

ANALIZA SAMODEJNE METODE ZA GENERIRANJE DIGITALNIH MODELOV RELIEFA IZ PODATKOV LIDAR NA OBMOČJU SLOVENIJE

THE ANALYSIS OF AN AUTOMATIC METHOD FOR DIGITAL TERRAIN MODEL GENERATION FROM LIDAR DATA ON SLOVENIAN TEST CASES

Domen Mongus, Mihaela Triglav Čekada, Borut Žalik

UDK: 528.8(497.4)

IZVLEČEK

V članku analiziramo metodo izgradnje digitalnega modela reliefa iz podatkov lidar na testnih primerih z območja Slovenije. Ker obe metodi temeljita na konceptih matematične morfologije, podrobneje predstavimo eno, medtem ko uvodoma podamo splošen pregled del na obravnavanem območju. Rezultati pokažejo, da se z obema metodama pravilno določi teren v več kot 90 odstotkih, in sta zato obe primerni za uporabo tudi na geografsko tako razgibanem območju, kot je Slovenija. Čeprav je na ravninskih območjih njuna natančnost primerljiva, opisana metoda omogoča natančnejšo izgradnjo digitalnega modela reliefa predvsem na zahtevnejših, goratih območjih z relativno strmimi in spremenljivimi nakloni ter na območjih s terasami. Tudi v teh primerih povprečna absolutna višinska napaka ni večja od 15 centimetrov.

KLJUČNE BESEDE

lasersko skeniranje, lidar, digitalni model reliefa, daljinsko zaznavanje

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

ABSTRACT

This paper reviews two methods for digital terrain model generation from LiDAR data in test cases in Slovenia; both methods are based on concepts of mathematical morphology. A general overview of methods is given in the introduction, one of which is presented in more detail. The results show that both methods are able to correctly extract terrain points in more than 90% of the cases and are, therefore, suitable for usage even for such geographically diverse regions as Slovenia. Although the accuracy of both methods is comparable in cases of flat areas, the described method performs significantly better in problematic cases, such as hilly areas with relatively steep variable slopes, and terrains containing terraces. Even in these cases, the average absolute height error is not higher than 15 cm.

KEY WORDS

laser scanning, lidar, digital terrain model, remote sensing

1 UVOD

Sodobna metoda aerolaserskega skeniranja (angl. airborne laser scanning, ALS) s tehnologijo lidar (angl. light detection and ranging) je s svojo hitrostjo zajema, natančnostjo in visoko ločljivostjo prinesla pravo revolucijo na področje topografskih opazovanj. Eden izmed najpomembnejših končnih izdelkov takšnega snemanja je digitalni model reliefa (DMR) visoke ločljivosti, ki tudi po natančnosti prekaša fotogrametrično izdelani DMR (Podobnikar, 2008). V okviru le deloma izvedenega projekta Lasersko skeniranje in aerofotografiranje Slovenije (LSA) v letu 2011/2012 je bil kot rezultat opredeljen DMR z velikostjo celice 1 m × 1 m in višinsko natančnostjo 15 centimetrov (Triglav Čekada in drugi, 2012). DMR, izdelan iz podatkov lidar, se ravno zaradi večje natančnosti ter ločljivosti tudi pri nas vse pogosteje uporablja za podrobne poplavne, geomorfološke in arheološke študije (Triglav Čekada, 2011), za prostorsko načrtovanje

(Kolega in drugi, 2008) ter za študije prostorske infrastrukture in upravičenosti naložb (Lukač in drugi, 2013).

Podatki lidar poleg točk terena vsebujejo tudi druge objekte na zemeljskem površju (na primer stavbe, vegetacijo, elektrovođe). Natančnost izdelanega DMR je tako odvisna od podrobnosti in natančnosti zajetih oblakov točk (število točk na enoto površine, višinska natančnost) ter metode njihovega filtriranja. Filtriranje podatkov lidar je tako ključni korak pri izdelavi DMR (Kobler in drugi, 2007; Liu, 2008; Podobnikar in Vrečko, 2012) in je predmet intenzivnega raziskovanja že od samega začetka razvoja tehnologije (Sithole in Vosselman, 2004). Poznane pristope izgradnje DMR in z njim povezanega filtriranja podatkov lidar v literaturi delimo na metode, ki temeljijo na oceni naklona (angl. slope-based), linearnem napovedovanju (angl. linear prediction-based) in matematični morfologiji (Sithole in Vosselman, 2004; Liu, 2008; Mongus in Žalik, 2012).

Metode filtriranja, ki temeljijo na **oceni naklona med sosednjimi točkami** (Vosselman, 2000; Sithole, 2001; Shan in Sampath, 2005; Wang in Tseng, 2010), izhajajo iz predpostavke, da naklon dejanskega terena ni nad določeno vrednostjo praga in se zaradi tega občutno razlikuje od naklona, ki ga s svojo okolico sestavljajo objekti (na primer drevesa ali hiše). Pragovno funkcijo tu določimo v obliki stožca, podanega s polmerom osnovnega kroga (okolice) in višino (oziroma naklonom). Vrh stožca nato prestavimo v dano točko in preverimo, ali je katera izmed sosednjih točk pod njim. Če pod stožcem ni točk, dano točko označimo kot del terena, sicer pa kot del objekta, in jo zato izločimo. Učinkovitost takšnega pristopa je odvisna predvsem od pravilno nastavljenih začetnih parametrov, to je naklona in velikosti okna, s katerim operira pragovna funkcija, te parametre pa določi uporabnik (Sithole in Vosselman, 2004). Ker je pragovna funkcija določena enolično za celoten nabor podatkov lidar, ta pristop ni primeren za razgibana območja z občutno spremenljivimi nakloni pobočij.

Nadgradnjo metode so predlagali Sithole (2001) ter Wang in Tseng (2010). Prvi podrobneje opisuje različne postopke predobdelave podatkov lidar, s katerimi lahko ocenimo lokalne naklone ter na tej podlagi izpeljemo prilagoditve pragovne funkcije in njenih parametrov. Drugi pa s prilagodljivim usmerjenim filtrom odpravlja težave, povezane s simetrično definicijo stožca, ki ne omogoča ohranitve razgibanih značilnosti terena. Vseeno pa te metode pogosto sprejmejo med točke terena še nekatere točke nizke vegetacije (Liu, 2008). V nedavno predstavljeni študiji Werbroucka in drugi (2011) je zato predlagano uporabniško nadzorovano pragovno filtriranje naklonov z vizualno interpretacijo podatkov.

Napovedovalne metode filtriranja uporabljajo grobo aproksimirano površje za napovedovanje položaja točk terena (Kraus in Pfeifer, 1998; Pfeifer in drugi, 1999; Lee in Younan, 2003; Brovelli in drugi, 2004). Takšno površje zgradimo z uteženo linearno aproksimativno funkcijo, s katero določimo približen izračun poteka reliefa po metodi najmanjših kvadratov. Vsaka točka lidar pomeni kontrolno točko aproksimativne funkcije, s spreminjanjem njenih uteži pa metoda doseže približevanje aproksimiranega površja dejanskemu terenu. Takšno približevanje doseže z več iteracijami, pri čemer v vsaki iteraciji ponovno ovrednoti uteži glede na višinsko odstopanje točk od aproksimiranega površja. Točkam nad površjem utežno vrednost zmanjša, saj te najverjetneje pripadajo objektom, medtem ko utežne vrednosti točk pod aproksimiranim površjem poveča. Točke, ki so dovolj visoko nad površjem, izloči.

Kraus in Pfeifer (1998) sta ugotovila, da se optimalna vrednost praga za izločanje točk spreminja glede na število iteracij, zato predlagata uporabniško nastavljen vektor vrednosti praga. V poznejšem delu pa Pfeifer in drugi (1999) podrobneje analizirajo številne različice utežnih funkcij. Lee in Younan (2003) sta pokazala, da predlagani pristop ni primeren za pobočja s spremenljivim naklonom (še zlasti, če so strma), in kot rešitev predlagata prilagodljivo filtriranje normaliziranih višinskih razlik. Čeprav učinkovitost metode v najzahtevnejših primerih tako občutno izboljšata, takšen pristop zahteva številne uporabniško nastavljive parametre (na primer parameter prilagoditve, faktor zakasnitve in stopnjo filtriranja). Vsekakor pa se lahko z aproksimativno funkcijo terenu zgolj grobo približamo. S temi metodami zato ni mogoče učinkovito ohraniti razgibanih značilnosti terena, kot so ostri robovi (rob ceste), in iz terenskih točk izločiti majhnih objektov (Sithole in Vosselman, 2004; Liu, 2008).

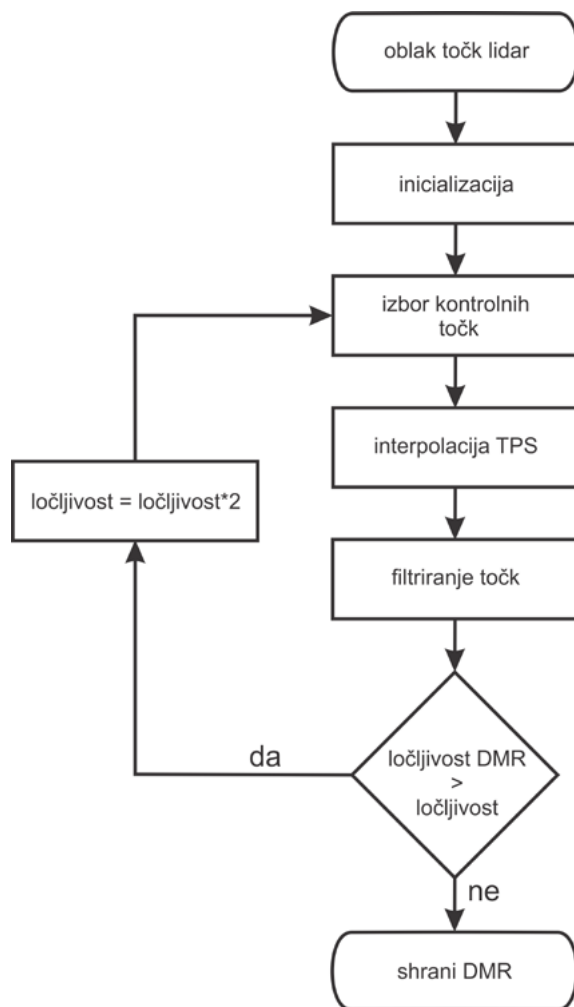
Ravno nasprotno pa so metode filtriranja, ki temeljijo na konceptih matematične morfologije, razmeroma učinkovite na strmih pobočjih, pri čemer je mogoče odstraniti majhne objekte ter ohraniti podrobnosti terena (Qi in drugi, 2007). Pred uporabo morfoloških operaterjev podatke lidar najprej razdelimo v mrežo enako velikih celic. Višino posamezne celice lahko interpretiramo kot sivino, kar nam omogoči uporabo morfoloških operaterjev, ki so bili razviti za razpoznavo vzorcev v 2D-rastrskih slikah (Shih, 2009). Pri teh postopkih se večinoma uporablja sivinsko morfološko odpiranje, ki omogoča izravnavo izstopajočih značilnosti z njihovo okolico. Dejansko velikost izločenih objektov (in ohranjenih detajlov terena) določa velikost preiskovalnega okna (Chen in drugi, 2007). Odpiranje z majhnim preiskovalnim oknom izloči majhne objekte in ohranja podrobnosti terena, vendar ne odstrani velikih objektov (na primer hiš). Uporaba večjega preiskovalnega okna pa povzroči izravnavo podrobnosti terena (vrhov gora, previsov in skal). Uspešnost morfoloških metod je tako odvisna predvsem od ustrezne definicije velikosti preiskovalnega okna.

Prvo metodo filtriranja podatkov lidar na podlagi matematične morfologije so predlagali Kilian in drugi (1996), pri čemer pa so morfološko odpiranje uporabili zgolj za določanje utežnih vrednosti kontrolnih točk aproksimativne funkcije. Napredujoči (angl. progressive) postopek filtriranja s postopnim povečevanjem preiskovalnega okna so predlagali Zhang in drugi (2003). Metoda pri vsakem filtriranju izloča točke glede na višinsko razliko med trenutnim in prejšnjim položajem točk. Dejansko izloči le točke, katerih višinske razlike so nad vrednostjo praga. Optimalna vrednost praga je odvisna od naklona terena (Zhang in Whitman, 2005), za katerega pa metoda predvideva, da je konstanten skozi celoten nabor točk. Čeprav so Chen in drugi (2007) prilagodili metodo za terene s spremenljivim naklonom, je uspešnost obeh metod odvisna predvsem od vhodnih parametrov, ki jih nastavi uporabnik in s katerimi v postopek vključimo dodatno znanje o obravnavanem geografskem območju. Podobno metodo je uporabil Li (2011), ki je dodal uporabniško nastavljive vrednosti pragu za odstranjevanje zaznanih robov. Nasprotno pa sta Mongus in Žalik (2012) predstavila brezparametrično metodo izgradnje DMR iz podatkov lidar, ki ne zahteva dodatnega uporabnikovega znanja o obravnavanem območju. Takšna metoda prinaša številne prednosti, saj odpravlja uporabnikov vpliv na izvajanje in učinkovitost. Pred njeno vpeljavo v prakso pa moramo rezultate temeljito preučiti na različnih podatkih lidar. Slovenija s svojo topografsko raznolikostjo je pri tem gotovo idealen testni primer.

V članku bomo analizirali brezparametrično metodo izdelave DMR iz podatkov lidar, predstavljeno v Mongus in Žalik (2012), ter ocenili njeno uporabnost za izdelavo DMR Slovenije.

2 SAMODEJNO FILTRIRANJE PODATKOV LIDAR

V tem poglavju opisujemo metodo samodejne izgradnje DMR iz podatkov lidar, predlagano v Mongus in Žalik (2012) ter Mongus (2012), ki temelji na iterativnem približevanju aproksimiranega površja dejanskemu terenu. Sestavljajo jo naslednji koraki (glej sliko 1):



Slika 1: Diagram poteka brezparametrične metode gradnje DMR iz podatkov lidar z iterativnim filtriranjem točk na podlagi postopnega povečevanja ločljivosti mreže in zmanjševanja preiskovalnega okna

- **Inicializacija**, pri kateri metoda razdeli točke lidar v mrežo enako velikih celic. Velikost celice določi glede na gostoto vhodnega oblaka točk, njeno višino pa določa najnižja vsebovana točka. To točko v naslednjih korakih obravnava kot kontrolno točko interpolacijske funkcije za izgradnjo DMR.

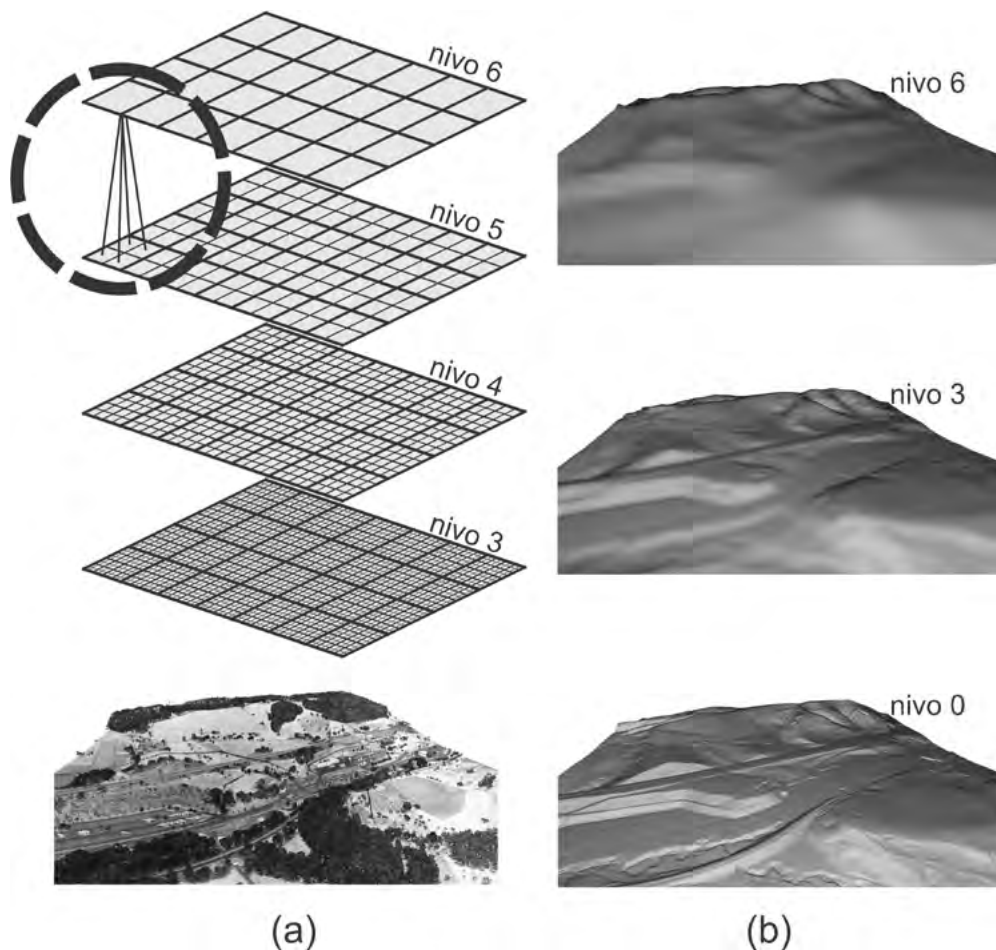
- **Izbor kontrolnih točk** je korak, v katerem se v metodi kontrolne točke razporedijo v hierarhično piramidno strukturo od spodaj navzgor (angl. bottom-up approach) s podvzorčenjem (angl. downsampling) osnovne mreže. Na vsakem nivoju združi v eno celico štiri sosednje celice nižjega nivoja ter tako postopno znižuje ločljivost mreže za faktor dva na vsakem nivoju.
- **Interpolacija zlepkov tankih plošč** (Lloyd, 2010) (angl. thin plate spline, TPS) se v metodi uporabi najprej za izgradnjo DMR nad kontrolnimi točkami vrhnjega nivoja piramidne strukture ter iterativno povečuje ločljivost DMR na vsaki izmed nižjih nivojev hierarhije od njenega vrha proti dnu (angl. top-down approach).
- **Filtriranje točk** izvede v vsaki iteraciji s primerjavo višinskih razlik med točkami z nižjega nivoja piramidne strukture ter trenutnim približkom DMR (ustvarjenim v prejšnjem koraku z interpolacijo TPS).
- **Povečevanje ločljivosti** je zadnji korak, pri katerem metoda vključi filtrirane točke v interpolacijo TPS in se tako po piramidni strukturi prestavi na nižji nivo.

2.1 Inicializacija

Nabori podatkov lidar običajno vsebujejo več deset milijonov točk, zato v postopku inicializacije vhodni oblak točk najprej podvzorčimo v mrežo celic iste velikosti. Ločljivost mreže lahko določi uporabnik glede na želeno ločljivost izhodnega DMR, sicer pa je ta samodejno določena z gosto vhodnih podatkov lidar. Podvzorčenje izvede tako, da izmed več mogočih točk v posamezni celici kot kontrolno točko interpolacije TPS izbere najnižjo izmed njih (množica kontrolnih točk je zato manjša od števila točk lidar), saj ta najverjetneje opisuje teren. Izjeme tega pravila so izstopajoče nizke točke, ki se v naboru podatkov lidar pojavijo zaradi napačno izmerjene razdalje med objektom in merilnikom (Sithole in Vosselman, 2004). Nizke točke se pogosteje pojavijo globoko pod terenom predvsem v urbanih predelih, kjer obstaja večja verjetnost za večkratni odboj laserkega impulza (laserski impulz se lahko najprej odbije od zgradbe in šele nato od tal, preden se vrne do sprejemnika laserskega žarka). Zaradi tega je čas potovanja laserskega impulza daljši, posledica česar je napačno izmerjena točka pod terenom. Ker lahko te tako imenovane nizke točke vodijo do zavrnitev dejanskega terena v njihovi okolici, jih je treba zaznati in izločiti, preden pričnemo izgradnjo DMR. Ker so te napake v primerjavi s pravilno zajetimi točkami razmeroma redke, jih lahko predhodno učinkovito odstranimo s tako imenovanim izmeničnim filtrom (Chang in drugi, 1997).

2.2 Izbor kontrolnih točk

Ker podatki lidar vsebujejo različno velike objekte, je treba filtriranje izvajati z različno velikimi preiskovalnimi okni. Metoda to doseže tako, da nad osnovno mrežo kontrolnih točk zgradi hierarhično piramidno strukturo, pri čemer vsak nivo hierarhije predstavlja osnovno mrežo z nižjo ločljivostjo. Najnižji nivo hierarhije je osnovna mreža, vsak nivo nad njo pa metoda ustvari s podvzorčenjem prejšnjega nivoja. V vsakem koraku se ločljivost nivoja zmanjša za faktor dve v vsako od dimenzij. Vsaka celica (oziroma njej pripadajoča kontrolna točka TPS) je zato povezana s štirimi celicami z nižjega nivoja (glej sliko 2a), njena višina pa je določena z najnižjo izmed njih. Konstrukcija hierarhične piramidne strukture se zaključi, ko velikost celice preraste velikost celotnega nabora podatkov lidar.



Slika 2: Postopno približevanje interpolacije TPS (a) hierarhično-piramidna struktura in (b) dobljeni rezultati prek različnih nivojev

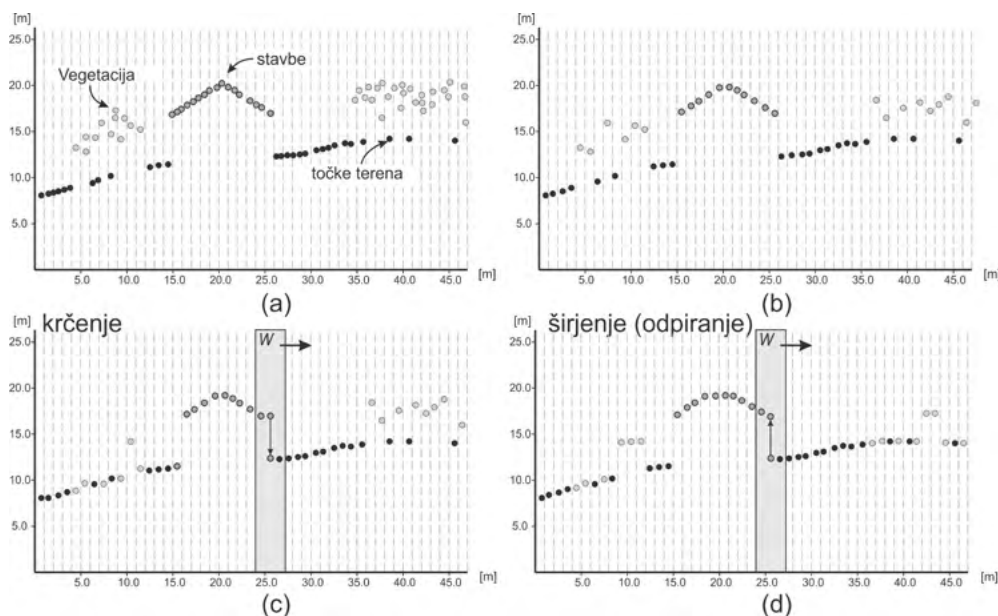
2.3 Interpolacija zlepkov tankih plošč

Z interpolacijo aproksimiranega površja metoda zmanjša vpliv naklona terena na natančnost filtriranja podatkov lidar. Uporabljena interpolacijska funkcija mora zato natančno posnemati geomorfološke značilnosti terena tudi, kadar uporabljamo zelo grobo ločljivost kontrolnih točk. Ker teren obravnavamo kot gladko površje (Haugerud in Harding, 2001), uporaba linearnih interpolacijskih metod (na primer bilinearna metoda ali metoda najbližjega sosesa) ni priporočljiva. Upoštevati moramo tudi, da med procesom gradnje hierarhične strukture podatke podvzorčimo z izborom najnižjih točk v dani okolici. Zaradi tega je pomembno, da je z interpolacijsko funkcijo mogoče predvideti lokalne ekstreme zunaj kontrolnih točk (oziroma med njimi). V predlagani metodi se zato izognemo uporabi interpolacijskih metod, na primer metodi uteženih razdalj (angl. inverse distance weighting), ki ne morejo izpolniti tega merila (Lloyd, 2010). Izognemo se tudi uporabi polinomske interpolacije, saj te metode pogosto

povzročijo neželene oscilacije. Predstavljena metoda zato temelji na interpolaciji zlepkov tankih plošč (angl. thin plate spline, TPS), ki ustvari gladko ploskev brez oscilacij z lokalnimi ekstremi zunaj kontrolnih točk. Postopek iterativnega približevanja interpolacije TPS dejanskemu terenu je prikazan na sliki 2.

2.4 Filtriranje točk lidar

Filtriranje točk poteka iterativno na vsakem nivoju hierarhije kontrolnih točk od njenega vrha proti dnu s primerjavo višinskih razlik med točkami in aproksimiranim površjem, pridobljenim z interpolacijo TPS. Višji nivo hierarhije tako predstavlja DMR nižje ločljivosti. Metoda lahko zato izvede filtriranje na vsakem nivoju hierarhije z enako velikim filtrom, saj se spreminja velikost celic. Pri samem filtriranju dejansko višino točk nadomesti njihova višinska razlika do aproksimativne funkcije. Primerjavo višinskih razlik med sosednjimi točkami izvede s cilindrično transformacijo, ki temelji na morfološkem odpiranju (Shih, 2009). Morfološko odpiranje je postopek, ki izravna visoke izstopajoče predele tako, da vsaki točki določi novo višino, ki je v prvem koraku enaka najnižji točki, v drugem koraku pa najvišji točki iz njene okolice (glej sliko 3). Cilindrično transformacijo izvedemo tako, da rezultat odpiranja odštejemo od vhoda. Brezparametrično izgradnjo DMR metoda doseže na podlagi statističnega zakona, ki pravi, da je več kot 99 % normalno porazdeljenih vrednosti znotraj treh standardnih odklonov od povprečja (Mann, 2010). Za višinske razlike med sosednjimi točkami lahko namreč privzamemo, da sledijo naravni porazdelitvi, ko opisujejo teren (Mongus in Žalik, 2012). Na mestu izločene točke metoda vstavi novo točko z interpolirano višino.



Slika 3: Morfološko odpiranje, pri katerem (a) vhodni oblak točk lidar podvzorčimo v (b) mrežo ter vsaki točki mreže najprej (c) določimo višino najnižje točke iz njene okolice (kar imenujemo tudi morfološko krčenje), nato pa (d) najvišje točke iz njene okolice (kar imenujemo tudi morfološko širjenje). Okolica je pri tem določena z velikostjo preiskovalnega okna W .

3 TESTNI NABORI PODATKOV

Metodo smo preizkusili na podatkih lidar, zajetih v Sloveniji. S strmimi gorami, sredogorji in ravninami je Slovenija izvrsten primer geomorfološke raznolikosti. V testu smo se omejili predvsem na sredogorje in ravnine, saj se tu pokažejo glavne težave izločevanja objektov nad različno strnim terenom, kamor sodijo gosta vegetacija in različni tipi antropogenih vplivov na okolje (različne pozidave, ceste, mostovi itd.). Teste smo izvedli na primerih podatkov lidar iz preglednice 1.

Testni primer	Opis testnih primerov				
	tip terena	značilnosti	gostota [točk/m ²]	povprečni naklon	standardni odklon
Maribor	ravninski	stavbe in majhni objekti	6,4	2,4°	5,4°
Mura	ravninski	gosta vegetacija in vodna območja	10,9	6,1°	5,2°
Šentilj	gričevnat	majhni objekti, nasipi in terase	10,9	10,6°	8,0°
Korte	gričevnat	terase in nizka vegetacija	16,7	12,2°	8,8°
Zagorje ob Savi	sredogorje	strma pobočja in gosta vegetacija	10,2	22,9°	9,8°
Zidani most	sredogorje	strma pobočja, mostovi in stavbe	6,7	16,3°	12,8°

Preglednica 1: Opis testnih primerov podatkov lidar

Dodatne informacije o testnih območjih so predstavljene na sliki 4.



Slika 4: Položaj testnih območij v Sloveniji ter informacije o njihovi velikosti in nadmorski višini

4 REZULTATI

Slike, predstavljene v tem delu, so bile izdelane z orodjem LiDAR Live (Mongus in drugi, 2009), ki je dosegljivo na spletni strani Laboratorija za geometrijsko modeliranje in algoritme multimedije (<http://gemma.uni-mb.si/lidarlive/>). Izgrajeni DMR imajo velikost celice med $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ in $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$, določeno s povprečno razdaljo med točkami v testnem primeru podatkov lidar. Rezultati so predstavljeni v preglednici 2, pri čemer napaka *tipa I* pomeni odstotek zavrnjenih točk terena in opisuje merilo popolnosti razpoznave terena, medtem ko napaka *tipa II* opisuje odstotek sprejetih nadterenskih točk v DMR in opisuje merilo natančnosti razpoznave terena. Skupna napaka je določena kot vsota obeh napak, in sicer: napaka tipa I $\times$ odstotek točk terena + napaka tipa II $\times$ odstotek nadterenskih točk. Pravilnost rezultatov smo ocenili glede na referenčne (angl. ground truth) podatke, ki so bili najprej filtrirani s komercialnim orodjem *Terasolid TerraScan®* in nato ročno popravljeni v podjetju *Geoin d.o.o.*

Analiza rezultatov je usmerjena na predstavljeno samodejno metodo. Primerjamo jo z metodo Chena in drugih (2007), ki velja za eno najučinkovitejših morfoloških metod (Liu, 2008). Velikost preiskovalnega okna in pragovne vrednosti smo heuristično določili za vsak testni primer posebej. Preiskovalno okno je bilo določeno glede na največji vsebovan objekt, pragovne vrednosti pa glede na povprečen naklon, pri čemer smo upoštevali tudi standardni odklon. Preglednica 2 prikazuje rezultate predstavljene in sorodne metode. Primerjava rezultatov kaže primernost predstavljene metode za izdelavo DMR na območju Slovenije, saj povprečna skupna napaka ne prerase 4 %, medtem ko je povprečna skupna napaka pri sorodni metodi nekoliko večja, to je 4,5 %. Predstavljena metoda ustvari nekoliko večjo napako tipa I kot napako tipa II. V praksi to pomeni, da se z metodo redkeje izločijo točke terena, vendar so zaradi tega v DMR pogostejše vključene nadterenske točke. Poleg težave z odstranjevanjem velikih objektov, ki smo jo že navedli pri predstavitvi metode, v nadaljevanju opozorimo še na nekatere značilnosti terena, ki lahko privedejo do napak pri samodejni izdelavi DMR s primerjanima metodama.

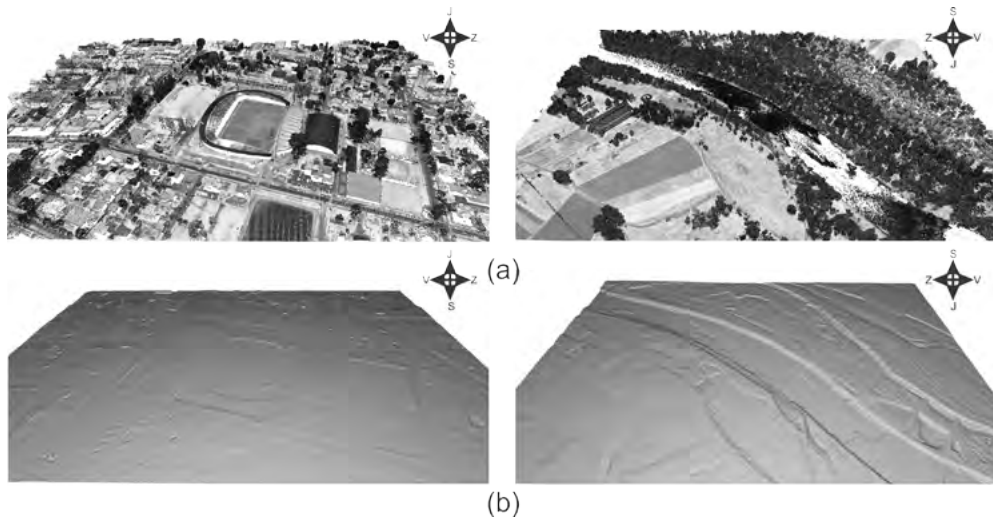
Nabor podatkov	Napaka					
	tip I		tip II		skupaj	
	Mongus in Žalik (2012)	Chen in drugi (2007)	Mongus in Žalik (2012)	Chen in drugi (2007)	Mongus in Žalik (2012)	Chen in drugi (2007)
Maribor	2,49	1,64	4,86	6,38	3,20	3,16
Mura	0,75	1,50	3,22	3,03	2,82	2,91
Šentilj	2,65	3,25	4,22	4,52	3,64	3,57
Korte	3,11	4,86	4,47	2,72	3,69	4,12
Zagorje ob Savi	3,89	8,67	6,91	3,01	4,35	6,24
Zidani most	3,54	7,19	6,01	5,11	4,43	6,58
Povprečje	2,74	4,52	4,95	4,13	3,69	4,48

Preglednica 2: Primerjava natančnosti predstavljene metode Mongus in Žalik (2012) ter metode Chena in drugih (2007) pri izgradnji DMR iz podatkov lidar na primerih iz Slovenije. Delež napake je naveden v odstotkih.

V preglednici 2 lahko združimo nekatere testne primere glede na končno velikost skupne napake. Tako lahko skupaj obravnavamo Maribor in Muro, ki imata najmanjšo skupno napako, Šentilj in Korte, ki imata srednjo skupno napako, ter Zagorje ob Savi in Zidani most, ki imata največjo skupno napako. Maribor in Mura sta različna primera nižin, Zagorje ob Savi in Zidani most sta primera strmejših sredogorij, Šentilj in Korte pa sta primer terena, ki je med tema ekstremoma.

4.1 Testna primera Maribor in Mura

Čeprav se testna primera Maribor in Mura na prvi pogled razlikujeta, sta oba ravninsko območje in zato spadata med najpreprostejše primere za izgradnjo DMR. Natančnost rezultata je zato obakrat nad povprečjem. V primeru Maribora je vseeno mogoče opaziti nekoliko večjo napako tipa I, in sicer zaradi nekaterih nezveznosti na terenu. V primeru Mure pa je nekoliko povečana napaka tipa II, in sicer zaradi močvirnatega terena, kjer je gostota točk nekoliko nižja (sistemi lidar ne omogočajo zajema točk z območij, pokritih z vodo). Čeprav avtorja metode (Mongus in Žalik, 2012) poudarjata možnost neuspešnega odstranjevanja velikih objektov, tega na testnem primeru Maribor nismo opazili. Zaradi ravninskega terena je bilo z metodo mogoče izločiti vse objekte. Kljub temu pa je treba opozoriti, da metoda lahko ohrani v DMR velike objekte, če so ti le delno vsebovani ali pa so v neposredni bližini strmih pobočij. Nasprotno pa sorodna metoda v primeru Maribora ni popolnoma odstranila velikih objektov (napaka tipa II je zato večja od predstavljene metode). Čeprav je bilo v primeru Mure s sorodno metodo odstranjenih več nadterenskih točk, je bilo zaradi tega odstranjenih tudi več terenskih točk, in je skupna napaka večja. Vseeno pa lahko v splošnem trdimo, da sta v tovrstnih primerih uspešni obe metodi. Slika 4 prikazuje DMR obeh testnih primerov.

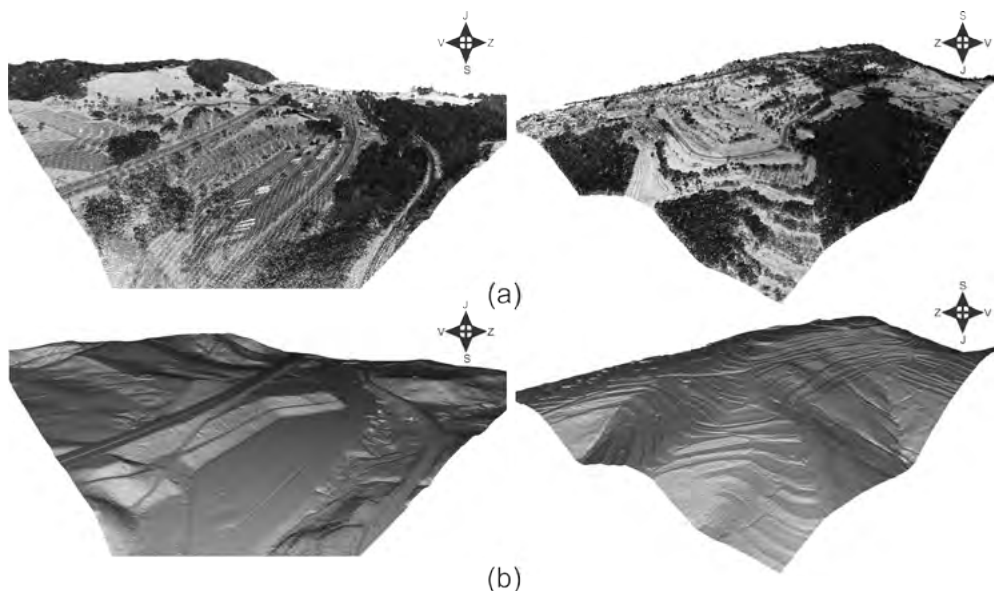


Slika 5: Oblaka točk lidar testnih primerov Maribor (levo) in Mura (desno) (a) ter izhodni DMR (b)

4.2 Testna primera Šentilj in Korte

Natančnost metode je v obeh testnih primerih podobna, saj oba terena vsebujeta relativno podobne značilnosti, čeprav je Šentilj na severovzhodu Slovenije, medtem ko je testni primer

Korte posnet na jugozahodu. Oba primera prikazujeta delovanje metode na relativno raznolikem terenu, kjer so vključena tako ravninska območja, terase, blaga pobočja ter strm teren, poraščen z nizko vegetacijo. Testni primer Šentilj vsebuje še majhne objekte (avtomobile). Prav tu lahko opazimo manjšo napako, saj z metodo ni bilo mogoče odstraniti sicer kratkega, a širokega železniškega mostu. Oba testna primera sicer dokazujeta, da metoda nima težav z odstranjevanjem vegetacije, saj lahko v primeru Šentilja opazimo rečno strugo, skrito pod gosto vegetacijo, v primeru Korte pa vidimo struge hudournikov. Oba primera sta prikazana na sliki 5. Sorodna metoda v teh primerih ustvari večjo napako tipa I, ki je posledica odstranjenih ostrih robov teras.



Slika 6: Oblaka točk testnih primerov Šentilj (levo) in Korte (desno) (a) ter izhodni DMR (b)

4.3 Testni primer Zagorje ob Savi



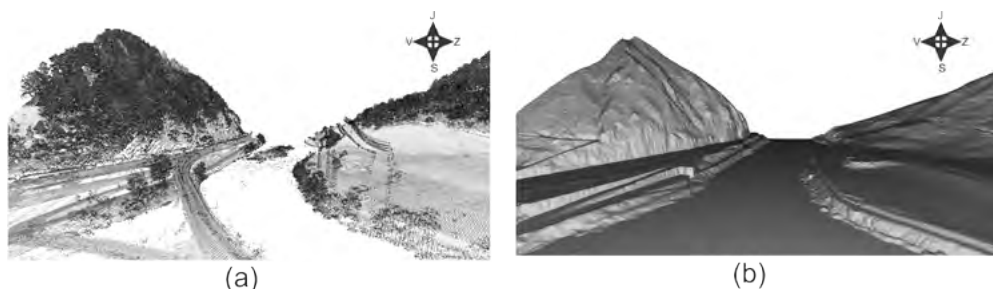
Slika 7: Oblak točk lidar testnega primera hriba iz okolice Zagorja ob Savi (a) ter izhodni DMR (b)

Testni primer Zagorje ob Savi je tipičen primer slovenskega sredogorja. Vsebuje ostre grebene ter strma in blaga pobočja. Opazimo lahko, da je z metodo mogoče izluščiti gozdne poti in ceste tudi, ko so prekrte z vegetacijo in stojijo na razmeroma strmih pobočjih. Vseeno pa v preglednici

I vidimo, da metoda v tem primeru ustvari relativno visoko napako tipa I. Ta napaka je posledica zavrnitve terena na nekaterih ostrih grebenih, ki jih, zaradi uporabe interpolacije TPS, metoda zgladi. To napako smo podrobneje analizirali in ugotovili, da je povprečna absolutna višinska napaka DMR v teh primerih med 1,3 in 2,1 metra (pri čemer je teren večinoma podcenjen). Ker metoda izločene točke nadomesti z interpoliranimi, ta napaka na sliki 6 ni vidna. Še več težav pa ima v takšnih primerih sorodna metoda, ki odstrani tako rekoč vse grebene (glej napako tipa I v preglednici 2).

4.4 Testni primer Zidani Most

Enako kot testni primer Zagorje ob Savi je testni primer Zidani Most eden izmed najtežjih za izgradnjo DMR, na katere lahko naletimo v Sloveniji. Poleg izjemno strmega terena in nezveznosti vsebuje še mostove, ki so zvezno vpeti v teren. Z metodo nam vseeno uspe razmeroma natančno ohraniti nezvezdne predele terena ter odstraniti vegetacijo na strmih pobočjih, prav tako odstranimo mostove. Vseeno pa je napaka v takšnih primerih večja tudi zaradi stavb, ki se s strehami dotikajo pobočij in jih ta metoda napačno vključi v DMR. Rezultat tega testnega primera je prikazan na sliki 7. Nasprotno pa sorodna metoda uspešno odstrani objekte, pripete na teren, vendar tudi v tem primeru odstrani tako rekoč vse nezveznosti terena.



Slika 8: Testni primer (a) Zidani Most ter (b) izhodni DMR

5 SKLEP

V predstavljeni raziskavi smo preverili učinkovitost metode samodejne izgradnje DMR iz podatkov lidar, ki temelji na konceptih matematične morfologije (Mongus in Žalik, 2012), ter jo primerjali s sorodno metodo (Chen in drugi, 2007). Lastnosti metod smo preučili na šestih testnih primerih, ki predstavljajo različno zahteven teren za izgradnjo DMR: Maribor in Mura (ravninski teren), Šentilj in Korte (gričevnat teren) ter Zagorje ob Savi in Zidani Most (sredogorje s strmimi pobočji). Povprečna napaka tipa I, s katero je podan odstotek zavrnutih točk terena, ki jih nismo vključili v DMR, znaša 2,74 %. Tudi na zelo strmih območjih, pokritih z vegetacijo, ta napaka ne presega 4 %. Nekoliko večja je povprečna napaka tipa II, s katero je podan odstotek sprejetih nadterenskih točk v DMR in znaša 4,95 %. V najbolj zahtevnih primerih, ki vključujejo strma pobočja in različne stavbe, ta napaka ne presega 7 %. Čeprav je natančnost sorodne metoda primerljiva na ravninskih območjih, pa njena natančnost občutno upade v zahtevnejših primerih slovenskega sredogorja in na terasatih območjih. Ker Sithole in Vosselman (2004) predpostavljata 90-odstotno natančnost pravilne klasifikacije točk v točke terena kot uspešno,

lahko iz analize rezultatov ugotovimo, da obe metodi omogočata relativno uspešno samodejno izgradnjo DMR tudi na tako geografsko raznolikem območju, kot je Slovenija.

6 ZAHVALA

Raziskavo je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (L2-3650 in P2-0041). Podatke lidar nam je v raziskovalne namene odstopilo podjetje Geoin d. o. o., za kar se mu najlepše zahvaljujemo. Članek je nastal v okviru operacije z naslovom »Center za Odrpte inovacije in RaziskavE Univerze v Mariboru (CORE@UM)«. Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa krepitev regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete: Konkurenčnost podjetij in raziskovalna odličnost, prednostne usmeritve 1.1: Izboljšanje konkurenčnih sposobnosti podjetij in raziskovalna odličnost.

Literatura in viri:

- Brovelli, M. A., Cannata, M., Longoni, U. M. (2004). Lidar data filtering and DTM interpolation within GRASS. *Transactions in GIS*, 8(2), 155–174.
- Chang, P. S., Lun, L. C., Shih, F. Y. (1997). An efficient class of alternating sequential filters in morphology. *Graphical Models and Image Processing*, 59(2), 109–116.
- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D., Xie, G. (2007). Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(2), 175–185.
- GURS. (2009). Tehnična dokumentacija, Aeroposnetki in ortofoto 2009–2010, http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/JVN_08/Aeroposnetki_in_ortofoto_2009-2010/Razpisna_dokumentacija.pdf (28. 11. 2012).
- Kraus, N., Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(4), 193–203.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., Džerovski, S. (2007). Repetitive interpolation: a robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain, *Remote sensing of environment*, 108(1), 9–23.
- 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*, 267–271.
- Haugerud, R. A., Harding, D. J. (2001). Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LiDAR topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(3/W4), 211–218.
- Kilian, J., Haala, N., Englich, M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 383–388.
- Lee, H. S., Younan, N. (2003). DTM extraction of LiDAR returns via adaptive processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9), 2063–2069.
- Li, S. (2011). A filtering method for generating DTM based on multi-scale mathematic morphology. V: S. Hata (ur.), *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 693–697, 2011. New York: IEEE.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31–49.
- Lloyd, C. D. (2010). *Local Models for Spatial Analysis* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Lukač, N., Žlavs, D., Seme, S., Žalik, B., Štumberger, G. (2013). Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data. *Applied Energy*, 102, 803–812.
- Mann, P. S. (2010). *Introductory statistics* (7th ed.). Hoboken (NJ): John Wiley & Sons Inc.
- Mongus, D. (2012). Brezparametrični algoritem gradnje digitalnega modela reliefa iz podatkov Lidar. *Doktorska disertacija*. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko.
- Mongus, D., Pečnik, S., Žalik, B. (2009). Efficient visualization of LiDAR datasets. V: Y. Toru (ur.), *Proceedings of the*

2009 International conference on optical instruments and technology, volume 7506-7513, 1–11. Washington: SPIE.

Mongus, D., Žalik, B. (2011). Efficient method for lossless LiDAR data compression. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9), 2507–2518.

Mongus, D., Žalik, B. (2012). Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1), 1–12.

Pfeifer, N., Reiter, T., Briese, C., Rieger, W. (1999). Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(3/W14), 31–36.

Podobnikar, T. (2008). Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki, *Geodetski vestnik*, 52(4), 834–853.

Podobnikar, T., Vrečko, A. (2012). Digital elevation model from the best results of different filtering of a LiDAR point cloud, *Transactions in GIS*, 16(5), 603–617.

Qi, C., Gong, P., Baldocchi, D., Xie, G. (2007). Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(2), 175–185.

Shan, J., Sampath, A. (2005). Urban DEM generation from raw LiDAR data: A labeling algorithm and its performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(2), 217–222.

Shih, F. Y. (2009). *Image processing and mathematical morphology: fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC Press.

Sithole, G. (2001). Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(3/W4), 203–210.

Sithole, G., Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1-2), 85–101.

Triglav Čekada, M. (2011). Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (LIDAR) za geomorfološke študije, *Geografski vestnik*, 83(2), 81–93.

Triglav Čekada, M., Bric, V., Oven, K. (2012). Prvo vsedržavno lasersko skeniranje Slovenije. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012*, 191–196.

Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 935–942.

Wang, C., Tseng, Y. (2010). DEM generation from airborne LiDAR data by an adaptive dualdirectional slope filter. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(7B), 628–632.

Werbrouck, I., Antrop, M., Van Eetvelde, V., Stal, C., De Maeyer, P., Bats, M., Bourgeois, J., Court-Picon, M., Crombe, P., De Reu, J., De Smedt, P., Finke, P. A., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Zwervaeagher, A. (2011). Digital elevation model generation for historical landscape analysis based on lidar data, a case study in Flanders (Belgium). *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8178–8185.

Zhang, K. Q., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 872–882.

Zhang, K., Whitman, D. (2005). Comparison of three algorithms for filtering airborne LiDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(3), 313–324.

Prispelo v objavo: 12. december 2012

Sprejeto: 23. marec 2013

doc. dr. Domen Mongus, univ. dipl. inž. rač. in inf.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17

SI-2000 Maribor

e-pošta: domen.mongus@uni-mb.si

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

Geodetski inštitut Slovenije

Jamova 2

SI-1000 Ljubljana

e-pošta: mihaela.triglav@gis.si

prof. dr. Borut Žalik, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17

SI-2000 Maribor