2.2.2. Stav využívání fotogrammetrie ve světě

Je obdobný jako v tuzemsku. Jsou používány různé metody a postupy dokumentace, včetně vytváření 3D modelů, jejich vizualizace a prezentace. Se zvyšující se kvalitou fotografických přístrojů (plnoformátové digitální zrcadlovky, digitální fotografické stěny, ad.) se stále zvyšuje kvalita a rozlišení snímků. Na druhou stranu tento vývoj klade vysoké nároky na výpočetní techniku a uživatele.

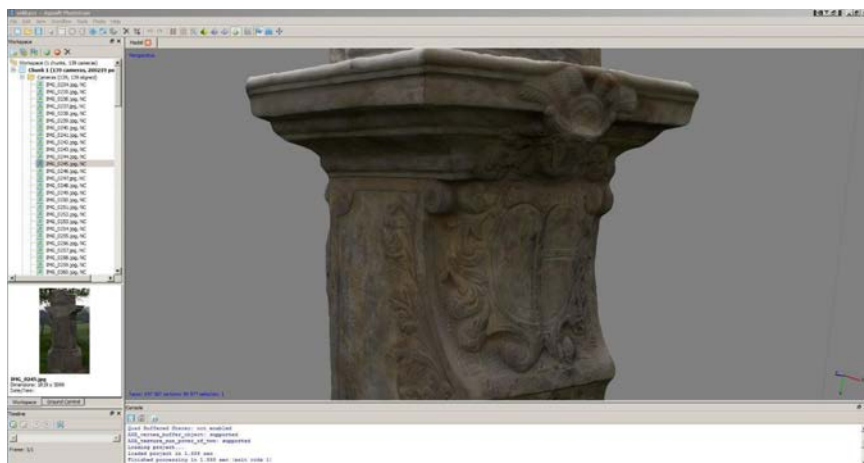
Fotografie je i nedílnou součástí při dokumentaci archeologických výzkumů. S rozvojem digitální fotografie, vysokého rozlišení a tím i zvýšení celkové kvality fotografie nastupují výpočetní metody pro tvorbu 3D modelů objektů, animace a tvorbu např. 3D panoramat (Schuhr, et al. 2013; d'Annibalea, Malinverni, 2013).

2.3. Programové vybavení pro průsekovou fotogrammetrii

Na softwarovém trhu je k dispozici řada programů pro profesionální zpracování podkladů z leteckého nebo pozemního fotogrammetrického snímkování. Obecně lze konstatovat, že zejména v posledních několika letech zaznamenala tato speciální softwarová řešení výrazné pokroky ve své funkčnosti i výkonu. V současné době se odborná veřejnost může setkat i s velmi jednoduchými softwarovými cloudovými řešeními, která umožňují vytvářet 3D modely zájmových objektů z fotografií (měřických snímků).

Nabídka programů pro průsekovou fotogrammetrii je široká. Autoři se v této metodice zmíní o dvou programech (komerčním a volně dostupném), které prakticky využívají při dokumentaci památkových objektů.

Jako komerční produkt byl vybrán programový systém Agisoft Photoscan², který je určen pro vytváření prostorových modelů zájmových objektů metodou obrazové korelace (Jiroušek 2013). Základními vstupy pro práci s tímto programem jsou měřické snímky (digitální fotografie) společně s prvky vnitřní a vnější orientace měřické kamery (fotoaparátu). Využívání uvedeného produktu se zejména v posledních letech rozšířilo po celém světě v mnoha oborech lidské činnosti, dokumentaci památek nevyjímaje. Ukázka prostředí programu na obr. 23.



Obr. 23. Prostředí programu Agisoft PhotoScan.

² <http://www.agisoft.ru/products/photoscan>.

Program je nabízen ve dvou edicích:

Standard edition – automaticky vytváří profesionální, kvalitní, texturované 3D modely ze statických snímků. Program automaticky počítá pozice kamer. Hlavní vlastnosti jsou zarovnání snímků, vytvoření polygonové sítě modelu, výpočet textury modelu. Vstupními formáty jsou JPEG, TIFF, PNG, BMP, JPEG Multi-Picture Format (MPO). Výstupními formáty jsou OBJ, PLY, VRML, COLLADA, Universal 3D, 3DS Max, PDF.

Professional edition – obsahuje moduly z edice Standard a dále umožňuje generovat georeferencované ortofotomapy ve vysokém rozlišení s přesností až 5 cm a vytvářet digitální výškový model (DEM). Hlavní přidanou funkcionalitou je možnost vytváření letecké triangulace, vytvoření triangulované polygonové sítě, nastavení souřadnicového systému, výpočet georeferencovaného digitálního výškového modelu (DEM), tvorba ortofotomapy. Výstupními formáty souborů jsou JPEG, TIFF, PNG, BMP, JPEG Multi-Picture Format (MPO). Mezi výstupními formáty souborů figurují GeoTIFF, xyz, Google KML, COLLADA, VRML, OBJ, PLY, 3DS Max, Universal 3D, PDF. Obě verze jsou dostupné pro systémy: Windows (32bit, nebo 64bit), MacOS a Linux.

2.3.1. Doporučené hardwarové vybavení

Použití programu je náročné na technickou úroveň počítače, zejména na jeho vybavení pamětí RAM, na jejíž velikosti závisí úspěšnost generace modelu a také rychlost této operace. Pro tvorbu jednoduššího modelu z 50 zadaných snímků je dostačující běžný notebook s procesorem dual-core a 2 GB RAM. Pro generaci rozsáhlých prostorových modelů s jejich vysokým rozlišením je nutné pro výpočty nasadit výkonný počítač, resp. výpočetní server. Při vytváření prostorových modelů vždy platí zásada, že kvalita výsledného produktu je závislá na počtu vstupních snímků, tab. 1, a na velikosti paměti, tab. 2.

Počet snímků	100	200	500	1000	2000	5000	10000
RAM	500 MB	1 GB	2.5 GB	5 GB	10 GB	25 GB	50 GB

Tab. č. 1. Následující tabulka ukazuje spotřebu paměti RAM při zpracování daného počtu snímků s rozlišením 12 Mpix (Ďiroušek 2013).

Počet snímků	20–50	100	200	500
Lowest quality	100 MB – 300 MB	150 MB – 450 MB	300 MB – 1 GB	1 GB – 3 GB
Low quality	500 MB – 1.5 GB	750 MB – 2.2 GB	1.5 GB – 4.5 GB	4 GB – 12 GB
Medium quality	2 GB – 6 GB	3 GB – 9 GB	6 GB – 18 GB	15 GB – 45 GB
High quality	8 GB – 24 GB	12 GB – 36 GB	24 GB – 72 GB	60 GB – 180 GB
Ultra high quality	32 GB – 96 GB	48 GB – 144 GB	96 GB – 288 GB	240 GB – 720 GB

Tab. č. 2. Velikost paměti RAM nutná k vytvoření 3D modelu dané kvality při určitém počtu snímků s rozlišením 12 Mpix (Ďiroušek 2013).

2. 4. Metoda průseková fotogrammetrie

Tato geodetická metoda využívá k řešení úlohy protínání vpřed z úhlů a je realizována prostřednictvím měřických snímků. Digitální snímky jsou získány buď přímo digitální komorou (digitálním kalibrovaným fotoaparátem) nebo kvalitním fotoaparátem s využitím jeho kalibrace například v softwarovém prostředí Agisoft Lens, který je nabízen k volnému použití. Současná technologie automatického digitálního zpracování fotogrammetrických snímků využívá principů obrazové korelace dvou subobrazů. Cílem je nalezení polohy dvou odpovídajících si bodů bez zásahu operátora zápisem jejich snímkových souřadnic. Pod pojmem korelační analýza si lze představit algoritmus, který hledá totožné body na dvou snímcích, které byly pořízeny každý z jiného místa. Algoritmus využívá skutečnosti, že každý bod (pixel) je společně se svým okolím unikátní, a proto platí předpoklad jeho nalezení i na dalších snímcích.

Pro úspěšnou aplikaci těchto výpočtů je nutné při pořizování snímků dodržet některá základní pravidla. Jedná se zejména o správné postavení při jejich pořizování a vytvoření dostatečných překrytů (30% – 60%). Dalším důležitým předpokladem pro vytvoření kvalitního výsledku je různorodost (nehomogenita) materiálu, ze kterého je zpracováván objekt složen. Právě v tomto případě je vyhledávání bodů (pixelů) s jejich stejnými charakteristikami jednodušší.

2. 4. 1. Zobrazení objektivem

V ideálním případě platí, že fotografické zobrazení je středové promítání, kdy každý objektiv má definovanou optickou osu procházející jeho

středem. Na této ose mají ležet středy křivosti jednotlivých čoček, ze kterých se tento objektiv skládá.

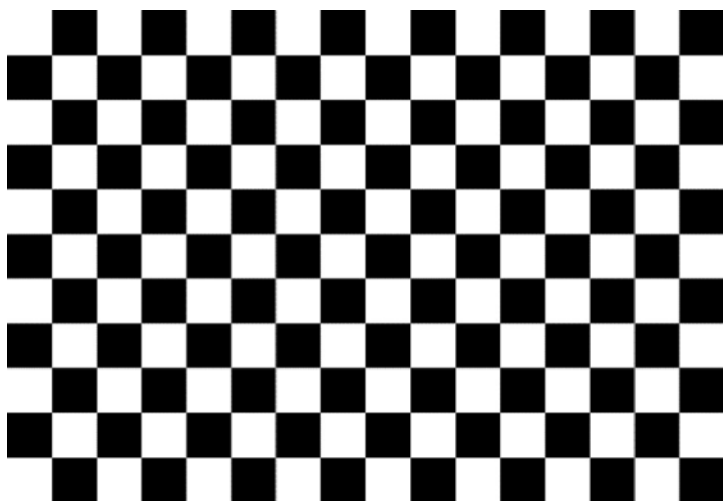
Je zřejmé, že při výrobě jsou používány objektivy zatíženy různými tzv. optickými vadami, které je však možné vhodným postupem eliminovat.

- ▶ Sférická vada
- ▶ Asférická vada (koma)
- ▶ Astigmatismus
- ▶ Barevná vada čoček (chromatická)
- ▶ Distorze objektivu
- ▶ Radiální distorze
- ▶ Tangenciální distorze

2.4.2. Kalibrace objektivu v prostředí Agisoft Lens

Programový nástroj Agisoft Lens je automatický kalibrační software, který používá LCD displeje jako kalibračního terče. Umožňuje výpočet kalibračních parametrů, včetně nelineárních koeficientů zkreslení. Kalibrační parametry mohou být uloženy v souboru ve formátu XML pro pozdější použití v software, ve kterém je vyžadováno uvedení přesných kalibračních parametrů.

Základní pomůckou pro kalibraci objektivu je testovací šachovnicové pole, obr. 24, tvořené pravidelnými čtverci, vytvořenými v černobílé kombinaci. Je nutné, aby bylo umístěno na dokonale rovnou plochu. Tato podmínka byla splněna zobrazením tohoto pole na displej televizního přijímače P UA40C6530 s úhlopříčkou 102 cm.



Obr. 24. Testovací kalibrační pole Agisoft Lens (AGISOFT).

Podmínky pro správnou kalibraci

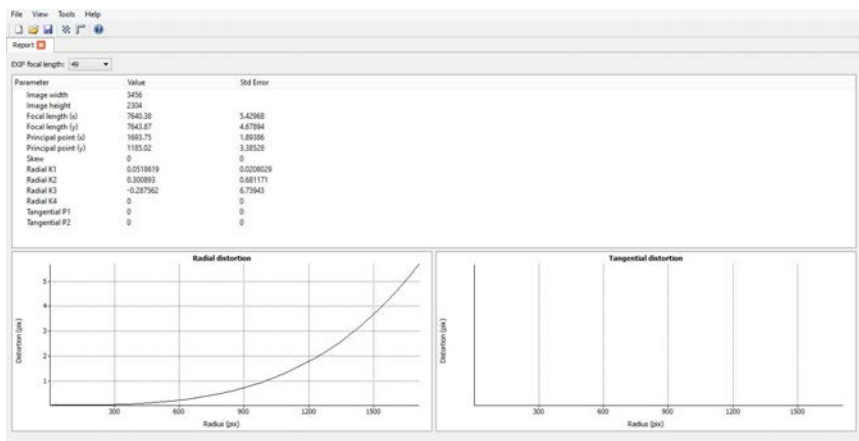
- ▶ Pořízení řady snímků zobrazeného kalibračního pole z mírně odlišných úhlů.
- ▶ Minimální počet snímků pro danou ohniskovou vzdálenost je tři.
- ▶ Vyhnout se odleskům na fotografiích.
- ▶ Snímat tak, aby na ploše snímku bylo pouze kalibrační pole.

Použitý pracovní postup při kalibraci

Použitý displej televize Samsung UA40C6530 obsahuje lesklou vrstvu, která vytváří nežádoucí odlesky. Prostor, kde byla kalibrace prováděna, musel být zastíněn. Snímání bylo provedeno s nejnižším nastavením citlivosti snímače (ISO), použitím maximálního rozlišení čipu, bez použití blesku, s vypnutým stabilizátorem obrazu a za použití manuálního zaostření s neměnnou ohniskovou vzdáleností.

Následně byly snímky načteny do programu Agisoft Lens a dále byl proveden výpočet. V případě vypočtení všech parametrů kalibrace je operace úspěšně dokončena.

V opačném případě je nutné vyřadit z výpočtu nevyhovující snímky. Poté znova spustit proces výpočtu, jehož výsledkem jsou parametry kalibrace. Z praktických testů osmi kalibrací bylo zjištěno, že výsledné hodnoty prvků vnitřní orientace se od sebe odlišují až o 1,5 % mezi jednotlivými kalibracemi, obr. 25.

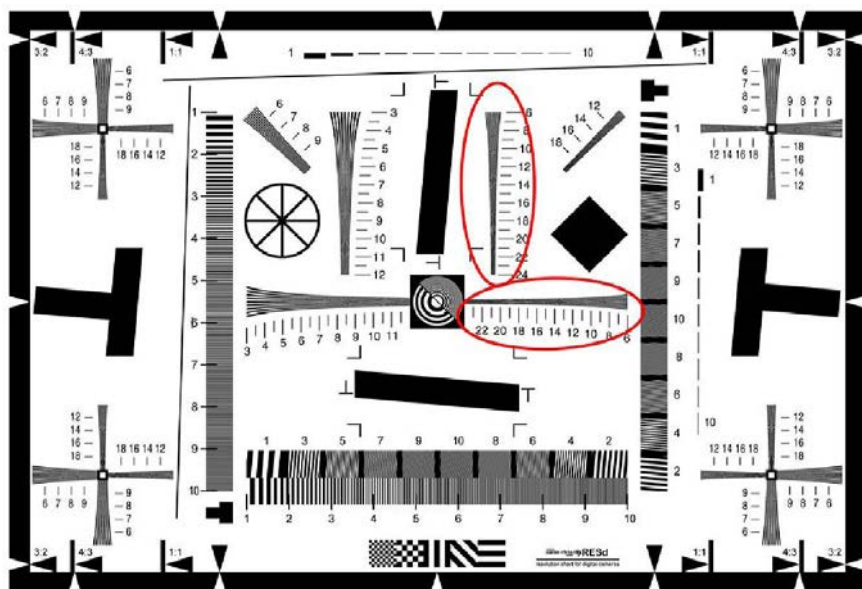


Obr. 25. Protokol o kalibraci objektivu v prostředí Agisoft Lens (Jiroušek 2013).

Hodnoty prvků vnitřní orientace vyhodnocené programem Agisoft Lens se s rostoucím počtem snímků zpřesňují. Pro kalibraci doporučujeme použít alespoň 15 snímků.

Postup vyhodnocení rozlišovací schopnosti

Pro toto vyhodnocení byla použita oboustranná testovací tabulka Daneš Picta DCR3 o rozměru A4. Kvalita tisku a rozložení testovacích obrazců je dána normou ISO 12233 pro testování digitálních fotoaparátů. Jedna strana testovací tabulky je určená pro kinofilmové fotoaparáty a druhá pro digitální fotoaparáty. Tabulka je rozdělena do několika částí, které slouží pro různá zhodnocení kvality kresby fotografie. Pro tuto práci je nejdůležitější část s vyobrazenými devíti hyperbolickými křivkami v horizontálním a vertikálním směru. Na obr. 26 jsou prvky označeny v červených elipsách.

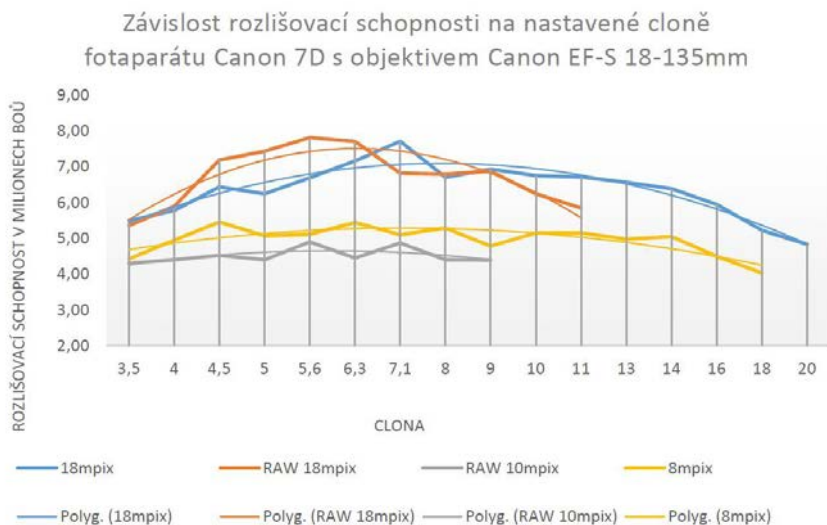


Obr. 26. Testovací tabulka Daneš Picta DCR3 (Ďiroušek 2013).

Testovací tabulka byla nasvícena dvěma lampami z úhlů 45° tak, aby byl zaručen její kontrast 1:50. Fotoaparát byl umístěn na stativ. Testovací tabulka byla usazena kolmo k ose fotoaparátu. Osa snímání byla zacílena do středu tabulky. V případě vyhodnocení rozlišovací schopnosti fotoaparátu pomocí speciálního software není stanovena vzdálenost testovací tabulky od čipu fotoaparátu.

Veškeré hodnoty tohoto testu byly zjišťovány na nejkratším ohnisku fotoaparátu.

Snímání testovací tabulky probíhalo na manuální nastavení parametrů expozice a s vypnutím stabilizátoru obrazu. Spuštění probíhalo prostřednictvím samospouště pro zajištění maximální ostroty snímků. Měření expozice bylo nastaveno na všech přístrojích na bodové. Citlivost byla nastavena na nejmenší dostupnou hodnotu fotoaparátu. Kvalita obrazového výstupu je závislá i na zvolené cloně, proto byly vyzkoušeny všechny clony nabízené objektivem fotoaparátu. Snímky byly uloženy i ve formátu RAW, který byl následně převeden bez úprav do JPEG. Vyhodnocení proběhlo ve specializovaném softwaru HYRes firmy Olympus, který je dostupný zdarma. Výsledná hodnota rozlišovací schopnosti je součinem hodnoty v horizontálním a vertikálním směru, vynásobená poměrem stran snímku, obr. 27.



Obr. 27. Závislost rozlišovací schopnosti fotoaparátu na nastavené cloně (Ďiroušek 2013).

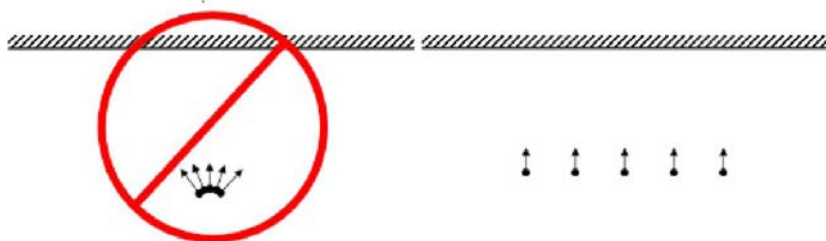
Pravidla získávání snímků pro zpracování v prostředí programu PhotoScan:

- ▶ Použití jakéhokoliv digitálního fotoaparátu s rozlišením 5 Mpix a více.
- ▶ Použitím širokoúhlých objektivů je umožněna lepší rekonstrukce prostorových vztahů než při použití teleobjektivů.
- ▶ Vyhnout se povrchům, které neobsahují žádnou strukturu – není možné najít identické body.

- ▶ Vyhnout se lesklým a průhledným povrchům.
- ▶ Vyhnout se nežádoucím předmětům pohybujícím se v popředí vyhotovovaného objektu.
- ▶ Snímat lesklé objekty při zatažené obloze.
- ▶ Snímat objekt s velkým překrytím snímků.
- ▶ Zachytit nejdůležitější části z více pohledů (tři a více).
- ▶ U snímků je vyloučeno ořezávání nebo aplikace geometrické transformace.
- ▶ Výhodou je větší množství pořízených snímků.
- ▶ Doporučuje se použití stativu fotoaparátu.

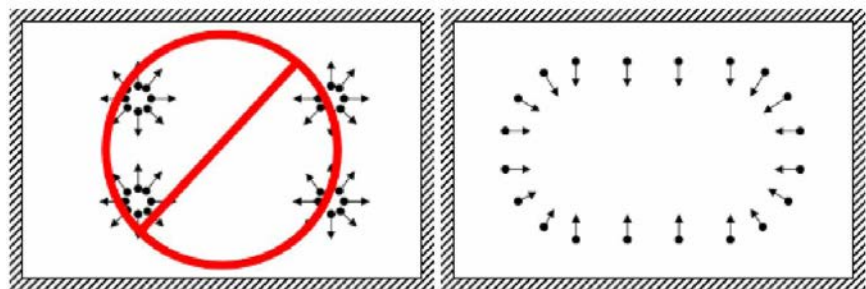
Pravidla úhlů záběru na různé typy objektů

Na následujících vyobrazeních je demonstrován základní princip pořízení snímků pro vyhotovení 3D modelu. Vždy je nutné dodržet velký překryt snímků (optimálně 60%) pro správné provedení fáze zarovnání snímků.



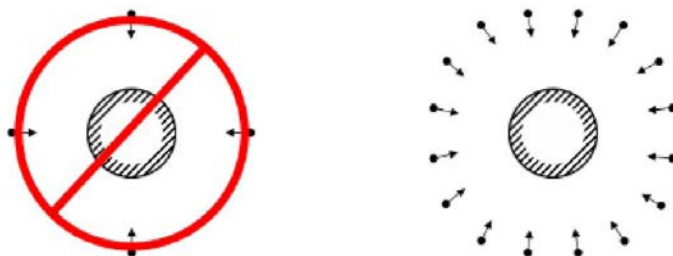
Obr. 28. Chybná a správná pozice fotoaparátu při zaměřování průčelí budovy.

Pro vyhotovení 3D modelu plochých objektů, jako je průčelí budovy či plastiky, je nutné, aby osy záběru byly rovnoběžné. V žádném případě nemůže být jejich průsečík za pozicemi fotoaparátů, obr. 28.



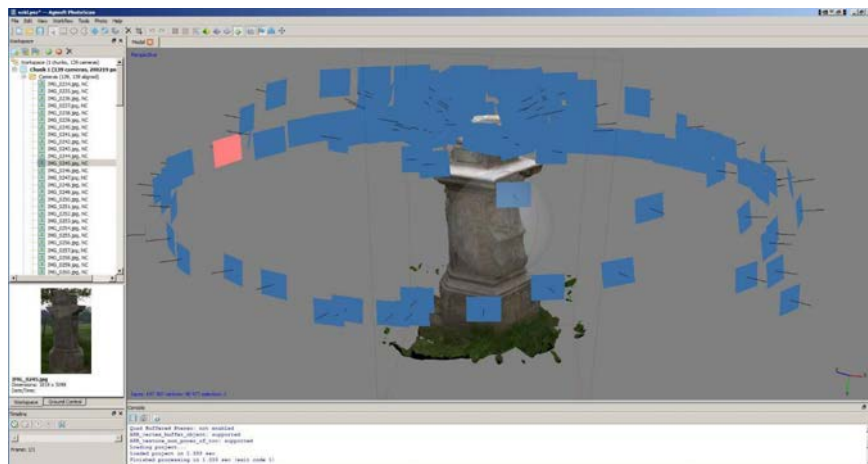
Obr. 29. Chybná a správná pozice fotoaparátu při zaměřování kompaktního prostorového objektu.

Pro vyhotovení 3D modelu celého objektu je nutné, aby se osy záběru protínaly uprostřed uzavřeného prostoru, obr. 4. Snímky nelze pořizovat takovým způsobem, že se jejich osy záběru budou vzájemně rozbíhat.



Obr. 30. Chybná a správná pozice fotoaparátu při zaměřování kompaktního prostorového objektu.

Při modelování izolovaného objektu je nutno dodržet zásadu, aby se osy záběru protínaly zhruba uprostřed objektu, obr. 29. Dalším základním předpokladem je zajistit dostatečný překryt pořízených snímků, obr. 30. Ukázka rozložení fotografických snímků u dokumentace malého objektu, obr. 31.



Obr. 31. Zobrazení jednotlivých postavení fotoaparátu při pořizování snímků soklu sochy sv. Josefa v Milešově.

3. TVORBA 3D MODELŮ OBJEKTŮ

V předchozích kapitolách byl popsán postup vytvoření fotografií – měřických snímků, které budou použity jako vstupní data pro vytvoření 3D modelů předmětných objektů. Nyní se zaměříme na postup vytvoření modelu objektu.

3.1. Princip vytvoření prostorového modelu objektu

Popisované postupy byly testovány v programovém systému Agisoft PhotoScan Profesional Edition verzi 0.9.0. určené pro 64 bitový operační systém (Windows 8). Tento software patří mezi pokročilé optické korelační systémy a umožňuje vytváření profesionálních 3D modelů na základě statických snímků pořízených z jakékoliv pozice vzhledem ke snímanému objektu za předpokladu, že objekt je viditelný alespoň na dvou snímcích. Určení pozic stanovisek, ze kterých byl objekt snímán, a následné vytvoření 3D objektu je automatizované. Z toho vyplývá, že tento proces lze ovlivnit pouze kvalitou snímků a volbou vhodného postupu snímání objektu. Za zřetelné výhody lze považovat časovou úsporu, zpracování detailu, tvorbu nepravidelných těles a výbornou možnost následné vizualizace výstupů.

Postup vytvoření objektů je rozdělen do tří etap. V první etapě program vyhledává identické body na snímcích, které k sobě přiřazuje. Na základě toho počítá pozice stanovisek fotoaparátů (měřických kamer). Následně je vypočteno řídké mračno bodů. Toto mračno není dále použito pro výpočet 3D modelu. Je však možné je exportovat jako hrubý výsledek pro zpracování v dalším aplikačním software.

Ve druhé etapě je na základě vypočtených pozic fotoaparátů a snímků generována geometrie objektu, která je reprezentována 3D polygonovou sítí představující jeho povrch.

Ve třetí etapě je možné využít nástroje pro jednoduchou editaci prostorového modelu, například snížení úrovně plošek 3D polygonové sítě, zalepení děr v 3D polygonové síti a odstranění objektů nesouvisejících s hlavním rekonstruovaným objektem. Dále je možné vytvořit textury objektu v zadaném rozlišení. V neposlední řadě je nutné zmínit možnost exportu vytvořeného objektu v několika formátech, které jsou dnes již standardem pro přenos 3D prostorových modelů.

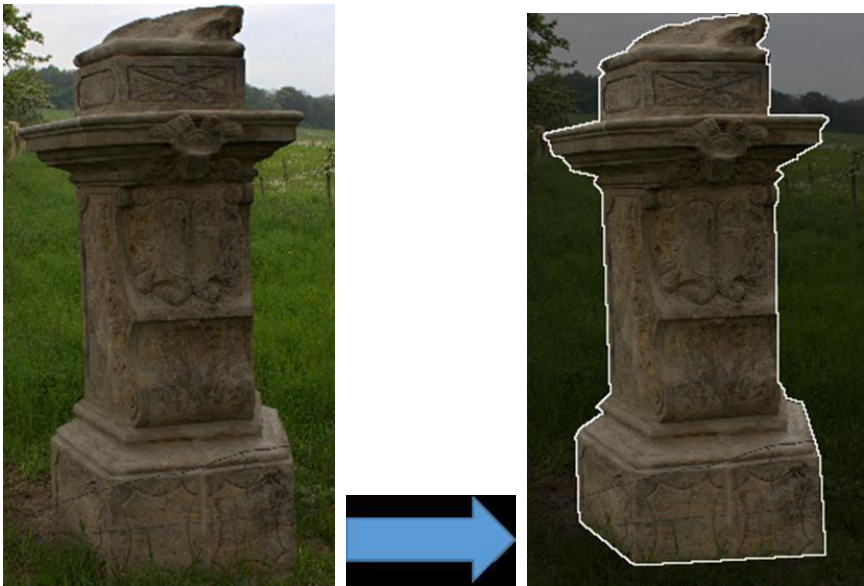
3.2. Pracovní postup vytvoření 3D modelu objektů

3.2.1. Úprava vstupních snímků

V této etapě Agisoft PhotoScan najde pozici (souřadnice stanoviště v modelovém souřadnicovém systému) fotoaparátu pro každou foto-

grafii. Dále vypočte náhledové řídke bodové mračno pro kontrolu 3D modelu, které je možné exportovat jako seznam bodů se souřadnicemi X, Y, Z. K tomuto procesu jsou k dispozici tři stupně přesnosti vyhodnocení (nízký, střední, vysoký). V případě následné generace 3D polygonové sítě modelu je nutné použít volbu vysoké přesnosti vyhodnocení. Hlavním důvodem je správné určení souřadnic stanovisek, které budou dále potřebné pro výpočet 3D modelu. Použití nižšího stupně přesnosti je vhodné ke kontrole zarovnání snímků (Align). Je vhodné zejména při použití velkého množství vstupních snímků (nad 100) a jejich vysokém rozlišení. V případě nesprávného zarovnání snímků software umožňuje manuální georeferencování bodů na snímcích tím způsobem, že jsou označeny čtyři identické body na každém nesprávně zarovnaném snímku a k tomu jejich odpovídající body na podmnožině již zarovnaných snímků. V případě neúspěchu tohoto postupu je zřejmé, že překryty na pořízených snímcích byly nedostatečné a jejich pořízení bude nutné zopakovat.

TIP: před započítím zarovnávání snímků je vhodné provést oříznutí vyhodnocovaných objektů na všech snímcích, obr. 32.



Obr. 32. Oříznutí snímků před započítím procesu zarovnání snímků.



Obr. 33a, b. Vytvořené řídké bodové mračno (vlevo), vytvořené mračno bodů s vysokým rozlišením (vpravo).

TIP: Mračno bodů vytvořené programem Agisoft PhotoScan má stejné vlastnosti jako bodové mračno vytvořené laserovým skenováním. Bodová mračna jsou podporována moderními CAD systémy nebo jejich nadstavbami, ve kterých je možné provádět jejich editaci, obr. 33a a 33b. Jako obecný výměnný formát je nejčastěji využíván formát LAS.

3.2.2. Vytvoření prostorového modelu

Tato fáze je časově nejnáročnější a má vysoké požadavky na využití paměti počítače RAM. Pro generaci modelu lze využít čtyř algoritmů, které užívají různé přístupy:

- ▶ dle typů objektu (libovolný – Arbitrary, výškové pole – Height Field);
- ▶ dle metody jejich generace – hladká – Smooth a ostrá – Sharp

s následujícími volbami:

- ▶ Arbitrary – Smooth;
- ▶ Arbitrary – Sharp;
- ▶ Height field – Smooth;
- ▶ Height Field – Sharp.

Typ objektu

Arbitrary (libovolný) – bude volen při použití pro generaci objektu jako jsou sochy, budovy atd. Tento zvolený typ je náročný na velikost paměti RAM.

Height Field (výškové pole) – bude volen pro generace rovinné plochy jako je zobrazení fasády, plastiky nebo pro zpracování snímků získaných bezpilotními nosiči kamer (prostředky UAV) při zpracování DEM a letecké ortofotomapy.

Typ geometrie

Sharp (ostrá) – tato metoda vytváří nespojitou 3D polygonovou síť. Výsledný produkt může obsahovat množství děr, které mohou být následně zaceleny – editovány. Tato metoda není vhodná pro generování objektů typu Arbitrary, protože část drobných ploch 3D polygonové sítě se soustředí na okraj modelu (s důrazem na jeho zvýraznění) s tím, že se v jeho středu objevují velké plochy, které ne zcela přesně charakterizují tvar objektu.

Smooth (hladká) – tato metoda vytvoří vyhlazený model bez dalších optimalizací.

Parametry generace 3D modelu

Quality (kvalita) – program umožňuje nastavit pět stupňů kvality modelu (Lowest, Low, Medium, High, Ultra High). Stupně kvality jsou určeny tak, že s nastavením na Ultra high je použit každý pixel na snímcích (obr. 9). Při nastavení High je použit každý druhý obrazový prvek (pixel) s nastavením parametru. Parametr Medium využívá každý čtvrtý pixel atd. Od tohoto nastavení se také odvíjí doba generace modelu a nároky na RAM výpočetního systému (tab. 2). Je výhodné generovat model na nejnižší stupeň kvality a podle výsledku zvolit příslušný typ generace. Dalším doporučením je uložit projekt před zahájením výpočtu do formy 3D polygonové sítě.

Face Count (počet ploch 3D polygonové sítě) – tento parametr určuje počet plošek výsledného generovaného prostorového modelu. Pokud bude jako hodnota tohoto parametru zvolena nula, program automaticky zvolí optimální počet plošek. Většinou se tento automaticky zvolený počet pohybuje v řádech desítek miliónů.

Filter threshold (prahový filtr) – určuje maximální počet plošek, které se automaticky odstraní po generaci 3D polygonové sítě. Hodnota je určena v procentech z jejich celkového počtu. Při nastavení tohoto parametru na hodnotu nula bude zakázáno prahové filtrování.

Hole threshold (prahování děr) – určuje maximální počet děr vyplněných po generaci 3D polygonové sítě. Hodnota je určena v procentech



Obr. 34. Detail polygonové sítě na části modelu soklu sv. Josefa.



Obr. 35. Vytvořený model s nastaveným typem geometrie „Smoth“ a parametrem generace Ultra High (objekt soklu sochy sv. Josefa) a vyhlazením Lowest.

z celkové plochy sítě. Tento parametr je možné použít pouze při generaci modelu metodou Height Field – Sharp.

Před spuštěním generace je vhodné upravit oblast, ve které bude proveden výpočet 3D polygonové sítě za pomoci ohraničovacího boxu. Tento box lze libovolně natáčet a zvětšovat. Tímto způsobem je možné určit objekty, které budou vyhodnoceny. Uvedená operace výrazně zkracuje dobu potřebnou k výpočtu. Ukázky na obr. 34 a 35.

3.2.3. Filtrování hloubek

Mild: v případě, že zájmový objekt má mnoho malých detailů v popředí, je doporučeno nastavit tuto metodu filtrování hloubek.

Aggressive: v případě, že objekt neobsahuje drobné detaily, je vhodné volit tuto metodu.

Moderate: metoda je kompromisním řešením obou předchozích metod filtrování.

3.3. Tvorba textury 3D modelu

Pokrytí vytvořeného modelu jeho reálnou texturou je dalším krokem k vytvoření reálného 3D modelu řešeného objektu.

Agisoft Photo Scan nabízí tyto metody tvorby textur:

Generic. Tato metoda tvorby textur je považována za univerzální. Umožňuje nastavení parametrů textury pro libovolnou geometrii.

Adaptive ortofoto. Povrch modelu je rozdělen do horizontální a vertikální části. Horizontální část povrchu je texturována pomocí ortografické projekce, vertikální části jsou texturovány odděleně.

Ortofoto. V tomto režimu mapování je celý povrch modelu texturován pomocí ortografické projekce.

Single foto. Tato metoda nabízí možnost generovat texturu z jednoho snímku.

UV. Vytvořené textury mohou být použity v dalších softwarech, které umožňují UV texturování (například Autodesk 3D Studio MAX).

Parametry textur

Tvorba textury z jednoho snímku, kdy je ze seznamu vybrán snímek, ze kterého je vytvořena textura.

Tvorba textury z více snímků – při výběru této metody je k dispozici více možností, jakým způsobem bude vypočten pixel z více snímků na výsledné textuře.

Average – používá průměrné hodnoty všech pixelů z jednotlivých snímků.

Mosaic – na překrytu snímků bude volen vhodnější pixel pro výpočet výsledné textury. Tato metoda je vhodná pro textury tvořené metodou

ortorektifikace (výsledkem je ortofotomapa, kdy na překrytu jsou zachovány detaily textury).

Max Intensity – pixel bude vybrán ze snímku s maximální intenzitou odpovídajícího pixelu.

Min Intensity – pixel bude vybrán ze snímku s minimální intenzitou odpovídajícího pixelu.

Fill Holes (vyplnit díry) – tato metoda umožňuje tvorbu souvislé textury bez děr, je doporučována pro výpočet textury modelu generovaného metodou Height Field.

Atlas Widht (šířka textury) – určuje šířku textury v pixelech.

Atlas Height (výška textury) – určuje výšku textury v pixelech.

Color Depth (barevná hloubka) – určuje barevnou hloubku cílové textury (standard nebo HDR). Pro tvorbu HDR textury jsou požadovány HDR snímky.

3. 4. Úpravy vytvořeného modelu

Pro ořezání generovaného 3D modelu jsou k dispozici jednoduché nástroje, jako je označení přebytečných prvků výběrovým lasem, obdélníkem a kruhem. Pro výběr prvků je možnost použití automatických nástrojů, jako je procentuální označení prvků oddělených od 3D modelu nebo automatický výběr velkých ploch 3D polygonové sítě generovaných metodou Arbitrary Smooth.

Pro zadání skutečného rozměru modelu je **nutné zadat délku referenční vzdálenosti mezi dvěma body označenými na vygenerovaném 3D modelu**. Tuto délku určíme z geodetického měření (pásmem nebo výpočtem z měřených souřadnic).

Export výsledků

Agisoft PhotoScan umožňuje široké možnosti exportů pro práci s 3D modelem v dalších programech. Mračno bodů stejně jako hodnoty parametrů kalibrace kamery lze exportovat přímo po dokončení zarovnání snímků. Další možnost exportu je k dispozici po vytvoření geometrie 3D modelu.

V některých speciálních případech doporučujeme finální úpravu vytvořeného modelu v externím software. Upravený model je možno importovat zpět do softwaru PhotoScan pro další zpracování. Agisoft PhotoScan podporuje export 3D modelu v následujících formátech: OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, PLY, DXF, U3D, PDF a 3D PDF.

TIP: Doporučujeme ukládání průběžných výsledků.

Některé etapy rekonstrukce 3D modelu mohou být časově velmi náročné. Pokud je 3D model generován ze stovek snímků, může zpracování trvat i několik dní. Ne vždy je možné dokončit všechny operace v jednom

běhu. Proto PhotoScan umožňuje ukládat průběžné výsledky v tzv. projektovém souboru.

Projekt může obsahovat následující informace:

- ▶ Seznam načtených snímků s cestami k jejich souborům.
- ▶ Údaje zarovnání snímků jako např. informace o pozicích fotoaparátu, mračnu bodů, sadu hodnot parametrů kalibrace fotoaparátu pro každý snímek.
- ▶ Masky aplikované na snímky v projektu.
- ▶ Generovaný 3D model s případnými změnami provedenými uživatelem.
- ▶ 256bitové hloubkové snímky použité pro generaci 3D modelu.
- ▶ Seznam přidanych značek a informace o jejich souřadnicích v modelovém souřadnicovém systému.
- ▶ Strukturu projektu, tj. počet bloků v projektu a jejich obsah.
- ▶ Projekt může být uložen na konci každé etapy zpracování, aby byla možnost vrátit se k němu později.

TIP: Při generování rozsáhlejších 3D modelů je možné rozdělit objekt na více částí a každou tuto část generovat samostatně. Poté, co jsou vygenerovány 3D modely těchto částí, je nutné je spojit do jednoho celku. Jejich spojení lze provést přes manuálně označené odpovídající si body na generovaných částech 3D modelu. Tyto body musí být nejméně tři. Dále jsou k dispozici dva automatické nástroje na spojení. První způsob nabízí možnost spojit části přes vypočtená stanoviska. Druhý způsob hledá identické body na již generovaném 3D modelu části objektu. U všech těchto způsobů spojování je nutný dostatečný překryt částí objektu. V opačném případě nastane deformace výsledného celku.

3.5. Alternativní softwarové řešení Autodesk 123CATCH

Tento program je řešením společnosti Autodesk a ve své základní verzi je určen pro registrované uživatele k volnému použití. Jeho ovládání je velmi jednoduché, obr. 36, a při dodržení základních pravidel pro pořizování snímků poskytuje zajímavé výsledky.

Jeho činnost je založena na využití tzv. cloudové technologie, kdy uživatel odesílá snímky řešeného objektu na server Autodesk 123Catch, kde dochází k jejich následnému zpracování, obr. 37. Výpočetní postupy aplikované tímto programem jsou analogické s postupy uvedenými při popisu práce se systémem Agisoft PhotoScan. Zpět přichází výsledný 3D model, který je možné ze systému exportovat včetně jeho vytvořené textury.



Obr. 36. Vstupní obrazovka pro zadání projektu v programu Autodesk Catch123.

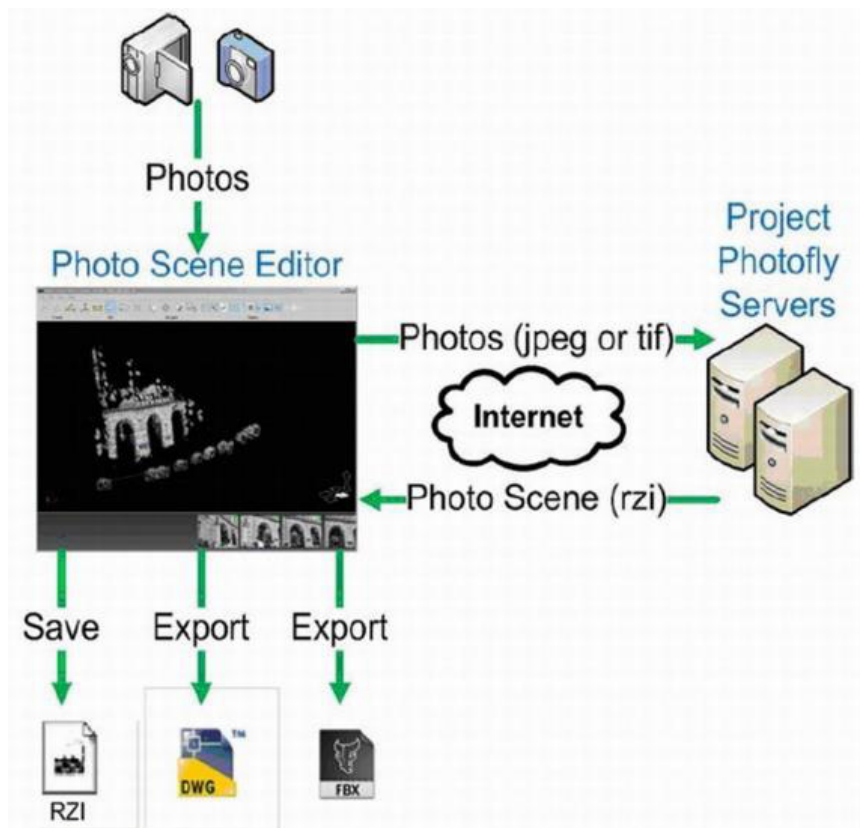
Pracovní postup zpracování 3D modelu (obr. 37):

- ▶ vytvoření nového projektu (tzv. Capture);
- ▶ odeslání snímků na server 123Catch;
- ▶ načtení vytvořeného základního modelu;
- ▶ vymazání tzv. „smetí“ s využitím výběrových nástrojů (obdélník, laso);
- ▶ nastavení souřadného systému (orientace souřadných os);
- ▶ zadání referenční vzdálenosti na modelu (je vhodné pro vytvoření modelu v reálných rozměrech);
- ▶ export prostorového modelu nebo mračna bodů pro jeho další případnou editaci v jiných programech.

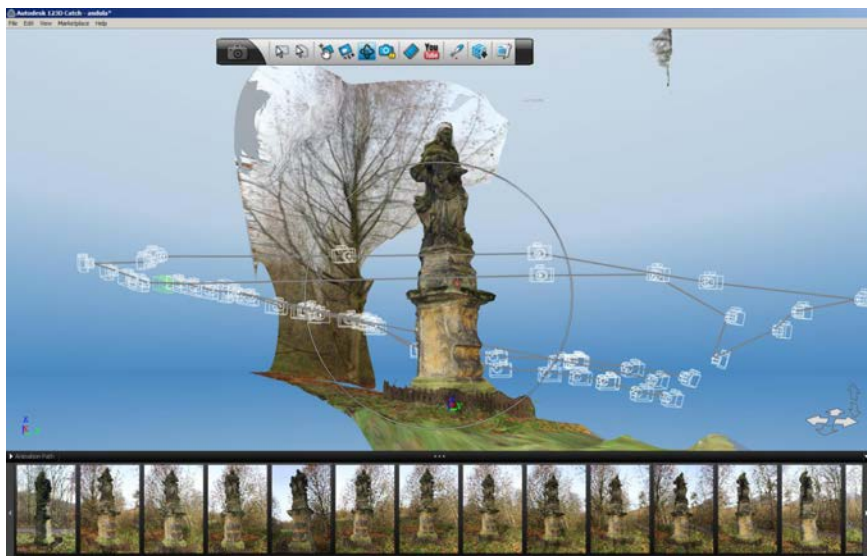
Kvalitu výsledného modelu a jeho textury lze ovlivnit těmito nastaveními režimů výpočtu:

- ▶ mobile (nižší detail zpracování pro prohlížení na mobilních zařízeních);
- ▶ standard (pro editační práci v 123Catch);
- ▶ maximum (vysoké rozlišení detailů vhodné pro export modelů do dalších speciálních aplikací).

Výstupní formáty jsou OBJ, FBX a DWG. Ukázka výstupu je na obr. 38.



Obr. 37. Schéma zobrazuje workflow při zpracování 3D modelu v Autodesk 123 Catch.



Obr. 38. Zpracování projektu prostorového modelu sochy sv. Anny v Milešově v prostředí Autodesk Catch 123.

ZÁVĚR

Zpracovaná metodika popisuje způsoby využití dvou softwarových nástrojů pro vytvoření prostorového modelu z fotografií. Jedním z nich je Agisoft PhotoScan – nástroj pro profesionální využití a druhým Autodesk Catch 123 – free software. Ukázalo se, že pro využití v oblasti dokumentace památek jsou oba programy vhodné a svým jednoduchým ovládáním použitelné i koncovými uživateli. Jsou operativní a finančně nenáročné na rozdíl od laserových skenovacích systémů.

Předložený text se zabývá využitím 3D laserového skenování a průsekovou fotogrammetrií při dokumentaci památkových objektů. Obě metody mají svá pozitiva i negativa. Vzhledem k omezenému rozsahu textu se autoři snažili popsat základní postupy, pravidla a shrnout dosavadní zkušenosti při praktických dokumentačních úlohách přímo v terénu.

Výchozím předpokladem při jakékoliv dokumentační činnosti je zadání, definice úkolu, úlohy, požadavek na výstupy, na dílčí úlohy (tvorba řezů, půdorysů, výpočet plochy, kubatury, apod.). Toto zadání by měl definovat koncový uživatel, památkář, odborník na dokumentaci. V opačném případě nastává situace, že je proveden sběr prostorových dat a zpětně se *vymýšlí* k čemu budou data využita. Proto úzká spolupráce odborníků na sběr dat a použití nových technologií s pracovníky památkové péče je východiskem k získání kvalitních, objektivních a prezentovatelných výsledků vlastní dokumentace.

LITERATURA:

BEZDĚK, L. a kol. (2011). *Metodika pro elektronický pasport zpřístupněné památky*. NPÚ ÚP Praha, 83s., Praha 2011, ISBN 978-80-87104-87-3.

D'ANNIBALEA, E. – MALINVERNI, E.S. (2013). *From panoramic photos to a low-cost photogrammetric workflow for cultural heritage 3D documentation*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2.

XXIV International CIPA Symposium, 2–6 September 2013, Strasbourg, France.

FIŠEROVÁ, V. (2012). *Laserové skenování*. Učební text FF UJEP, ISBN 978-80-7414-458-5.

GUARNIERI, A., et al. (2011). *Monitoring Of Complex Structure For Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (Tls) And Photogrammetry*. International Journal of Architectural Heritage 7(1): 54–67.

HADDAD, N. A. (2011). *From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences 23(2): 109–118.

HODAČ, J. (2011). *Pozemní fotogrammetrie*. Učební text FF UJEP Ústí nad Labem, ISBN 978-80-7414-343-4.

JIROUŠEK, T. 2013. *Testování programu PhotoScan pro tvorbu 3D modelů objektů*. Diplomová práce, VŠB TU Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut inženýrské geodézie, s. 77.

KAŠPAR, M. a kol. (2003). *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. VEGA, s.r.o., Praha, ISBN 80-900860-3-9.

KAŠPAR, M. – KŘEMEN, T. (2002). *3D laserové skenovací systémy*. Stavebnictví a interiér, 10, č. 11, s. 62–63.

MILS, J. (2011). *3D Laser Scanning for Heritage*, English Heritage.

PIERACCINI, M., et al. (2001). *3D digitizing of cultural heritage*. Journal of Cultural Heritage 2(1): 63–70.

PAVELKA, K. (2001). *Fotogrammetrie 20*. Učební text FSv ČVUT Praha. ISBN 80-01-02649-3.

RÜTHER, H., et al. (2009). *Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa*. Journal of Archaeological Science 36(9): 1847–1856.

SCHUHR, W., et al. (2013). *3D photographs in cultural heritage*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XL-5/W2: 567–572.

ŠTRONER, M. a kol. (2013). *3D skenovací systémy*. Česká technika – nakladatelství ČVUT. Praha, ISBN 978-80-01-05371-3.

ŠVEC, M. – VITUALA, A. (1986). *Příspěvek k měření s lasery při podpovrchových pracích*. In.: 25. symposium Hornická Příbram ve vědě a technice, s. 175–182.

VACCA, G., et al. (2012). *Laser scanner survey to cultural heritage conservation and restoration*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XXXIX-B5: 589-594.

VRBOVÁ, M. et al. (1994). *Lasery a moderní optika*. (Oborová encyklopedie). PROMETHEUS, Praha, 474s.

YAHYA ALSHAWABKEH, N. H. (2006). *Integration of Digital Photogrammetry and Laser Scanning for heritage Documentation*. PhD Thesis, Univ. Stuttgart.

YASTIKLI, N. (2007). *Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning*. Journal of Cultural Heritage 8(4): 423-427.

Publikační činnost autorů:

BRŮNA, V. – BÁRTA, M. – BREJCHA, M., *Laserové skenování Duaptahovy skalní hrobky v jižním Abúsíru. Pražské egyptologické studie XIII/2014, pp. 31 - 37, UK Praha.*

BRŮNA, V. – MAREK, Z. – DULÍKOVÁ, V. – HAVELKOVÁ, P., *Podobu starých Egyptanů pomáhá odhalit 3D modelování*. [online]. Zpravodajský portál Národního muzea pro 3. tisíciletí. [vid. 2015-06-26]. Dostupné z: <http://muzeum3000.nm.cz/veda/podobu-starých-egyptanů-pomaha-odhalit-3d-modelování>.

SUKOVÁ, L. – BRŮNA, V. – KROUŽEK, J. – NOVOTNÝ, V. – KABELKA, P. – HEGRLÍK, J.: Zpráva o projektu 3D skenování a fotografování v Národním muzeu Súdánu v Chartúmu. Pražské egyptologické studie, VII/2010, 8–11s. ČEgÚ FF UK Praha, ISSN 1214-3189.

BRŮNA, V. – SUKOVÁ, L.: *Využití 3D ručního skeneru při dokumentaci archeologických památek v Súdánu*. in: KUCHARÍK, M. – GÁL, L. – KOŠTIAL, J. 2010: *Počítačová podpora v archeologii III*. Sborník příspěvků z deváté konference konané v Litomyšli 19.–21. 5. 2010. Praha, TerraVerita s.r.o., ISBN 978-80-254-7563-8.

MAREK, Z. – BRŮNA, V. – FROUZ, M. (2010): *3D prostorová digitalizace sochy sv. Jana Křtitele na Maltézském náměstí v Praze*. Pracovní studie, nepublikováno.

MAREK, Z. – BRŮNA, V. – BREJCHA, M. (2013): *Metody sběru prostorových dat v Laboratoři geoinformatiky FŽP UJEP*. 3D dokumentace v archeologii a památkové péči. Plzeň.

BREJCHA, M. (2013). *3D Modeling of Open-Pit Mining Affected Area in Czech Republic*. Carlson conference, Cincinnati, Ohio, USA, April 7 – 10, 2013.

BREJCHA, M. (2014): *3D interaktivní vizualizace přeložky dopravních komunikací v rámci projektu revitalizace a sanace území dotčených těžbou nerostných surovin*. XII. mezinárodní konference GEODÉZIE A KARTOGRAFIE V DOPRAVĚ, Olomouc, 4. – 5. 9. 2014, 978-80-02-02073-8.

Marcel Brejcha – Vladimír Brůna – Zdeněk Marek – Bára Větrovská
Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace

Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem
Podmokelská 1/38, CZ 400 07 Ústí nad Labem – Krásné Březno

Filozofická fakulta Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem
Pasteurova 13, CZ 400 96 Ústí nad Labem

Lektorovali:

doc. PhDr. Ivana Ebelová, CSc.

doc. PhDr. Pavel Vařeka, Ph.D.

Sazba, návrh obálky: Petr Hrubý

Jazyková korektura: Vendula Suchá

Tisk: Tiskárna V&H Print Hlávko, s.r.o.

Náchodská 215, 549 01 Nové Město nad Metují

Vydání první, Ústí nad Labem 2015

Náklad: 500 ks

Katalogizace v knize – Národní knihovna ČR

Brejcha, Marcel

Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek : certifikovaná metodika / Marcel Brejcha, Vladimír Brůna, Zdeněk Marek, Bára Větrovská. – Vydání první. – Ústí nad Labem : Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem : Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. – 62 stran
ISBN 978-80-85036-61-9 (Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem : vázáno). – ISBN 978-80-7414-954-2 (Univerzita J. E. Purkyně. Ústí nad Labem : vázáno)

904 * 002 * 086:004

- památky
- dokumentace
- digitalizace objektů
- certifikované metodiky

004.9 - Speciální počítačové metody. Počítačová grafika [23]

Metodika vychází s podporou prostředků z Programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity podpory a vývoje (NAKI) Ministerstva kultury, v rámci řešení projektu Dokumentace, digitalizace a prezentace ohroženého kulturního dědictví v příhraniční oblasti severozápadních Čech. Identifikační kód projektu: DF12P01OVV009.

© Národní památkový ústav, 2015,

ISBN: 978-80-85036-61-9

© Filozofická fakulta Univerzity Jana Evangelisty Purkyně, 2015

ISBN: 978-80-7414-954-2

© Marcel Brejcha, Vladimír Brůna, Zdeněk Marek, Bára Větrovská, 2015



NÁRODNÍ
PAMÁTKOVÝ
ÚSTAV

ÚZEMNÍ ODBORNÉ PRACOVISŤE
V ÚSTÍ NAD LABEM

UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM

Filozofická fakulta



**Filozofická fakulta Univerzity J. E. Purkyně
v Ústí nad Labem**

ISBN: 978-80-7414-954-2

**Národní památkový ústav
územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem**

ISBN: 978-80-85036-61-9

ISBN 978-80-85036-61-9



9

7

8

8

0

8

5

0

3

6

6

1

9