



TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI MOBILNÍHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

*Jakub Nosek, Lada Hoffmannová, Jana Otrusinová, Petr Kalvoda, Michal Kuruc,
Tomáš Volařík and Petra Stránská*

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

ABSTRAKT

Článek popisuje zpracování mračna bodů pořízeného mobilním mapovacím systémem Riegl VMX-450. Mobilním mapovacím systémem byl nasnímán areál Výzkumného centra AdMaS, VUT v Brně, kde bylo pro účely testování zřízeno kalibrační pole. Souřadnice bodů kalibračního pole byly získány výpočtem geodetické sítě vyrovnáním metodou nejmenších čtverců. Výsledná přesnost je analyzována na základě rozdílů souřadnic bodů kalibračního pole určených vyrovnáním sítě a souřadnic určených z mračna bodů.

KLÍČOVÁ SLOVA

laserové skenování, mobilní mapování, testování přesnosti, vlíčovací body

ÚVOD

Mobilní mapovací systémy se v současné době využívají pro geodetické aplikace stále častěji. Přesnost určení souřadnic pomocí těchto technologií je závislá na řadě vlivů a nelze ji jednoduše vyjádřit hodnotou, která by odpovídala všem situacím. Cílem tohoto článku je analýza přesnosti souřadnic bodů získaných z výsledných bodových mračen mobilního laserového skenování. Testováno bylo více výpočetních variant výsledných mračen. Pro testování byl použit mobilní mapovací systém Riegl VMX-450, kterým disponuje Výzkumné centrum AdMaS na Fakultě stavební VUT v Brně.

MOBILNÍ MAPOVACÍ SYSTÉMY

Mobilní mapovací systémy (MMS) jsou zařízení určená ke sběru geoprostorových dat s využitím mobilního nosiče (například automobil). MMS bývají zpravidla vybaveny laserovými skenery, digitálními kamerami, přijímačem GNSS, inerciální měřicí jednotkou (IMU), odometrem a výpočetními prostředky, které zajišťují sběr dat a jejich synchronizaci.

Výzkumné centrum AdMaS je vybaveno MMS Riegl VMX-450 (Obr. 1). Tento MMS je vybaven dvěma laserovými skenery, čtyřmi kamerami, jednou panoramatickou kamerou, odometrem, IMU a přijímačem GNSS. Systém umožňuje skenovat rychlostí až 1,1 MHz. Výrobcem udávaná přesnost laserového skenování je 8 mm [1].



KALIBRAČNÍ POLE

Pro potřeby testování přesnosti MMS bylo nutno vytvořit kalibrační pole, které bude mít vyhovující charakteristiky přesnosti a zároveň bude tvořeno dostatečným počtem bodů. Z důvodu snadné dostupnosti a dlouhodobé udržitelnosti stabilizačních značek jednotlivých



Obr. 1: MMS Riegl VMX-450 v popředí Výzkumného centra AdMaS

bodů kalibračního pole byl pro jeho zřízení zvolen areál Výzkumného centra AdMaS. V areálu centra AdMaS bylo zřízeno celkem 214 kalibračních bodů, které byly signalizovány a stabilizovány pomocí šachovnicových terčů. Horizontální terče (119) byly vyznačeny bílou barvou na asfaltových komunikacích. Vertikální terče (95) byly zhotoveny z černého matného plechu, který byl doplněn o reflexní fólii. Vertikální terče byly umístěny nejen na jednotlivé budovy v centru AdMaS (ve dvou výškových úrovních nad terénem: 2 m, 10 m), ale také na svislé dopravní značení, betonové sloupy a další vhodné svislé konstrukce.



Obr. 2: Ukázka horizontálního a vertikálního terče

Souřadnice jednotlivých bodů kalibračního pole byly určeny pomocí vyrovnání sítě metodou nejmenších čtverců. Nejprve byla vytvořena účelová geodetická síť, ze které byly následně určeny body kalibračního pole v systému ETRS89 (ETRF2000). Účelová síť byla vyrovnána jako volná. Do výpočtu vstupovaly jak terestricky měřené veličiny pomocí totální stanice Trimble S8, tak souřadnice čtyř bodů určené statickou metodou pomocí technologie GNSS. Samotné kalibrační pole bylo na tuto síť navázáno pomocí terestrického měření a vyrovnáno jako vázaná síť. Na základě výsledků vyrovnání lze kalibračnímu poli přisoudit souhrnná přesnost charakterizovaná střední prostorovou chybou $m_{x,y,z} = 2$ mm.



METODIKA

Sběr dat určených k testování mobilního laserového skenování byl proveden 17. června 2019 v dopoledních hodinách. Nájezd testovací lokality (Obr. 3) začínal 5minutovou statickou observací GNSS, která v následném zpracování trajektorie umožňuje spolehlivější řešení ambiguit. Inicializace jednotky IMU probíhala mimo areál AdMaS s využitím vyšších rychlostí. Samotný sběr dat v areálu AdMaS trval přibližně 15 minut při rychlosti 30 km/h. V areálu byly obousměrně projety všechny dostupné komunikace.



Obr. 3: Znárodnění průjezdu MMS areálem AdMaS

Zpracování dat probíhalo v několika krocích. V programu POSPac byla řešena trajektorie MMS. Základem pro výpočet trajektorie byly observace technologií GNSS. Poloha MMS v jednotlivých observovaných epochách byla řešena pomocí kinematické relativní metody s připojením na okolní stanice České sítě permanentních stanic (CZEPOS). V následném zpracování byla trajektorie „vyhlazena“ na základě dat z IMU.

Zpracování dat laserových skenerů probíhalo v programu RiPROCESS od firmy Riegl. Na základě zpřesněné trajektorie MMS získané ze zpracování v programu POSPac byla vygenerována mračna bodů z obou skenerů a jednotlivých opakovaných nájezdů. Mračna bodů byly automatickou funkcí relativně urovnaný vůči sobě. V programu RiPROCESS probíhalo i vyhledání a označení bodů kalibračního pole v bodovém mračnu. Samotné vlícování na vybrané kalibrační body probíhalo v programu RiPRECISION.

Pro účely porovnání bylo zvoleno několik variant vlícování a způsobu následného urovnaní mračen bodů. Pro vlícování byly použity pouze horizontální terče, které jsou v případě MMS v praxi používány častěji. Vlícováno bylo ve dvou variantách:

- velký počet vlícovacích bodů (93); očekává se vyšší přesnost výsledného mračna
- malý počet vlícovacích bodů (10); reálnější využití v praxi

Urovnaní navlícovaných mračen bodů bylo prováděno taktéž ve dvou variantách:

- rigid
- non-rigid

Varianta *rigid* představuje shodnostní transformaci mračna bodů na body kalibračního pole. Mračno (případně trajektorie) je transformováno pomocí 6 transformačních parametrů (3 translace, 3 rotace). V případě varianty *non-rigid* je celé mračno transformováno pomocí 6 parametrů podobně jako je tomu u varianty *rigid*, ale zároveň je lokálně deformováno tak, aby se co nejvíce přimykalo vlícovacím bodům [2][3].

Ke stanovení přesnosti výsledných mračen byly použity body nepoužité pro vlícování (kontrolní body). Pro snadnější interpretaci byly souřadnice bodů kalibračního pole a bodová mračna transformovány do lokální topocentrické souřadnicové soustavy NEU (North, East, Up) [4] Souřadnice kalibračního pole určené z vyrovnání mají proti souřadnicím odměřeným



z bodového mračka významně vyšší přesnost. Rozdíly jednotlivých složek souřadnic na bodech kalibračního pole δ_X , δ_Y , δ_Z lze tedy považovat za skutečné chyby. Přesnost jednotlivých variant je charakterizována středními chybami složek souřadnic m_N , m_E , m_U vypočtenými ze vztahu

$$m_N = \sqrt{\frac{\delta_N^2}{n}}, m_E = \sqrt{\frac{\delta_E^2}{n}}, m_U = \sqrt{\frac{\delta_U^2}{n}},$$

kde n je počet kontrolních bodů.

VÝSLEDKY

Přesnost mobilního laserového skenování byla posuzována na základě rozdílů souřadnic bodů kalibračního pole určených vyrovnáním metodou nejmenších čtverců a souřadnic odměřených z bodových mraček. Data byla vyhodnocována ve dvou variantách. Ve variantě "Vše" bylo zvoleno 93 vřícovacích bodů a 87 kontrolních bodů. Varianta "Výběr" byla vřícována na 10 bodů, přičemž kontrolních bodů bylo 173. V tabulkách 1 a 2 jsou shrnuty dosažené charakteristiky přesnosti.

Tab. 1: Souřadnicové odchylky na bodech kalibračního pole, varianta „Vše“

		non-rigid			rigid		
		dN [m]	dE [m]	dU [m]	dN [m]	dE [m]	dU [m]
Průměr		-0,056	0,005	0,045	-0,007	0,000	0,011
Maxima absolutních hodnot		5,118	0,781	1,781	0,078	0,049	0,086
Medián		-0,004	0,002	0,004	-0,008	0,000	0,010
Střední chyba		0,594	0,149	0,253	0,026	0,016	0,018
Rozdíl	0,00 – 0,10 m	72 %	78 %	85 %	100 %	100 %	100 %
	0,11 – 0,20 m	16 %	12 %	5 %	0 %	0 %	0 %
	0,21 – 1,00 m	8 %	10 %	9 %	0 %	0 %	0 %
	> 1,00 m	4 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %

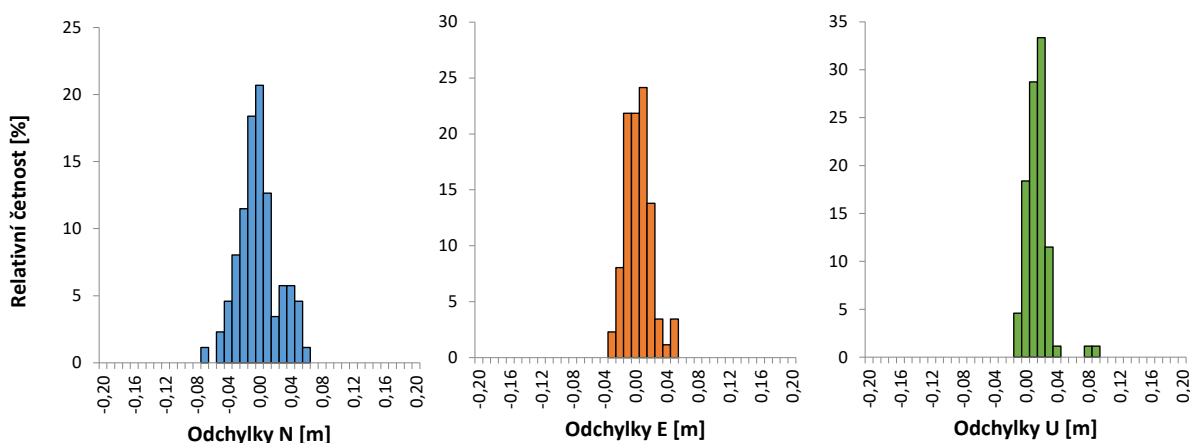
Tab. 2: Souřadnicové odchylky na bodech kalibračního pole, varianta „Výběr“

		non-rigid			rigid		
		dN [m]	dE [m]	dU [m]	dN [m]	dE [m]	dU [m]
Průměr		-0,021	0,059	-0,202	-0,054	0,000	0,097
Maxima absolutních hodnot		1,814	1,544	3,813	0,125	0,054	0,173
Medián		-0,046	0,003	0,016	-0,056	0,000	0,097
Střední chyba		0,380	0,284	0,860	0,059	0,017	0,098
Rozdíl	0,00 – 0,10 m	83 %	85 %	78 %	98 %	100 %	63 %
	0,11 – 0,20 m	2 %	3 %	5 %	2 %	0 %	37 %
	0,21 – 1,00 m	10 %	9 %	8 %	0 %	0 %	0 %
	> 1,00 m	5 %	3 %	9 %	0 %	0 %	0 %

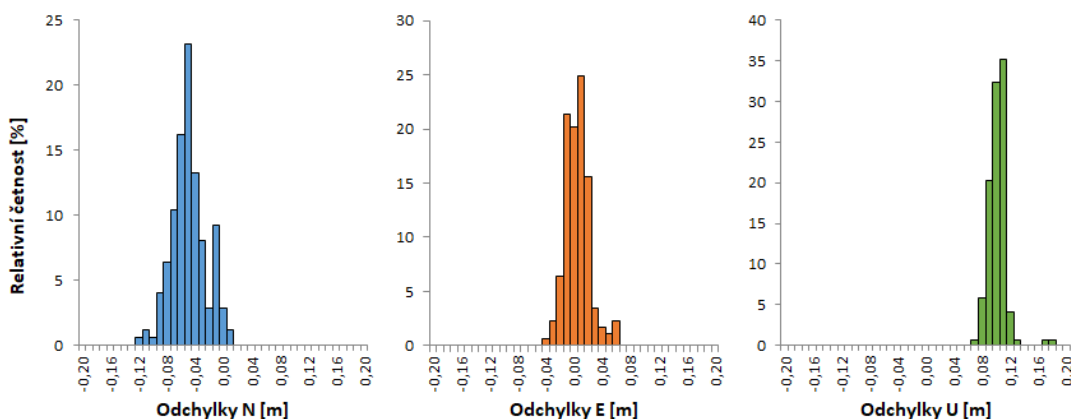


Na první pohled je zřejmé, že varianta non-rigid dává významně horší výsledky. U obou variant non-rigid si můžeme všimnout, že při větším množství vlíčovacích bodů nedošlo k dosažení vyšší přesnosti. U variant rigid vidíme rozdíl v dosažené výškové přesnosti, kdy se přesnost při použití většího počtu vlíčovacích bodů statisticky významně zvýšila. Toto tvrzení bylo ověřeno pomocí statistického testu na testování shodnosti dvou středních chyb (Fischerův test) [5]. Varianta rigid s použitím velkého počtu vlíčovacích bodů je tedy z hlediska přesnosti nejoptimálnější variantou.

Souřadnicové odchylky pro variantu rigid, uvedené v tabulkách 1 a 2, jsou pro názornější interpretaci znázorněny graficky v obrázcích 4 a 5.



Obr. 4: Grafické znázornění souřadnicových odchylek, varianta „Vše“ - rigid



Obr. 5: Grafické znázornění souřadnicových odchylek, varianta „Výběr“ - rigid

Následně bylo provedeno vyhodnocení souřadnicových odchylek u vertikálních terčů umístěných na budovách v různých výškových úrovních. Dolní terče jsou umístěné přibližně 2 m nad terénem a horní přibližně 10 m nad terénem, jak je popsáno v kapitole Kalibrační pole. Porovnání těchto hodnot bylo provedeno pouze pro metody vlíčování rigid. Dosažené výsledky vidíme v tabulce 3.



Tab. 3: Porovnání přesnosti na bodech v různých výškových úrovních

	varianta „Vše“			varianta „Výběr“		
	dN [m]	dE [m]	dU [m]	dN [m]	dE [m]	dU [m]
Terče horní	0,026	0,015	0,028	0,058	0,015	0,107
Terče dolní	0,026	0,018	0,015	0,061	0,018	0,098

Z výsledků je opět patrné zvýšení výškové přesnosti při použití více vlíčovacích bodů. Předpoklad pro nižší přesnost u horních terčů se na základě Fischerova testu ani v jedné z obou variant nepotvrdil. Dosažená přesnost na terčích v obou výškových úrovních je srovnatelná, přičemž střední souřadnicová chyba terčů ve variantě „Vše“ dosahuje hodnoty 0,022 m a ve variantě „Výběr“ hodnoty 0,043 m.

ZÁVĚR

V rámci testování přesnosti mobilního laserového skenování byly vyhodnocovány dvě varianty vlíčování bodových mračen. Ve variantě „Vše“ byl použit velký počet vlíčovacích bodů (93) pro účely zjištění, zda dojde ke zvýšení přesnosti. Ve variantě „Výběr“ byl použit malý počet vlíčovacích bodů (10), což více odpovídá reálnému využití v praxi. Dále byly zpracovány varianty výpočtu rigid a non-rigid. Jedná se o varianty, které nabízí program RiPRECISION pro urovnání navlíčovaných mračen bodů.

Z výsledků testování vyplývá, že varianta non-rigid nedává uspokojivé výsledky. Varianta rigid dává výsledky v rámci očekávané přesnosti.

Při použití velkého počtu vlíčovacích bodů dojde ke zvýšení výškové přesnosti. Dále bylo ověřeno, že přesnost určení terčů ve vyšších výškových úrovních (přibližně 10 m nad terénem) je srovnatelná s přesností určení terčů ve výškové úrovni přibližně 2 m nad terénem, tedy ve výšce montáže laserového skeneru na MMS. Výsledné charakteristiky přesnosti lze vyjádřit střední souřadnicovou chybou $m_{N,E}$ a střední chybou souřadnice U m_U . Střední chyba $m_{N,E}$ ve variantě „Vše“ dosahuje hodnoty 0,022 m a ve variantě „Výběr“ hodnoty 0,043 m. Střední chyba m_U ve variantě „vše“ dosahuje hodnoty 0,018 m a ve variantě „Výběr“ hodnoty 0,098 m. Testováním se prokázalo, že výslednou přesnost zásadním způsobem ovlivňuje množství a konfigurace vlíčovacích bodů. Kalibrační pole v areálu Výzkumného centra AdMaS, VUT v Brně nám otevírá prostor pro další testování, v rámci kterého se budeme mimo jiné věnovat optimalizaci výběru vlíčovacích bodů.

PODĚKOVÁNÍ

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

REFERENCE

[1] Compact Mobile Laser Scanning System: Riegl VMX-450, 2014. Riegl Laser Measurement Systems GmbH. Uživatelský manuál.

[2] Rigorous Scan Data Adjustment for kinematic LIDAR systems. SPAR 3D [online]. [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <https://sparmsdc-static.s3.amazonaws.com/uploads/2014/08/Swatschina,%20Paul%20-%20Rigorous%20scan%20data%20adjustment%20for%20kinematic%20LIDAR%20systems.pdf>



- [3] Monnier, F., Vallet, B., Pararoditis, N., Papelard, J.-P., David, N., 2013. Registration of terrestrial mobile laser data on 2D or 3D geographic database by use of a non-rigid ICP approach. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2013, II-5/W2, 193-198 [cit. 2019-10-23]. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-193-2013. ISSN 2194-9050. Dostupné z: <http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-5-W2/193/2013/>
- [4] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008. *GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Austria: Springer Wien New York. ISBN 978-3-211-73012-6.
- [5] Hampacher M., Štroner, M., 2008. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. Vydání druhé, upravené a doplněné. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-05843-5.