

Nová efektivní metoda 3D skenování jeskyní

Jiří Šindelář

Přesná geodetická dokumentace a 3D skenování rozsáhlých a členitých podzemních komplexů bývají tradičně spojovány s vysokými investičními a logistickými náklady. Kromě toho jsou obvykle náročné i časově. Aplikovaný výzkum organizací Naše historie, Geo-cz,

Správa jeskyní České republiky, odbor životního prostředí Jihočeského kraje a Univerzita Pardubice se v posledních pěti letech soustředil na pilotní vytvoření přesných plánů a digitálních modelů vybraných jeskynních systémů v České republice a v Arménii.



Bronzový model Koněpruských jeskyní v měřítku 1 : 100. Foto Martin Frouz

Úvod do problematiky

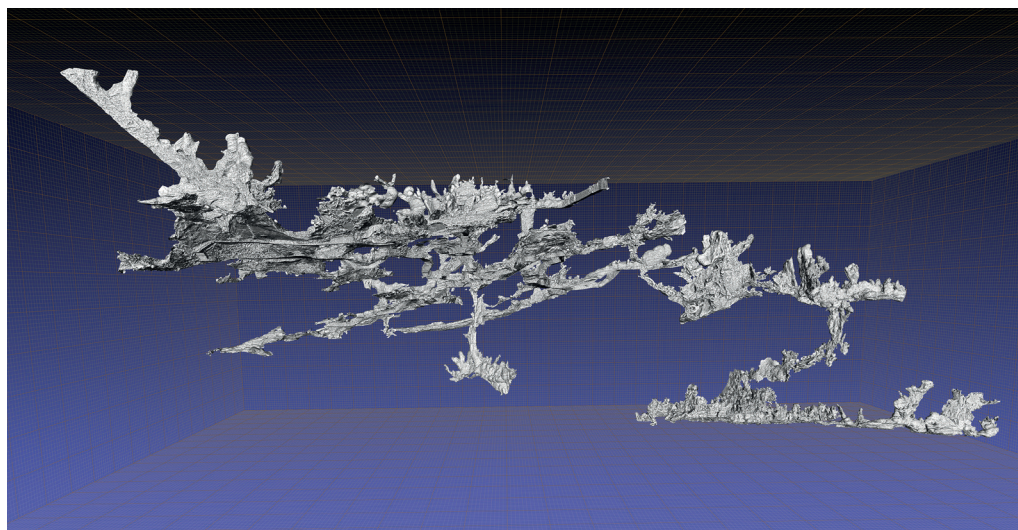
Zároveň výzkum kladl důraz i na jednoznačné definování pravidel pro sběr metrických dat v terénu i postupů v následné fázi výpočetní. Cílem bylo (vedle vytvoření 3D dokumentace konkrétních lokalit) definování a testování efektivní metody 3D skenování v těžko přístupném, členitém a rozlehlém podzemí. Jako efektivní metodu chápeme takovou, která je rychlá, přesná, ale také levná. V době laserových skenerů se může zdát takové počínání zbytečné. Vždyť stačí projít jeskyni s laserovým skenerem a máme hotovo. Nebo ne? Prakticky již od zavedení laserového skenování do praxe byly laserové skenery testovány a také úspěšně zavedeny v nejrůznějších odvětvích průmyslu, hornictví nevýjimaje. V důlním podnikání tato technologie rychle získala své uplatnění. Ve speleologické praxi je však využitelnost laserových skenerů značně omezená. Je to dáno dvěma hlavními důvody. Prvním je vysoká finanční náročnost, která je na laserové skenování vázána, ať již při objednání díla u specializovaných organizací, nebo při pořizování přístrojové techniky a softwaru pro zpracování naměřených dat. Důvodem druhým jsou nevhodné podmínky v jeskyních pro laserové skenování obecně, tedy konkrétně vysoká vlhkost, vysoká prašnost a velmi stísněné prostory. Laserovým skenerem je možné zdokumentovat velké dómy a chodby, které je možné alespoň trochu rozumně projít. Dokumentace „plazivek“, chodeb zčásti zanesených bahnem, částečně zatopených nebo třeba propastí a komínů (dostupné pouze díky jednolanové technice) se dá laserovým skenerem pořídít jen s velkými obtížemi. Jde zpravidla o časově velmi náročný podnik, který je navíc spojen s velmi vysokým rizikem poškození použitých přístrojů. Proto byla hledána cesta, jak laserový skener nahradit jinou technologií. Zcela logicky se nabízelo využít nejnovějších postupů fotogrammetrie a videogrammetrie.

Testování metody SfM (Structure-from-Motion)

Již v letech 2018 a 2019 jsme úspěšně otestovali možnosti využití metody SfM (Structure-from-Motion) při dokumentaci zatopených částí Chýnovské jeskyně na Tábořsku (Ochrana přírody 1/2019). Protože je potřeba v případě mapování trvale zatopených prostor hledat metody velmi rychlé v terénní fázi, nahradili jsme pořizování jednotlivých měřických fotografií videozáznamem. Tím byl sběr dat v terénu významně



Sférický snímek, ukázka zdrojových dat pro výpočet. Foto Jiří Šindelář



Digitální model Koněpruských jeskyní. Foto Jiří Šindelář

urychlen a navíc přinesl nové možnosti zpracování i zavedení nových kontrolních mechanismů do výpočetní fáze projektu. Během dvou půlhodinových ponorů se podařilo dvojici potápěčů zmapovat (naskenovat) více než 220 m členitých chodeb s převýšením 43 m. Kontrolními výpočty bylo potvrzeno, že maximální prostorová chyba vzniklého digitálního modelu zatopené části Chýnovské jeskyně nepřekračuje 20 cm.

Metodika SfM videogrammetrie tak byla uvedena do praxe. Využívali ji odborníci v archeologii, památkové péči i ve stavebnictví (při dokumentaci skutečného provedení stavby a při pořizování plánové dokumentace pro projektanty). Metoda se dala využít při skenování pozemním, podzemním i při zpracovávání dat z dálkového průzkumu Země (bezpilotní

letecké prostředky). Ještě v roce 2021 jsme využívali metody SfM videogrammetrie při skenování jeskyní v Jihočeském kraji a při dokumentaci historického důlního díla Orty u Českých Budějovic. V průběhu prací se začala více projevovat slabá stránka metody, na niž musel realizační tým okamžitě reagovat. V případech rozsáhlejších podzemních prostor (řádově stovky metrů) neúměrně narůstala časová náročnost projektu ve fázi sběru dat a vzhledem k nastaveným a požadovaným pravidlům geometrickým a organizačním i objem vstupních obrazových materiálů pro výpočet (mnohdy nad únosnou mez a možnosti běžných stolních počítačů). Řešením bylo využití technologie, která umožňuje zaznamenat pohled z reálného světa všesměrovým pohledem v jediném záběru, tedy v jednom snímku.



Snímek z kamery při skenování vertikál, které jsou dostupné jen díky jednolanové technice (metodou „SV“), světlý bod v ruce speleologa je všesměrové světlo pod sférickou kamerou. Foto Jiří Šindelář

Sférická fotogrammetrie a videogrammetrie

Začalo testování panoramatických kamer pro sběr dat v terénu a následná úprava metody SfM pro výpočet ze sférických snímků, tedy metody, pro niž se vžil pojem sférická fotogrammetrie. První testy byly provedeny při dokumentaci historických podzemních objektů pod historickým jádrem jihočeského Tábora a kontrola výsledných modelů s mapou, která vznikla konvenčním geodetickým mapováním, prokázala dostatečnou přesnost nové metody. Polohová odchylka v dokumentovaném středověkém sklepe nepřekročila 36 mm a odchylka výšková 16 mm. Problémy nastaly při testech prováděných v interiérech členité architektury a při dokumentaci „monotónních“ objektů, vzorově na úzkém točitém schodišti v katedrále sv. Víta na Pražském hradě, v dlouhých štolách a chodbách s výztuží stříkaným betonem, v dlouhých plazivkách apod. V takových případech nepřesnost modelu vždy výrazně vzrostla, mnohdy nad únosnou míru. U některých počítačových programů došlo k výrazné (až nesmyslné) deformaci, tak velké, že byla odhalena již pouhým pohledem na výsledný digitální model. Výpočet probíhal obdobně jako při metodě SfM, tedy tak, že pozice kamery v době pořízení snímku i geometrie prostoru zájmu byly při výpočtu rekonstruovány současně prostřednictvím automatické identifikace shodných prvků na více snímcích. Zároveň s tím byly automaticky určovány i tzv. prvky vnitřní orientace kamery pro každý jednotlivý snímek samostatně. Vzhledem k jisté monotónnosti dokumentovaného prostoru a velmi stísněným podmínkám v terénu došlo opakovaně (i při výpočtu v různých počítačových programech) k chybnému určení pozic kamer i k výrazně chybné

geometrii prostoru zájmu. Na vzniklém digitálním modelu se větvené schodiště směrem vzhůru nesmyslně zužuje a vytváří tvar homole (ač jde ve skutečnosti v celé výšce o pravidelný válec o neměnném vnitřním průměru 2 m). Vypočtené vnitřní prvky orientace u jednotlivých snímků se navzájem výrazně lišily (ač se jednalo ve zdroji o 6 minut dlouhou videosekvenci z jedné kamery). Testy tak jednoznačně ukazují na nebezpečí, která plynou z používání nových moderních metod dokumentace bez dodatečných kontrolních mechanismů. Vzniklé hrubé chyby jsou jen těžko opravitelné a zpravidla i těžko odhalitelné. Popsaný nedostatek metody byl vyřešen tím, že jsou nejprve zjištěny a zapsány všechny prvky vnitřní orientace používané kamery a jsou následně přiřazeny jako pevné a neměnné hodnoty ke všem snímkům, jež vstupují do finálního výpočtu. Opakovaným testováním takového postupu práce a nahrazením pořizování jednotlivých fotografií videozáznamem byla stanovena upravená metodika práce – sférické videogrammetrie (SV). Touto metodou se podařilo v průběhu let 2021, 2022 a 2023 vytvořit digitální kopie více než 70 jihočeských jeskyní a dvou významných podzemních komplexů v Arménii, světově proslulých jeskyní Areni-1 a Areni-2.

Skenování Koněpruských jeskyní

Skutečnou výzvou a definitivním aplikovaným výzkumem v oblasti 3D skenování podzemí, který jednoznačně prokázal funkčnost, přesnost a využitelnost metody SV (sférické videogrammetrie), se v roce 2023 stal projekt Geo-cz a Správy jeskyní České republiky nazvaný „3D skenování

Koněpruských jeskyní“. Velká část horního a středního patra Koněpruských jeskyní byla naskenována terestrickými laserovými skenery. Zároveň byla pořízena i data metodou SV. Model z laserového skenování byl využíván jako referenční pro exaktní určení přesnosti modelu z videogrammetrie. Rozdíly modelů nikde nepřekračují hodnotu 4 cm. Po provedeném testu přesnosti lze konstatovat, že je sférická videogrammetrie při pevně stanovených hodnotách prvků vnitřní orientace kamery dostatečně přesná, detailní, velmi rychlá a nízkonákladová metoda skenování. Díky tomu byla následně metoda SV využita pro dokumentaci všech těžko dostupných míst Koněpruských jeskyní – plazivek, komínů, propastí a celého spodního patra, které představuje 350 m propastí a chodeb velmi malých průměrů. Kontrolu přesnosti skenování tzv. spodního patra představují na povrchu zaměřené body u vstupu do podzemí a poloha komína v nejjižnější části, který byl geodeticky zaměřen z povrchu ve druhé polovině 20. století. Naplno se projevila nejsilnější stránka metody – její bezkonkurenční rychlost v terénní fázi projektu. Během pouhých 5 dnů se podařilo naskenovat známé části Koněpruských jeskyní, od velkých domů přes komíny a propasti až po sotva průlezná „plazivky“. Celkem bylo zdokumentováno 200 m chodeb horního patra, 1 700 m středního patra a 350 m spodního patra Koněpruských jeskyní.

Unikátní model Koněpruských jeskyní

Výsledné mračno bodů (1,5 miliardy bodů) ze skenování Koněpruských jeskyní bylo decimováno (zjednodušeno) a body spojeny do ploch, čímž vznikl digitální model, který byl následně vytištěn na 3D tiskárně v měřítku 1 : 100. Plastový model z 3D tiskárny posloužil jako podklad pro vytvoření jedinečného sochařského díla – bronzového modelu Koněpruských jeskyní, který je dnes součástí venkovní expozice u nově otevřeného Domu přírody Českého krasu. Návštěvníci tak mohou poprvé spatřit prostorově složitý labyrint podzemních chodeb Koněpruských jeskyní a odborníkům nabízí bronzová sochařská díla i digitální modely možnost studovat vzájemné souvislosti jednotlivých částí jeskyně, její geologii, morfologii nebo třeba genezi. Vedle přesné geodetické dokumentace tak vzniklé dílo slouží i k dalším badatelským účelům. ■

Seznam literatury najdete na www.casopis.ochranaprirody.cz