

Ručné mobilné laserové skenovanie a technológia SLAM v lesnom prostredí – posúdenie polohovej presnosti objektov a využiteľnosti technológie

Ing. Juliána Chudá,
Katedra plánovania lesných zdrojov a informatiky,
Lesnícka fakulta,
Technická univerzita vo Zvolene

Abstrakt

Vyhodnotenie polohovej presnosti objektov odvodených z mračna bodov, získaného ručným laserovým skenerom, využívajúcim technológiu simultánneho určenia polohy a mapovania. Posudzuje sa polohová presnosť mračna bodov po transformácii z lokálneho do bežne používaného súradnicového systému a tiež využiteľnosť a potenciál technológie a zariadenia pre riešenie úloh v nadväznosti na lesné prostredie.

Handheld Mobile Laser Scanning and SLAM Technology in Forest Environment – Assessment of Positional Accuracy and Usability of Technology

Abstract

The positional accuracy of the object, acquired from point cloud obtained as a product of the handheld mobile laser scanner (HMLS) working with simultaneous localization and mapping technology, was evaluated. The accuracy after transformation from the local coordinate system to the coordinate system, which is commonly used, was assessed, as well as the potential of using technology and HMLS for tasks, concerned with the forest environment.

Keywords: Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Handheld Mobile Laser Scanner (HMLS), Inertial Measurement Unit (IMU), Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

1. Úvod

V obhospodarovaní prírodných zdrojov je vykonávaných mnoho činností závislých na presnej lokalizácii. Na určovanie polohy sú v dnešnej dobe najviac využívané globálne navigačné satelitné systémy (GNSS). Avšak využiteľnosť a tiež presnosť meraní spomínanou technológiou je závislá na mnohých faktoroch (počet dostupných družíc, vlastnosti prostredia a pod.). Vhodnou alternatívou, ktorá je čiastočne schopná eliminovať nepriaznivý vplyv faktorov lesného prostredia, je špecifický typ mobilného laserového skenovania, na báze nesených skenovacích zariadení: technológia simultánneho určenia polohy a mapovania.

2. Problematika a alternatívne metódy zberu údajov v lesnom prostredí

Tradičné lesnícke techniky, založené na manuálnom zbere ľahko merateľných charakteristík (obvod kmeňa, výška) spolu s časovo, logisticky a finančne náročným zberom vzoriek (často deštruktívnymi metódami), môžu byť efektívne nahradené detailnejšími a presnejšími meraniami. Alternatívou k spomínanému prístupu je laserové skenovanie. Laserové skenovanie ponúka trojdimenzionálne výstupy záujmového územia, ktoré sú kľúčom k redukcii chýb (napríklad spresnenie odhadov hrúbky kmeňov v rôznej výške, výška nasadenia koruny, odhad prírastku, biomasy a pod.) [1]. Pozemné laserové skenovanie je, aj napriek svojim benefitom, v lesnom prostredí pomerne komplikované z toho dôvodu, že morfológicky bohato štruktúrované prostredie nie je možné vierohodne zaznamenať len z jedného stanoviska. Pre zaznamenanie jednej lokality

je vyžadované opakované skenovanie a následné kancelárske spracovanie, ktoré je náročné na čas, výpočtovú kapacitu a vyžaduje si určitý stupeň vedomostí a zručností.

V lesníckej praxi je hojne využívaným spôsobom zberu údajov letecká fotogrametria v kombinácii s leteckým laserovým skenovaním. Je nástrojom pre tvorbu mapového diela vo forme ortofotomáp a súčasne je možné interpretáciou materiálu odvodiť rôzne vlastnosti porastov. Ich detail je však viazaný na kvalitu a vlastnosti snímkového materiálu. Limitujúcim faktorom je v tomto prípade vysoká cena celkového procesu zberu a spracovania údajov, náročnosť na čas a vedomosti a tiež fakt, že presnosť výsledkov (vzhľadom na presnosť určenia polohy objektov pod clonou lesného porastu) je silne ovplyvňovaná nie len rozlíšením snímkového materiálu, ale aj presnosťou použitých vlíčovacích bodov, ktoré sú získavané technológiou GNSS.

Prostredie lesných porastov je veľmi špecifické a často sa stretávame s problémom výrazného zhoršenia kvality prijatého signálu GNSS, jeho sily, nevyhovujúcou geometriou postavenia satelitov prípadne celkovou nedostupnosťou signálu. Toto všetko je spôsobené špecifickosťou, ktorá vyplýva z rozmanitej morfologickej variability vegetačného krytu lesných porastov a premenlivých terénnych podmienok [2]. Je však vhodné upozorniť, že s podobnými problémami sa stretávame taktiež v zastavaných aglomeráciách avšak v menšom rozsahu.

V oblasti výskumu lesných ekosystémov je čoraz viac využívaná technológia pozemného laserového skenovania, pričom sa súčasne vyvíjajú nové aplikácie, ktorých cieľom je rozšíriť rozsah meraní v špecifických podmienkach [2]. Za krok v pred je považované pozemné laserové skenovanie s použitím nesených zariadení.

2.1 Ručné mobilné laserové skenery

Ručné laserové skenovacie systémy sú navrhnuté na dokumentovanie a meranie rozmerných statických objektov, ktoré sa v súčasnosti uplatňuje v mnohých oblastiach, ako je ochrana kultúrnych pamiatok, letecký a kozmický priemysel, výroba automobilov a pod. Technológie založené na princípe optického snímania sú známe najmä výhodami, ako je vysoká presnosť, rýchlosť, vysoká účinnosť a bezkontaktnosť [3].

Ručné mobilné laserové skenery (z angl. Handheld Mobile Laser Scanner – HMLS) v reálnom čase získavajú údaje o porastoch v podobe mračien bodov. Súčasťou zariadenia je inerciálna meracia jednotka (z angl. Inertial Measurement Unit – IMU), ktorá umožňuje zaznamenávať trajektóriu pohybu zariadenia za predpokladu absencie príjmu GNSS signálu. IMU obsahuje 3 akcelerometre a 3 gyroskopy. Ich osi vytvárajú ortogonálnu triádu a merajú uhlové zrýchlenia a špecifické sily, ktorým je IMU vystavená. Súčasťou jednotky je prijímač, ktorý definuje východiskovú polohu a orientáciu zariadenia [1]. **Obr. 1** zachytáva HMLS a zber údajov o lesnom poraste v praxi.

2.2 SLAM – Simultánne určenia polohy a mapovanie

Simultánne určenia polohy a mapovanie spočíva v súbežnej konštrukcii modelu prostredia a odhadu polohy robota/zariadenia v snímanom prostredí. Technológia zaznamenala v uplynulých 30 rokoch ohromujúci pokrok. To umožnilo rozsiahle aplikácie v mnohých odvetviach (napríklad stabilné využívanie tejto technológie v priemysle) [4].

Systém spája dve súčasne prebiehajúce technológie zberu údajov. Odhad pozície zariadenia senzormi na ňom umiestnenými a konštrukciu modelu prostredia, ktoré senzory zachytávajú. V jednoduchých prípadoch je pohyb zariadenia opísaný jeho polohou a orientáciou, avšak do výpočtov môžu byť zahrnuté aj iné veličiny, napríklad rýchlosť pohybu zariadenia, skreslenie snímača a rôzne kalibračné parametre. Model prostredia je reprezentáciou aspektov záujmu, ktoré sú prvkami opisujúcimi zaznamenané prostredie [5]. Technológia SLAM nutne nevyžaduje známe orientačné body, ak je možné lokalizáciu vykonať spoľahlivo. Popularita technológie narastá s vývojom vnútorných aplikácií mobilnej robotiky. SLAM tiež poskytuje príťažlivé alternatívne vytváranie máp, v rôznych odvetviach za konkrétnym účelom [6].

3. Posúdenie presnosti určenia polohy objektov

Cieľom experimentu so zariadením využívajúcim technológiu SLAM je preskúmať alternatívnu metódu zberu polohových informácií o objektoch pod clonou lesného porastu, zistiť, či presnosť bude vyhovujúca aj za predpokladu absencie signálu GNSS v skúmanej lokalite, a tiež či môže byť technológia GNSS len prostriedkom na prevod zozbieraných údajov z lokálneho súradnicového systému do iného, bežne používaného, tak, ako v ďalej popisovanom experimente.

3.1 Príprava experimentu a zber údajov

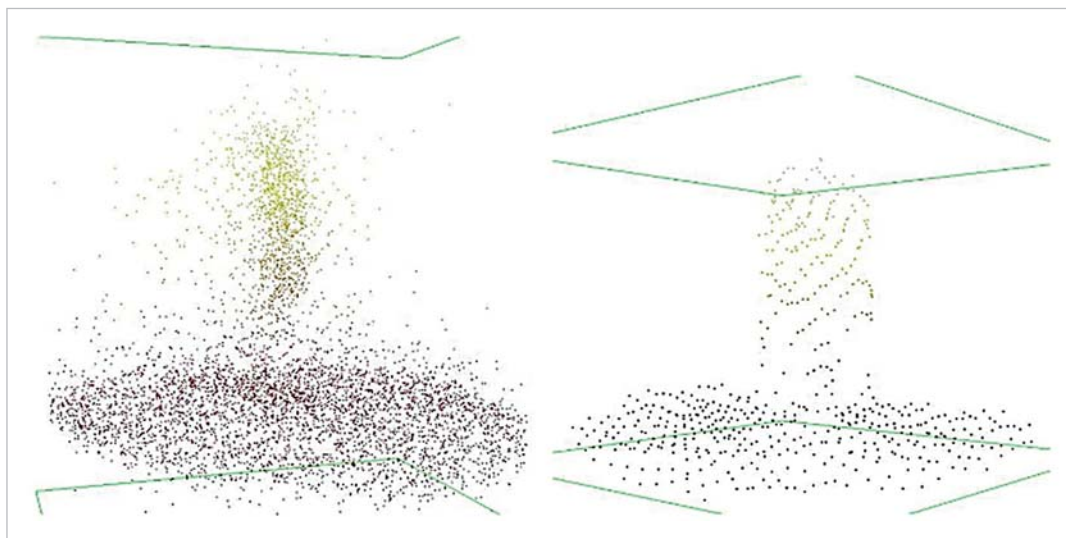
Dôležitým parametrom pre výber výskumnej plochy bola existencia voľných plôch bez súvislého zápoja korún stro-



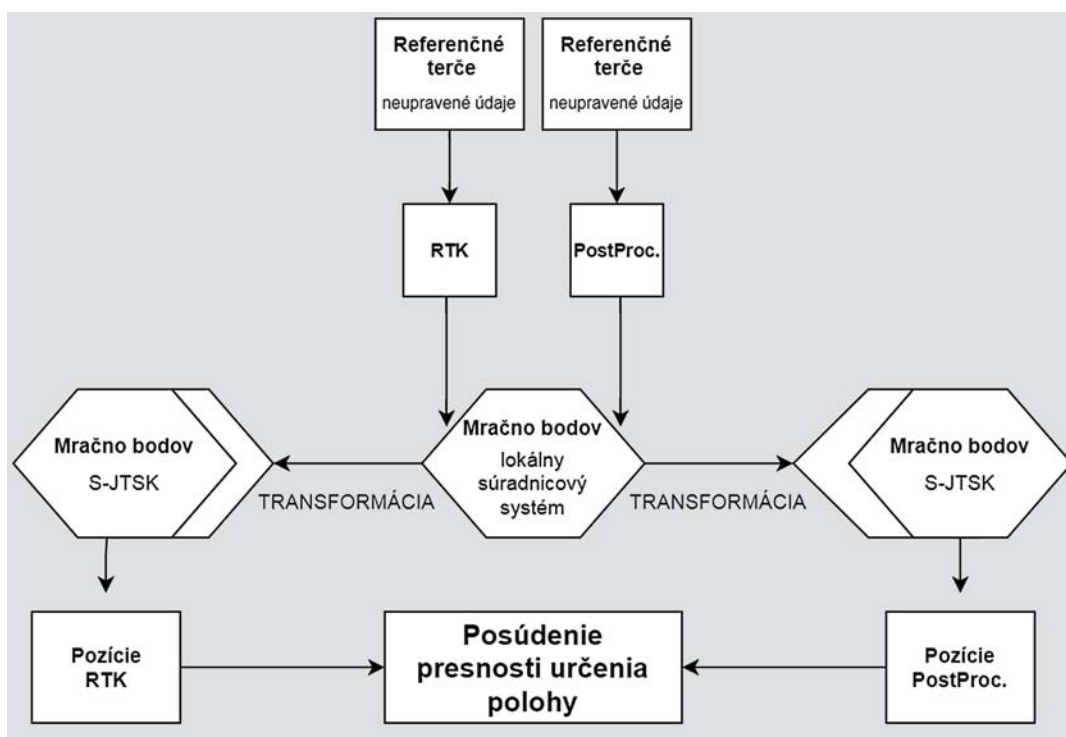
Obr. 1 Zber údajov ručným laserovým skenerom využívajúcim SLAM

mov v jej blízkosti, kvôli zhusteniu referenčného bodového poľa. Výskumná plocha je zriadená na území Vysokoškolského lesníckeho podniku Technickej univerzity vo Zvolene, kde sa nachádza porast s miernymi sklonovými podmienkami vo veku 115 rokov, vekovo a štruktúrne vyrovnaný s dominantným zastúpením (93%) dreviny Dub zimný (*Quercus petraea* Mill.), priemernou výškou 26 m a priemernou hrúbkou kmeňov 35 cm vo výške 1,3 m nad terénom. Na kruhovej ploche s polomerom 16 m bolo zmeraných 43 stromov.

Referenčnými údajmi sú pozície osí kmeňov zozbierané elektronickým tachymetrom Topcon 9000 v kombinácii s anténou GNSS Topcon Hiper SR. Pri určovaní pozícií objektov pod clonou porastu bolo potrebné v prvom kroku zhustiť bodové pole na voľnom priestranstve, kvôli eliminácii nepriaznivých vplyvov porastu na kvalitu signálu GNSS. Zhustenie bodového poľa bolo vykonané 15 minútovým záznamom satelitných observácií, na každom konkrétnom stanovisku a dodatočným spracovaním fázového merania post-procesingom RINEX dátami pre príslušný časový interval. Výsledkom sú signalizované a trvalo stabilizované body – stanoviská pre elektronický tachymeter, v súradnicovom systéme Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK) a Baltskom výškovom systéme po vyrovnaní, z ktorých boli polárnou metódou pomocou uhlového odsadenia zmerané pozície osí kmeňov stromov. Aj keď sa pri meraniach v lesných porastoch praktickejšie osvedčil vyššie popísaný postup zhustenia bodového poľa, zhustenie bolo tiež vykonané kinematickou metódou merania pozície v reálnom čase, zhodným zariadením. Zaujímala nás prípadná prítomnosť a veľkosť odchýlok pri použití týchto údajov počas ďalšieho spracovania údajov. Boli tiež zmerané pozície referenčných terčov, rozmiestnených po výskumnej ploche, ktoré budú využité pri trans-



Obr. 2 Názorný príklad referenčného terča pred úpravou (vľavo) a po úprave (vpravo) pre potreby automatizovaného odvodenia lokálnych súradníc jeho stredu



Obr. 3 Schematické znázornenie spracovania údajov pri posúdení presnosti určenia polohy objektov

formácii mračna bodov z lokálneho súradnicového systému do S-JTSK.

Skenovanie výskumnej plochy prebehlo podľa expertom navrhnutej schémy ručným laserovým skenerom ZEB-REVO. Zariadenie zbiera údaje rýchlosťou 43 000 bodov za sekundu, v dosahu 30 m s presnosťou 1 – 3 cm v závislosti od podmienok prostredia. Zariadenie sa skladá z laserového skenera, ktorý je pripojený k IMU. Algoritmus SLAM kombinuje údaje laserového skenovania s údajmi o pohybe zariadenia, zaznamenaných pomocou IMU, na vytvorenie presných 3D mračen bodov. Výsledným produktom je mračno bodov v lokálnom súradnicovom systéme.

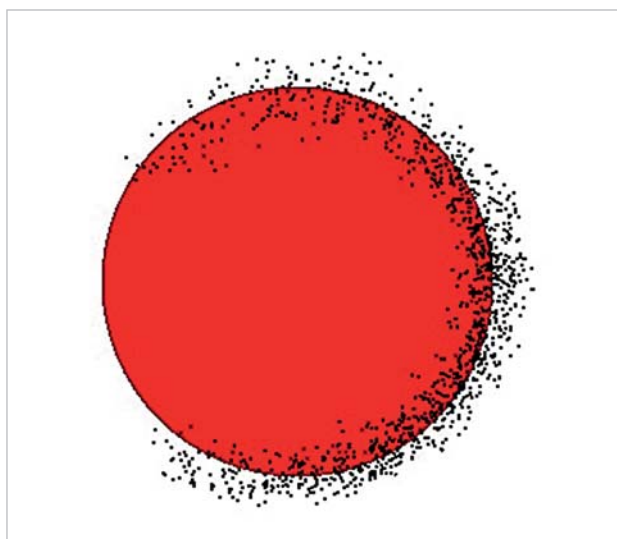
3.2 Spracovanie údajov

Spracovanie údajov začalo odvodením lokálnej pozície referenčných terčov rozmiestnených po výskumnej ploche, nasledovala manuálna filtrácia šumu na parciálnych mračnách obsahujúcich objekty referenčných terčov a následný výpočet pozície stredu terča (obr. 2).

Transformácia bola vykonaná identifikáciou dvojíc tožných bodov nástrojom pre vyrovnanie bodových mračen v programe CloudCompare Zephyrus 2.10.2. Schematické znázornenie postupu spracovania údajov je znázornené na schéme na obr. 3.

Kedže v rámci merania referenčných údajov boli zozbierané informácie o polohe stromov vo výške 1,3 metra, bol vytvorený 10 cm široký výrez mračna bodov v zvolenej výške. Na základe algoritmu pre odvodenie hrúbky stromov boli automatizovane získané údaje o polohe zhlukov bodov, zodpovedajúcich priečnemu rezu mračnom bodov v zvolenej výške. Údaj o hrúbke stromu je počítaný na podklade kružnice, najlepšie popisujúcej zhluk bodov v príslušnom reze. Jej stred zodpovedá pozícií stromu (obr. 4). Zhluky, v ktorých počet bodov nedosiahne minimálny limit a vzájomnú vzdialenosť bodov medzi sebou, sú z výstupného mračna bodov odstránené. Bolo odvodených 48 zhlukov reprezentujúcich stromy.

Nakoľko sa na výskumnej ploche nachádza kvalitný pomerne homogénny, vekovo a hrúbkovo málo diferencovaný porast, nie je príčinou vyššieho počtu odvodených zhlukov bodov prítomnosť rušivých elementov (podrast, druhá etáž výrazne nižšieho veku, nízko nasadené konáre stromov, olistenie). Príčinou je dosah snímača zariadenia, ktorý zaznamenal objekty (stromy) aj mimo výskumnej plochy aj napriek ich relatívne širokým rozstupom a veľkej vzdialenosti od trajektórie a výrobcom deklarovaným tvrdením, že prostredie má vplyv na dosah zariadenia (7 identifikovaných stromov, nezahrnutých vo výpočtoch, pretože sa sústredíme na objekty na výskumnej ploche, nie mimo nej).



Obr. 4 Ukážka zhľuku bodov reprezentujúcich kmeň stromu v priečnom reze

3.3 Vyhodnotenie výsledkov a posúdenie polohovej presnosti

Aj napriek vyššiemu počtu odvodených zhlukov bodov reprezentujúcich stromy (48 zhlukov) sa podarilo stotožniť s referenčnými údajmi 38 stromov (tab. 1). Dôvodom výpadku objektov je fakt, že konkrétny strom nebol zaznamenaný v dostatočnom rozsahu (z viacerých uhlov). To znamená, že počet bodov na povrchu kmeňa nebol dostačujúci na vytvorenie zhľuku. Z referenčnej vzorky 43 stromov bolo identifikovaných 38 stromov, ktoré boli používané do výpočtov.

Pri hodnotení polohovej presnosti údajov porovnávame navzájom usporiadané dvojice údajov, referenčné a odvodené hodnoty. Výpočet sa opiera o metódu kvantitatívnej validácie [7]. Najväčší podiel zložky chyby (RMS) odvodenia polohy objektov bol zaznamenaný v smere osi Y, keď boli pri georeferencovaní použité údaje zozbierané metódou RTK (zber údajov v reálnom čase), kedy hodnota ukazovateľa systematickej zložky chyby nadobudla hodnotu 26,1 cm (tab. 2).

Hodnoty ostatných premenných sa pohybovali v intervale do 15 cm čo je považované za dobrý výsledok vzhľadom na podmienky. Spomínaná hodnota tiež vykazuje najväčší podiel systematickej zložky chyby reprezentovanej aritmetickým priemerom (tab. 3 - eYr: aritmetický priemer = -0,214; smerodajná odchýlka = 0,151).

Tab. 1 Počet poloautomatizovane odvodených stromov podľa zdrojov údajov pre transformáciu mračna bodov (celkový počet referenčných stromov je 43)

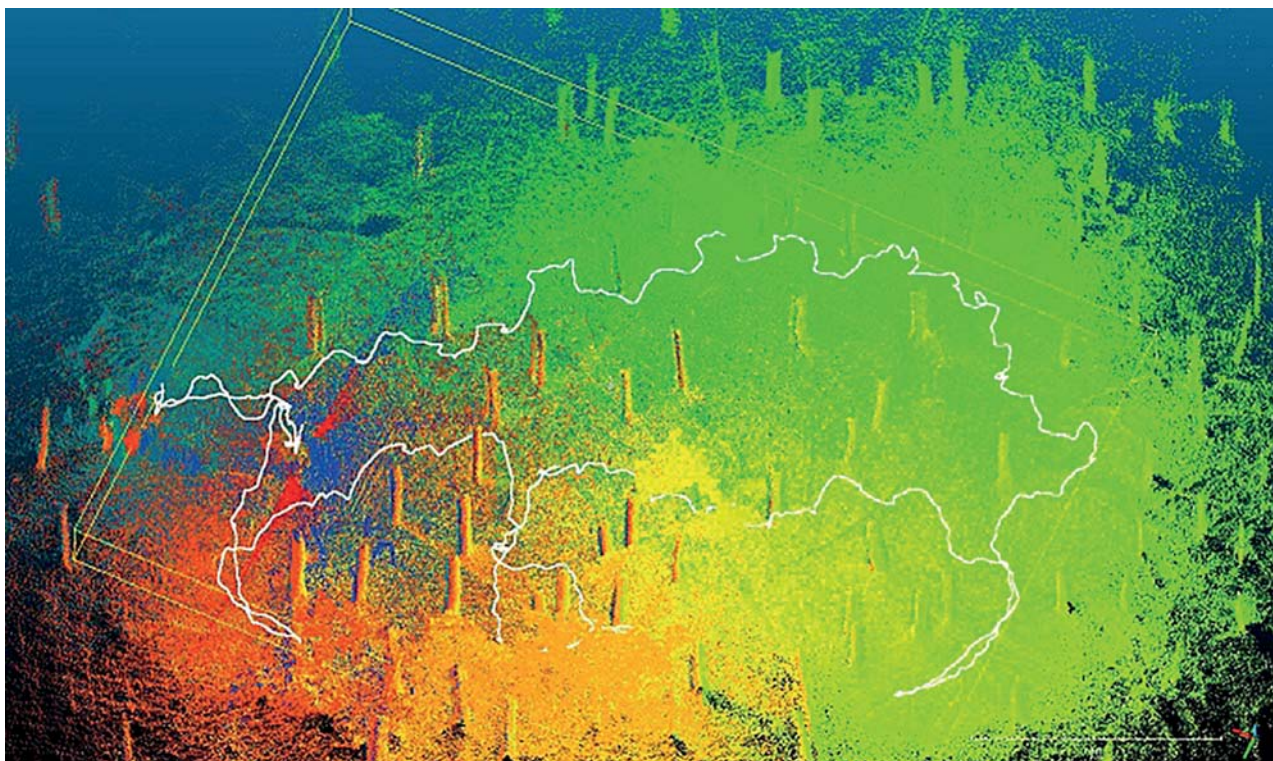
| Zdroje údajov pre transformáciu | |
|---------------------------------|------------|
| RTK | PP |
| 38 (zo 43) | 38 (zo 43) |

Tab. 2 Porovnanie strednej kvadratickej chyby diferencí (e) hodnôt v smere jednotlivých osí získané porovnaním postprocesingových (p) a RTK (r) údajov s referenčnými

| [m] | eXp | eYp | eZp |
|-----------|-------|-------|-------|
| RMS (PP) | 0,125 | 0,152 | 0,104 |
| RMS (RTK) | 0,132 | 0,261 | 0,095 |

Tab. 3 Porovnanie štatistických charakteristík diferencí (vypočítaných ako rozdiel referenčných a odvodených pozícií v smere jednotlivých osí) pre stromy odvodené z mračna bodov, transformovaného pomocou údajov z PP a RTK a referenčných pozícií stromov

| [m] | PP | | | RTK | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | eXp | eYp | eZp | eXr | eYr | eZr |
| minimum | -0,176 | -0,235 | -0,193 | -0,159 | -0,471 | -0,189 |
| maximum | 0,198 | 0,226 | 0,126 | 0,217 | -0,004 | 0,045 |
| priemer | 0,028 | 0,022 | -0,079 | 0,052 | -0,214 | -0,08 |
| smerodajná odchýlka | 0,123 | 0,152 | 0,066 | 0,123 | 0,151 | 0,054 |



Obr. 5 Trajektória pohybu zariadenia ZEB REVO

Aj keď operátor pri zbere údajov postupoval podľa pokynov výrobcu, uzavrel pohyb po výskumnej ploche slučkou na mieste štartu snímania, meranie neprebiehalo kontinuálne (obr. 5), to znamená, že v určitých lokalitách, podľa subjektívneho posúdenia vizualizácie zosnímaného prostredia sústredil zariadenie na zaznamenanie mračna vysokej hustoty.

Tento spôsob zberu údajov je postačujúci pri snímaní objektov statických, rovnorodých, v uzavretom jasne definovanom priestore (napr. budovy, výrobné haly, technické objekty, pamiatka a podobne) keďže SLAM zariadenia zo svojej technologickej podstaty prepočítavajú svoju polohu vzhľadom na zaznamenané objekty. Nakoľko je však našim cieľom zisťovanie údajov o lese, je nutné prispôbiť zber údajov prostrediu a tým zvýšiť polohovú presnosť objektov.

4. Záver

V príspevku chceme poukázať na fakt, že implementáciou nových technológií zberu a spracovania údajov dosiahneme značný progres nie len vo výskumnej činnosti, ale aj v praktickej sfére, kde je v dnešnej dobe intenzívne vyžadovaný. Práce viacerých autorov venujúce sa využívaniu ručných laserových skenerov v lesnom prostredí poukazujú na potenciál využívania technológie v lesníckej praxi [8], [9]. Za najvýraznejší progres v spomínanej problematike je považovaná možnosť jednoduchého, opakovateľného, kontrolovaného zberu údajov pomocou nových nástrojov, ktorých výstupy sú relevantné pre výskum a prax v mnohých oblastiach ekológie a iných environmentálnych vied, lesníctvo nevynímajúc [2], [10]. Zastávame názor, že vhodnou manipuláciou pri zbere údajov, sa pri

vhodnom následnom spracovaní dá presnosť určenia zvýšiť a posunúť rádozo z decimetrov, na centimetrové až milimetrové hodnoty. Kľúčom však je precízny a premyslený systém zberu údajov.

Ručné laserové skenery využívajúce technológiu SLAM svojou koncepciou umožňujú užívateľom rýchly zber údajov, využiteľných v rôznych odvetviach výskumu. Výskumy podporujú predpoklad, že je v silách malého kolektívu pracovníkov údaje efektívne zhromažďovať, spracovávať a vyvíjať aplikácie. Z výskumu vyplýva, že aj pri použití relatívne jednoduchšieho modelu zariadenia (ZEB REVO) je možné získať veľmi kvalitné údaje.

V práci sa nám pri transformácii mračna bodov údajmi z postprocesingu podarilo dosiahnuť priemernú výšku diferencií súradníc pod päť centimetrov v smeroch osí X a Y so smerodajnou odchýlkou dosahujúcou hodnoty 0,123 m pre os X a 0,152 m pre os Y (tab. 3).

Prieskumy odhadujú, že zber údajov ručným laserovým skenerom je približne 12-krát rýchlejší ako je pri použití pozemného laserového skenovania (z angl. Terrestrial Laser Scanning – TLS). Tiež preukazujú, že zariadenia sú približne 40-krát rýchlejšie ako TLS pri prieskume zložitej topografie. V tej istej štúdii sa tiež dospelo k záveru, že aj pri obmedzení hustoty a presnosti údajov uvedených v systéme ZEB REVO by jeho užitočnosť v náročných prostrediach z neho robila vysoko praktické riešenie [9]. Ručný laserový skener je schopný zosnímať oveľa väčšiu oblasť za hodinu prieskumu ako TLS zariadenie alebo ako je schopný zaznamenať pracovník bežne používanými technológiami. Je tu znateľná perspektíva skrátenia času na zber údajov, nižšia náročnosť na ľudskú prácu a predpoklad efektívneho zberu údajov s vysokým potenciálom využitia a spracovania (napríklad na určovanie zásoby porastov, výpočet porastových veličín, evidencia, inventarizácia, prípadne dokumentácia a archivácia údajov do budúcnosti).

Podakovanie:

Za finančnú podporu ďakujeme Internej projektovej agentúre TUZVO (č. projektu 12/2019).

LITERATÚRA:

- [1] DASSOT, M.-CONSTANT, T.-FOURNIER, M.: The use of terrestrial LiDAR technology in forest science. Application fields, benefits and challenges. In: *Annals of Forest Science*. 2011, vol. 68, no. 5, p. 959–974. ISSN 1297-966X.
- [2] TUČEK, J.-KARDOŠ, M.-TOMAŠTÍK, J.: Prvé skúsenosti s použitím neseného inerciálneho navigačného systému v lesnom prostredí. *Správy lesníckeho výskumu*. 2016, 61 (3), s. 203-212.
- [3] WANG, X.-XIE, Z.-WANG, K.-ZHOU, L.: Research on a Handheld 3D Laser Scanning System for Measuring Large-Sized Objects. In: *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 10, 3567 pp.
- [4] CHEN, Y.-TANG, J.-JIANG, C.-ZHU, L.-LEHTOMÄKI, M.-KAARTINEN, H.-KAJALUOTO, R.-WANG, Y.-HYYPÄ, J.-HYYPÄ, H.-ZHOU, H.-PEI, L.-CHEN, R.: The accuracy comparison of three simultaneous localization and mapping (SLAM) - based indoor mapping technologies. In: *Sensors*. 2018, vol. 18, 3228 pp.
- [5] CADENA, C.-CARLONE, L.-CARRILLO, H.-LATIF, Y.-SCARAMUZZA, D.-NEIRA, J.-REID, I.-LEONARD, J.: Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. In: *IEEE Transactions on Robotics*. 2016, vol. 32, no. 6, p. 1309-1332.
- [6] YADAV, M.-SINGH, A. K.-LOHANI, B.: Computation of road geometry parameters using mobile LiDAR system. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2018, vol. 10, p. 18-23.
- [7] YANG, Y.-MONSERUD, R. A.-HUANG, S.: An evaluation of diagnostic tests and their roles in validating forest biometric models. In: *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 3, p. 619-629, ISSN 2352-9385.
- [8] QUINTON, J. N.-JAMES, M. R.: Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: The hand-held mobile laser scanner (HMLS). *Earth Surf. Process. Landf.* 2013, 39, p. 138-142.
- [9] RYDING, J.-WILLIAMS, E.-SMITH, M. J.-EICHHORN, M. P.: Assessing Hand-held Mobile Laser Scanners for Forest Surveys. *Remote Sens.* 2015, 7, p. 1095-1111.
- [10] WATT, P. J.-DONOGHUE, D. N. M.: Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. In: *International Journal of Remote Sensing*. 2005, vol. 26, no. 7, p. 1437-1446.

Do redakcie došlo: 19. 1. 2020

Lektoroval:
Ing. Michal Volkmann,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.