

METODE**MOŽNOSTI UPORABE ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA (LIDAR) ZA GEOMORFOLOŠKE ŠTUDIJE**

AVTORICA

dr. Mihaela Triglav Čekada*Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija
mihaela.triglav@gis.si*

UDK: 528.8:551.4

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (LIDAR) za geomorfološke študije

Zračno lasersko skeniranje (LIDAR) omogoča hitro izmero in preučevanje reliefa tudi pod rastjem. Zato je zelo primerno za preučevanje različnih reliefnih oblik. Predstavljene so najbolj pomembne lastnosti laserskega skeniranja, ki vplivajo na možnost njegove uporabe. Predvsem je treba poznati gostoto laserskih točk na enoto površine (število točk/m²) in končno natančnost izmere. Na primeru zemeljskih plazov, skalnih podorov in kraških pojavov je opredeljeno kakšne laserske podatke potrebujemo. V odvisnosti od velikosti reliefnih oblik bomo izbrali gostoto laserskih točk na enoto površine. Velike zemeljske plazove in različne kraške pojave lahko preučujemo na srednji gostoti od 5 do 12 točk/m². Za srednje velike zemeljske plazove in manjše skalne podore je smiselna uporaba več kot 12 točk/m². Za spremljanje hitrih geomorfni procesov, na primer zemeljskih plazovi, pa potrebujemo bolj natančne podatke kot za prikaz statičnih pojavov kot so kraški pojavi.

KLJUČNE BESEDE

LIDAR, zračno lasersko skeniranje, gostota laserskih točk, natančnost, geomorfološki pojavi, zemeljski plazovi, skalni podori, kraški pojavi

ABSTRACT

Possibilities of aerial laser scanning (LIDAR) usage for geomorphologic studies

Aerial laser scanning (LIDAR) enables quick acquisition of terrain data and it can be used for the study of terrain under the vegetation. Therefore LIDAR is very appropriate for different geomorphologic studies. In this paper different characteristics of LIDAR are described, especially those which are important for decision, if LIDAR data are appropriate for the possible needs. The most important factors are the number of points per area unit (points/m²) and the positional accuracy of the LIDAR data. On the example of landslides, rockfalls and different karst features the most suitable LIDAR data sets are defined. Based on the dimension of different geomorphologic features the number of LIDAR points per square meter will be defined. The largest landslides and different karst features can be studied with LIDAR data of 5 to 12 points/m². For medium extent landslides and smaller rockfalls the usage of more than 12 points/m² is recommended. For monitoring of more dynamic geomorphologic features, such as landslides, very accurate LIDAR data is needed. For static features, such as different karst features, only average LIDAR accuracy is needed.

KEY WORDS

LIDAR, aerial laser scanning, number of laser points per unit area, accuracy, geomorphologic features, landslide, rockfall, karst features

Uredništvo je prispevek prejelo 16. junija 2011.

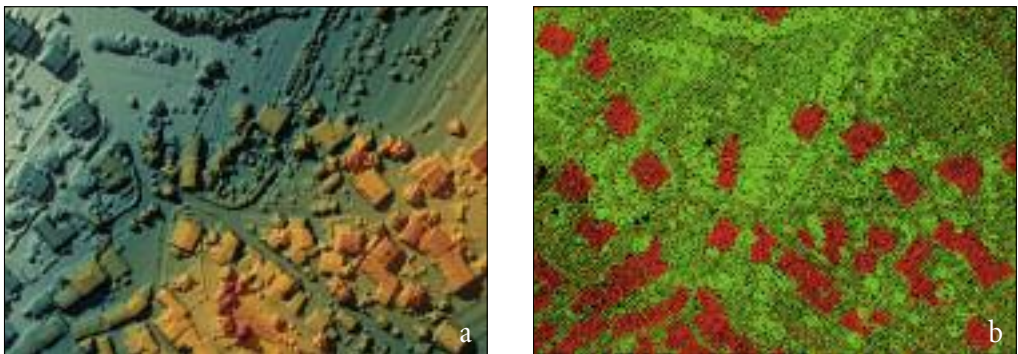
1 Uvod

Zračno lasersko skeniranje ali LIDAR (ang. *light detection and ranging*) omogoča neposredno izmero velikega števila točk na površju Zemlje z merjenjem časa od oddaje laserskega žarka do povratka laserskega odboja nazaj na senzor. Spada med tako imenovane aktivne tehnike daljinskega zaznavanja. Laserska meritev poda koordinate točke, od katere se je laserski žarek odbil, ter intenziteto izmerjenega signala. Koordinate točke se izračuna na podlagi izmerjene razdalje med oddajnikom, tarčo in sprejemnikom, znanim kotom skeniranja ter znano lego oddajnika. Intenziteta je večinoma predstavljena kot barva točke in predstavlja razmerje med izsevano energijo oddanega laserskega pulza in prejeta energija odbitega pulza.

Prednost laserskega skeniranja pred ostalimi tehnikami daljinskega zaznavanja je, da omogoča zaznavo oblik in objektov pod rastjem. Uporablja se lahko kot samostojna tehnika snemanja, vendar se najpogosteje izvaja skupaj z drugimi snemanji: od klasičnih fotogrametričnih snemanj do termičnih ter hiperspektralnih snemanj. S kombiniranjem omogočimo izdelavo dodatnih izdelkov, kot so na primer ortofotografije, ali pa nam omogoča lažjo interpretacijo objektov v oblaku laserskih točk.

Neobdelani laserski podatki so običajno shranjeni kot oblak laserskih točk (slika 1b), večinoma v zapisih LAS ali ASCII. Za delo z vektorskim slojem potrebujemo namenske programe za obdelavo laserskih točk (na primer *TerraScan* podjetja Terasolid (Medmrežje 5)), s katerimi lahko laserske podatke klasificiramo v sloje po različnih kriterijih (na primer višina, red odboja). Enostavnejša in širše dostopna pa je uporaba laserskih podatkov v obliki rastrskega sloja, s katerim prikažemo različne digitalne modele višin (na primer gola tla, vrhovi rastja, stavbe), ki smo jih predhodno izdelali iz originalnih laserskih podatkov. Rastrske digitalne modele višin lahko uporabljamo v geografskih informacijskih sistemih, torej programih, ki omogočajo tudi različne prostorske študije (na primer ArcGIS) (slika 1a).

Različne javne ustanove v Sloveniji so že naročile podatke zračnega laserskega skeniranja za različne potrebe: od podrobnih vodarskih študij, do potreb gozdarstva, prostorskega načrtovanja in zgodovinskih študij (Kobler in Zafran 2006; Gosar s sodelavci 2007; Barborič s sodelavci 2008; Kokalj s sodelavci 2008; Kolega s sodelavci 2008; Janža s sodelavci 2009; Mlekuž 2010; Štular 2010). V letu 2011 izvaja Geodetska uprava Republike Slovenije lasersko skeniranje celotnega ozemlja Slovenije (Medmrežje 3). S tem bodo postali podatki zračnega laserskega skeniranja čedalje dostopnejši, kar bo omogočilo tudi njihovo širšo uporabo. V članku se osredotočamo na značilnosti laserskega skeniranja, ki so pomembne za spremljanje reliefnih oblik in geomorfni procesov. S tem bomo pripomogli k lažji odločitvi, kateri obstoječi podatki laserskega skeniranja lahko zadostijo našim potrebam oziroma kakšne nove podatke moramo naročiti.



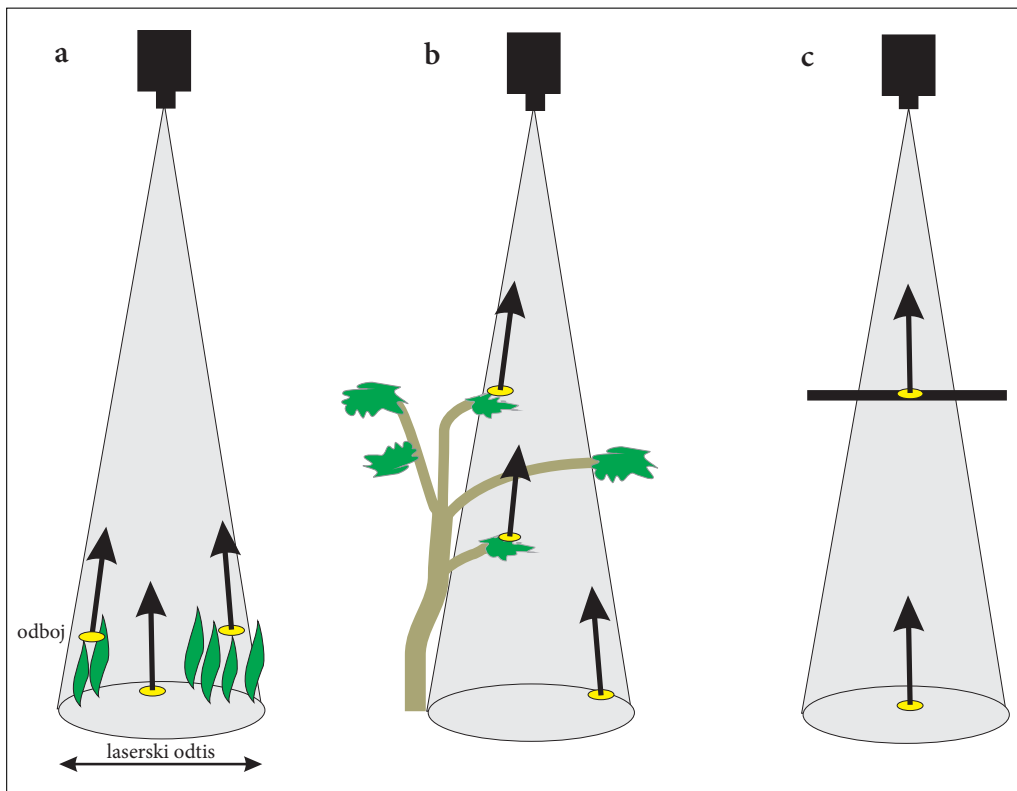
Slika 1: Zračni laserski podatki istega območja: a) rastrski prikaz, kjer so laserski podatki prikazani v obliki digitalnega modela višin po vrhovih objektov z velikostjo celice 25 cm × 25 cm in obarvani glede na nadmorsko višino ter b) vektorski prikaz, kjer so laserske točke klasificirane na objekte (rdeče) in dva tipa rastja različnih višin (svetlo zelena – grmičevje in drevje, temno zelena – nizko rastje).

2 Osnovne laserskega skeniranja

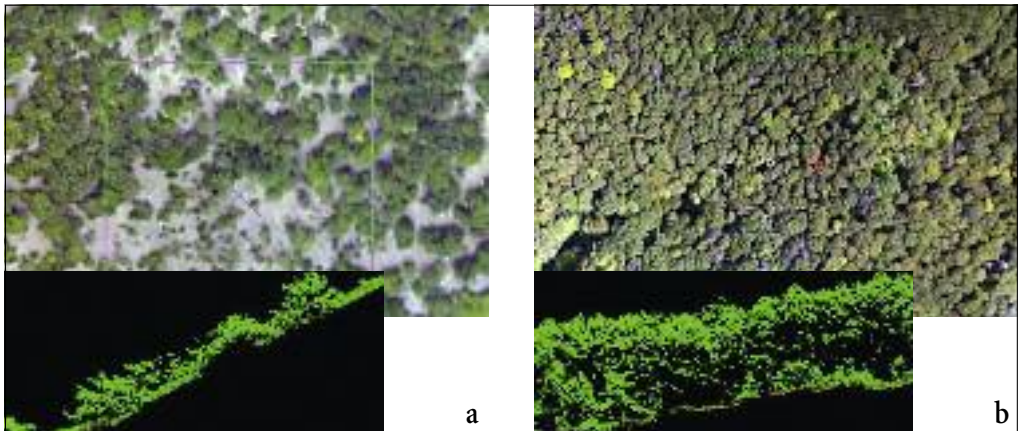
2.1 Princip zajema objektov pod rastjem – divergenca laserskega žarka

Zaradi divergenca laserskega žarka, ki je tipično med 0,2 in 2 mrad, laserski žarek na tleh predstavlja krog določenega premera, ki mu pravimo laserski odtis (ang. *footprint*) (Wehr in Lohn 1999). Če uporabljamo laserski sistem z divergenco 0,2 mrad in smo od tarče oddaljeni 1000 m, dobimo odtis laserske točke na tarči premera 20 cm. Na poti med oddajnikom, tarčo (tlemi) in sprejemnikom laserskih odbojev se lahko v laserskem žarku znajdejo tudi drugi majhni odbojniki (listje, veje, žice, ptiči), od katerih se laserski žarek deloma odbije. Sprejemnik tako zazna več laserskih odbojev, ki jih je povzročil en laserski žarek (slika 2) – govorimo o redu odbojev. Za samodejno klasifikacijo laserskih podatkov sta pomembna prvi odboj in zadnji odboj laserskega žarka. Z njuno pomočjo lahko določimo višino rasti in izluščimo, kateri odboji v resnici predstavljajo tla brez rasti.

Delež odbojev, ki dosežejo tla pod rastjem, je odvisen od gostote rasti, vrste rasti in posledično tudi od letnega časa, v katerem snemamo. Tako bomo dobili večji delež odbojev, ki dosežejo tla, ob snemanju neolistanih listnatih gozdov, kot pa ob snemanju gostih iglastih gozdov. Za srednje gost mešan gozd evropskega tipa lahko pričakujemo v olistanem delu leta 20–40 % laserskih odbojev, ki prikazujejo tla, v neolistanem delu leta pa tudi do 70 % laserskih odbojev. Na primer v olistanem delu leta dobimo za redko mediteransko rastje, ki je prikazano na sliki 3a, 20 % odbojev, ki prikazujejo tla, v primeru



Slika 2: Shematski prikaz različnega števila odbojev enega laserskega žarka za: a) travo, b) grmičevje in c) žico.



Slika 3: Primera različnega rastja na izsekih ortofotografij merila 1 : 1000 in vstavljenem prečnem prerezu skozi vektorski sloj laserskih točk z gostoto 20 točk/m²: a) redko mediteransko rastje – pretežno nizko grmičevje (prevladujejo črnika, puhasti hrast, črni gaber) in b) termofilni gozd mešanih listavcev z gostim prepletom drevesnega rastja (prevladujejo hrast graden, javor maklen, akacija, bela breza).

gostega termofilnega gozda, ki je prikazan na sliki 3b, pa dobimo samo 6 % odbojev, ki prikazujejo tla (Ackermann 1999; Triglav Čekada 2009).

2.2 Gostota laserskih točk na enoto površine

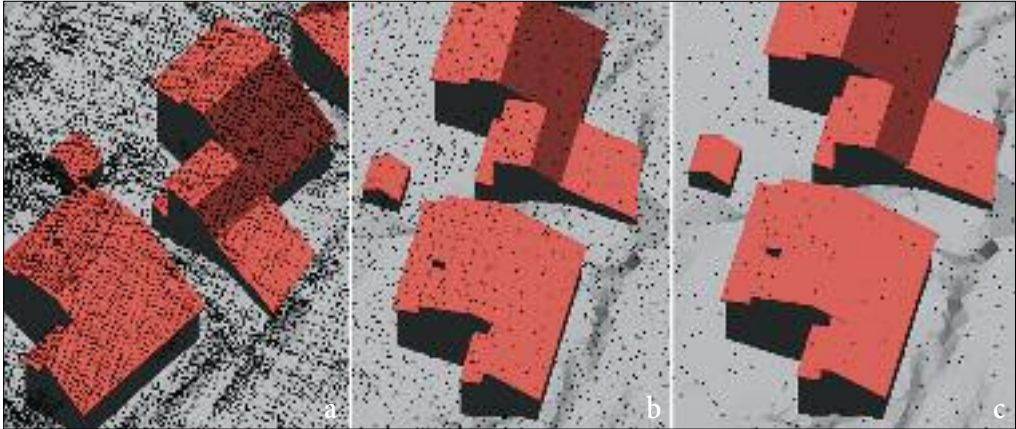
Gostota laserskih točk na enoto površine, to je število točk na m², nam pove kakšne objekte bomo lahko prepoznali v oblaku laserskih točk, kdaj bomo lahko ločili dva objekta med sabo in kako natančno bomo lahko določili obliko objektov. Gostota laserskih točk na enoto površine je opredeljena kot povprečna vrednost gostote za določeno območje obravnave. Zaradi različnega števila redov odbojev enega laserskega žarka (na stavbi dobimo en laserski odboj, na rastju več), različnih stopenj prekrivanja laserskih snemalnih pasov, slabše odbojnosti laserskega žarka od določenih objektov ter absorpcije laserskega žarka (vodna telesa) ne moremo doseči enotne gostote za celotno območje obravnave.

Glede na gosto laserskih točk na enoto površine lahko rezultate laserskega skeniranja delimo na (slika 4):

- do 5 točk/m² – majhna gostota laserskih točk: omogoča izdelavo splošnih digitalnih modelov višin (DMV) za celotno državo in je primerljiva z DMV-ji, ki jih pridobimo na osnovi stereorestitucije letalskih posnetkov cikličnega aerosnemanja Slovenije,
- 5–10 točk/m² – srednja gostota laserskih točk: omogoča izdelavo bolj podrobnih DMV-jev, denimo za generalne študije poplavnih območij,
- 10 in več točk/m² – visoka gostota laserskih točk: omogoča izdelavo najbolj podrobnih DMV-jev, podrobnih 3D-modelov mest, prikaz podatkov za topografske zemljevide merila 1 : 10.000 ali 1 : 5000 ter podrobne študije poplavnosti.

Za gostote 100 točk/m² ali več uporaba zračnega laserskega skeniranja v tem trenutku ni več smotrna, za te namene raje uporabimo terestrično lasersko skeniranje. Razvoj senzorjev zračnega laserskega skeniranja gre v smeri povečevanja gostote laserskih točk na enoto površine pri enakih parametrih leta (hitost leta, končna natančnost meritev) kot se za snemanja trenutno uporabljajo (Medmrežje 4). Zato lahko pričakujemo, da bodo kmalu tudi zgoraj omenjene gostote postale smoterne za uporabo zračnega laserskega skeniranja.

Ob snemanju območij, pokritih z gostim rastjem, še posebej v olistanem delu leta, je smiselno pri naročilu zračnega laserskega skeniranja opredeliti gostoto laserskih točk, ki dosežejo tla, saj se velik delež



Slika 4: Različne gostote laserskih točk na primeru tipičnih enodružinskih hiš – redčeni podatki:
a) 20 točk/m² (original), b) 10 točk/m² in c) 1 točka/m².

laserskih točk odbije od rastja. Če želimo preučevati naravne in antropogene elemente pod gozdom, je vsekakor priporočljivo uporabiti vsaj 8 do 10 točk/m² (Chasmer s sodelavci 2006). Generalno pa je smiselno območje obravnave razdeliti na območja, pokrita z istim tipom rastja in za vsak takšen tip že vnaprej oceniti delež laserskih točk, ki se bodo odbile od tal, saj bomo le tako lahko zagotovili zadostno število točk (Triglav Čekada 2009).

Predpostavimo, da so točke, ki prodrejo do tal razporejene v isti ravnini, ki opisuje tla. S pomočjo teorema vzorčenja izpeljemo enačbo za izračun najmanjšega še uporabnega števila laserskih točk na enoto površine ρ_{min} . Poznati moramo samo delež prodiranja laserskih točk in kartografsko merilo, na katerem želimo predstaviti podatke, pridobljene iz podatkov laserskega skeniranja:

$$\rho_{min} = \frac{1}{(GA/2)^2} \cdot \frac{100}{PR} \quad (1)$$

Delež prodiranja (PR) je izražen v procentih. GA je geometrijska točnost zemljevida izražena v metrih, ki jo dobimo iz povprečne grafične točnosti zemljevida 0,2 mm in merila zemljevida. Zgodovinsko je grafična točnost opredeljena z najtanjšo črto, ki se jo je še dalo ročno narisati na zemljevid 0,13 mm. Geometrijska točnost je enaka zmnožku grafične točnosti in merila zemljevida. Tako znaša geometrijska točnost zemljevida $GA = 1$ m za merilo 1 : 5000 in grafično točnost 0,2 mm. V primeru snemanja mešanega rastja (travniki, sadovnjaki in gozd), ki omogoča delež prodiranja laserskih točk do tal 33 %, potrebujemo za zajem objektov pod rastjem, ki jih bomo prikazali na merilu 1 : 5000, teoretično gostoto laserskih točk vsaj 12 točk/m² (Triglav Čekada 2009; Triglav Čekada s sodelavci 2010).

2.3 Odbojnost laserskega žarka

Intenziteta laserskega odboja vsebuje tudi podatek o odbojnosti objekta od katerega se je laserski žarek odbil. Intenziteta, ki jo v vektorskem prikazu oblaka laserskih točk lahko predstavimo kot barvo laserske točke, je razmerje med izsevano energijo oddanega laserskega žarka in izmerjeno prejetjo energije laserskega odboja. Energija odboja je odvisna od: izsevane energije oddanega laserskega žarka, odbojnosti tarče, kota skeniranja (kot pod katerim je laserski žarek zadel tarčo), višine leta, atmosferskih pogojev (vsebnost vlage in aerosolov) ter tehničnih karakteristik sprejemnika. Z radiometrično kalibracijo podatkov intenzitete lahko odstranimo vplive višine leta ter kota skeniranja in tako dobimo zemljevid psevdoodbojnosti, ki omogoča približno samodejno klasifikacijo laserskih točk (Coren in Sterzai 2006; Bitenc 2007).

Odbojnost tarče je odvisna od valovne dolžine vpadne svetlobe. Lasersko skeniranje izkorišča za izmero laserskih točk način difuznega odboja laserskega žarka na hrapavih površinah v valovni dolžini laserja. Če pride do navadnega odboja po odbojnem zakonu, kot na primer pri vodi ali drugih gladkih površinah, laserski odboj zaznamo le v primeru pravokotnega vpada laserskega žarka na površino.

Zračne laserske sisteme delimo na topografske in batimetrične sisteme. Topografski laserski sistemi večinoma uporabljajo bližnje infrardeče valovne dolžine (1064 nm, 1541 nm ali 1550 nm). Vodna telesa so za topografske laserske sisteme v veliki meri nevidna. Batimetrični sistemi za izmero uporabljajo še razpolovljeno valovno dolžino (na primer v zelenem delu elektromagnetnega spektra – 532 nm), ki prodre v vodo, tako da lahko merimo globine mirnih in čistih vod. Ob ugodnih pogojih, ko voda ne vsebuje preveč različnih delcev in ni turbulentna, batimetrični laser lahko prodre v vodo tudi do globine 70 m (Medmrežje 1).

Topografski laserski sistemi, ki so jih uporabili za laserske izmere v Sloveniji, večinoma uporabljajo valovno dolžino 1064 nm, zato smo v preglednici 1 predstavili odbojnosti za to valovno dolžino. Tabela olajša izbiro kontrolnih točk, ki jih potrebujemo za preverbo natančnosti laserskega skeniranja ali za izbiro veznih točk, ki jih potrebujemo za integracijo oblaka laserskih točk z drugimi (na primer slikovnimi) podatki, saj je v teh primerih zelo pomembno, da znamo odkriti dobre odbojnikove v valovni dolžini laserja. Dobri odbojnikovi so na primer bakrene strehe. Dobri odbojnikovi so v oblaku laserskih točk vidni tudi, če so veliko manjši od odtisa laserskega žarka: to so žice in listje.

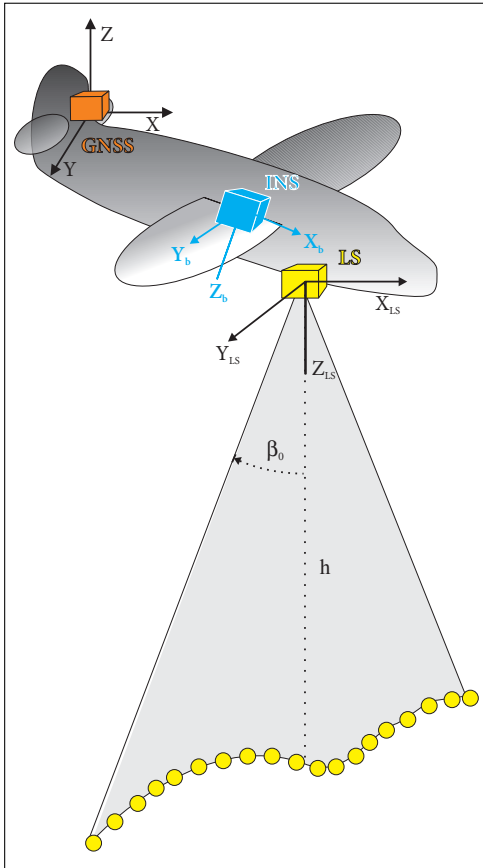
Preglednica 1: Odbojnost različnih materialov za valovno dolžino 1064 nm (Wehr in Lohn 1999; Wagner 2005). Najboljši odbojnikovi imajo odbojnost blizu 1.

material	odbojnost	material	odbojnost
aluminijeva folija	0,8–0,9	pesek, peščene plaže, puščave	0,5
sneg	0,8–0,9	peščena prst: mokra – suha	0,2–0,3
baker	0,9	suha slana prst	0,6
koruzno listje	0,9	žgana glina (strešniki)	0,3
pšenica	0,6–0,7	cement	0,4
krom	0,6	asfalt	0,2
nerjavno jeklo	0,6	lava	0,1
apnenec	0,7	voda	< 0,01

Glede na preglednico 1 se je pri načrtovanju novega laserskega snemanja priporočljivo odločiti za kontrolne točke iz aluminijaste folije. Mitishita s sodelavci (2011) so za kontrolne točke, ki so jih prepoznali na ortofotografijah in v oblaku laserskih točk z gostoto 3 točk/m², uporabili belo pobarvane kroge na asfaltu premera 60 cm.

2.4 Natančnost zračnega laserskega skeniranja

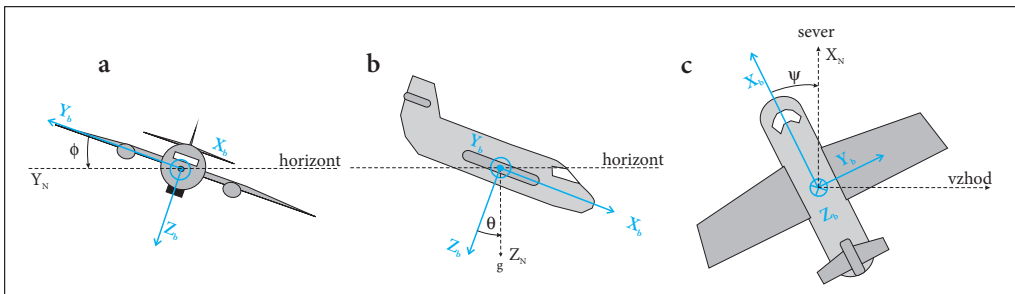
Natančnost zračnih laserskih sistemov je odvisna od natančnosti direktnega georeferenciranja s katerim določimo lego laserskih točk v prostoru. Direktno georeferenciranje temelji na meritvah laserskega sistema (LS), inercialnega navigacijskega sistema (INS) in globalnega navigacijskega satelitskega sistema (GNSS) na krovu nosilca snemanja (slika 5). INS- in GNSS-meritve opredeljujejo lego nosilca v prostoru. Najnovejši laserski sistemi uporabljajo zelo natančne integrirane INS/GNSS-sisteme, kot je na primer Applanix (Medmrežje 2), ki omogočajo višinsko natančnost izmere laserskih točk okoli decimetra in položajno natančnost laserskih točk nekaj decimetrov v koordinatnem sistemu meritev – ETRS89. S transformacijo iz ETRS89 v Gauß-Krügerjev koordinatni sistem »pokvarimo« absolutno natančnost meritev še za kakšen decimeter.



Slika 5: Kako pridemo od točke na terenu do laserske meritve preko različnih koordinatnih sistemov: LS – laserski sistem, INS – inercialni navigacijski sistem in GNSS – globalni navigacijski sistem, β_0 – največji kot skeniranja, h – višina leta.

Da lahko naknadno opredelimo absolutno natančnost laserskih meritev, brez izvajanja kontrolnih meritev na terenu, moramo poznati osnovne parametre natančnosti laserskega sistema, INS- in GNSS-sistema, ki so odvisni od uporabljenih sistemov in jih pridobimo od izvajalcev snemanja.

Na podlagi simulacije vpliva različnih parametrov laserskega skeniranja smo izvedli nekaj poenostavitvev in tako izpeljali poenostavljen model napak zračnega laserskega skeniranja (Triglav Čekada, 2009; 2010). Poenostavljen model napak zračnega laserskega skeniranja je odvisen od največjega kota skeniranja β_0 ,



Slika 6: INS-koti: a) ϕ – nagib, b) θ – naklon in c) ψ – zasuk.

višine leta h ter napake izmere INS-kotov: nagib ($\Delta\phi$; ang. *roll*), naklon ($\Delta\theta$; ang. *pitch*) in zasuk ($\Delta\psi$; ang. *heading*) (slika 6).

Na podlagi poenostavljenega modela napak izračunamo povprečno absolutno natančnost zračnega laserskega skeniranja (položajna $|\Delta X_{\text{povp}}|$ in višinska $|\Delta Z_{\text{povp}}|$):

$$\Delta \mathbf{X}_{\text{povp}} = \begin{bmatrix} |\Delta X_{\text{povp}}| \\ |\Delta Z_{\text{povp}}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h \cdot \sin \beta_0}{\beta_0} (-1,22 \cdot 10^{-4} \Delta \theta \sin \theta - 1,22 \cdot 10^{-4} \Delta \theta \cos \theta \sin \phi + \Delta \theta \cos \theta \cos \phi) \\ \frac{h \cdot \sin \beta_0}{\beta_0} (-1,22 \cdot 10^{-4} \sin \theta - 1,22 \cdot 10^{-4} \cos \theta \sin \phi + \cos \theta \cos \phi + 1,74 \cdot 10^{-5} \sin \theta + 1,74 \cdot 10^{-5} \cos \theta \sin \phi - \cos \theta \cos \phi) \end{bmatrix} + \Delta \text{GNSS} \quad (2)$$

Vrednosti kotov pišemo v stopinjah, razdalje pa v metrih. Številčne komponente v enačbi so pridobljene na podlagi vrednosti, ki opisujejo tipičen topografski laserski sistem. Za vrednosti kotov nagiba ϕ in naklona θ vzamemo povprečno velikost obeh kotov 3° . Vektor napake faznega centra GNSS na nosilcu snemanja je ΔGNSS in njegova velikost lahko znaša med 0,05–0,10 m.

Podobno enačbo zapišemo še za izračun največjih absolutnih možnih napak zračnega laserskega skeniranja (položajna $|\Delta X_{\text{max}}|$ in višinska $|\Delta Z_{\text{max}}|$):

$$\Delta \mathbf{X}_{\text{max}} = \begin{bmatrix} |\Delta X_{\text{max}}| \\ |\Delta Z_{\text{max}}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,44 \Delta X_{\text{s_povp}} + 5,60 \Delta \psi - 7,59 \Delta \phi + 1,79 \cdot 10^{-4} h \\ -8,74 \Delta \phi + 2,11 \cdot 10^{-4} h + 0,15 \end{bmatrix} + \Delta \text{GNSS} \quad (3)$$

Kot primer uporabimo INS-sistem z natančnostjo izmere kotov nagiba in naklona $\Delta\phi = \Delta\theta = 0,02^\circ$ in natančnostjo izmere kota zasuk $\Delta\psi = 0,04^\circ$, ter dovolimo največji kot skeniranja $\beta_0 = 20^\circ$ ter višino leta $h = 800$ m. Po enačbi (2) dobimo povprečno absolutno planimetrično napako 0,31 m, ter povprečno absolutno višinsko napako 0,05 m v koordinatnem sistemu ETRS89. Po enačbi (3) lahko v teh podatkih pričakujemo največjo absolutno planimetrično napako 0,65 m in največjo absolutno višinsko napako 0,26 m. Največje napake so ponavadi na robovih snemalnih pasov.

3 LIDAR in nekateri geomorfološki pojavi

Geomorfološke študije preučujejo reliefne oblike zemeljskega površja, njihov nastanek, razvoj in razporeditev. Preučujejo še vpliv različnih dejavnikov, od podnebnih do človeških, na geomorfne procese. Osredotočili se bomo na pojave, ki jih je v Sloveniji veliko ter na uporabnost zračnega laserskega skeniranja za njihovo spremljanje. Obravnavano je preučevanje zemeljskih plazov, skalnih podorov in preučevanje kraških oblik. Uporabnost zračnega laserskega skeniranja za preučevanje poplav se je pri nas že izkazalo (Gosar s sodelavci 2007), zato poplav ne bomo obravnavali.

3.1 Plazovi

Zračno lasersko skeniranje lahko uporabljamo za preučevanje premikanja predvsem večjih zemeljskih plazov in posledic obsežnejših blatnih ali drobirskih tokov. Manjše in srednje velike plazove spremljamo ali s klasičnimi geodetskimi metodami (tahimetrična izmera ali GNSS-izmera) ali z terestričnim laserskim skeniranjem. Glede na predvidevano hitrost zemeljskega plazu načrtujemo tudi večkratne ponovitve izmere ali lasersko snemanje.

Pri preučevanju premikanja velikih zemeljskih plazov potrebujemo podatke zračnega laserskega skeniranja z gostotami laserskih točk 5–25 točk/m², odvisno od obsega zemeljskega plazu in posledično merila zemljevida ter letnega časa, v katerem je bilo snemano. Glede na obseg zemeljskega plazu izberemo merilo. Na primer plaz Koseč meri 10 ha (pri širini do 150 m in dolžini 600 m), zemeljskih plaz Slano blato 20 ha (200 m × 1100 m), zemeljski plaz Stovžje 25 ha (400 m × 900 m) in zemeljskih plaz Macesnik 19 ha (100 m × 2200 m) (Zorn in Komac 2008, 36). Za prikaz plazov Slano blato in Macesnik bi izbrali merilo 1 : 5000, za prikaz plazu Koseč in Stovže pa 1 : 1000. Po enačbi (1) potrebujemo vsaj 4 točke/m² za zemljevid plazu merila 1 : 5000 ali 25 točk/m² za merilo 1 : 1000, če predpostavimo, da vse laserske točke opisujejo tla. Če zemeljski plaz nastane v olistanem delu leta moramo upoštevati, da vse laserske točke ne pridejo do tal. V primeru, da se zemeljski plaz nahaja na območju z mešanim rastjem (deloma sadovnjaki, deloma travniki, deloma gozd) lahko predpostavimo, da v olistanem delu leta delež prodiranja laserskih točk do tal predstavlja 33 % (Triglav Čekada s sodelavci 2010), zato potrebujemo po enačbi (1) 12 točk/m² za merilo 1 : 5000.

Ker je dinamika premikanja zemeljskih plazov zelo pomembna pri načrtovanju sanacije, moramo za spremljanje velikih zemeljskih plazov uporabiti tudi zelo natančne podatke zračnega laserskega skeniranja, saj nas zanimajo že premiki velikostnega reda nekaj decimetrov v mesecu dni. Zato priporočamo uporabo podatkov zračnega laserskega skeniranja, posnetih z relativno nizkih višin leta, to je 500–700 m nad tlemi, ter z dobro natančnostjo izmere INS-kotov (na primer natančnosti izmere kotov nagiba in naklona $\Delta\phi = \Delta\theta = 0,005^\circ$, in natančnost izmere kota zasuka $\Delta\psi = 0,007^\circ$, ter največji kot skeniranja $\beta_0 = 20^\circ$). Priporočamo tudi navezavo na krajevni koordinatni sistem prek stabilnih kontrolnih točk v okolici zemeljskega plazu, ki se jih da prepoznati v oblaku laserskih točk, oziroma v več zaporednih laserskih snemanjih, s pomočjo katerih bomo ocenili hitrost premikanja zemeljskega plazu. Za spremljanje manjših in srednje velikih zemeljskih plazov, ki jih želimo prikazati v merilih 1 : 1000 ali 1 : 500, predlagamo uporabo terestričnega laserskega skeniranja, saj bomo z njim lažje dosegli večje gostote laserskih točk/m² in večjo absolutno natančnost meritev.

3.2 Skalni podori

Podobno kot pri zemeljskih plazovih lahko podatke zračnega laserskega skeniranja uporabljamo za preučevanje stanja pred sprožitvijo skalnih podorov in po njih. Večje skalne podore lahko preučujemo z laserskimi podatki različnih gostot laserskih točk na enoto površine, uporabni so že podatki z 1–5 točk/m². Kajti večje podore lahko predstavimo tudi na tematskih zemljevidih merila 1 : 5000. Ker v visokogorju ni veliko rastja, ki bi omejevalo delež laserskih točk, ki se odbijejo od tal, lahko uporabimo tudi laserske podatke posnete v olistanem delu leta. Prav tako ne potrebujemo laserskih podatkov, ki bi bili zelo natančni. Zadostujejo že laserski podatki s povprečno položajno natančnostjo 0,5 m in višinsko natančnostjo nekaj decimetrov.

Pri preučevanju manjših skalnih podorov bomo potrebovali laserske podatke z veliko večjo gostoto laserskih točk na enoto površine od neke 12 točk naprej, torej odvisno od prostornine in površine, ki jo je podor zasul. Po enačbi (1) rabimo vsaj 25 točk/m², če želimo izdelati zemljevid skalnega podora v merilu 1 : 1000, za merilo 1 : 500 pa celo 400 točk/m². Za doseglo gostot, primernih za merilo 1 : 500, je bolj smiselno uporabiti podatke terestričnega laserskega skeniranja. Terestrično lasersko skeniranje ima pri snemanju skalnih podorov tudi bistveno prednost pred zračnim laserskim skeniranjem, saj s stranskim pogledom lažje predstavimo navpične in previsne stene ter podrobnosti na njih.

Pri preučevanju manjših skalnih podorov in skalnih odlomov moramo paziti tudi na natančnost podatkov laserskega skeniranja. Za prikaz površin, manjših od 0,5 km², in izračun podornih prostornin moramo dosegati že nekajdecimetrsko položajno in višinsko natančnost meritev. To pa lahko dosežemo le, če uporabimo podatke zračnega laserskega skeniranja, ki so bili posneti z dokaj nizkih višin leta ter z dobro natančnostjo izmere INS-kotov (glej primer pri zemeljskih plazovih).

3.3 Kraški pojavi

Z zračnim laserskim skeniranjem lahko preučujemo površinske kraške oblike. To so večji vhodi v jame in brezna, kraške kotanje (vrtače, udornice) in drugi večji kraški pojavi, na primer kraška polja. Ker je pri nas kraška pokrajina (z izjemo visokogorja) porasla z drevjem ali različnim grmičevjem, je smiselno iskati ali naročiti laserske podatke, ki niso bili posneti v olistanem delu leta.

Da bomo lažje našli vhode v jame ali brezna, potrebujemo laserske podatke z večjo gostoto laserskih točk, torej gostoto med 5 in 12 točk/m². Sama natančnost laserskega skeniranja ni tako pomembna, saj je največ podatkov o jamskih vhidih ponavadi določenih na največ 10 metrov natančno (Čekada 2010). Priporočamo snemanje oziroma preučevanje večjih kraških območij naenkrat, saj je povprečna gostota jam v Sloveniji 0,4 jame/km² (Staut in Čekada 2006).

Kraške kotanje lahko samodejno iščemo v DMV-jih s pomočjo morfoloških značilnosti kotanj (Obu 2011). Vrtiče so praviloma okrogle oblike, a dokaj majhne (širina od nekaj metrov do nekaj sto metrov, globina manjša od širine). Obu (2011) je uspel na osnovi DMV 12,5 m × 12,5 m samodejno identificirati le 5 do 10 % obstoječih vrtič. Večji uspeh je imel z udornicami, ki pa so večjih dimenzij (največje imajo premer tudi do 500 metrov). Ob uporabi podatkov zračnega laserskega skeniranja z večjim številom točk na enoto površine, od 5 do 12 točk/m², bomo dobili boljše rezultate samodejne klasifikacije. Odvisno od tega, kako natančno želimo umestiti robove kraških kotanj v prostor, izbrejemo tudi natančnost laserskega skeniranja. Za osnovne raziskave razporejenosti kraških kotanj zadoščajo že laserski podatki, ki jih lahko uporabimo tudi za iskanje jamskih vhodov (na primer višinska natančnost nekaj decimetrov in položajna natančnost pol metra).

Za preučevanje kraških dolin, ki pa so veliko večjih dimenzij, zadošča že lasersko skeniranje z gostoto od 1 do 5 točk/m².

4 Sklep

Zračno lasersko skeniranje ali LIDAR omogoča hitro, gosto in zelo natančno izmero terenskih točk. Omogoča izmero terenskih točk tudi pod rastjem. Uporabimo ga lahko kot samostojno tehniko zajema podatkov ali v kombinaciji z ostalimi fotogrametričnimi senzorji (od klasičnih do hiperspektralnih). V Sloveniji obstajajo različni podatki zračnega laserskega skeniranja, ki so bili naročeni v okviru javnih naročil, v letih 2011–2012 pa bo izvedeno še vsedrjavno lasersko skeniranje, zato podatki zračnega laserskega skeniranja postajajo čedalje bolj dostopni tudi za različne geomorfološke študije.

V prvem delu članka so opisane osnovne značilnosti zračnega laserskega skeniranja: divergenca laserskega žarka, odbojnost laserskega žarka, gostota laserskih točk na enoto površine in natančnost laserskega skeniranja. Divergenca laserskega žarka opredeljuje, zakaj dobimo odboje tudi izpod rastja. Odbojnost laserskega žarka je smiselno poznati za opredelitev kontrolnih ali veznih točk med laserskimi podatki in drugimi podatki, na primer različne ortofotografije. Gostota laserskih točk na enoto površine (število točk/m²) opredeljuje velikost najmanjšega objekta, ki ga še lahko izmerimo na podlagi laserskih podatkov. Podali smo enačbo za izračun optimalnega števila laserskih točk na kvadratni meter, ki temelji na teoremu vzorčenja. Za izračun optimalnega števila točk/m² moramo vedeti v kakšnem merilu želimo naš geomorfološki pojav predstaviti. Podani sta tudi enačbi za izračun pričakovane povprečne in največje absolutne napake zračnega laserskega skeniranja, ki temeljita na poenostavljenem analitičnem

modelu natančnosti zračnega laserskega skeniranja. Za izračun povprečne in največje napake moramo poznati: višino leta snemalnega sistema, največji kot skeniranja in natančnost meritev INS-kotov (natančnosti izmere nagiba, naklona in zasuka letala med snemanjem).

Drugi del članka je razprava o tem, kakšni laserski podatki bi bili optimalni za spremljanje različnih geomorfoloških pojavov: zemeljskih plazov, skalnih podorov in različnih kraških pojavov. Na osnovi velikosti posameznega geomorfološkega pojava smo opredelili verjetno kartografsko merilo, na katerem lahko ta pojav prikažemo. S pomočjo verjetnega merila smo z enačbo, podano v prvem delu članka, izračunali optimalno število laserskih točk/m². Uporabili smo še enačbo za izračun pričakovane absolutne natančnosti laserskega skeniranja, da smo določili optimalno višino leta snemalnega sistema in želeno natančnost izmere INS-kotov.

Sklenili smo, da za spremljanje velikih zemeljskih plazov potrebujemo laserske podatke z gostoto 5–25 točk/m² in z zelo veliko natančnostjo izmere. Za doseglo zelo velike natančnosti laserske izmere (višinska 0,1 m, položajna do 0,2 m) potrebujemo zelo natančno izmerjene INS-kote (na primer 0,005° za izmero nagiba in naklona ter 0,007° za izmero zasuka) ter največjo še dopustno višino leta snemalnega sistema od 500 m do 700 m.

Zračnega laserskega skeniranja ne priporočamo za spremljanje srednje velikih in majhnih zemeljskih plazov, saj bi potrebovali preveliko število laserskih točk/m². Za slednje priporočamo uporabo terestričnega laserskega skeniranja ali terenske geodetske meritve.

Skalni podori v nasprotju od zemeljskih nastanejo pretežno v visokogorju, kjer ni veliko rastja, ki bi zmanjševala delež laserskih točk, ki prikazujejo tla. Zato za njihovo spremljanje ne potrebujemo tako velike gostote laserskih točk, že gostote 1–5 točk/m² bi zadostovale za preučevanje večjih skalnih podorov. Za preučevanje manjših skalnih podorov pa potrebujemo več kot 12 točk/m². Natančnost laserskega skeniranja mora biti enaka kot za preučevanje zemeljskih plazov.

Za preučevanje razporejenosti jamskih vhodov, brezen, vrtač in udornic potrebujemo laserske podatke z gostoto 5–12 točk/m² in povprečno absolutno natančnostjo laserskega skeniranja (višinska nekaj decimetrov, položajna pol metra).

5 Viri in literatura

- Ackermann, F. 1999: Airborne laser scanning – present status and future expectations. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 2-3. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00009-X
- Barborič, B., Triglav Čekada, M., Berk, S., Kosmatin Fras, M. 2008: Metodologija za izboljšavo in harmonizacijo geodetskih podlag za potrebe čezmejnega prostorskega načrtovanja. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008. Ljubljana.
- Bitenc, M. 2007: Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusidler See. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Smith, B., Treitz, P. 2006: Examining the influence of changing laser pulse repetition frequencies on conifer forest canopy returns. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72-12. Maryland.
- Coren, F., Sterzai, P. 2006: Radiometric correction in laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 27-15. Philadelphia. DOI: 10.1080/01431160500217277
- Čekada, M. 2010: Koliko se izboljšujejo lege jam? Jamar 2. Ljubljana.
- Medmrežje 1: http://geomaticsdatasolutions.com/GeomaticsDataSolutions/Files/Broshydr_AHAB_Hawk-EyeII_090326.pdf (22. 1. 2011).
- Medmrežje 2: <http://www.applanix.com/products/> (22. 1. 2011).
- Medmrežje 3: http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1%5bshow_single%5d=875 (15. 2. 2011).
- Medmrežje 4: <http://www.optech.ca/> (22. 1. 2011).

- Medmrežje 5: <http://www.terrasolid.fi/> (1. 6. 2011).
- Mitshita, E., Cortes, J., Centeno, J. 2011: Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalized lidar control points. *The Photogrammetric Record* 26-133. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00621.x
- Mlekuž, D. 2010: Lidar in georheologija aluvialnih pokrajin. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2009–2010*. Ljubljana
- Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P. 2007: Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. *Gradbeniški vestnik* 56. Ljubljana.
- Janža, M., Komac, M., Kobler, A., Stojanova, D., Oštir, K., Marsetič, A., Džeroski, S., Gosar, A. 2009: Metodologija ocene višine in gostote vegetacijskega pokrova z daljinsko zaznamimi podatki in možnosti njene uporabe v geologiji. *Geološki zbornik* 20. Ljubljana.
- Kobler, A., Zafran, J. 2006: Podatki letalskega lidarskega snemanja in njihova uporaba pri gospodarjenju z gozdom. Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino. *Studia forestalia Slovenica* 127. Ljubljana.
- Kokalj, Ž., Oštir, K., Zakšek, K. 2008: Uporaba laserskega skeniranja za opazovanje preteklih pokrajin – primer okolice Kobarida. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008*. Ljubljana.
- Kolega, N., Žerjal, A., Krapež, B., Slavec, P. 2008: Uporaba lidarskih podatkov za občinsko prostorsko načrtovanje in upravljanje. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008*. Ljubljana.
- Obu, J. 2011: Prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela višin. *Diplomsko delo, Filozofska fakulteta v Ljubljani*. Ljubljana.
- Staut, M., Čekada, M. 2006: Porazdelitev gostote jam v Sloveniji. *Naše jame* 46. Ljubljana.
- Štular, B. 2010: Jožefinski vojaški zemljevid kot vir za preučevanje preteklih pokrajin. *Geografski vestnik* 82-1. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M. 2009: Optimizacija metodologije obdelave in analiza natančnosti letalskega laserskega skeniranja pri zajemu geodetskih podatkov za lokalno prostorsko planiranje. *Doktorska disertacija. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo*. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M. 2010: Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence. *Geodetski vestnik* 54-2. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin Fras, M. 2010: Teoretična gostota lidarskih točk za topografsko kartiranje v največjih merilih. *Geodetski vestnik* 54-3. Ljubljana.
- Vežočnik, R., Gvozdanič, T., Smole, D. 2008: Terestrično lasersko skeniranje in njegova uporaba pri spremljanju plazov. *Razprave petega posvetovanja Slovenskih geotehnikov*. Nova Gorica.
- Wagner, W. 2005: *Physical principles of airborne laser scanning*. Laser Scanning – Data Acquisition and Modeling. Dunaj.
- Wehr, A., Lohn, U. 1999: *Airborne laser scanning – an introduction and overview*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54. Maryland.
- Zorn, M., Komac, B. 2008: Zemeljski plazovi v Sloveniji. *Georitem* 8. Ljubljana.

6 Summary: Possibilities of aerial laser scanning (LIDAR) usage for geomorphologic studies

(translated by the author)

Aerial laser scanning or LIDAR (light detection and ranging) enables quick, dense and very accurate acquisition of terrain points. It enables the acquisition of terrain points even under the vegetation. It can be used as a stand alone acquisition technique or in combination with different photogrammetric sensors (from classical to hyperspectral). Following different public orders of LIDAR data in Slovenia and national-wide laser scanning (due to be performed in 2011–2012) LIDAR data is becoming more accessible also for geomorphologic studies.

Basic characteristics of the LIDAR are first described: divergence of the laser beam, reflectivity, the number of points per unit area and accuracy. Divergence of the laser beam determines why the laser reflections under vegetation are recorded. Reflectivity of the laser beam can be used to define the control points for connecting laser data with additional data, e.g. different kinds of orthophotographs. The number of points per unit area (No. points/m²) defines the size of the smallest object which can still be acquired from the LIDAR point cloud. An equation for the calculation of the optimal number of points per m² is written based on sampling principle. Only two parameters should be known to calculate it: the scale of map on which objects should be presented and the LIDAR penetration rate for the area of interest. A simplified analytical error model for LIDAR is presented and two equations given for the calculation of the expected average and maximum LIDAR errors for the whole LIDAR data set. To calculate the average and maximum LIDAR errors only the following parameters should be known: the LIDAR flying height, the maximum scanning angle and the accuracy of the INS measurements (roll, pitch and heading accuracies).

In the second part of the paper a discussion is given on what kind of LIDAR data would be appropriate for geomorphologic studies of landslides, rockfalls and different karst features. Based on the extent of these geomorphologic features and a probable scale on which such features should be presented, the number of laser points per m² was calculated by using the equation defined in the first section of this paper. The equation for the calculation of the expected accuracy of lidar data is also used, to define the required flying height and INS-angle accuracies of the LIDAR data.

It is concluded that for large landslide monitoring LIDAR data with 5–25 points/m² and very accurate lidar measurements are needed. Very accurate LIDAR measurements (vertical accuracy 1 dm, positional accuracy 2 dm) can be achieved with the use of the most accurate INS angle measurements (e.g. roll and pitch accuracy of 0.005° and heading accuracy of 0.007°) and flying heights between 500 and 700 m.

For medium and small landslide monitoring LIDAR is not recommended as too large numbers of lidar points per unit area are needed. Terrestrial laser scanning or field measurements are more appropriate for such purposes.

For rockfalls smaller number of points per unit area is needed as they mainly happen in high mountains, where the terrain is not obstructed with much vegetation, therefore for large rockfall monitoring even 1–5 points/m² will be sufficient. For smaller rockfall monitoring more than 12 points/m² is recommended. The LIDAR accuracy for rockfalls studies should be as accurate as for landslide monitoring.

For cave and pit entrance search, doline and collapsed doline study 5–12 points/m² will be needed and average LIDAR accuracy (vertical accuracy few dm, positional accuracy half a meter) will already satisfy.

