



TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI MOBILNÍHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ A MOBILNÍ FOTOGRAMMETRIE

Jakub Nosek, Petr Kalvoda, Michal Kuruc, Tomáš Volařík and Petra Stránská

1. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, Brno, Veveří 95, nosek.j@fce.vutbr.cz

ABSTRAKT

Tento článek se zabývá určením přesnosti dat mobilního laserového skenování (MLS) a mobilní fotogrammetrie, která byla pořízena pomocí mobilního mapovacího systému (MMS) Riegl VMX-450. V areálu výzkumného centra AdMaS bylo zřízeno testovací pole, které bylo signalizováno šachovnicovými terči. Body testovacího pole byly zaměřeny pomocí totální stanice Trimble S8 HP a GNSS systému Trimble R8s. Souřadnice bodů testovacího pole byly určeny na základě vyrovnání geodetické sítě metodou nejmenších čtverců. Přesnost souřadnic bodů testovacího pole odhadnutá z vyrovnání odpovídá 3D směrodatné odchylce $s_{x,y,z} = 2$ mm. Přesnost obou metod byla určena na základě porovnání souřadnic bodů testovacího pole určených z výsledných dat pořízených MMS a souřadnic bodů testovacího pole určených vyrovnáním sítě. Odhad hodnoty 3D směrodatné odchylky dat z MLS a mobilní fotogrammetrie činí 0,017 m, respektive 0,061 m. V praxi bývají běžně prováděny vícenásobné průjezdy MMS, které umožňují dosáhnout vyšší přesnosti výsledných bodových mračen. Relativní přesnost mračen bodů z MLS byla testována na základě odchylek mezi dvěma průjezdy MLS. Samostatně byla vyhodnocena přesnost mračen bodů na komunikacích a na budovách. Směrodatná odchylka v obou případech nepřesahuje hodnotu 0,008 m a maximální absolutní odchylka nepřesahuje hodnotu 0,030 m. Přesnost takovýchto mračen bodů tedy odpovídá požadavkům na běžné mapování a parametrům uvedeným v technické dokumentaci MMS. Odhad přesnosti mračen bodů z mobilní fotogrammetrie byl stanoven na základě odchylek od mračen z MLS, které jsou významně přesnější. Porovnání bylo provedeno pouze na budovách a odhad hodnoty směrodatné odchylky mračen z mobilní fotogrammetrie činí 0,16 m, přičemž maximální absolutní odchylka nepřesáhla hodnotu 0,25 m.

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní laserové skenování, mobilní fotogrammetrie, mračno bodů, přesnost, Riegl VMX-450

ÚVOD

Mobilní mapovací systémy jsou v současné době využívány v široké škále geodetických aplikací. Geometrická přesnost výsledných produktů, kterými jsou nejčastěji mračna bodů, je ovlivněna mnoha faktory – například přesností vstupních dat, hustotou mračen bodů a použitými algoritmy.

V případě mobilního laserového skenování (MLS) se vstupní data pro modelování skládají z urovnaných a filtrovaných mračen bodů. Základními faktory pro přesnost modelu jsou pak



přesnost a hustota bodových mračen. Tuto přesnost lze rozdělit na absolutní a relativní, které souvisí s jednotlivými subsystémy MMS. Absolutní přesnost je zejména ovlivněna přesností určení trajektorie, která je určena na základě kombinace dat z přijímače globálních navigačních satelitních systémů (GNSS), z inerciální jednotky (IMU) a z odometru (DMI) [1], [2]. Výsledkem kombinace dat z GNSS, IMU a DMI pomocí Kalmanova filtru je Smoothed Best Estimated Trajectory (SBET), kterou je možno dále zpřesnit použitím vlíčovacích bodů [3]. Relativní přesnost je zejména ovlivňována přesností mapovacího subsystému, který se skládá z jednoho nebo více laserových skenerů a digitálních kamer. Předpokladem pro správně georeferencované snímky a mračna bodů je přesná kalibrace jednotlivých komponent MMS.

Výsledný 3D model ze zpracování mobilní fotogrammetrie může být vytvořen manuálně i automatizovaně. V případě manuálního generování 3D modelu jsou prvky modelu vytvářeny přímo na základě odměřování snímkových souřadnic. Automatizované zpracování se skládá z generování mračna bodů pomocí přiřazovacích algoritmů [4] a tvorby 3D modelu z tohoto bodového mračna (meshing).

MMS RIEGL VMX-450

MMS Riegl VMX-450 se skládá ze dvou laserových skenerů Riegl VX-450, čtyř modulárních kamer VMX-450-CS6, sférické kamery Point Grey ladybug5, GNSS přijímače, IMU, odometru VMX-450-DMI a řídicí jednotky VMX-450-CU. Parametry systému jsou uvedeny v Tab. 1.

Přesnost laserového skenování je v dokumentaci VQ-450 [5] definována jako těsnost shody mezi měřenou a skutečnou hodnotou. Preciznost je chápána jako míra opakovatelnosti měření. Polohová přesnost (GNSS/IMU) je splněna za předpokladu, že nedošlo k výpadkům GNSS signálů, data z DMI jsou zahrnuta do zpracování a je použita metoda dvojitých diferencí (připojení na referenční GNSS stanici). Prvky vnitřní orientace kamer Riegl jsou poskytnuty výrobcem. Prvky vnější orientace kamer (jejich polohy a rotace) lze v post-processingu určit pomocí software Riegl RiPROCESS. Snímky z kamer lze exportovat ve formátu JPEG, přičemž lze exportovat i snímky nezkreslené (bez vlivu radiální a tangenciální distorze) [6].

Tab. 1: Technické parametry MMS Riegl VMX-450 [5].

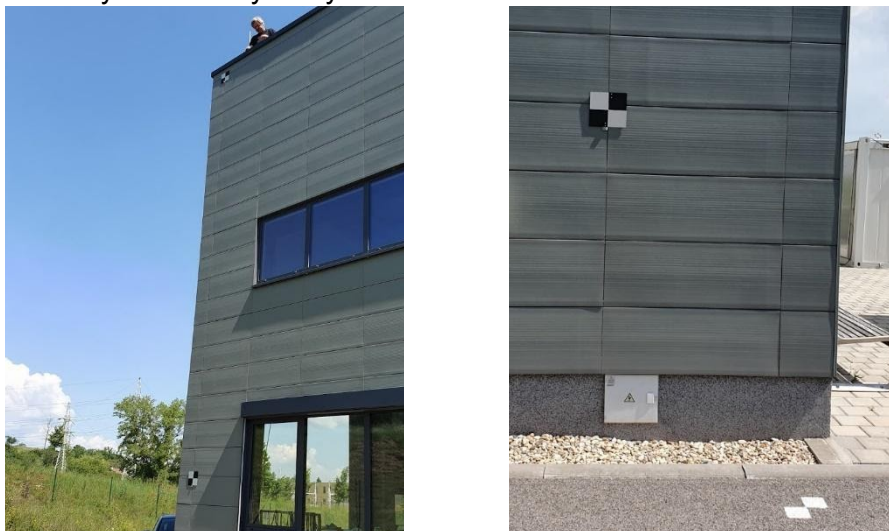
Senzor	Název parametru	Hodnota parametru
VQ-450	Princip měření	doba letu paprsku
	Maximální rychlost pulsů	1,1 MHz (2 × 550 kHz)
	Maximální rychlost otáček zrcadla	400 otáček/s
	Přesnost	8 mm (na vzdálenost 50 m)
	Preciznost	5 mm (na vzdálenost 50 m)
IMU/GNSS	Polohová přesnost	0,02 – 0,05 m
	Úhlová přesnost (roll, pitch)	0,005°
	Úhlová přesnost (yaw)	0,015°
VMX-450-CS6	Rozlišení	5 Mpx
	Velikost pixelu	3,45 μm
	Velikost snímače	2452 × 2056 px
	Ohnisková vzdálenost	5 mm
Ladybug5	Rozlišení	30 Mpx (5 Mpx × 6 kamer)
	Velikost pixelu	3,45 μm



	Velikost snímače	2048 × 2448 px
	Ohnisková vzdálenost	4,4 mm

TESTOVACÍ POLE

Testování přesnosti MLS a mobilní fotogrammetrie bylo založeno na testování rozdílů mezi souřadnicemi kontrolních bodů, které byly určeny z dat MMS, a souřadnicemi kontrolních bodů, které byly určeny s významně vyšší přesností. V areálu výzkumného centra AdMaS bylo vytvořeno testovací pole, které se skládalo z celkem 214 bodů. Jednotlivé body testovacího pole byly stabilizovány a signalizovány šachovnicovými terči. Horizontální terče (119) byly na asfaltových komunikacích signalizovány bílou barvou. Svislé terče (95) byly vyrobeny z černého matného hliníkového plechu a byly doplněny reflexní folií. Svislé terče byly umístěny na svislém dopravním značení, betonových sloupech a budovách. Terče na budovách byly umístěny do dvou výškových úrovní: 2 m nad zemí a 10 m nad zemí.



Obr. 1: Šachovnicové terče

Body testovacího pole byly zaměřeny totální stanicí Trimble S8 HP a GNSS přijímačem Trimble R8s. Souřadnice bodů testovacího pole byly určeny na základě vyrovnání geodetické sítě metodou nejmenších čtverců s kombinací terestrických a GNSS měření. Aposteriorní 3D směrodatná odchylka vyrovnaných bodů testovacího pole odpovídá hodnotě $s_{x,y,z} = 2$ mm. Souřadnice testovacího pole byly navázány do závazného souřadnicového systému European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89) a jeho referenčního rámce European Terrestrial Reference Frame 2000 (ETRF2000) [7].

METODIKA

Pořízení a zpracování dat MMS

Data MMS byla pořízena pomocí dvou 750 m dlouhých protisměrných průjezdů vozidla při rychlosti 20 km/h. Laserová data byla registrovaná s frekvencí 2×550 kHz. Snímky z kamer byly registrovány vždy po ujetí 1,5 m. Trajektorie MMS byla vypočtena v programu Applaix POSpac. Výsledky GNSS kinematické metody byly zpřesněny a vyhlazeny obousměrným Kalmanovým filtrem pomocí dat z IMU a DMI.



Data MLS byla zpracována v programu Riegl RiPROCESS. Zpracování v RiPROCESS se skládá z konverze dat, generování mračen bodů a urovnání mračen bodů na vlíčovací body. V první fázi bylo mračno bodů vygenerováno na základě trajektorie z POSpac. Následně byly v bodových mračeně manuálně identifikovány vlíčovací body (body testovacího pole). Zpřesněná trajektorie MMS může být generována v modulu RiPRECISION na základě zadaných souřadnic vlíčovacích bodů. Výsledným produktem MLS je bodové mračno, které se skládá ze dvou samostatných mračen bodů ze dvou průjezdů MMS. Výsledné mračno bodů obsahuje více než 247 milionů bodů s hustotou 4 mm. Mračna z každého průjezdu obsahují přibližně 123 milionů bodů s hustotou 8 mm.

Data z kamer (prvky vnější orientace a nezakreslené snímky) byly exportovány pomocí programu RiPROCESS. Zpracování snímků dále probíhalo v programu Bentley ContextCapture. Celkem bylo zpracovááno více než 3 872 snímků. V první fázi proběhlo automatizované generování klíčových bodů, automatizované přiřazování spojovacích bodů a blokové vyrovnání paprskových svazků. Na závěr byly ve snímcích manuálně identifikovány vlíčovací a kontrolní body [8]. Základní parametry ze zpracování mobilní fotogrammetrie jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Parametry zpracování v ContextCapture.

Název parametru	Hodnota parametru
Počet snímků	3872
Počet navazovacích bodů	490794
Medián navazovacích bodů na snímek	412
Reprojekční chyba (RMS)	0,70 px

Filtrování a porovnání mračen bodů bylo provedeno v programu CloudCompare v2.10. Rozdíly mezi mračny bodů byly vypočteny s pomocí funkce 2.5D Volume v gridu 5 × 5 cm a promítnuty do vodorovné roviny v případě bodového mračna na komunikacích, případně do roviny fasády, v případě mračna bodů na fasádě.

Hodnocení přesnosti MMS

Souřadnice bodů testovacího pole a mračna bodů byly kvůli snadnější interpretaci transformovány do lokální topocentrické soustavy East, North, Up (E, N, U). Vlčovací body nebyly z důvodu nezávislého hodnocení přesnosti zahrnuty do výpočtů. Souřadnice bodů určené vyrovnáním (E_i , N_i , U_i) mají významně vyšší přesnost než souřadnice bodů z MMS a můžeme je pro další porovnání považovat za bezchybné. Rozdíly (δE_i , δN_i , δU_i) mezi souřadnicemi bodů testovacího pole a body určenými z mračna bodů mají pak tvar skutečných chyb a můžeme je zapsat jako

Načítání...

(1)

kde \tilde{E}_i , \tilde{N}_i , \tilde{U}_i jsou souřadnice kontrolních bodů získané z mračen bodů. 3D souřadnicové rozdíly můžeme vypočítat jako

Načítání...

(2)

Směrodatné odchylky jednotlivých složek souřadnic lze pak zapsat jako

(3)

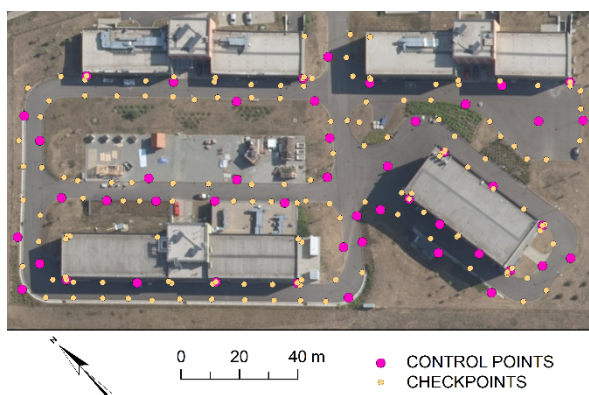
kde n je počet souřadnicových rozdílů (počet kontrolních bodů).

Důležitým ukazatelem přesnosti je výskyt hrubých chyb (odlehých hodnot). Pro testování přesnosti výsledků lze použít statistické metody popsané v normě ISO 5725-2 [9]. Pokud je testová statistika v numerickém testu odlehých hodnot menší nebo rovna kritické hodnotě 5 % ($\alpha = 5\%$), je testovaná hodnota prohlášena za správnou. Pokud je testová statistika větší než její kritická hodnota 5 % ($\alpha = 5\%$) a zároveň menší než kritická hodnota 1 % ($\alpha = 1\%$), pak je testovaná hodnota prohlášena za vybočující (straggler). V případě, že testová statistika přesáhne kritickou hodnotu 1 % ($\alpha = 1\%$), je testovaná hodnota prohlášena za odlehlou (outlier).

Zjednodušený test odlehých hodnot spočívá v rozhodnutí, zda testovaná hodnota leží v tzv. konfidenční kouli. 3D odchylky které splňují podmínku $\delta_{3D} \leq 2.8 \cdot s_{3D}$ jsou akceptovány. 3D odchylky odpovídající podmínce $2.8 \cdot s_{3D} < \delta_{3D} \leq 3.4 \cdot s_{3D}$ jsou prohlášeny za vybočující a konečně odchylky, které splňují podmínku $\delta_{3D} \geq 3.4 \cdot s_{3D}$, jsou prohlášeny za odlehlé. Komplexní test porovnává hodnoty odchylek s tzv. konfidenčním elipsoidem [10].

VÝSLEDKY

Přesnost mobilního laserového skenování a mobilní fotogrammetrie byla testována na základě odchylek mezi souřadnicemi bodů určenými z dat MMS a souřadnicemi určenými s významně vyšší přesností. Přehledka kontrolních bodů je zobrazena na Obr. 2. Výsledky hodnocení přesnosti jsou zobrazeny v Tab. 3.



Obr. 2: Přehledka vlíčovacích a kontrolních bodů

Tab. 3: Odhad přesnosti na kontrolních bodech.

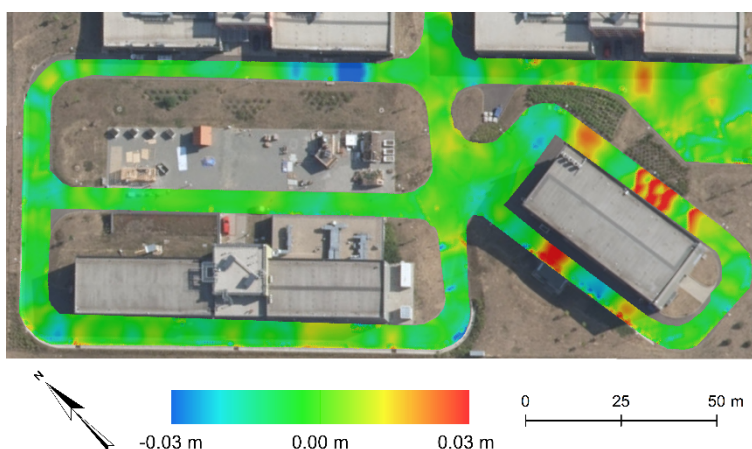
	MOBILNÍ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ				MOBILNÍ FOTOGRAMMETRIE			
	E	N	U	3D	E	N	U	3D
Počet vlíčovacích bodů	48	48	48	48	48	48	48	48
Počet kontrolních bodů	158	158	158	158	96	96	96	96
Maximální absolutní odchylka	0,037	0,025	0,044	0,050	0,095	0,216	0,124	0,230
Směrodatná odchylka	0,011	0,009	0,009	0,017	0,031	0,045	0,027	0,061



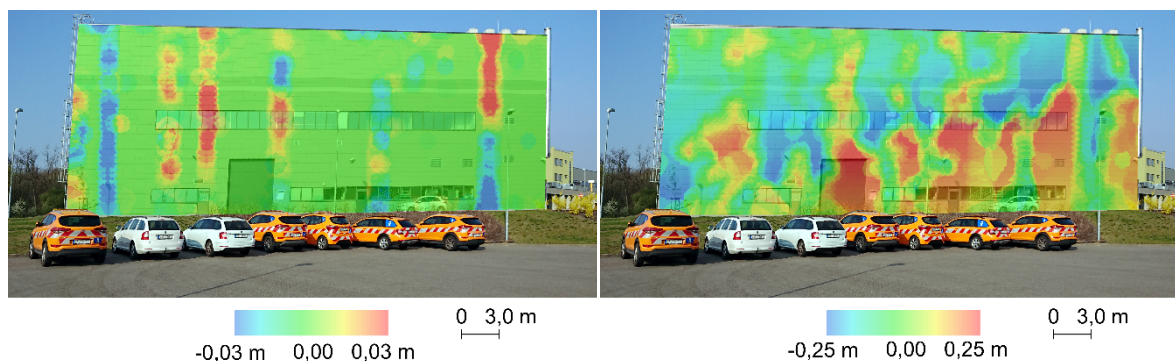
Výsledky testování relativní přesnosti odhadnuté z dvojího průřezu MMS jsou uvedené v Tab. 4. Porovnávány byly dva různé soubory mračen bodů z MLS. První soubor obsahuje mračna bodů na komunikacích (sloupec 2, Tab. 4; Obr. 3), zatímco druhý obsahuje mračna bodů na fasádách (sloupec 3, Tab. 4; Obr. 4 vlevo). Dále byla porovnána mračna bodů z mobilní fotogrammetrie automaticky generovaná v Bentley ContextCapture s mračny bodů z MLS. Mračna z MLS byla použita jako referenční, protože lze předpokládat, že mají významně vyšší přesnost než mračna z fotogrammetrie. Porovnání mračen z mobilní fotogrammetrie bylo provedeno pouze na fasádách (sloupec 4, Tab. 4; Obr. 4 vpravo). Tyto analýzy relativní přesnosti jsou založeny na rozdílech mezi mračny vypočtenými programem CloudCompare v2.10.

Tab. 4: Relativní přesnost mračen bodů.

	Dva průřezdy MLS komunikace	Dva průřezdy MLS fasáda	MLS × fotogrammetrie fasáda
Počet grid bodů	48	48	48
Maximální absolutní odchylka	96	96	96
Směrodatná odchylka	0,045	0,027	0,061



Obr. 3: Vizualizace rozdílů mezi dvěma průřezdy MMS – komunikace.



Obr. 4: Vizualizace rozdílů mezi dvěma průřezdy MLS na fasádě (vlevo), mezi MLS a mobilní fotogrammetrií (vpravo).



Výsledky testování souboru 3D odchylek na kontrolních bodech s využitím $Z_{95\%}$ a $Z_{99\%}$ konfidenčních koulí jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5: Výsledky testování vybočujících a odlehlých hodnot na kontrolních bodech pomocí konfidenční koule.

	Mobilní laserové skenování	Mobilní fotogrammetrie
$\delta_{3D} \leq Z_{95\%}$	157	92
$Z_{95\%} < \delta_{3D} \leq Z_{99\%}$	1	2
$\delta_{3D} > Z_{99\%}$	0	2

ZÁVĚR

V rámci tohoto článku bylo provedeno srovnání a zhodnocení přesnosti dat MLS a mobilní fotogrammetrie pořizovaných pomocí MMS Riegl VMX-450. V rámci areálu výzkumného centra AdMaS bylo vytvořeno nové vysoce přesné testovací pole s odhadovanou hodnotou 3D směrodatné odchylky 2 mm. Vyhodnocení přesnosti dat MMS bylo provedeno zvlášť pro MLS a pro mobilní fotogrammetrii. Přesnost MLS je charakterizovaná 3D směrodatnou odchylkou odpovídající hodnotě 0,017 m s maximální absolutní 3D odchylkou 0,050 m. Tato směrodatná odchylka je lepší než výrobcem udávaná přesnost polohy z dat GNSS/IMU (0,02 – 0,05 m) a také než výsledky jiných autorů [2]. Této přesnosti je dosaženo zejména díky zpřesnění trajektorie MMS pomocí vřícovacích bodů. Přesnost mobilní fotogrammetrie je charakterizována hodnotou 3D směrodatné odchylky 0,061 m s maximální absolutní 3D odchylkou 0,230 m. Předpoklad, že výsledky MLS mají významně vyšší přesnost než výsledky mobilní fotogrammetrie, byl splněn.

Testování relativní přesnosti výsledných produktů MLS byl proveden na dvou různých souborech dat. První soubor obsahuje body na komunikacích, zatímco druhý soubor obsahuje body na fasádě. Relativní přesnost mračen bodů na komunikacích, odvozená z rozdílů opakovaných průjezdů MMS, je charakterizována hodnotou 3D směrodatné odchylky 0,006 m s maximální absolutní 3D odchylkou 0,030 m. Relativní přesnost mračen MLS na fasádě je charakterizována hodnotou 3D směrodatné odchylky 0,008 m s maximální absolutní 3D odchylkou 0,028 m. Tyto rozdíly jsou v souladu s přesností udávanou výrobcem MMS (8 mm) a s výsledky uvedenými v [11]. Přesnost MLS splňuje požadavky na běžné mapovací účely.

Relativní přesnost mračenja bodů mobilní fotogrammetrie na fasádě byla odvozena na základě porovnání s referenčním mračenem bodů z MLS. Hodnota 3D směrodatné odchylky mračenja bodů z mobilní fotogrammetrie na fasádě odpovídá hodnotě 0,16 m s maximální absolutní 3D odchylkou 0,25 m. Přesnost mračenja bodů z mobilní fotogrammetrie je významně nižší, než přesnost manuálně měřených bodů na snímcích.

Relativní četnost odlehlých hodnot vypočtená na základě testování 3D odchylek pomocí konfidenční koule $Z_{99\%}$ je 0,0 % v případě MLS a 2,2 % v případě mobilní fotogrammetrie. Tyto výsledky jsou pro účely standardního mapování přijatelné.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl v rámci řešení projektu Specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-19-5704.



REFERENCE

- [1] Puente, I., H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez a P. Arias. Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement* [online]. 2013, 46(7), 2127-2145 [cit. 2020-10-29]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2013.03.006
- [2] Mattheuwsen, L., M. Bassier a M. Vergauwen. Theoretical Accuracy Prediction And Validation of Low-End And High-End Mobile Mapping System In Urban, Residential And Rural Areas. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2019, XLII-2/W18, 121-128 [cit. 2020-10-29]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-121-201
- [3] Kersting, A. P. a P. Friess. Post-Mission Quality Assurance Procedure for Survey-Grade Mobile Mapping Systems. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2016, XLI-B1, 647-652 [cit. 2020-10-29]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B1-647-2016
- [4] Luhmann, T., Stuart R., Stephen K. a Jan B. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging [online]. De Gruyter, 2020 [cit. 2020-10-29]. ISBN 9783110607253. Dostupné z: doi:10.1515/9783110607253
- [5] Riegl Laser Measurement Systems GmbH. RIEGL VMX-450, Compact Mobile Laser System, Data Sheet. 2015.
- [6] Riegl Laser Measurement Systems GmbH. RiPROCESS user guide, Austria, 2016.
- [7] Z. Altamimi. EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems, 2018.
- [8] Bentley Systems, ContextCapture User Guide, 2019.
- [9] International standard ISO 5725-2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method, 1994.
- [10] P. Cederholm, Deformation analysis using confidence ellipsoids, *Survey Review*, United Kingdom, 37:287, pp. 31–45, 2003.
- [11] Toschi, P. Rodríguez-González, F. Remondino, S. Minto, S. Orlandini, and A. Fuller, Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W4, pp. 245–253, 2015.