

Vpliv števila točk aerolaserskega skeniranja na izračun koordinat vrha stožčaste tarče

Tilen Urbančič*, Božo Koler*, Bojan Stopar*, Mojca Kosmatin Fras*

Povzetek

V prispevku predstavljamo rezultate analize določitve minimalnega števila točk laserskega skeniranja na plašču stožčaste tarče, ki so potrebne za dovolj natančno določitev vrha tarče. Uporabimo oblake točk na stožcu, ki so pridobljeni z aerolaserskim skeniranjem z višinami leta 100, 200 in 400 m. Minimalno potrebno število točk na plašču stožca za vsako obravnavano snemalno višino določimo iz rezultatov 50-krat ponovljene določitve parametrov stožca z naključnim izborom točk po metodi najmanjših kvadratov. Kot prave vrednosti parametrov stožca privzamemo vrednosti, določene z vsemi točkami na stožcu. Rezultat predstavljajo povprečne vrednosti odstopanj parametrov stožca iz 50-kratnih ponovitev določitve parametrov stožca od prave vrednosti. Ponovljivost rezultatov ocenimo z izračunom standardnih odklonov odstopanj povprečnih vrednosti.

Ključne besede: stožec, umetna tarča, aerolasersko skeniranje

Key words: cone, artificial target, airborne laser scanning

Uvod

Sodobno pridobivanje prostorskih podatkov se od svojih začetkov razlikuje po vrsti dostopnih tehnologij, hitrosti pridobivanja, količini in natančnosti podatkov. Med tehnologije, ki omogočajo pridobivanje velike količine podatkov z visoko natančnostjo v kratkem času, uvrščamo tudi lasersko skeniranje ali lidar (angl. light detection and ranging). Poznamo različne vrste laserskega skeniranja, ki se razlikujejo predvsem po dosegu in platformi, na katere je laserski skener pritrjen: satelitsko, aero- (ALS), terestrično (TLS) in mobilno (MLS) ter lasersko skeniranje s kratkih razdalj.

V postopkih georeferenciranja in ocenjevanja kakovosti oblakov točk laserskega skeniranja se pogosto uporabljajo umetne tarče različnih oblik. Najpogosteje so uporabljene ravne tarče s črno-belimi vzorcem (Csanyi et al., 2005; Becerik-Gerber et al., 2011; Kregar et al., 2013), ravne retroreflektivne tarče (Pesci & Teza, 2008), tarče enostavnih geometrijskih oblik, npr. krogla in valj (Bienert & Maas, 2009; Barbarella & Fiani, 2013; Witzgall et al., 2006) in tudi stožec (Artese et al., 2004; Urbančič, 2017). Za umetno tarčo laserskega skeniranja (lidarska umetna tarča) je pomembno, da je samodejno prepoznavna, enostavno razločljiva od ostalih objektov v oblaku, omogoča natančno določitev 3D položaja in ima optimalno obliko, velikost in barvo (Csanyi et al., 2005). Poseben primer umetne lidarske tarče je bil predstavljen v doktorski disertaciji Urbančič (2017), kjer je bil v postopkih ALS prvič uporabljen in analiziran stožec. Zaradi svojega namena je tarča poimenovana stožec ALS. Uporaba umetnih tarč kot oslonilnih točk skupaj z izravnavo snemalnih pasov po metodi najmanjših kvadratov (MNK) v postopku georeferenciranja omogoča bolj kakovostno georeferenciranje oz. doseganje višje točnosti georeferenciranja oblakov točk.

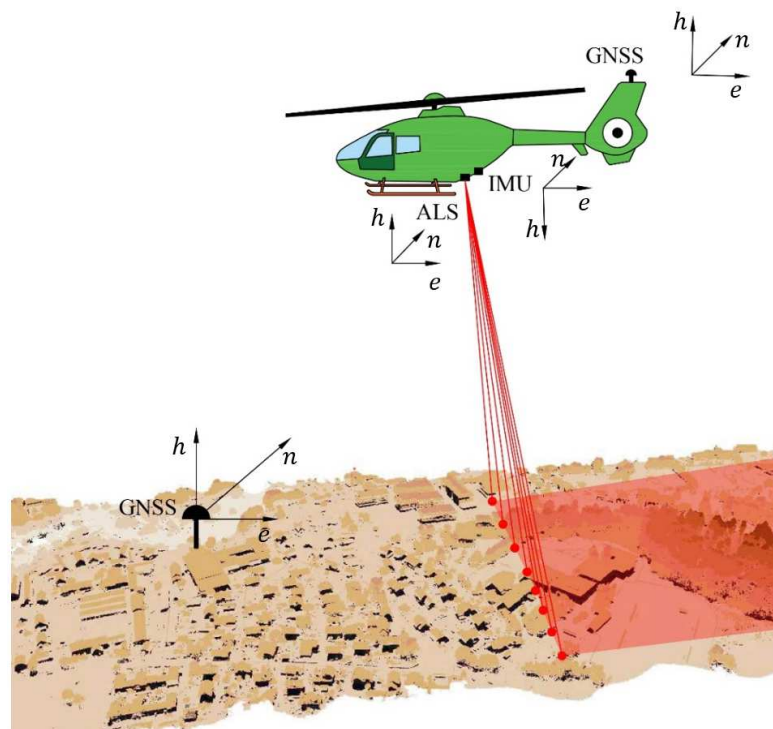
Pomembno je, da dobro poznamo lastnosti uporabljenih tarč, zato v danem prispevku obravnavamo določitev minimalno potrebnega števila točk na plašču stožca, ki omogoča določitev koordinat vrha stožca ALS z natančnostjo vsaj 2 cm. Končno vrednost bomo

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

določili z izvedbo večkratnih ponovitev izravnave parametrov stožca po MNK in z naključnim izborom točk na plašču stožca. Kriterij za določitev minimalnega števila točk na plašču bo povprečno odstopanje vrednosti parametrov stožca, določenih na osnovi 50-ih določitev parametrov stožca, od prave vrednosti.

Aerolasersko skeniranje

Nosilec ALS je najpogosteje letalo ali helikopter. Manjše in lažje laserske skenerje lahko nosijo tudi brezpilotna plovila. Snemalni sistem ALS lahko razdelimo na zračni in terenski segment (slika 1). Zračni segment sestavljajo plovilo, laserski skener in sistem za pozicioniranje in orientacijo, to sta antena GNSS in inercialna merska enota (angl. inertial measurement unit, IMU). Terenski segment predstavlja referenčna postaja GNSS.



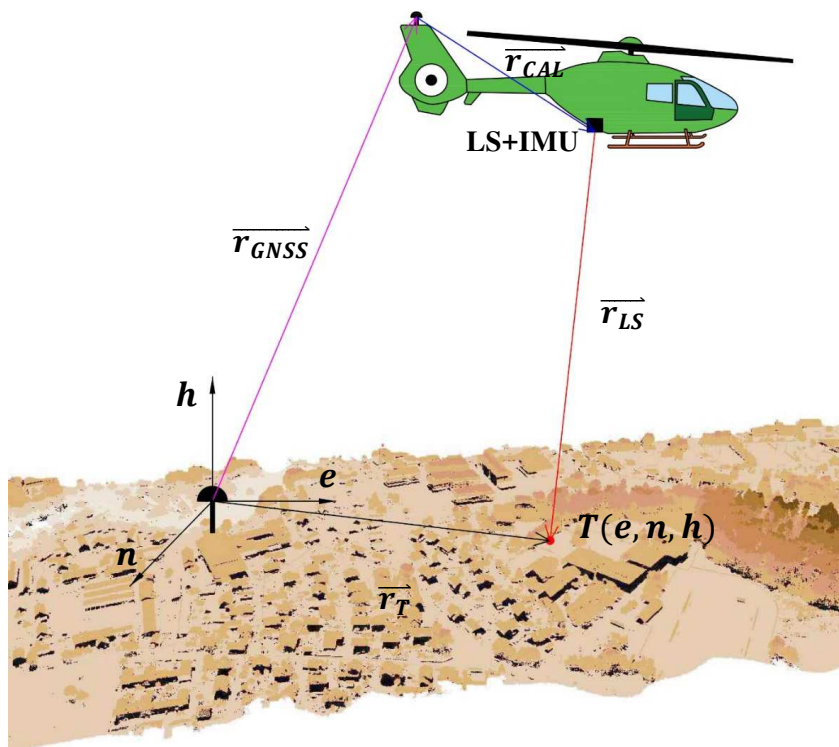
Slika 1: Princip aerolaserskega skeniranja

Naknadna obdelava opazovanj vseh senzorjev snemalnega sistema omogoča izračun koordinat skeniranih točk v izbranem referenčnem koordinatnem sistemu. Uporabimo opazovanja laserskega skenerja, GNSS in IMU enote ter kalibracijske parametre snemalnega sistema. Ti opisujejo relativne odnose med položaji vseh treh omenjenih senzorjev (Vosselman & Mass, 2010).

Georeferenciranje oblakov točk

Koordinate točk, ki so rezultat laserskega skeniranja, so določene v lokalnem koordinatnem sistemu skenerja. Umestitev oblaka točk v izbran koordinatni sistem imenujemo georeferenciranje. Ker se snemalni sistem ALS skupaj s plovilom med skeniranjem premika, se skener za vsako izmerjeno točko nahaja drugje. S premikom skenerja se spremeni tudi njegova orientacija. Določitev pravega položaja in orientacije skenerja omogoča integracija GNSS in IMU opazovanj. Obravnavamo torej dinamičen sistem, kjer opazovanja različnih senzorjev sinhroniziramo na osnovi izmerjenih časov

posameznih opazovanj (Vosselman & Mass, 2010). Za določitev položaja GNSS-antene z visoko točnostjo je pomembno, da določimo njen relativni položaj glede na referenčno postajo GNSS. Na kakovost koordinat točk ima vpliv tudi kakovost kalibracijskih parametrov snemalnega sistema. Proizvajalec izvede kalibracijo skenerja, pri skeniranju pa je potrebno čim boljše določiti vektorje med skenerjem, anteno GNSS in IMU (Friess, 2007). Medsebojne zasuke osi koordinatnih sistemov IMU in laserskega skenerja imenujemo kotna nepravilnost. Določajo jo koti nagiba (angl. roll), naklona (angl. pitch) in zasuka (angl. yaw) (Kuwano, 2008). Postopku georeferenciranja, kjer upoštevamo vsa naštetna opazovanja in podatke kalibracije, imenujemo direktno georeferenciranje (slika 2) (Hebel & Stilla, 2012).



Slika 2: Direktno georeferenciranje

Prostorski položaj (e, n, h) posamezne točke T pri direktnem georeferenciranju izračunamo kot vsoto vektorjev (slika 2):

$$\vec{r}_T = \vec{r}_{GNSS} + \vec{r}_{CAL} + \vec{r}_{LS} \quad (1)$$

Pri tem uporabimo časovno sinhronizirane vektorje:

- \vec{r}_{GNSS} – položaj faznega centra antene GNSS na plovilu,
- \vec{r}_{CAL} – kalibrirana in pravilno orientirana razdalja med faznim centrom antene GNSS na plovilu in koordinatnim izhodiščem skenerja,
- \vec{r}_{LS} – poševna razdalja od izhodišča koordinatnega sistema laserskega skenerja do merjene točke (upoštevamo dolžino, izmerjeno z laserskim razdaljemerom, orientacijo vektorja pa določajo koti, določeni z inercialno mersko enoto, in notranji koti skenerja).

Direktno georeferencirani oblaki točk so glede na točnost in natančnost koordinat točk v oblaku zelo odvisni od kakovosti senzorjev in postopkov naknadne obdelave opazovanj. Točnost in natančnost georeferenciranja oblakov točk lahko izboljšamo z izravnavo

snemalnih pasov po MNK ter uporabo oslonilnih točk. Te v praksi najpogosteje predstavljajo talne označbe ali drugi objekti, posebna oblika pa so umetne tarče.

Stožec kot umetna tarča ALS

Raziskovanje primerne oblike in velikosti umetne tarče za postopke ALS lahko povezujemo z razvojem postopkov ocenjevanja točnosti georeferenciranja oblakov točk snemalnih pasov. Wotruba et al. (2005) so uporabili tarče v obliki zaporednih črt ter v obliki zvezde. Boljši primer tarče so predlagali Csanyi et al. (2005), ki so oblikovali ravno črno-belo tarčo z že poznanim vzorcem bele pike na črni podlagi. Ker postopek postavljanja in izmere umetnih tarč predstavlja velik strošek, so kljub zagotavljanju visoke kakovosti koordinat tarč raziskovalci poskušali tarče nadomestiti z objekti v naravi. Pri tem so uporabili talne označbe (Toth et al., 2008) in ravnine streh (Kager, 2004; Höhle & Pedersen, 2010; van der Sande et al., 2010).

Zaradi geometrije, ki omogoča enolično določitev 3D koordinat karakteristične točke tarče, smo v doktorski disertaciji Urbančič (2017) analizirali tarče v obliki stožca. Z izvedbo dveh testov s TLS je bilo ugotovljeno, da je za uporabo v postopkih laserskega skeniranja najprimernejši naklon plašča stožca od osnovne ploskve 45° . Za odločitev polmera stožca 1 m smo uporabili izsledke raziskav iz Csanyi et al., (2005) ter Csanyi & Toth (2007). Za raziskavo smo izdelali stožec ALS iz epoksi smole, ki ga sestavimo iz petih delov. Štirje deli sestavljajo plašč in peti vrh stožca (slika 3).

Podrobnosti o določitvi najprimernejšega naklona, postopku prepoznavanja točk stožca v oblaku, izračunu njegovih parametrov, razvoju algoritma za samodejno prepoznavanje v oblaku točk ter primerjavi rezultatov uporabe stožcev ALS s črno-belimi tarčami so podrobno opisani v doktorski disertaciji (Urbančič, 2017). V danem prispevku že opravljeno raziskavo vpliva števila točk na plašču stožca nadgradimo s postopkom, ki je predstavljen v nadaljevanju.

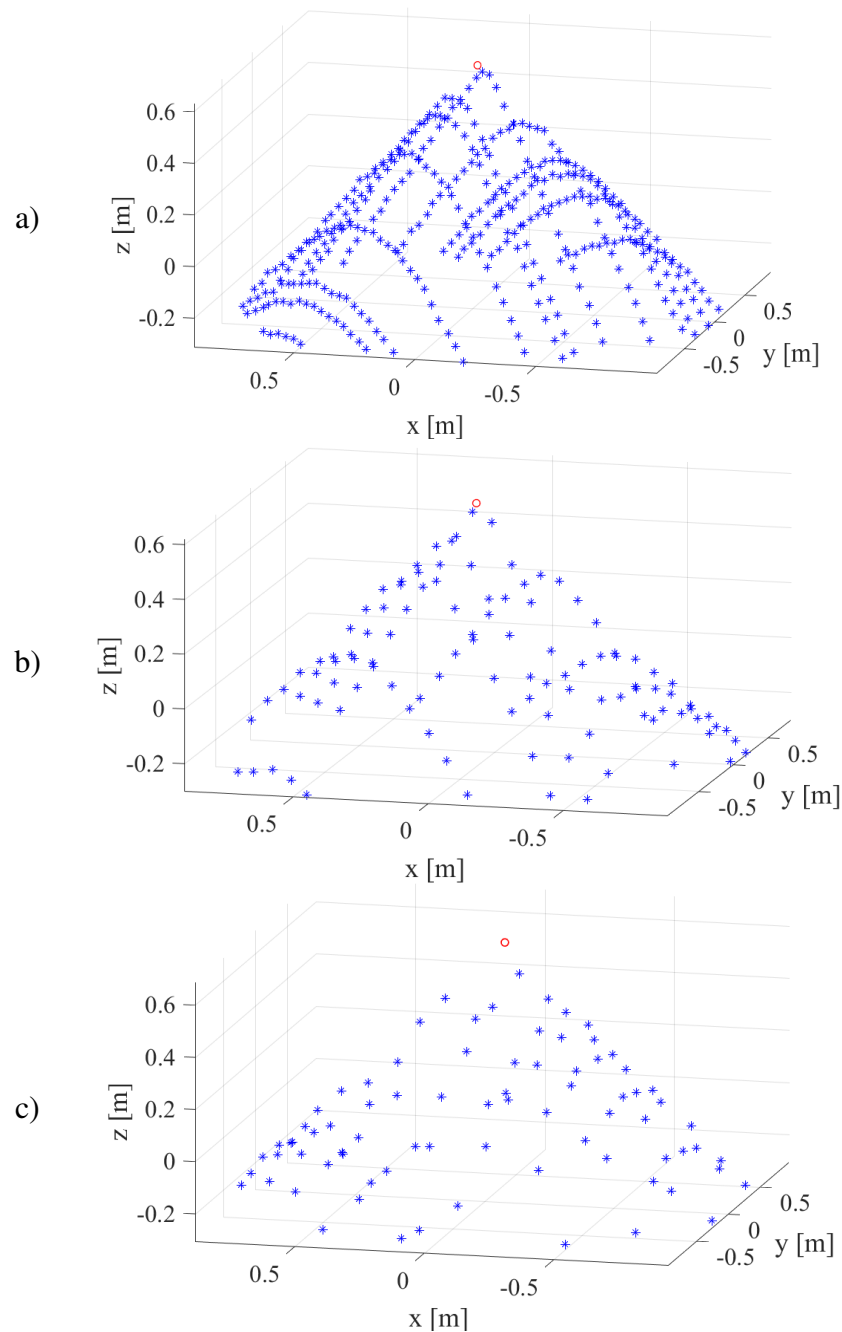


Slika 3: Stožec ALS z anteno GNSS

Vpliv števila točk na določitev parametrov stožca z izravnavo po MNK

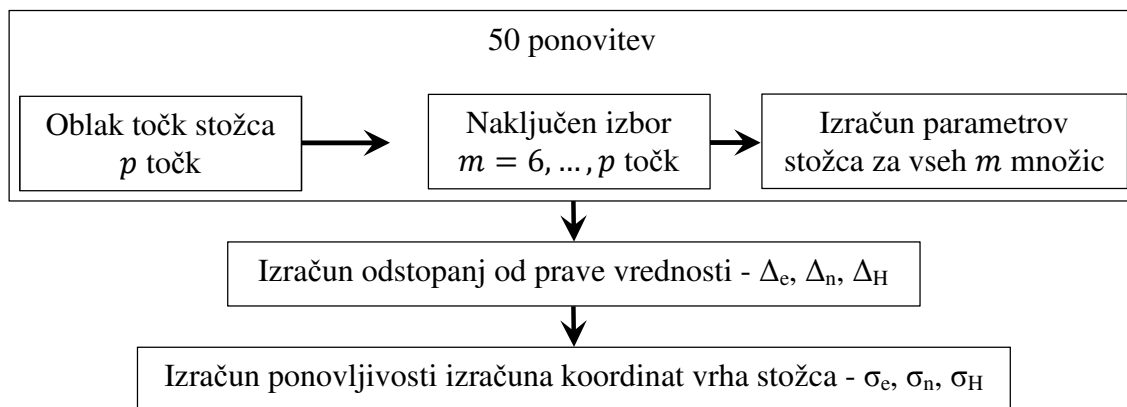
Za izračun koordinat vrha stožca uporabimo t. i. splošni model izravnave po MNK, kjer ob neznanem naklonu plašča stožca za pridobitev rešitve potrebujemo vsaj šest točk na

plašču (Urbančič et al., 2016). Na oceno vrednosti parametrov stožca in njihove natančnosti vplivata število in natančnost koordinat skeniranih točk na plašču. Za izvedbo analize vpliva števila točk na parametre stožca smo uporabili oblake točk velike gostote skeniranja na višinah leta 100 m (na stožcu se nahaja 368 točk), 200 m (na stožcu se nahaja 107 točk) in 400 m (na stožcu se nahaja 78 točk). Pri skeniranju je bil uporabljen laserski skener Riegl LMS-Q780, ki ima deklarirano natančnost posamezne skenirane točke 2 cm (www.riegl.com). Ob upoštevanju površine tarče, ki v tlorisu znaša π oz. približno $3,14 \text{ m}^2$, je bila gostota skeniranih točk posameznih višin snemanja približno 117, 34 in 24 točk/ m^2 (slika 4).



Slika 4: Oblaki točk (modra *) in vrh (rdeč o) stožcev izračunan iz vseh točk na plašču:
a) 100 m, b) 200 m in c) 400 m.

Postopek analize vpliva števila točk na izračun koordinat vrha stožca prikazujemo na sliki 5. V prvem koraku smo iz posameznega oblaka točk naključno poiskali od $m = 6, \dots, p$ točk, kjer je p število točk v izvornem oblaku. Iz izbranih točk z izravnavo določimo parametre stožca, kjer naklon plašča stožca od osnovne ploskve obravnavamo kot neznanu količino. Za posamezen stožec izvedemo $p - 6$ določitev, kjer v posamezni določitvi naključno poiščemo m točk. Rezultat posamezne določitve so koordinate vrha stožca in naklon plašča od osnovne ploskve ter natančnosti iskanih količin. Ker za izračun parametrov stožca uporabimo postopek naključnega izbora točk, v več ponovitvah z istim številom točk dobimo različne rezultate. Postopek celotnega izračuna parametrov stožcev za vse tri oblake točk za vseh $p - 6$ določitev zato ponovimo 50-krat. Končni rezultat določimo kot povprečno vrednost odstopanj 50-krat določenih koordinat vrha stožca od prave vrednosti, ki jo predstavljajo koordinate vrha stožca pri izravnavi z vsemi točkami na stožcu. Ponovljivost rezultatov ocenimo z izračunom standardnih odklonov odstopanj koordinat od prave vrednosti iz večkratnih ponovitev. Iz velikosti standardnih odklonov bomo lahko sklepali o vplivu samega števila točk na izračun koordinat vrha stožca in morebitnem vplivu razporeditve točk na plašču.



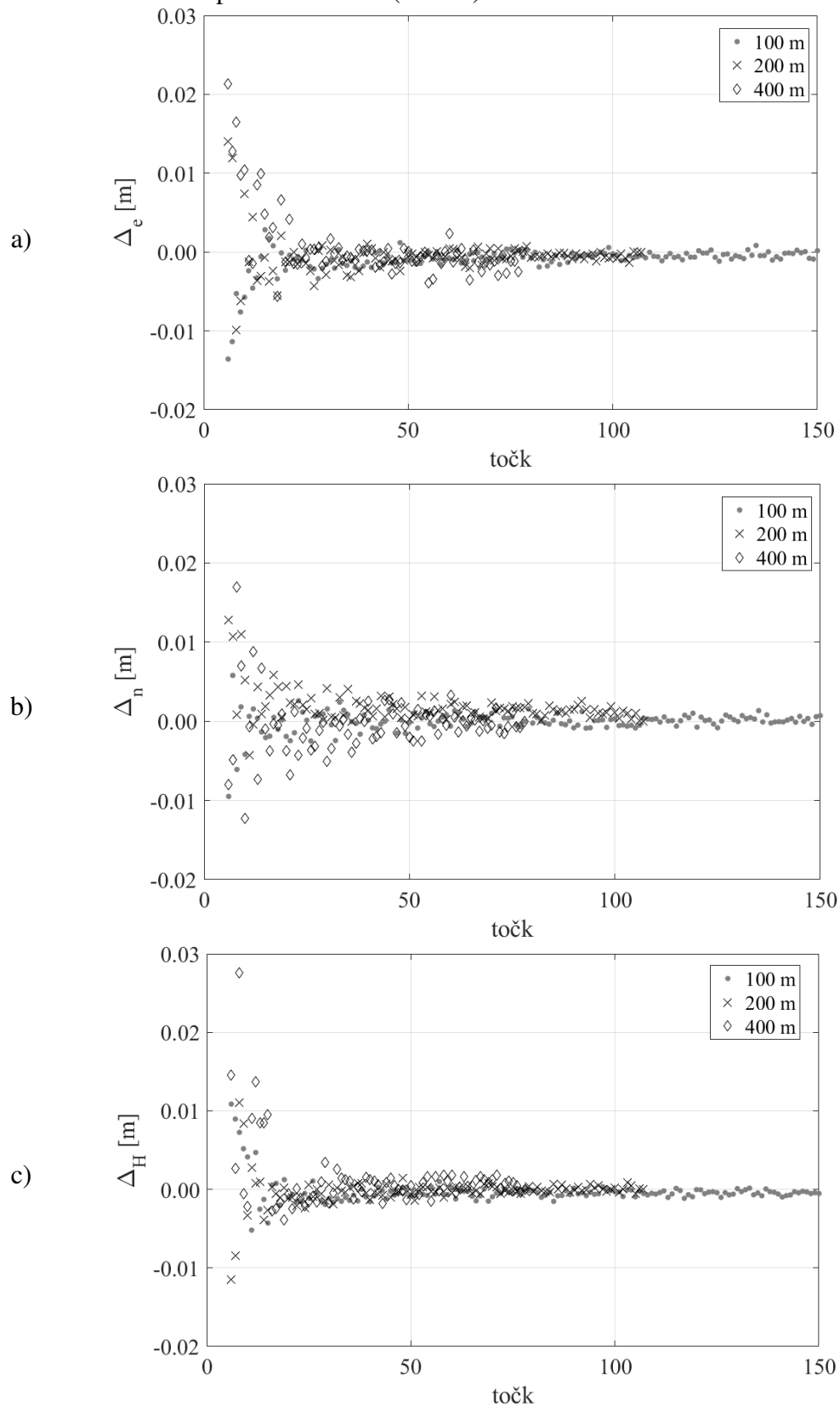
Slika 5: Shematski prikaz določitve minimalnega števila točk na stožcu za uporabo v postopkih ALS

Na sliki 6 prikazujemo rezultate opravljenih izračunov. Izrisane so povprečne vrednosti odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti. Ker so pri višini leta 100 m in množicah z več kot 150 točkami povprečna odstopanja na plašču stožca tako za Δ_e kot za Δ_n in Δ_H zelo majhne vrednosti, prikazujemo le rezultate za primere izračunov z do 150 točkami.

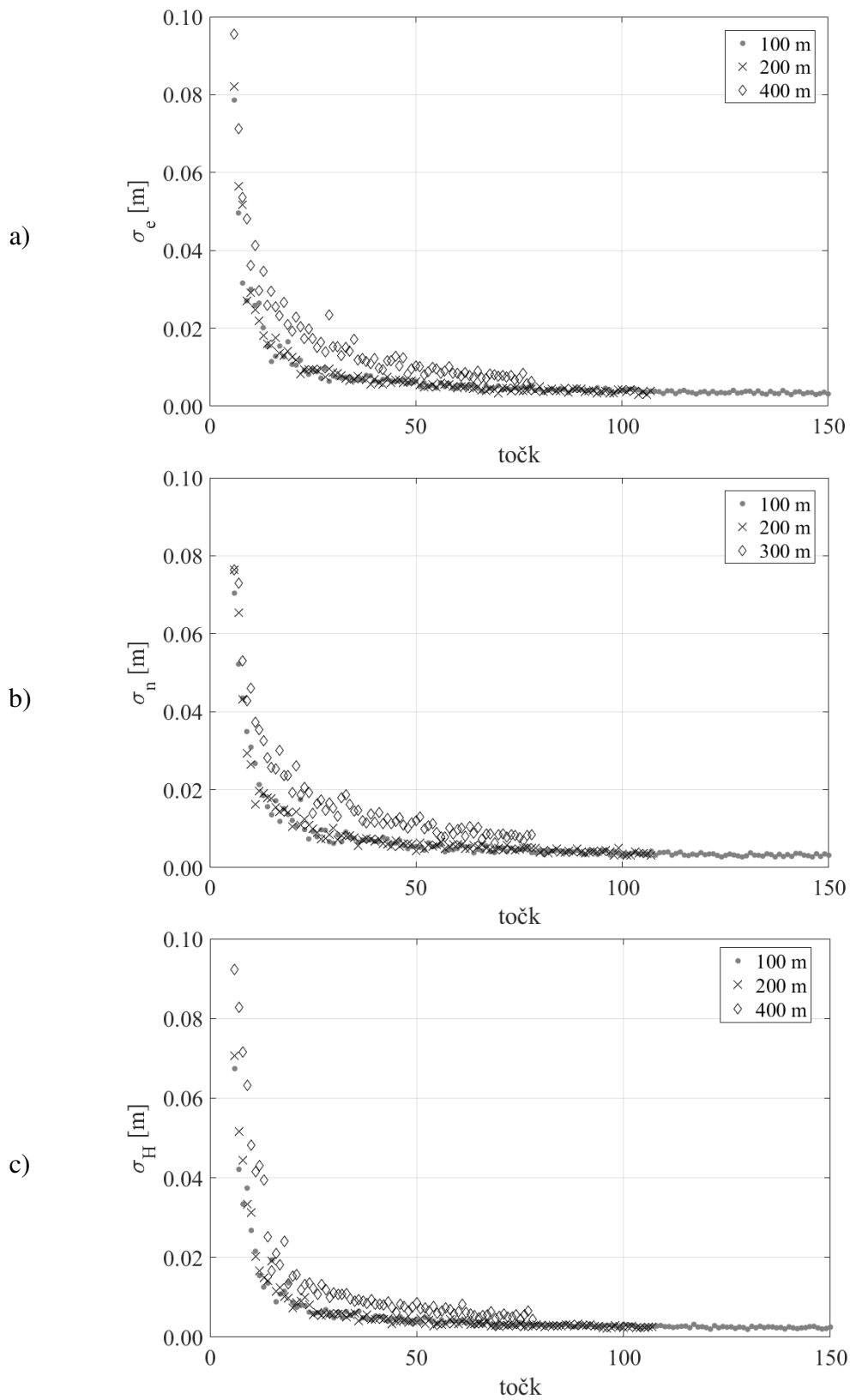
S slike 6 vidimo, da za množice z več kot 20 točkami pri večkratnih izračunih parametrov stožcev z naključnim izborom istega števila točk dobimo približno enake rezultate. Razpršenost vrednosti odstopanj koordinat je najmanjša za rezultate obdelav oblaka točk pri višini leta 100 m in največja za rezultate obdelav oblaka točk višine leta 400 m. Sklepamo lahko, da je razlog v natančnosti položajev skeniranih točk na plašču stožca, ki se na stožčastih površinah zmanjšuje z višino leta. Izrisani grafi kažejo na to, da so ne glede na število točk na stožcu vse tri komponente enako kakovostno določene. Največja razdalja med povprečjem izračunanih koordinat vrha stožca in pravo vrednostjo je v najslabšem primeru 3,6 cm (za oblak točk višine leta 400 m in 8 točk na plašču stožca).

Minimalno potrebno število točk na plašču lahko določimo le na osnovi izračunanih odstopanj koordinat, ki jih prikazujemo na sliki 6. Ker pri večkratnih ponovitvah ne dobimo enakih naključno izbranih točk, ponovljivost rezultatov izračuna koordinat vrha

stožca preverimo z izračunom standardnih odklonov iz odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti (slika 7).



Slika 6: Povprečne vrednosti odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti



Slika 7: Standardni odkloni koordinat vrha stožca za 50-krat ponovljene izračune

Izračunane vrednosti standardnih odklonov, ki jih predstavljamo na sliki 7, smo uporabili za določitev natančnosti 3D koordinat vrha stožca (σ_{3D}), določenih na osnovi 50-ih ponovitev izračuna. Iz rezultatov obdelav oblakov točk posamezne višine leta smo določili število točk m , ko je σ_{3D} še manjši od 2 cm, kolikor znaša natančnost določitve koordinat za uporabljeni laserski skener (preglednica 1).

Preglednica 1: Minimalno število točk na stožcu za določitev koordinat vrha stožca z natančnostjo, višjo od 2 cm

Višina leta [m]	100	200	400
Min. št. točk	11	16	26
σ_{3D} [mm]	18,4	18,7	19,3

Minimalno potrebno število točk, ki zagotavlja želeno natančnost koordinat vrha stožca iz 50-krat določenih parametrov stožca z naključnim izborom točk na plašču stožca, se za obravnavane oblake točk razlikuje tudi za več kot dvakrat (preglednica 1). Vpliv višine leta na izračunane parametre stožcev jasno vidimo tudi na sliki 7, kjer so standardni odkloni pri obdelavi oblakov točk pri višini leta 100 m veliko manj razpršeni in zavzemajo najmanjše vrednosti v primerjavi z rezultati obdelav oblakov točk pri višini leta 200 in 400 m. Glavni razlog za razlike je v natančnostih določitve koordinat skeniranih točk, ki so močno odvisne od površinske strukture znotraj odtisa laserskega žarka na stožcu. Uporabljeni laserski skener ima divergenco laserskega žarka 0,25 mrad, kar na višini leta 100 m predstavlja 2,5 cm in na višini 400 m 10 cm.

Natančnost določitve koordinat umetne tarče iz oblakov točk ALS z natančnostjo, višjo od 2 cm, je visoka zahteva. V primeru, da si izberemo mejo pri 5 cm, bi za višino leta 400 m na plašču stožca potrebovali 14 točk, za višino leta 100 m pa le 10.

Zaključek

V prispevku smo predstavili analizo določitve minimalnega potrebnega števila točk na plašču stožca, če želimo stožec uporabiti kot natančno umetno tarčo v postopkih ALS. Raziskava temelji na testnih podatkih, pridobljenih na višinah snemanja 100, 200 in 400 m. Potrebno število točk za izračun koordinat vrha stožca z želeno natančnostjo smo določili na osnovi 50-ih ponovitev določitve parametrov stožca in končni rezultat določili s povprečnimi vrednostmi odstopanj koordinat vrha stožca od pravih vrednosti.

Z grafičnimi prikazi predstavljamo povprečna odstopanja koordinat po posameznih koordinatnih komponentah in standardne odklone teh odstopanj. Razpršenost rezultatov je najmanjša za obdelave oblaka točk stožca pri višini leta 100 m in največja pri višini leta 400 m. Glede na lastnosti laserske svetlobe in odboja od stožčasnih oblik je rezultat pričakovan. Za velike množice točk, ki jih uporabimo pri določitvi parametrov stožca v več ponovitvah, dobimo podobne rezultate, kar potrjujejo milimetske vrednosti standardnih odklonov, ki jih predstavljamo na sliki 7. Pri zelo majhnem številu točk (manj kot 10) lahko standardni odkloni odstopanj koordinat, ki so določeni na osnovi odstopanj 50-ih ponovitev izračuna po posameznih koordinatnih komponentah, dosegajo vrednosti tudi do 9 cm.

Izbran kriterij določitve minimalnega potrebnega števila točk za izračun koordinat vrha stožca predstavlja prostorska natančnost koordinat točk, določena na osnovi 50-ih ponovitev določitve parametrov stožca na osnovi naključno izbranih točk, ki mora biti manjša od 2 cm. Ugotovili smo, da za obravnavane primere dobimo različne rezultate

(preglednica 1). V najslabšem primeru, to je za oblak, pridobljen pri višini leta 400 m, ta pogoj izpolnjuje 26 točk. Če se zadovoljimo z natančnostjo določitve koordinat vrha stožca 5 cm, bi potrebovali 14 točk. Pri praktični uporabi stožcev ALS bi za doseganje natančnosti koordinat vrha stožca 5 cm za višine leta pod 200 m morali načrtovati gostoto skeniranja vsaj 5 točk/m², za lete nad 400 m pa vsaj 8 točk/m².

Literatura in viri

- Artese, G., Achilli, V., Salemi, G., Trecroci, A. (2004). Automatic Orientation and merging of laser scanner acquisitions through volumetric targets: procedure description and test results. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXV, PARTB5, Commission V: 210–215.
- Barbarella, M., Fiani, M. (2013). Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. *European Journal of Remote Sensing*, 46:1, 126–151.
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Kavulya, G., Calis, G. (2011). Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. *Automation in Construction*, 20, 5: 649–658.
- Bienert, A., Maas, H.G. (2009). Methods for the automatic geometric registration of terrestrial laser scanner point cloud in forest stands. *ISPRS Archives – Volume XXXVIII-3/W8*, Paris, France: str. 93–98.
- Csanyi, N., Toth, C. K. (2007). Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73, 4: 385–396.
- Csanyi, N., Toth, C. K., Grejner-Brzezinska, D., Ray, J. (2005). Improving LiDAR Data Accuracy Using LiDAR Specific Ground Targets *ASPRS 2005 Annual Conference Baltimore, Maryland, March 7-11, 2005*: 11 p.
- Friess, P. (2007). Requirements for generating a geometrically Correct Point Cloud. *Theory and Application of Laser Scanning*, ISPRS summer school, July 1-7, 2007, Ljubljana.
- Hebel, M., Stilla, U. (2012). Simultaneous Calibration of ALS System and Alignment of Multiview LIDAR Scans of Urban Areas. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 50, 6: 2364–2379.
- Höhle, J., Pedersen, C.Ø. (2010). A new method for checking the planimetric accuracy of digital elevation models data derived by airborne laser scanning. *Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, University of Leicester, Leicester, 253–256.
- Kager, H. (2004). Discrepancies between overlapping laser scanner strips – simultaneous fitting of laser scanner strips. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXV, B3: 6 p.
- Kregar, K., Grigillo, D., Kogoj, D. (2013). High precision target determination from a point cloud. *V: ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, Antalya, Turkey*, 11–13.
- Kuwano, Y. (2008). LiDAR System overview and instrument calibration. *International School on LiDAR Technology, Kanpur, India*, 74 p.
- Pesci, A., Teza, G. (2008). Terrestrial laser scanner and retroreflective targets: An experiment for anomalous effects investigation. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 19: 5749–5765.
- Toth, C., Paska, E., Brzezinska, D. (2008). Quality assessment of lidar data by using pavement markings. Presented at *ASPRS Annual Conference, Portland, Oregon, ZDA*: 10 p.
- Urbančič, T. (2017). Ocenevanje geometrične podobnosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja. *Doktorska disertacija, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana*
- Urbančič T., Vrečko A., Kregar K. (2016). The reliability of RANSAC method when estimating the parameters of geometric object. *Geodetski vestnik*, 60, 1: 69–97.
- van der Sande, C., Soudarissanane, S., Khoshelham, K. (2010). Assessment of relative accuracy of AHN-2 laser scanning data using planar features. *Sensors*, 2010, 10: 8198–8214.

- Vosselman, G., Maas, H.-G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, CRC Press: 318 p.
- Witzgall, C., Cheok, G.S. Kearsley, A.J. (2006). Recovering Spheres from 3D Point Data. In Proceedings of the 35th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR '06). IEEE Computer Society, Washington, ZDA, 6 p.
- Wotruba, L., Morsdorf, F., Meier, E., Nüesch, D. (2005). Assessment of sensors characteristics of an airborne laser scanner using geometric reference targets. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, Netherlands, 6 p.