VLIV POČTU VLÍCOVACÍCH BODŮ NA PŘESNOST MOBILNÍHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

INFLUENCE OF THE NUMBER OF CONTROL POINTS ON MOBILE LASER SCANNING ACCURACY

Jakub Nosek^{*1}, Petr Kalvoda¹, Michal Kuruc¹, Tomáš Volařík¹

^{*}nosek.j@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, Veveří 331/95, Brno

Abstrakt

Mobilní laserové skenování (MLS) je v současné době běžně využíváno v řadě geodetických aplikací, např. při mapování rozsáhlých oblastí. Tento článek se zaměřuje na vliv počtu vřícovacích bodů na výslednou přesnost bodových mračen MLS. MLS mračno bylo porovnáno s referenčními daty v podobě bodů testovacího pole určeného s vysokou přesností a referenčního mračna terestrického laserového skenování. Testování potvrdilo požadavky výrobce na maximální vzdálenost mezi vřícovacími body 100. Vřícování s vyšší hustotou (až 50 m) umožňuje odstranit lokální deformace v mrazech MLS.

Klíčová slova

MMS, přesnost, laserové skenování, MLS

Abstract

Mobile laser scanning (MLS) is currently commonly used in a number of surveying applications, such as large-area mapping. This paper focuses on the effect of the number of control points on the resulting accuracy of MLS point clouds. The MLS cloud was compared with reference data in form of high-precision test point field and a terrestrial laser scanning reference cloud. Testing confirmed the manufacturer's requirements for the maximum spacing of control points 100 m. Matching with a higher density (up to 50 m spacing) allows eliminating local deformations in MLS clouds.

Key words

MMS, accuracy, laser scanning, MLS

1 ÚVOD

Mobilní laserové skenování (MLS) je v současné době využíváno pro pořizování 3D mračen bodů v mnoha aplikacích, jako je mapování, katastr nemovitostí, 3D modelování měst a dopravní stavitelství [1], [2]. Geometrická přesnost výsledných produktů MLS je ovlivněna faktory, jako je přesnost vstupních dat, použitými algoritmy a hustotou vstupních a výstupních dat.

Přesnost MLS může být rozdělena na absolutní a relativní složku, které korespondují s polohovými a mapovacími subsystemy mobilního mapovacího systému (MMS). Polohový subsystem využívá data z Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS), inerciální jednotky (IMU) a odometru (DMI). Výstupem polohového subsystemu je trajektorie MMS. Tato trajektorie může být následně zpřesněna s využitím vhodného počtu vřícovacích bodů (VB). Mapovací subsystem zajišťuje pořizování prostorových dat pomocí laserových skenerů a případně digitálních kamer. Přesná kalibrace obou subsystemů je jedním ze základních předpokladů pro zajištění přesnosti výsledných bodových mračen.

Návrhem metod pro zpřesňování výsledků MLS a hodnocením přesnosti procesu MLS se zabývalo několik autorů. Geometrická přesnost výsledných bodových mračen MLS může být zpřesněna využitím signalizovaných VB [3], které jsou identifikovány v bodových mrazech a pomocí vícenásobných průjezdů MMS [4]. Větší počet VB umožňuje dosahovat vyšší přesnosti na úkor vyšší časové a finanční náročnosti procesu. Nezávislé hodnocení chyb ve výsledných bodových mrazech lze provádět s využitím kontrolních bodů. Pro korektní hodnocení přesnosti bodového mračna s využitím kontrolních bodů je ale potřeba vytvořit testovací pole s dostatečným počtem kontrolních bodů.

Druhou možností, jak kontrolovat geometrickou přesnost bodových mračen, je porovnání těchto mračen s přesným referenčním bodovým mračnem. Je nutné, aby přesnost referenčního bodového mračna byla významně vyšší než přesnost testovaného mračna. Vhodnou technologií pro tvorbu referenčního mračna je terestrické laserové skenování (TLS). Výhodou mračen TLS je jejich vysoká hustota a geometrická přesnost, díky které lze snáze hledat lokální deformace v mračcích MLS. Oproti zhotovení testovacího pole je ale tvorba referenčního TLS mračna technologicky a finančně náročná a referenční mračno má obvykle horší přesnost než jednotlivé kontrolní body.

Kaartien et al. [5] testovali 5 různých MMS na 1700 m dlouhém úseku silnice. Horizontální a vertikální přesnost MLS určovali na základě přirozeně signalizovaných kontrolních bodů, jako jsou rohy budov, rohy obručnicků a sloupky, extrahovaných z bodových MLS mračen. Vertikální přesnost výsledků z testovaných MMS byla lepší než 35 mm do vzdálenosti 35 m od trajektorie. Bodová mračna z nejlepšího testovaného MMS dosahovala vertikální přesnosti $\pm 1\text{--}2$ cm a horizontální přesnosti ± 25 mm.

Fryskowska and Wróblewski [6] využili referenční TLS bodové mračno pro testování přesnosti MMS dat. Testování bylo založeno na porovnání délek, jako jsou rozměry částí budov (stěn, střech) a také pomocí 395 kontrolních bodů. Celková horizontální a vertikální přesnost MLS mračna byla ± 60 mm, respektive ± 42 mm.

Tento článek se zaměřuje na posouzení vlivu počtu VB na přesnost bodových mračen MLS. Na rozdíl od ostatních článků bude v tomto článku pro stanovení přesnosti MLS použito velmi přesného testovacího pole (3D směrodatná odchylka jednotlivých bodů $s_{3D} = 2,0$ mm) a referenčního TLS bodového mračna.

2 POPIS MMS RIEGL VMW-450

MMS Riegl VMX-450 (základní technické charakteristiky uvedeny v Tab. 1) je modulární systém skládající se ze dvou laserových skenerů Riegl VQ-450, čtyř kamer VMY-450-CS6, panoramatické kamery POINT GREY Ladybug5, přijímače GNSS, IMU, odometru VMX-450-DMI a řídicí jednotky Riegl VMX-450-CU [7].

Absolutní polohová a úhlová přesnost deklarovaná výrobcem je splnitelná pouze za předpokladu dobrých podmínek pro měření GNSS (minimální výpadky signálu), při užití metody dvojitých diferencí (připojení na referenční stanici, případně síť permanentních stanic GNSS) a využití dat z DMI. Hodnoty relativní polohové přesnosti v Tab. 1 odpovídají situaci, kdy je vzdálenost mezi sousedními VB maximálně 100 m.

Tab. 1 Vybrané technické parametry MMS Riegl VMX-450 [7].

Senzor	Název parametru	Hodnota parametru
VQ-450	Princip měření	Měření tranzitního času
	Maximální frekvence pulsů	1,1 MHz (2×550 kHz)
	Maximální rychlost otáček zrcadla	400 otáček/s
	Vnější přesnost	8 mm ($1 \times \sigma$ na vzdálenost 50 m)
	Vnitřní přesnost	5 mm ($1 \times \sigma$ na vzdálenost 50 m)
GNSS/IMU	Absolutní polohová přesnost	0,02–0,05 m ($1 \times \sigma$)
	Relativní polohová přesnost	0,01 m ($1 \times \sigma$ při vzdálenostech sousedních VB < 100 m)
	Úhlová přesnost (roll, pitch)	0,005° ($1 \times \sigma$)
	Úhlová přesnost (yaw)	0,015° ($1 \times \sigma$)

3 REFERENČNÍ DATA A ZPRACOVÁNÍ DAT MMS

Pro testování přesnosti bylo využito testovací pole (TP) a referenční TLS mračno. TP bylo vytvořeno při řešení interního projektu Fakulty stavební VUT v Brně FAST-S-19-5704 „Geometrická přesnost mobilních mapovacích systémů“ v areálu výzkumného centra ADMAS. TP se skládá z celkem 214 bodů signalizovaných a stabilizovaných pomocí šachovnicových terčů. Horizontální terče (119) byly vyznačeny bílou barvou na asfaltových komunikacích (Obr. 1 vpravo). Vertikální terče (95) byly umístěny na dopravních značkách, budovách, betonových sloupech a dalších vhodných svislých předmětech. Obr. 1 zobrazuje ukázkou vertikálního (vlevo) a horizontálního (vpravo) terče. Body TP byly zaměřeny pomocí totální stanice Trimble S8 HP a GNSS systémem Trimble R8s. Souřadnice bodů TP byly určeny vyrovnáním geodetické sítě metodou nejmenších čtverců kombinací terestrických a GNSS měření v systému ETRS89 (ETRF2000). Odhad přesnosti bodů TP lze vyjádřit pomocí 3D směrodatné odchylky $s_{3D} = \pm 2,0$ mm. Referenční TLS mračno bylo získáno dvěma statickými laserovými skenerem Faro Focus3D X 130. Referenční TLS mračno bylo vličováno na celkem 30 bodů TP. Odhad

přesnosti TP a referenčního TLS mračna v podobě horizontálních (s_{HZ}), vertikálních (s_V) a 3D směrodatných odchylek (s_{3D}) je uvedena v Tab. 2.

Obr. 1 Ukázka vertikálního (vlevo) a horizontálního terče (vpravo).

Tab. 2 Přesnost TP a referenčního TLS mračna.

Varianta	s_{HZ}	s_V	s_{3D}
TP	$\pm 1,6$ mm	$\pm 1,4$ mm	$\pm 2,0$ mm
Referenční TLS mračno	$\pm 7,4$ mm	$\pm 4,1$ mm	$\pm 8,5$ mm

MLS data byla pořízena pomocí dvou protisměrných 600 m dlouhých průjezdů MMS při rychlosti 20 km/h. Skenovaný areál má rozměry přibližně 190×90 m v horizontálním směru. Výšková členitost areálu je přibližně 20 m. Trajektorie MMS byla vypočtena v programu Applanic POSPac s využitím kinematické GNSS metody s následným zpracováním. Trajektorie byla zpřesněna pomocí Kalmanova filtru kombinací dat z GNSS, IMU a odometru.

Zpracování MLS bodových mračen probíhalo v programu Riegl RiPROCESS. Zpracování v programu RiPROCESS se skládá z konverze dat, generování MLS bodových mračen a zpřesňování trajektorií. Nejprve byla MLS bodová mračna vypočtena na základě trajektorií z programu POSPac. Následně byly v MLS mračcích manuálně identifikovány body TP. Zpřesněná trajektorie byla vypočtena na základě vazeb mezi souřadnicemi bodů TP a souřadnicemi těchto bodů identifikovaných v MLS mračcích v modulu RiPRECISION. Výsledná bodová mračna ze dvou průjezdů MMS byla spojena v jedno a obsahují přibližně 247 000 000 bodů při průměrné hustotě 4 mm. Filtrace a čištění MLS bodových mračen bylo vytvořeno v programu CloudCompare v2.11.

4 METODOLOGIE URČOVÁNÍ PŘESNOSTI

Určování přesnosti výsledných MLS mračen bylo založeno na porovnání mračen s referenčními daty. Testování přesnosti založené na TP využívalo rozdílů mezi referenčními souřadnicemi bodů TP a jejich souřadnicemi získanými z MLS bodových mračen. Určování přesnosti založené na referenčním TLS mračnu vycházelo z jeho porovnání s MLS bodových mračnem v programu CloudCompare v2.11. Rozdíly mezi mračky byly vypočteny pomocí funkce Cloud-to-Cloud Distance s lokálním modelováním metodou nejmenších čtverců. Horizontální přesnost MLS byla určována na fasádách, zatímco vertikální přesnost MLS byla určována na komunikacích. Pro testování přesnosti byly využívány horizontální, vertikální a 3D směrodatné odchylky (68% konfidenční interval). Dále byla podle [8] bodová mračna testována na výskyt vybočujících (kritická hodnota $\alpha = 5\%$) a odlehlých ($\alpha = 1\%$) hodnot.

Globální přesnost bodových mračen na základě odchylek na bodech TP byla testována v několika variantách podle počtu a rozmístění VB (varianty 0VB, 1 VB, 3VB, 4 VB, 5 VB, 6 VB, 7 VB, 10 VB a 13 VB).

5 VÝSLEDKY

Výsledky byly rozděleny do dvou částí podle zvoleného referenčního datasetu. Konfigurace VB v jednotlivých variantách podle počtu použitých VB znázorňuje Obr. 2. Odhad globální přesnosti bodových mračen MLS v podobě směrodatných odchylek vypočtených na základě odchylek na bodech TP jsou uvedeny v Tab. 3. Přesnost výsledků MLS roste společně se zvyšujícím se počtem VB až po variantu s 6 VB. To odpovídá požadavkům výrobce na maximální vzdálenost mezi VB 100 m.

Obr. 2 Konfigurace variant s různým počtem VB.

Tab. 3 Přesnost variant odvozená z odchylek na kontrolních bodech.

Varianta	Počet	SHZ	SV	S3D
	kontrolních bodů			
0 VB	204	±36 mm	±127 mm	±130 mm
1 VB	203	±26 mm	±42 mm	±59 mm
2 VB	202	±32 mm	±43 mm	±64 mm
3 VB	201	±18 mm	±33 mm	±49 mm
4 VB	200	±17 mm	±59 mm	±59 mm
5 VB	199	±20 mm	±37 mm	±51 mm
6 VB	198	±16 mm	±30 mm	±48 mm
7 VB	197	±16 mm	±30 mm	±46 mm
10 VB	194	±15 mm	±32 mm	±46 mm
13 VB	191	±14 mm	±34 mm	±43 mm

Horizontální a vertikální přesnost MLS vypočtená na základě porovnání s referenčním TLS mračnem je uvedena v Tab. 4. Relativní četnost vybočujících hodnot dosáhla 3 %. Až 2 % hodnot v bodových mračnec MLS bylo vyhodnoceno jako odlehlých. Při vličování na více než 6 VB se globální přesnost zlepšuje pouze minimálně. Vličování na 10 VB (průměrná vzdálenost mezi body 50 m) nicméně významně redukuje lokální deformace v MLS mračnec. Obr. 3 a Obr. 4 znázorňují rozdíly mezi referenčním TLS mračnem a MLS mračny větší než 20 mm.

Tab. 4 Přesnost variant odvozená z referenčního TLS mračna.

Varianta	SHZ	sv
6 VB	±14 mm	±7,7 mm
7 VB	±14 mm	±7,4 mm
10 VB	±6,1 mm	±7,7 mm
13 VB	±5,9 mm	±7,9 mm

Obr. 3 Vertikální odchylky větší než 20 mm mračen z variant 6VB, 7VB (nahore), 10VB, 13VB (dole) s referenčním TLS mračem.

Obr. 4 Horizontální odchylky na vybrané fasádě větší než 20 mm mračen z variant 6VB (nahore), 7VB, 10VB, 13VB (dole) s referenčním TLS mračem.

6 ZÁVĚR

Použití vřícovacích bodů významně zvyšuje přesnost bodových mračen MLS, zejména v oblastech se špatnými podmínkami GNSS. Z tohoto důvodu jsme testovali vliv počtu VB na výslednou přesnost MLS mračen. Testování přesností bylo rozčleněno do dvou samostatných částí podle zvolených referenčních dat. Přesnost na základě referenčního TLS mračna byla samostatně určována pro horizontální složku souřadnic (na fasádách objektů) a vertikální složku (na komunikacích).

Na základě testování přesnosti lze říci, že přesnost MLS mračen se významně zvyšuje až do varianty vličování na 6 VB. Tato hodnota odpovídá požadavku výrobce na minimální vzdálenost mezi VB 100 m. I přesto, že při přidávání dalších VB se globální přesnost MLS mračen zvyšuje pouze mírně, výsledky testování ukázaly, že vličování na 10 VB (vzdálenost mezi body 50 m) může odstranit některé lokální deformace v mračcích MLS.

Přesnost dosažitelná při vličování se vzdáleností mezi VB 100 m je dostatečná pro většinu běžných aplikací. Nicméně, lokální přesnost MLS mračen se zvyšuje až do průměrné vzdálenosti mezi VB 50 m.

Poděkování

Článek vznikl v rámci řešení projektu Specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-21-7484 Efektivita využití low-cost kamer v aplikacích blízké fotogrammetrie.

Použité zdroje

- [1] Wang, Chen, Zhu, Liu, Li, Zheng. A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas. *Remote Sensing*. 2019 [cited 2021Oct.9];11(13). Available from: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/13/1540>
- [2] Al-Bayari O. Mobile mapping systems in civil engineering projects (case studies). *Applied Geomatics* [Internet]. 2019;11(1):1-13. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12518-018-0222-6>
- [3] Schaer P, Vallet J. TRAJECTORY ADJUSTMENT OF MOBILE LASER SCAN DATA IN GPS DENIED ENVIRONMENTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [Internet]. 2016 [cited 2021Oct.9];XL-3/W4:61-64. Available from: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W4/61/2016/isprs-archives-XL-3-W4-61-2016.pdf>
- [4] Nolan J, Eckels R, Evers M, Singh R, Olsen MJ. MULTI-PASS APPROACH FOR MOBILE TERRESTRIAL LASER SCANNING. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [Internet]. 2015 [cited 2021Oct.9];II-3/W5:105-112. Available from: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-3-W5/105/2015/>
- [5] Kaartinen H, Hyypä J, Kukko A, Jaakkola A, Hyypä H. Benchmarking the Performance of Mobile Laser Scanning Systems Using a Permanent Test Field. *Sensors*. 2012;12(9):12814-12835. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/12814>
- [6] Fryskowska A, Wróblewski P. Mobile Laser Scanning accuracy assessment for the purpose of base-map updating. *Geodesy and Cartography*. 2018;67(1):35-55.
- [7] Riegl Laser Measurement Systems GmbH, RIEGL VMX-450: Compact Mobile Laser System, Data Sheet, 2015.
- [8] Kalvoda P, Nosek J, Kuruc M, Volarik T, Kalvodova P. Accuracy Evaluation and Comparison of Mobile Laser Scanning and Mobile Photogrammetry Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;609. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/609/1/012091>