

ZRAČNO LASERSKO SKENIRANJE IN NEPREMIČNINSKE EVIDENCE

AERIAL LASER SCANNING AND REAL ESTATE DATABASES

Mihaela Triglav Čekada

UDK: 332:347.235:528.8

IZVLEČEK

Zračno lasersko skeniranje, imenovano tudi lidar (light detection and ranging), lahko uporabimo kot samostojno tehniko snemanja ali v kombinaciji z različnimi tipi snemanj (od klasičnih fotogrametričnih snemanj do hiperspektralnih snemanj). Glavna prednost zračnega laserskega skeniranja pred drugimi tehnikami daljinskega zaznavanja je, da detajle na reliefu neposredno izmerimo in jih ne pridobimo z naknadno restitucijo iz stereoparov. V članku bomo prikazali možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja za obnovo podatkov različnih nepremičninskih evidenc v Sloveniji. Možnost uporabe zračnega laserskega skeniranja pri ažuriranju katastra stavb in zemljiškega katastra še ni opredeljena v zakonskih in podzakonskih predpisih, ki te evidence opredeljujejo. Zato bomo v članku opredelili minimalne pogoje, na podlagi katerih se bomo lahko odločili, ali bomo zračno lasersko skeniranje lahko uporabili v praksi: potrebna natančnost, višina leta in gostota laserskih točk na enoto površine.

KLJUČNE BESEDE

zračno lasersko skeniranje, lidar, natančnost, nepremičninske evidence, kataster stavb, zemljiški kataster

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

ABSTRACT

Aerial laser scanning, also called lidar (light detection and ranging), can be used as a stand-alone acquisition technique or in combination with other types of aerial surveys (from classic photogrammetric to hyper-spectral). The basic advantage of lidar in comparison with other remote sensing techniques is that the details on the relief are directly measured rather than acquired with additional stereo-restitution. In this paper, we will describe the possibilities of lidar being involved in data acquisition for different real-estate databases in Slovenia. The possibility of applying lidar to the building cadastre and the land cadastre measurements has not been yet defined in the legislation defining these databases. Therefore, we will define the minimal conditions that will enable us to decide if lidar can be applied for those databases in practice: required accuracy, flying height and number of points per m².

KEY WORDS

aerial laser scanning, lidar, accuracy, real estate databases, building cadastre, land cadastre

1 UVOD

Za zračno lasersko skeniranje se pogosto uporablja termin lidarsko snemanje ali samo lidar (light detection and ranging). Glavna prednost lidarskega snemanja pred drugimi snemalnimi tehnikami je, da omogoča neposredno izmero oddaljenosti med oddajnikom laserskega žarka in detajlom

na fizičnem površju Zemlje, od katerega se laserski žarek odbije. Razdalja med oddajnikom in detajlom na tleh je izmerjena s časom, ki ga laserski žarek porabi za pot od oddajnika do detajla na tleh in nazaj. Ker ima laserski žarek nezanemarljiv premer, se del laserskega žarka odbije od različnih objektov, ki so na njegovi poti med oddajnikom in površjem, od koder se odbije še preostali del laserskega žarka. Dobimo več laserskih odbojev oziroma tako imenovanih lidarskih točk. Tako lidarsko snemanje poleg različnih klasifikacij objektov omogoča tudi analize razporejenosti vegetacije po višinah, kar veliko pove o vegetacijskem oziroma habitatnem tipu ter prirastku vegetacije, če primerjamo več nizov lidarskih podatkov istega območja. Po drugi strani pa lahko tudi neposredno izmerimo višinsko predstavo različnih topografskih (hribi, brežine vodnih teles) in antropogenih objektov (stavbe, ceste) oziroma ugotovljamo njihove spremembe.

Lidarsko snemanje lahko uporabljamo kot samostojno tehniko zajema ali pa v kombinaciji z različnimi srednje- ali visokoločljivimi snemanji. Najbolj pogosto je sinhrono izvajanje lidarskega in klasičnega aerofotografiranja, dodamo pa lahko vse od hiperspektralnih do termičnih kamer. Kombiniranje lidarskega snemanja z ostalimi snemalnimi tehnikami poenostavi identifikacijo objektov v lidarskem oblaku točk ter omogoči izdelavo dodatnih izdelkov, kot so ortofotografije.

Lidarsko snemanje se v tujini uporablja za izmero tras elektrovodov, izdelavo podrobnih 3D-modelov mest, gozdarske, hidrološke in ostale topografske analize (Shan in Toth, 2009). Ob pravilni postavitvi pogojev lidarskega snemanja nam omogoča zajem podatkov, ki so povsem primerljivi s podatki klasične stereorestitucije na podlagi aerofotografij. Tudi v Sloveniji se je lidarsko snemanje uveljavilo predvsem za potrebe podrobnih hidroloških študij (Gosar in sod., 2007), za potrebe gozdarstva (Kobler in Zafran, 2006; Janža in sod., 2009), kot vhodni vir za izdelke prostorskega načrtovanja (Kolega in sod., 2008; Barborič in sod., 2008) in za zgodovinske študije (Kokalj in sod., 2008).

Ker za različne dele Slovenije obstaja že veliko lidarskih podatkov, katerih naročniki so bile javne ustanove (občine, ministrstva, javni zavodi), je smiselno razmisliti tudi o večkratni uporabi že obstoječih lidarskih podatkov. Lahko bi jih uporabili tudi za preverjanje obstoječih državnih evidenc, na primer za preverjanje in ažuriranje nepremičninskih evidenc (Viitanen in sod., 2005). V članku bomo podali osnovne pogoje, ki jih morajo posamezni lidarski podatki izpolnjevati, da jih lahko uporabimo za preverbo nepremičninskih evidenc: katastra stavb in zemljiškega katastra. Ti pogoji so uporabni tudi za novo načrtovanje lidarskega snemanja, saj z njimi lahko še pred snemanjem opredelimo možnost večkratne uporabe nekaterih lidarskih podatkov, kar poveča ekonomičnost snemanja. Sami pogoji so lahko tudi izhodišče za razmislek, da bi možnost lidarskega snemanja uvedli v zakonske in podzakonske akte, ki opredeljujejo načine ažuriranja omenjenih nepremičninskih evidenc.

Za določitev, kakšne lidarske podatke potrebujemo za neki namen, moramo poznati njihovo natančnost in ločljivost. Natančnost lidarskega snemanja je odvisna od natančnosti direktnega georeferenciranja, s katerim izračunamo koordinate posamezne lidarske točke. Natančnost direktnega georeferenciranja je odvisna od natančnosti meritev GNSS, inercialnega navigacijskega sistema (INS) in laserskega sistema. Ločljivost lidarskih podatkov pa je povezana z gostoto laserskih točk na enoto površine.

2 OSNOVNI POGOJI ZA UPORABO LIDARJA PRI AŽURIRANJU SLOVENSКИH NEPREMIČNINSKIH EVIDENC

2.1 Natančnost lidarskih podatkov – poenostavljen analitičen model napak lidarja

Natančnost lidarskega snemanja je odvisna od natančnosti direktnega georeferenciranja, ki temelji na meritvah GNSS in INS ter lidarskih meritvah, izvedenih ob samem snemanju. Pred transformacijo v državni koordinatni sistem lahko lidarsko snemanje doseže planimetrično natančnost nekaj decimetrov in višinsko okoli decimetra, kot je opisal že Maas (2003).

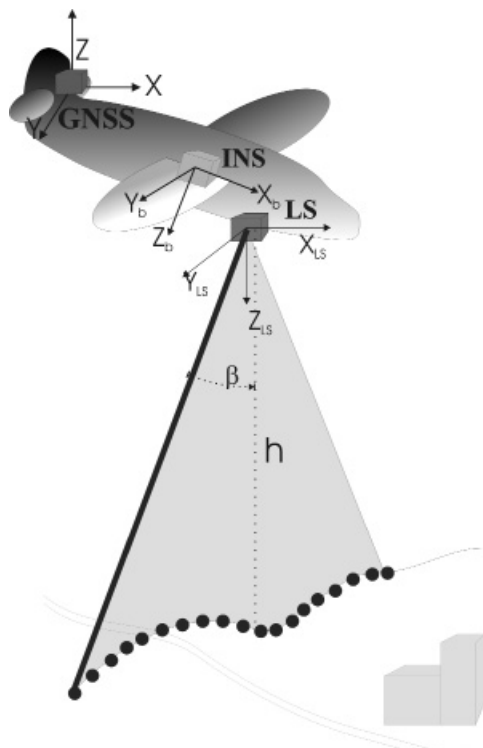
Direktno georeferenciranje je rezultat hkratne obdelave meritev GNSS in INS ter lidarskih meritev takoj po snemanju. Večinoma se uporablja Kalmanov filter za hkratno obdelavo napak lokacije, hitrosti, pospeškov ter različnih parametrov meritev INS in GNSS (Legat in sod., 2006; Ding in sod., 2009). Naročnik dobi lidarske podatke v obliki točk s koordinatami X , Y , Z v določenem koordinatnem sistemu ter za vsako točko podatke o intenziteti odboja. Če predhodno od izvajalcev lidarskih meritev ne zahtevamo ocene natančnosti oblaka lidarskih točk oziroma posameznih koordinat X , Y , Z , jih naknadno tudi ne moremo izračunati, če nismo zahtevali parametrov natančnosti merilnikov INS, GNSS in lidarja. Naknadno oceno natančnosti lidarskih podatkov lahko dobimo le z naknadno izmero terenskih kontrolnih točk oziroma kontrolnih območij, ki jih v oblaku lidarskih točk lahko nedvoumno identificiramo (Ahokas in sod., 2005; Crosilla in sod., 2005; Thoma in sod., 2005). Ker se natančnost lidarskih meritev ter meritev INS in GNSS na krovih nosilcev (letala, helikopterji) z vsako novo generacijo lidarskih sistemov izboljšuje, moramo kot uporabnik lidarskih podatkov poznati nekatere parametre omenjenih merilnikov, da lahko naknadno ocenimo natančnost podatkov. S tem bomo omogočili ponovno uporabo že obstoječih podatkov ter preprečili drage terenske kontrolne meritve za določitev realne natančnosti obstoječih lidarskih podatkov. Če ne poznamo nobenega parametra natančnosti uporabljenih merilnikov INS, GNSS ter lidarskega merilnika, nam preostane samo še ponovna orientacija oblaka točk na podlagi povezave med laserskimi snemalnimi pasovi (Kager, 2004).

Obstoječi rigorozni modeli napak lidarskega snemanja (Schenk, 2001; Friess, 2006; Skaloud in Lichti, 2006), ki podajo natančnost za vsako posamezno lidarsko točko, so prezapleteni za vsakodnevno uporabo pri načrtovanju snemanja, zato smo se odločili izdelati poenostavljen model napak lidarskega snemanja (Triglav Čekada, 2009; Triglav Čekada in sod., 2009). Ta poenostavljeni model napak lahko uporabimo za predhodno oceno natančnosti lidarskega snemanja že pred naročilom podatkov ali z njim podamo oceno natančnosti za že obstoječi niz lidarskih podatkov.

Osnovno geolokacijsko enačbo lidarskega snemanja, skupaj z njenimi sistematičnimi napakami, lahko opišemo z naslednjimi procesnimi sklopi (slika 1):

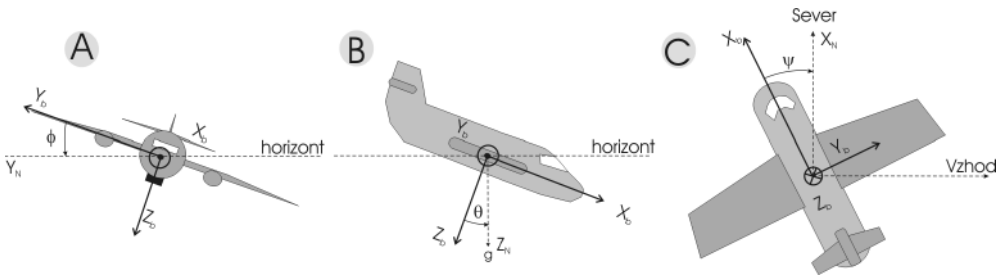
- opredelitev lidarskega snemalnega sistema z njegovimi fizikalnimi lastnostmi (LS),
- postopek transformacije podatkov iz snemalnega sistema v lokalni koordinatni sistem nosilca (INS),
- transformacija podatkov iz lokalnega koordinatnega sistema nosilca v globalni koordinatni sistem (GNSS),

- transformacija iz globalnega v nacionalni koordinatni sistem (na primer transformacija med ETRS89 in državnim ravninskim koordinatnim sistemom D48/GK).



Slika 1: Procesni sklopi izračuna koordinat lidarskih točk. Kot β je kot skeniranja in h višina leta nosilca nad tlemi.

Podroben opis posameznih komponent procesnih sklopov in obnašanje njihovih pričakovanih napak je podano v Triglav Čekada (2009). Na podlagi analize vpliva pričakovanih napak na skupno natančnost lidarskega snemanja smo opredelili analitičen poenostavljen model napak lidarskega snemanja (Triglav Čekada, 2009). Kot podlago za izpeljavo poenostavitve smo vzeli rigorozni Schenkov geolokacijski model napak (Schenk, 2001). Ugotovili smo, da je Schenkov model odvisen predvsem od kota skeniranja β in kotov, izmerjenih z merilnikom INS, ter od višine leta nosilca snemanja h . Koti INS (slika 2) opisujejo prehod iz koordinatnega sistema nosilca (definiran z osjo Z_b , usmerjeno pravokotno na trup nosilca v smeri proti tlom, osjo X_b točno proti nosu nosilca ter osjo Y_b , usmerjeno skozi desno krilo) v navigacijski koordinatni sistem (definiran z osjo Z_N , usmerjeno v smeri navpičnice proti centru geoida, osjo X_N proti severu in osjo Y_N proti vzhodu). Koti nagibov (ang: roll) in naklonov (ang: pitch) so večinoma velikosti do $\pm 10^\circ$, koti zasukov (ang: heading) pa lahko imajo vrednosti med 0° in 360° . Napake izmere kotov INS se glede na natančnost izdelave/ceno merilnika INS gibljejo v vrednostih $0,004^\circ - 0,02^\circ$ za kote nagiba in naklona po že izvedeni skupni kalibraciji merilnikov med letom. Napaka kota zasuka lahko doseže dvakratnik napak kotov nagiba ali naklona (Katzenbeisser, 2003).



Slika 2: Koti INS: A) ϕ – nagib, B) θ – naklon in C) ψ – zasuk.¹

Uporabnik lidarskih podatkov ne razpolaga s koti skeniranja in neposrednimi meritvami kotov INS za vsako posamezno točko, zato smo izpeljali poenostavljen analitični model napak, neodvisen od kota skeniranja in kotov INS. Poenostavljen analitičen model napak temelji na naslednjih poenostavitvah:

- napake, ki vplivajo na izmerjen trenutni kot skeniranja, so majhne: indeksna napaka (odmik ničtega kota skeniranja od ničte lege lidarskega sistema), napaka določitve širine pasu skeniranja, napaki vertikalnega in horizontalnega neujemanja ravnine skeniranja s teoretično ničto ravnino skeniranja,
- izhodišči merilnikov INS in GNSS sta na istem mestu,
- rotacije med fiksiranima merilnikoma INS in GNSS so minimalne, dovoljujemo kote zasukov po vseh treh oseh do največ $0,001^\circ$,
- nosilec snemanja leti večinoma skoraj horizontalno glede na teren, zato dovoljujemo kote nagibov in naklonov do največ $\pm 6^\circ$, za izpeljavo privzamemo povprečno velikost kotov 3° ,
- kot zasuka se med letom spreminja enakomerno med 0° in 360° ,
- razdaljo, izmerjeno z laserskim žarkom, nadomestimo z njenim približkom, to je višino leta h ,
- izhodišče faznega centra merilnika GNSS je kar v središču Zemlje, zato da se lokalni in globalni koordinatni sistem GNSS prekrivata,
- ne obravnavamo transformacije med globalnim koordinatnim sistemom GNSS in državnim ravninskim koordinatnim sistemom.

Najprej smo zapisali povprečno vrednost osnovne sistematične napake lidarskega snemanja za različne kote skeniranja kot integral po kotu zasukov 0° – 360° za vsako koordinatno komponento vektorja napak posebej (ΔX , ΔY , ΔZ). Povprečno vrednost osnovne sistematične napake neodvisno od kota skeniranja Δx_{s_povp} izračunamo kot dvojni integral po kotu zasuka 0° – 360° in kotu skeniranja, od najmanjše do največje dovoljene vrednosti kota skeniranja. Ker najdemo največje skupne napake lidarskega snemanja na robovih snemalnega pasu, večinoma dovoljujemo največje kote skeniranja do $\pm 20^\circ$. Pričakovano dobimo enaki absolutni vrednosti napak po ΔX in ΔY , zato bomo zapisali matriko povprečnih vrednosti sistematičnih napak samo za eno horizontalno komponento ΔX :

¹ Slovenska poimenovanja kotov INS so povzeta po Oštir, K. (2006): str. 74, slika 10.1.

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

Numerične komponente v enačbi (1) so pridobljene na podlagi vrednosti, ki opisujejo tipični lidarski sistem, ter povezavami med različnimi procesnimi sklopi. Za povprečne vrednosti napak moramo poznati samo največji dovoljeni kot skeniranja, višino leta h ter napake kotov INS, saj za vrednosti nagiba ϕ in naklona θ vzamemo privzeto povprečno velikost obeh kotov 3° . Da dobimo skupno povprečno vrednost napake laserskega skeniranja, moramo k $\Delta \mathbf{x}_{s_povp}$ prišteti še vektor napake faznega centra merilnika GNSS na nosilcu, ki znaša v idealnih primerih med 0,05 m in 0,10 m ter napako zaradi različne višine vegetacije, ki pa predvsem vpliva na višinsko komponento skupne povprečne napake in je odvisna od višine vegetacije na obravnavanem območju.

Poleg povprečne napake nas zanimajo tudi največje možne napake, ki se pojavijo v lidarskem nizu podatkov, saj opredeljujejo mejno natančnost naših podatkov. Največje napake so pri največjih kotih skeniranja, vendar so odvisne od tudi od kota zasuka, ki pa ni fiksen. Z analizo korelacije med največjimi napakami in povprečnimi napakami, neodvisnimi od kota skeniranja, smo ugotovili, da lahko izračunamo linearno regresijo med največjo in povprečno napako. Med sabo smo povezali naslednje parametre: povprečno napako, neodvisno od kota skeniranja $\Delta \mathbf{x}_{s_povp}$, največjo napako $\Delta \mathbf{x}_{s_max}$, napako izmere kota zasuka $\Delta \psi$, napako izmere kota nagiba in naklona $\Delta \phi$ ($\Delta \phi = \Delta \theta$) ter višino leta h . S t-Studentovo testno statistiko in ob stopnji značilnosti testa $\alpha=95\%$ smo izločili parametre z neznačilnim vplivom. Končna linearna povezava med $\Delta \mathbf{x}_{s_povp}$ in $\Delta \mathbf{x}_{s_max}$ je:

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

Da dobimo skupno največjo napako lidarskega snemanja, moramo k $\Delta \mathbf{x}_{s_max}$ prav tako prišteti še vektor napake faznega centra merilnika GNSS na nosilcu in napako zaradi različne višine vegetacije.

V tabeli 1 smo povzeli lastnosti tipičnih trenutno obstoječih merilnikov INS in lidarskih sistemov ter za nekaj primerov izračunali vrednosti povprečnih in največjih napak (vrednosti za izračun numeričnih komponent so podane v Triglav Čekada (2009)). Pri uporabi merilnikov INS slabše

natančnosti ($\Delta\phi = \Delta\theta = 0,02^\circ$ in $\Delta\psi = 0,04^\circ$), ob nepopolni odstranitvi sistematičnih napak v procesu obdelave podatkov pri izvajalcu, hitro presežemo prej omenjene Maasove (2003) pričakovane napake lidarskega snemanja nekaj decimetrov po planimetričnih komponentah in decimeter po višini. Prav tako tu nismo upoštevali dodatnih odstopanj, ki jih pridobimo v rangu vsaj decimetra zaradi transformacije podatkov v veljavni državni koordinatni sistem D48/GK. Zato je ob naročilu lidarskega snemanja smiselno postaviti bolj stroge pogoje glede natančnosti meritev INS in višine leta nosilca nad tlemi, če potrebujemo kot končni rezultat zelo natančne podatke.

$\Delta\phi=\Delta\theta$	$\Delta\psi$ [°]	h [m]	Povprečna napaka [m]				Največja napaka [m]			
			$ \Delta X $	$ \Delta Z $	$ \Delta X $	$ \Delta Z $	$ \Delta X $	$ \Delta Z $	$ \Delta X $	$ \Delta Z $
			s_povp	s_pov	končna	končna	s_max	s_max	končna	končna
0,005	0,007	1000	0,08	0	0,15	0,05	0,28	0,10	0,35	0,15
0,005	0,007	800	0,06	0	0,13	0,05	0,23	0,07	0,30	0,14
0,005	0,007	600	0,05	0	0,12	0,05	0,17	0,06	0,21	0,13
0,020	0,040	1000	0,34	0	0,41	0,05	0,73	0,23	0,80	0,28
0,020	0,040	800	0,26	0	0,31	0,05	0,58	0,19	0,65	0,26

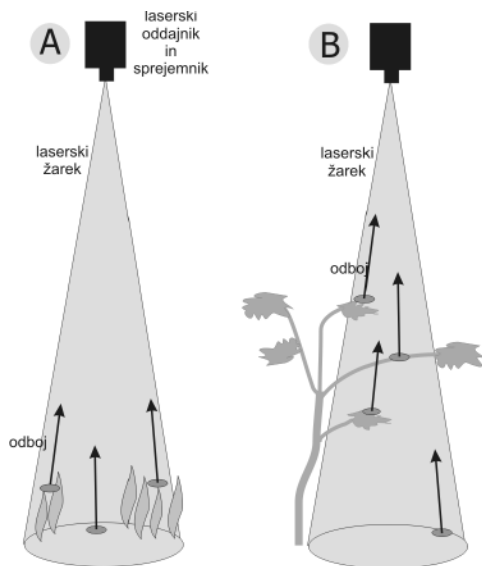
Preglednica 1: Absolutne vrednosti napak lidarskega snemanja po obeh planimetričnih komponentah ($|\Delta X| = |\Delta Y|$) in višini ($|\Delta Z|$) za povprečne (s_povp) in največje (s_max) sistematične napake ter skupne končne napake obeh primerov (končna). Za vse izračune smo vzeli povprečno velikost kotov $\phi = \theta = 3^\circ$ ter za največje napake največji kot skeniranja $\beta = 20^\circ$.

2.2 Gostota lidarskih točk na enoto površine

Poznavanje pozicijske natančnosti lidarskih točk ni zadosten pogoj za odločitev, ali bodo ti podatki primerni za naše potrebe. Poznati moramo tudi ločljivost lidarskega niza podatkov, tega pa lahko opredelimo na podlagi gostote lidarskih točk na enoto površine (število točk na m^2). Gostota lidarskih točk opredeljuje možnost izrednotenja oblike objekta, natančnost določitve oblike objekta ter možnost ločitve dveh objektov med seboj.

Gostota lidarskih točk na enoto površine je opredeljena kot povprečna vrednost gostote za eno delovišče, saj zaradi različnega števila redov odbojev enega laserskega žarka (na stavbi dobimo en laserski odboj, na vegetaciji več), različnih stopenj prekrivanja lidarskih snemalnih pasov ter slabše odbojnosti laserskega žarka od nekaterih objektov (neodbojnost od vodnih teles) ne moremo doseči enotne gostote za celotno delovišče. Koliko odbojev enega laserskega žarka se bo vrnilo k sprejemniku, je odvisno od višinske razporejenosti drobnih odbojnikov (npr. listov ali vej) in divergence laserskega žarka, ki skupaj z višino leta nosilca poda premer laserskega žarka na tleh (slika 3). Pri nizkih višinah leta (500 m) in novejših laserskih sistemih z majhno divergenco laserskega žarka lahko znaša premer laserskega žarka na tleh že pod 0,2 m. Prav tako nam gostota lidarskih točk na enoto površine še ne pove deleža točk, ki je prodrli do tal oziroma objektov, če so ti zakriti z različnimi tipi vegetacije. Odstotek laserskih odbojev, ki so

prodrli do posameznega višinskega razreda (na primer tal), je opredeljen z deležem prodiranja laserskih točk. Delež prodiranja je odvisen od vrste vegetacije in njene gostote ter letnega časa, v katerem snemamo (predvsem za listnate in mešane gozdove). Če želimo preučevati topografske in antropogene elemente pod gozdom, je vsekakor priporočljiva uporaba vsaj med 8 in 10 točk/m², saj bomo le tako lahko zagotovili dovolj točk, ki bodo prodrle do tal (Chasmer in sod., 2006). Generalno pa je smiselno delovišče razdeliti na območja, pokrita z istim tipom vegetacije, in za vsak takšen tip oceniti delež prodiranja laserskih točk že vnaprej, da bomo zagotovili zadostno število točk, ki pridejo do tal (Triglav Čekada, 2009).



Slika 3: Shematski prikaz različnega števila odbojev enega laserskega žarka za: A) travo, B) grmičevje.

V splošnem lahko delimo gostoto lidarskih točk na enoto površine glede na želen namen uporabe:

- do 5 točk/m² - majhna gostota lidarskih točk: omogoča izdelavo splošnih DMR-jev za celotno državo in je primerljiva z DMR-ji, ki jih pridobimo na podlagi stereorestitucije letalskih posnetkov CAS,
- 5-10 točk/m² - srednja gostota lidarskih točk: omogoča izdelavo bolj podrobnih DMR-jev, recimo za namene študije poplavnih območij,
- 10 in več točk/m² - visoka gostota lidarskih točk: omogoča izdelavo najbolj podrobnih DMR-jev, recimo za izdelavo podrobnih 3D-modelov mest, prikaz podatkov za topografske karte merila 1 : 10 000 ali 1 : 5000, izdelava podrobnih hidroloških študij poplavnosti.

V Sloveniji je bila v zadnjih nekaj letih največja gostota lidarskih točk 30 točk/m² naročena v okviru javnih naročil občin za potrebe hidroloških študij in prostorskega načrtovanja. Take podatke bi z lahkoto uporabili tudi za ažuriranje nepremičninskih evidenc.

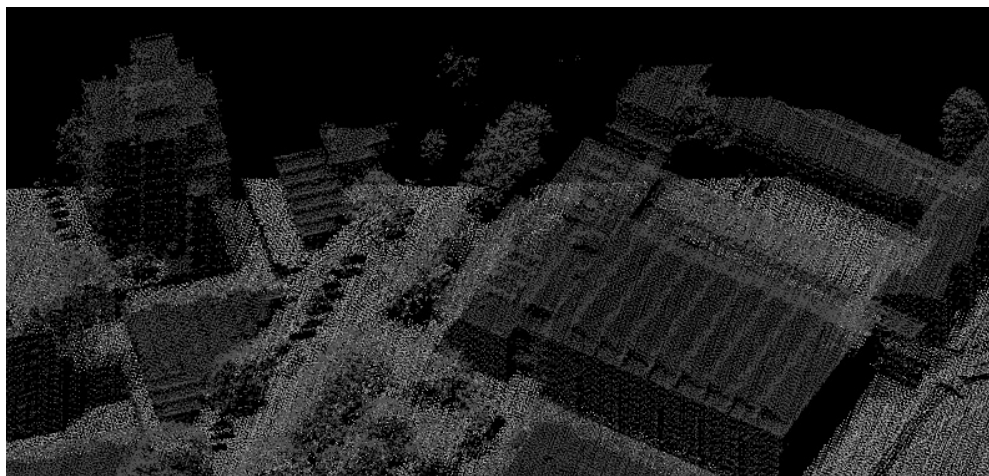
2.3 Zahteve nepremičninskih evidenc

Med zbirke prostorskih podatkov, ki opisujejo nepremičnine, lahko po Zakonu o evidentiranju nepremičnin (ZEN, Ur. l. RS, št. 47/2006) štejemo: zemljiški kataster, kataster stavb, register nepremičnin, evidenco državne meje in register prostorskih enot. Med vsemi temi zbirkami pa le zemljiški kataster, kataster stavb in evidenca državne meje vsebujejo izvirne podatke o fizičnih objektih v prostoru, ki se jih da meriti tudi z lidarjem. V prvem primeru so to zemljiškokatastrske točke, ki opredeljujejo mejo parcele, v drugem podatki o legi in obliki stavbe, v tretjem pa podatki o legi državnih mejnikov. Register nepremičnin položajne podatke o parcelah in stavbah privzema iz omenjenih evidenc in ne vsebuje svojih podatkov o fizičnih objektih v prostoru, enako velja za register prostorskih enot. Lega mejnikov državne meje se lahko spremeni le v okviru meddržavnih pogodb, zato možnosti njihove izmere z lidarjem ne bomo obravnavali.

V zemljiškem katastru se vodijo podatki o zemljiških parcelah (legi, obliki, površini), ki so definirane na podlagi zemljiškokatastrskih točk, označenih v naravi z mejniki. Mejniki imajo lahko različne oblike in dimenzije: kvadrat, velik $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$; krog s premerom od 2 cm do 10 cm ; križ, vklesan v naravni kamen ali grajeni objekt in velik $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, ter druge nazorne označbe, ki nedvoumno označujejo položaj zemljiškokatastrskih točk na terenu. Sama natančnost koordinat zemljiškokatastrskih točk je opredeljena kot daljša polos standardne elipse zaupanja in mora biti boljša ali enaka 4 cm ob izmeri, izvedeni na terenu. Če so koordinate zemljiškokatastrskih točk pridobljene iz ortofotografij, mora biti natančnost enaka enemu metru ali boljša. V zemljiškem katastru se vodi tudi podatek o metodi določitve koordinat zemljiškokatastrskih točk (Pravilnik o urejanju mej ter spreminjanju in evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru, Ur. l. RS, št. 8/2007). Ob uporabi lidarskih meritev za kontrolo katastra bi morali poskrbeti, da bodo zemljiškokatastrske točke vidne v oblaku točk. Glede na dimenzijo mejnika priporočamo visoko gostoto lidarskih točk ($15\text{--}30\text{ točk/m}^2$), nizek let nosilca snemanja nad tlemi ($500\text{--}600\text{ m}$) in zelo natančen merilnik INS, da bomo dosegli visoko natančnost lidarskih meritev (glej vrstico 3 v tabeli 1). Ker velik del Slovenije prekriva gozd, svetujemo še označbo mejnikov s tarčami, ki predstavljajo dobre odbojnik v valovni dolžini laserskega žarka (topografski lidarski sistemi večinoma uporabljajo valovni dolžini 1064 nm ali 1535 nm), saj bi se tako precej izognili izgubi manjših mejnikov, zakritih z vegetacijo. Prav tako bi snemanje morali izvesti v nezalistanem delu leta. Pred uvedbo lidarja v izmero zemljiškokatastrskih točk bi bilo smiselno izvesti še pilotno lidarsko snemanje, s katerim bi določili delež odkritih mejnikov v lidarskih podatkih.

V katastru stavb so podatki o stavbah in njihovih delih. Stavba mora biti opisana z lego, obliko in površino. Lega stavbe je določena s koordinatami točk tlorisa, njena oblika pa opredeljena z višino stavbe in številom etaž. Za stavbo se vpišejo še nadmorske višine najnižje točke stavbe (višina tlaka v prvi etaži), najvišje točke stavbe (najvišja višina strehe ali drugega zidanega dela stavbe) ter karakteristična višina stavbe (višina terena ob vhodu v stavbo). Izdelati je treba še tloris stavbe in navpično projekcijo zunanjih obrisov stavbe. Tloris mora biti izdelan v merilu od $1 : 200$ do $1 : 1000$ glede na preglednost vsebine na načrtu (Pravilnik o vpisih v kataster stavb, Ur. l. RS, št. 22/2007). Sam način izmere ali njena natančnost nista predpisana. Glede na zgodovino nastanka katastra stavb prek množičnega fotogrametričnega zajema na podlagi

stereoparov cikličnega aerosnemanja Slovenije še iz analognih posnetkov merila 1 : 17500 pa lahko trdimo, da je natančnost stereorestitucije reda velikosti 0,5 m. Torej ima večina stavb v katastru stavb, ki niso bile vpisane naknadno kot novogradnje, takšno natančnost izmere. Glede na zapisano bi lidarske meritve lahko uporabili za kontrolo katastra stavb (slika 4). Uporabili bi lahko že majhno do srednjo gostoto točk ter povprečno natančnost lidarskih meritev, ki jo dobimo s precej visokimi leti (800–1000 m) in povprečno natančnimi merilniki INS (natančnost izmere nagiba in naklona $0,02^\circ$, natančnost izmere zasuka $0,04^\circ$). Za novo izmero novogradenj večjih dimenzij pa priporočamo lidarsko snemanje visoke gostote točk (več kot 10 točk/m^2). Za izmero posameznih novogradenj manjših dimenzij, kjer izvedba lidarskega snemanja postane neekonomična, predlagamo uporabo terestričnega laserskega skeniranja.



Slika 4: Stranski pogled na različne večstanovanjske stavbe v lidarskem oblaku točk, gostota 20 točk/m^2

3 MOGOČE STRATEGIJE UPORABE LIDARJA ZA KATASTER STAVB IN ZEMLJIŠKI KATASTER

Veliko držav ali regij, ki so primerljive velikosti s Slovenijo, že ima vsedrjavni DMR, izdelan na podlagi lidarskega snemanja, zato menimo, da bo tudi Slovenija v ne tako daljni prihodnosti ena izmed njih. Tako obstajajo vsedrjavna in regijska lidarska snemanja za celotno Nizozemsko (Artuso in sod., 2003; Ahokas in sod., 2005), za nižinski del Švice (Artuso in sod., 2003; Luethy in Stengele, 2005), za provinco Bolzano v Italiji (Wack in Stelzl, 2005) in različne dežele Nemčije (Ahokas in sod., 2005). Obstoječa snemanja celih držav in regij so narejena z majhno gostoto lidarskih točk na enoto površine do nekje 1 točka/m^2 . Takšen lidarski niz podatkov bi zadostoval za iskanje sprememb v katastru stavb, torej identifikacijo nevpisanih novogradenj ali črnih gradenj. V zemljiškem katastru pa si z njim ne bi mogli pomagati. Ker v Sloveniji že imamo redna ciklična aerosnemanja Slovenije (CAS), je smiselno razmisliti o kombinaciji lidarja in fotogrametričnega snemanja v enem od naslednjih ciklov CAS. Kombinacija ortofotografij in lidarja bi še poenostavila identifikacijo novogradenj, pri čemer bi iz lidarskega oblaka točk lahko samodejno privzemali karakteristične višine novogradenj za kataster stavb. Poudariti pa

moramo, da bi bila uporaba vsedravnega lidarja za ažuriranje oziroma kontrolo katastra stavb samo eden izmed rezultatov vsedravnega lidarskega snemanja. Vsestravno lidarsko snemanje z majhno do srednjo gostoto lidarskih točk na enoto površine bi omogočilo tudi:

- izdelavo bolj gostega in natančnega DMR-ja Slovenije za različne potrebe (na primer vizualizacije, karte hrupa in drugo),
- gozdarske in kmetijske študije pokrovnosti z različnimi tipi vegetacije,
- generalne poplavne študije in
- iskanje sprememb v prostoru (ceste, stavbe in drugo).

Druga možnost pa je, da se uporabijo različna že obstoječa lidarska snemanja ali nova snemanja z visoko gostoto lidarskih točk na enoto površine (15–30 točk/m²). Pri novem naročilu naj se strmi k temu, da se podatke prav tako lahko uporabi za več namenov:

- izdelava geodetskih načrtov za potrebe prostorskega načrtovanja (merila 1 : 5000–1 : 1000),
- izdelava podrobnih poplavnih študij,
- izdelava študij ogroženosti z zemeljskimi plazovi,
- preverba katastra stavb in zemljiškega katastra,
- študije za potrebe gozdarstva in kmetijstva,
- drugo (podrobni 3D-modeli, karte hrupa ...).

Za hkratno uporabo lidarskih podatkov za več namenov se moramo predvsem izogibati naročilom lidarja za ozke koridorje (samo poplavni pas okoli rek, samo območje velikosti nekaj km² za potrebe študij ogroženosti z zemeljskimi plazovi). Ker v Sloveniji izvajamo CAS v enotah listov temeljnih topografskih načrtov 1 : 5000 ter se za potrebe prikaza stanja prostora uporablja merilo vsaj 1 : 5000 ali več (Pravilnik o prikazu stanja prostora, Ur. l. RS, št. 50/2008), bi to merilo predlagali tudi za najmanjšo enoto naročila lidarskega snemanja. Za več namenov lahko uporabimo surove lidarske podatke (*X*, *Y*, *Z* in atributi) ali že izvedene podrobne DMR-je, na katerih so prikazane tudi entitete, ki nas zanimajo (npr. stavbe za kataster stavb). Zato bi naročnike lidarskega snemanja vzpodbudili, da ob naročilu novega snemanja poleg izvedenih DMR-jev za posamezno potrebo (npr. poplavna študija) zahtevajo tudi surove lidarske podatke, saj si lahko na njihovi podlagi kasneje pripravimo kakršenkoli DMR ali drug izhodni podatek (npr. podrobni prečni prerezi), torej omogočimo raznovrstne sekundarne uporabe lidarskih podatkov. Seveda ne smemo zanemariti, da lahko naknadno preverimo natančnost lidarskih podatkov, le če so tisti, ki jih imamo, surovi.

Žal naročilo za namen kontrole zemljiškega katastra zahteva dodatna terenska dela – signalizacijo zemljiškokatastrskih točk –, kar lahko precej podraži lidarsko snemanje. Zato bi bilo smiselno pred uvedbo možnosti uporabe lidarskega snemanja za kontrolo zemljiškega katastra izvesti analizo smotrnosti in ekonomičnosti uporabe lidarja v ta namen. Po drugi strani pa za kataster stavb ne potrebujemo nobenih dodatnih zahtev in tako lahko uporabimo lidarske podatke, ki so bili naročeni za druge namene. Uporabimo lahko že sekundarne podatke, kot so izvedeni podrobni DMR-ji, če prikazujejo tudi stavbe.

4 SKLEP

Lidarsko snemanje omogoča zelo natančen zajem višinskih podatkov, če pogoje snemanja pravilno opredelimo še pred samim snemanjem. Zato lahko to tehniko uporabimo za kontrolo ali nov zajem podatkov v nepremičninskih evidencah. Obravnavali smo kataster stavb in zemljiški kataster, saj zbirki vsebujeta podatke o fizičnih entitetah v prostoru, ki jih lahko prepoznamo v oblaku lidarskih točk: stavbe in zemljiškokatastrske točke.

Najprej smo opisali analitičen poenostavljen model napak lidarskega snemanja, ki poda najbolj pomembne parametre za opredelitev natančnosti lidarskega snemanja: višina leta, natančnost izmere kotov INS, velikost vektorja napake faznega centra merilnika GNSS in največji dovoljeni kot skeniranja. S temi parametri lahko vnaprej izračunamo pričakovano srednjo ali največjo sistematično napako lidarskega snemanja. Poleg srednje in največje pričakovane napake lidarskega snemanja moramo pred uporabo opredeliti še gostoto lidarskih točk na enoto površine (število točk/m²). Ta parameter opredeljuje možnost izvedenja podrobne oblike objekta, natančnost same določitve te oblike ter možnost ločitve dveh objektov med seboj.

Za kontrolo položajnih podatkov katastra stavb bi zadoščali že povprečni lidarski podatki z majhno do srednjo gostoto lidarskih točk (1–10 točk/m²), visokimi višinami leta (800–1000 m) in uporabo srednje natančnih merilnikov INS (natančnost kotov INS: nagib in naklon 0,02°, zasuk 0,04°). Take podatke bi lahko pridobili v okviru vsedravnega lidarskega snemanja ali pa bi uporabili že obstoječe lidarske podatke, ki so bili naročeni za druge namene.

Kontrola podatkov zemljiškega katastra, torej položajev zemljiškokatastrskih točk, pa ne bi bila mogoča brez posebnih lidarskih snemanj, ki bi bila izvedena prav za ta namen. Zemljiškokatastrske točke so označene z mejniki, ki so razmeroma majhni in jih je treba tudi zelo natančno izmeriti. Predlagamo lidarsko snemanje z visoko gostoto lidarskih točk (15–30 točk/m²), z zelo nizkimi višinami leta (500–600 m) ter zelo natančnimi merilniki INS (natančnost kotov INS: nagib in naklon 0,005°, zasuk 0,007°). Zaradi boljšega razpoznavanja mejnikov pod vegetacijo predlagamo tudi njihovo označbo s tarčami, ki so dobri odbojniki v valovni dolžini laserskega žarka, saj bomo le tako v oblaku točk našli dovolj mejnikov. Zaradi boljšega prodiranja lidarskih točk skozi vegetacijo je smiselno snemanje izvesti v nezalistanem delu leta.

Obstoječe lidarske podatke in načrtovana snemanja lahko ob poznavanju zgornjih parametrov izkoristimo tudi za kontrolo katastra stavb. Ob večkratni uporabi obstoječih lidarskih podatkov izboljšamo smotrnost naročila takšnih podatkov, zato smo podali tudi nekaj nasvetov, na kaj moramo biti pozorni ob naročilu lidarskega snemanja: vedno moramo od izvajalca zahtevati osnovne parametre snemanja (opis merilnih sistemov in njihove natančnosti, višina leta, povprečna gostota lidarskih točk), izogniti se moramo naročilom ozkih koridorjev, poleg izvedenih podatkov (različni DMR-ji) moramo zahtevati tudi surove lidarske podatke (v obliki X, Y, Z in atributi, po možnosti še pred transformacijo v državni ravninski koordinatni sistem D48/GK).

Vsekakor bi bila smiselna izvedba vsedravnega lidarskega snemanja, ki bi kot enega od rezultatov omogočila tudi kontrolo podatkov katastra stavb.

Literatura in viri:

- Ahokas, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hyypä, J., Kaasalainen, S., Matikainen, L., Honkavaara, E., Hyypä, H., Rönholm, P., Soininen, A. (2005). *Quality of laser scanning*. EARSeL Workshop '3-D Remote Sensing', 10.–11. junij 2005, Porto, Portugalska (na CD).
- Ahokas, E., Yu, X., Oksanen, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., Hyypä, H., (2005). *Optimization of the scanning angle for contrywide laser scanning*. ISPRS WG III/3, V/3 Workshop 'Laser scanning 2005', Enschede, Nizozemska: 12.–14. september 2005, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/115.pdf> (18. 4. 2010)
- Artuso, R., Bovet, S., Streilein, A. (2003). *Practical methods for the verification of contrywide terrain and surface models*. ISPRS, 24 (3/WG13) Workshop '3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSar data', Dresden, Nemčija: 8.–10. oktober 2003.
- Barborič, B., Triglav Čekada, M., Berk, S., Kosmatin Fras, M. (2008). *Metodologija za izboljšavo in harmonizacijo geodetskih podlag za potrebe čezmejnega prostorskega načrtovanja, GIS v Sloveniji 2007–2008*, 273–286.
- 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), 1359–1367.
- Crosilla, F., Beinat, A., Visintini, D., Fico, B., Sossai, E. (2005). *Likelihood and Accuracy Analysis of 3D Building Models from Airborne Laser Data, Proceedings of Italy-Canada 2005 Workshop on '3D Digital Imaging & Modeling: Application of heritage, industry, medicine & land'*, 17.–18. maj, 2005, Padova, Italija (na CD).
- Ding, W. D., Wang, J. L., Li, Y., Mumford, P., Rizos, C. (2008). *Time synchronisation error and calibration in integrated GPS/INS systems*. *Journal of ETRI (Electronics & Telecommunications Research Institute, Korea)*, 30 (1), 59–67. www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/ding_et al2006d.pdf (20. 1. 2009).
- Friess, P. (2006). *Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping*. *Proceedings of International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006*, Španija: 25.–27. januar 2006, Castelldefels.
- Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P. (2007). *Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov*. *Gradbeniški vestnik*, 56, 115–123.
- 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*. 19. posvetovanje slovenskih geologov, Ljubljana, marec 2009. *Razprave, poročila (Geološki zbornik, 20)*, 58–61.
- Kager, H. (2004). *Discrepancies between overlapping laser scanner strips – simultaneous fitting of aerial laser scanner strips*. *ISPRS*, 35–(B1), 555–560.
- Katzenbeisser, R. (2003). *About the calibration of lidar sensors*. *ISPRS*, 34 (3/W13) Workshop '3-D Reconstruction from airborne laser-scanner and InSAR data', Nemčija: Dresden, 8.–10. oktober 2003, 59–64.
- Kobler, A., Zafran, J. (2006). *Podatki letalskega lidarskega snemanja in njihova uporaba pri gospodarjenju z gozdom*. V: Hladnik, David (ur.). *Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino (Studia forestalia Slovenica, 127)*. Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 83–96.
- Kokalj, Ž., Oštir, K., Zakšek, K. (2008). *Uporaba laserskega skeniranja za opazovanje preteklih pokrajin – primer okolice Kobarida*, *GIS v Sloveniji 2007–2008*, 321–329.
- Kolega, N., Žerjal, A., Krapež, B., Slavec, P. (2008). *Uporaba lidarskih podatkov za občinsko prostorsko načrtovanje in upravljanje, GIS v Sloveniji 2007–2008*, 267–271.
- Legat, K., Skaloud, J., Schaer, P. (2006). *Real-time processing of GPS/INS data for on-the-fly quality control in airborne mobile mapping*, *ENC-GNSS 2006*, Velika Britanija: 7.–10. maj 2006, Manchester.
- Luethy, J., Stengele, R. (2005). *3D mapping of Switzerland – challenges and experiences*. *ISPRS WG III/3, V/3 Workshop 'Laser scanning 2005'*, Nizozemska: 12.–14. september 2005, Enschede.
- Maas, H.-G. (2003). *Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance*. *Proceedings 49 Photogrammetric Week*, Wichmann Verlag, Nemčija.
- Oštir, K. (2006). *Daljinsko zaznavanje*. Založba ZRC, Ljubljana.
- Schenk, T. (2001). *Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners*. *Technical Notes in Photogrammetry No 19*, Columbus, The Ohio State University, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science.
- Shan, J., Toth, C. K. (2009). *Topographic laser ranging and scanning*. Taylor & Francis Group.

Skaloud, J., Lichti, D. (2006). Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61, 47–59.

Thoma, D. P., Gupta, S. C., Bauer, M. E., Kirchoff, C. E. (2005). Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sensing of Environment*, 95, 493–501.

Triglav-Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin-Fras, M. (2009). A simplified analytical model for a-priori lidar point-positioning error estimation and a review of lidar error sources. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75 (12), 1425–1439.

Triglav-Čekada, M. (2009). Optimizacija metodologije obdelave in analiza natančnosti letalskega laserskega skeniranja pri zajemu geodetskih podatkov za lokalno prostorsko planiranje. *Doktorska disertacija*, Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Viitanen, K., Hyypä, H., Hyypä, J., Rönholm, P. (2005). The use of laser scanning data in real estate analyses. *FIG Commission 9, CIREA in HKIS simpozij 'Property Valuers Fronting the Triple Bottom Lines of Economic, Environment and Social Conflicts'*, Kitajska: Xian 16.–20. oktober 2005.

Wack, R., Stelzl, H. (2005). Laser DTM generation for South-Tyrol and 3D-visualisation. *ISPRS, WG III/3, V/3 Workshop 'Laser scanning 2005'*, Nizozemska: 12.–14. september, 2005, Enschede.

Zakonu o evidentiranju nepremičnin (ZEN). *Uradni list RS*, 9. 5. 2006, št. 47/2006, 5029–5056.

Pravilnik o urejanju mej ter spreminjanju in evidentiranju podatkov v zemljiškem katastru. *Uradni list RS*, 29. 1. 2007, št. 8/2007, 719–725.

Pravilnik o vpisih v kataster stavb. *Uradni list RS*, 12. 3. 2007, št. 22/2007, 2707–2723.

Pravilnik o prikazu stanja prostora. *Uradni list RS*, 22. 5. 2008, št. 50/2008, 5406–5407.

Prispelo v objavo: 19. 4. 2010

Sprejet: 7. junija 2010

dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: mihaela.triglav@gis.si