

VEKTORIZACIJA POTEKA DALJNOVODNIH VODNIKOV S HOUGHOVO TRANSFORMACIJO IZ PODATKOV AERO- IN TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA

EXTRACTION OF POWER LINES FROM AIRBORNE AND TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA USING THE HOUGH TRANSFORM

Dejan Grigillo, Samo Ozvaldič, Anja Vrečko, Mojca Kosmatin Fras

UDK: 528.7/8
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 21.1.2015
Sprejeto: 13.4.2015

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.246-261
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 21.1.2015
Accepted: 13.4.2015

IZVLEČEK

V članku predstavljamo postopek za samodejno prepoznavanje poteka daljnovidnih vodnikov v horizontalni ravnini xy iz podatkov aero- in terestričnega laserskega skeniranja. Postopek sestavljajo štirje glavni koraki: predobdelava s klasifikacijo oblaka točk, filtriranje oblaka točk, prepoznavanje točk na vodnikih s Houghovo transformacijo (HT) in vektorizacija poteka vodnikov ter izračun njihovih presečišč. V predobdelavi s klasifikacijo oblaka točk odstranimo večino točk, ki ne pomenijo vodnikov. Predstavljamo lasten filter, s katerim dodatno zmanjšamo število točk v oblaku, pospešimo izračun in povečamo zanesljivost nadaljnje obdelave podatkov. Točke vodnikov poiščemo z uporabo HT na vektorskih točkah v ravnini xy . Končen potek vodnikov določimo s premicami, izračunanimi po metodi najmanjših kvadratov iz točk, ki jih HT označi kot točke na vodnikih. Rezultate ocenimo vizualno in izdelamo relativno primerjavo koordinat presečišč z referenčnimi presečišči, ki smo jih določili iz ročno filtriranega oblaka točk. S predlaganim postopkom je mogoče prepoznati večino vodnikov na testnem območju v obeh nizih podatkov.

ABSTRACT

In this article, a method for the automatic detection of power lines in a horizontal xy plane from airborne and terrestrial laser scanning data is presented. The workflow is composed of four main steps: pre-processing with classification of a point cloud, filtering of the point cloud, the detection of points on the power lines by applying the Hough transform (HT), and vectorisation of power line locations and their intersections. In the pre-processing step, most of the points that are not representing power lines are eliminated via classification of the point cloud. We present our filter, which reduces the number of points in the point cloud further and thus accelerates data processing and increases the reliability of processing in the next steps. We detect the points on the power lines with the HT on the vector points in the xy plane. The final track of the power lines is derived from the straight segments computed by the method of the least squares from the points that HT recognised on the power lines. The results are assessed visually and via relative comparison of the computed intersections coordinates with the reference data manually extracted from the filtered point cloud. The proposed method detects almost all power lines in the test area for both data sets.

KLJUČNE BESEDE

lasersko skeniranje, daljnovidni vodniki, Houghova transformacija, filtriranje oblaka točk

KEY WORDS

laser scanning, powerlines, Hough transform, filtering of point cloud

1 UVOD

Življenje sodobnega človeka je močno odvisno od električne energije. To se je še posebej jasno pokazalo ob žledolomu, ki smo ga v Sloveniji doživeli v januarju in februarju 2014. Zaradi prekinjene dobave električne energije je bila na najbolj prizadetih območjih onemogočena ali otežena komunikacija, velike težave so se pojavile z ogrevanjem in osvetljavo prostorov, gmotno škodo je utrpelo tudi gospodarstvo.

Za upravljanje distribucijskega omrežja so ključni kakovostni in ažurni podatki o stanju infrastrukture električnega omrežja in njegove okolice, ki lahko pomeni nevarnost (na primer zaraščenost). Geodetska uprava Republike Slovenije vodi podatke o objektih energetske infrastrukture na ozemlju Slovenije v zbirnem katastru gospodarske javne infrastrukture. Terenski zajem podatkov o distribucijskem omrežju je lahko zamuden in nevaren, mogoče pa ga je deloma nadomestiti z metodami daljinskega zaznavanja. Medtem ko je ločljivost komercialnih satelitskih in tradicionalnih aeroposnetkov še preslaba, da bi na njih lahko zaznali daljnovodne vodnike (v nadaljevanju: vodniki), pa so ti dobro prepoznavni v oblakih točk laserskega skeniranja. Tako je bilo prav zaradi kontrole stanja električnih daljnovodov izvedeno sploh prvo aerolasersko skeniranje v Sloveniji (Bilc, 2002).

V članku predstavljamo lasten postopek za samodejen 2D-zajem poteka vodnikov in njihovih presečišč iz oblaka točk, pridobljenega z aero- (ALS) ali terestričnim laserskim skeniranjem (TLS). Zasnovan je bil v okviru diplomske naloge (Ozvaldič, 2014), za članek smo ga izboljšali in avtomatizirali. Opisana je predobdelava podatkov, ki temelji na klasifikaciji oblaka točk, s katero smo v oblaku obdržali le točke, ki najverjetneje pomenijo vodnike. Običajni postopki klasifikacije oblaka točk ne omogočajo popolnega izločanja točk vodnikov, v rezultatih se pojavljajo tudi druge točke (objekti, visoka vegetacija ...). Določitev poteka vodnikov v naši raziskavi temelji na uporabi Houghove transformacije (HT) na vektorskih točkah, projiciranih v ravnino xy . Časovna obdelava in rezultat HT sta odvisna od količine točk, ki jih obravnavamo, zato smo razvili postopek filtriranja, s katerim zmanjšamo število točk v obdelavi in izboljšamo rezultate HT. Končen potek vodnikov in izračun njihovih presečišč določimo iz premic, izračunanih z metodo najmanjših kvadratov (MNK) skozi točke, ki jih je HT prepoznala kot točke na vodnikih. Na koncu smo ocenili natančnost horizontalnega položaja presečišč, dobljenih v opisanem postopku, glede na ročno filtrirane podatke.

1.1 Pregled sorodnih del

Pri vizualnem pregledu oblaka točk aerolaserskega skeniranja so vodniki lepo vidni. V tlorisnem pogledu so točke na vodnikih skoraj kolinearne, kar lahko uporabimo za njihovo samodejno prepoznavanje. Zamisel, da za ta namen uporabi HT, je predstavil že Axelsson (1999), kasneje so HT za prepoznavanje vodnikov velikokrat uporabili tudi drugi avtorji.

Melzer in Breise (2004) sta iz oblaka točk ALS najprej odstranila talne točke. Na podlagi netalnih točk sta ustvarila binarni raster z velikostjo celice 1 m x 1 m, tako da sta polnim celicam pripisala vrednost 1 in praznim celicam vrednost 0. Večino vegetacije in drugih šumov sta odstranila s tem, da sta ohranila le tiste polne celice, ki so imele 1, 2 ali 3 sosednje polne celice. Točke znotraj preostalih polnih celic sta projicirala v ravnino xy in nato izvedla iterativno HT. Za določitev 3D-modela poteka vodnika med dvema stebroma sta uporabila algoritem RANSAC (angl. random sample consensus). Podoben pristop so

uporabili Liu in sod. (2009), ki so po odstranitvi talnih točk HT izvedli na rastru. Uporabili so hitrejšo različico HT (Fernandes in Oliviera, 2008), ki piksele že na vhodni podobi poveže v gruče in vsaki gruči priredi daljico. To so krajši nepovezani deli linij, ki se nato transformirajo v parametrični prostor, kjer se določi končni potek linij. Postopek je veliko hitrejši, saj v parametrični prostor ni treba transformirati vseh premic v vsaki točki. Zgoraj opisani metodi uporabita HT na celotnem območju, rezultat HT so točke, ki ležijo na vodnikih. Pri tem pristopu avtorji poročajo o težavah s prepoznavanjem vodnikov na krajih, kjer so obdani z vegetacijo.

Nekoliko drugačen pristop uporabijo na primer Jwa in sod. (2009) ter Guo in sod. (2014). V teh primerih se HT uporabi v okolici vsake točke oblaka točk oziroma znotraj posameznega voksla (Jwa in sod., 2009). Točke (v okolici obravnavane točke) se najprej projicirajo na ravnino xy , nato se izvede transformacija v parametrični prostor. Obravnavani točki se kot nov atribut pripiše razmerje med njeno vrednostjo v matriki HT in vsoto vseh elementov matrike HT. To razmerje je le ena izmed spremenljivk, pripisanih točkam in uporabljenih za iskanje točk, ki v oblaku predstavljajo vodnike. Jwa in sod. (2009) kot spremenljivke uporabijo še gostoto točk v vokslah ter razmerje med razliko najmanjših lastnih vrednosti in največjo lastno vrednostjo kovariančne matrike točk v vokslu (tako imenovano linearnost, angl. linearity). Guo in sod. (2014) so uporabili še 25 ostalih spremenljivk in klasifikacijo na več razredov (npr. stavbe, vegetacija ...) naenkrat izvedli z algoritmom JointBoost. To je algoritem strojnega učenja, ki v fazi učenja določi tudi, katere spremenljivke so za klasifikacijo bolj pomembne. Zaradi tega zmore učinkovito izvesti klasifikacijo v več razredov na podlagi veliko spremenljivk (Guo in sod. 2014). Pri teh metodah so rezultati iskanja točk vodnikov zelo odvisni od izbrane velikosti okolice točke (na primer od velikosti stranice voksla), ki je največkrat med 2 metroma in 3 metri. Uspešnost metod je bila ocenjena na različne načine (npr. odstotek pravilno določenih točk, število v celoti in delno prepoznanih vodnikov), odstotek pravilno določenih točk, ko je podan, vedno nekoliko presega 90 %.

Vse bolj se razvijajo tudi metode samodejnega prepoznavanja objektov v oblakih točk, pridobljenih z mobilnimi laserskimi sistemi (najpogosteje nameščenimi na avtomobilu). Čeprav je ALS bolj priročen za zajem vodnikov, ima snemanje s tal nekaj prednosti: razdalja med skenerjem in vodnikom je manjša, snemanje s strani in navzgor zabeleži več točk na vzporednih vodnikih, gostota podatkov je večja, za manjša območja je tako snemanje cenejše. Cheng in sod. (2014) so postopek prepoznavanja vodnikov izvedli v treh korakih: 1) določitev točk na vodnikih, za kar so uporabili HT, 2) gručenje točk na vodnikih in 3) modeliranje vodnikov s krivuljo v 3D-prostoru.

Zaradi vse boljših podatkov (večja gostota točk, podatki iz različnih senzorjev) se metode za samodejno prepoznavanje daljnovodov v oblakih točk še vedno intenzivno razvijajo (Guo in sod., 2014; Zhu in Hyypä, 2014; Cheng in sod., 2014). Znano je, da se podatki aero- in terestričnega laserskega skeniranja razlikujejo zaradi različne oddaljenosti skenerja od objektov (in posledično različne velikosti odtisa laserskega žarka) ter različne perspektive snemanja (Pfeifer in Briese, 2007). Pri snemanju in samodejnem zajemanju linijskih objektov, kot so daljnovodi, so te razlike še posebej očitne: večji odtis žarka pomeni večjo razpršenost točk okoli vodnika, ki se pri podatkih ALS pojavi v ravnini xy . To je za obdelavo s HT še posebej problematično, zato je smiselno empirično preveriti vpliv različno zajetih podatkov (ALS, TLS) na rezultate zajema vodnikov s HT na istem območju in v istih pogojih snemanja.

2 PODATKI

Podatke laserskega skeniranja za našo raziskavo smo pridobili od dveh podjetij. Podjetje FLYCOM d. o. o. (<http://www.flycom.si>) je posredovalo podatke ALS. Podatke TLS smo pridobili od podjetja DFG CONSULTING d. o. o. (<http://www.dfgcon.si/>). Obe snemanji sta bili izvedeni aprila 2012. Koordinate točk so za obe vrsti podatkov določene v državnem koordinatnem sistemu D48/GK. Obravnavano območje leži v občini Logatec, obsega del naselja Petkovec in je veliko približno 160 m x 170 m. Konfiguracija terena je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Panoramska fotografija obravnavanega območja.

Terestrično skeniranje je bilo izvedeno s skenerjem Riegl VZ-400 (Riegl, 2014), ki uporablja impulzni način merjenja razdalj. Instrument je bil med zajemom podatkov nameščen na streho mirujočega avtomobila. Za ALS je bil uporabljen merski sistem LiteMapper (LM) 5600, nameščen na helikopterju. Eden od sestavnih delov LM 5600 je skener Riegl LMS Q560 (Riegl, 2014), ki je podatke meritev zapisoval v impulznem načinu.

Čeprav so osnove tehnologije laserskega skeniranja pri aero- in terestričnih sistemih enake, se izvedbe v napravah in postopkih obdelave med seboj razlikujejo (Pfeifer in Briese, 2007). Predpostavili smo, da na rezultate samodejnega zajema vodnikov najbolj vplivajo naslednje razlike med TLS in ALS: velikost odtisa laserskega žarka, gostota točk in geometrija snemanja ter možnost beleženja več odbojev istega impulza.

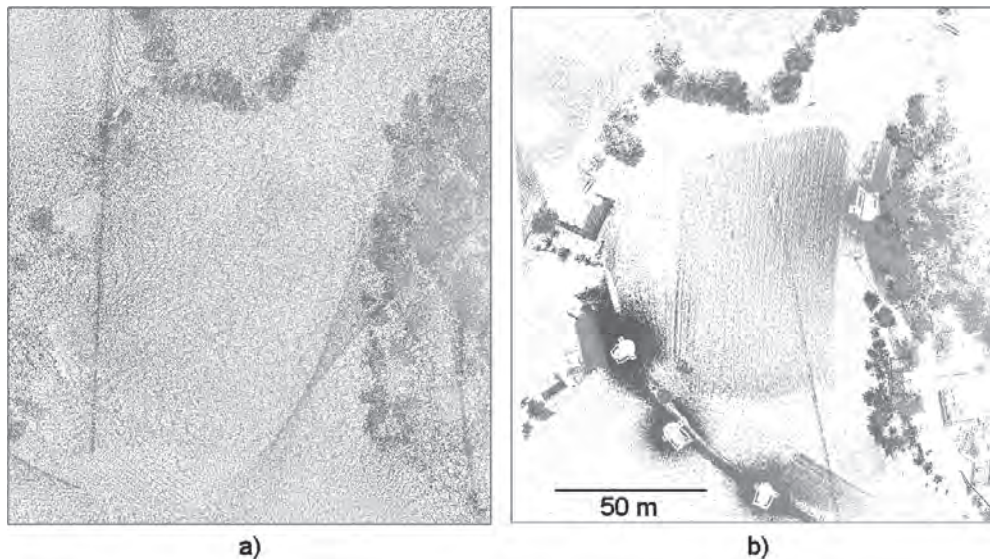
Velikost odtisa laserskega žarka je odvisna od divergence laserskega žarka (prostorski kot razširjanja laserskega žarka), oddaljenosti opazovanega objekta od skenerja in vpadnega kota žarka. Pri izračunu končnega premera laserskega žarka se upošteva še njegov začetni premer, če ga proizvajalec opreme navaja (Urbančič in sod., 2014). Podobno kot za točkovne in ploskovne tarče velja tudi za linijske tarče: vsem tarčam, ki so znotraj posameznega odtisa laserskega žarka, se določi položaj središča odtisa. Zaradi tega so točke razpršene okoli dejanskega poteka vodnika v območju polmera odtisa laserskega žarka (slika 2).

Kotna ločljivost (angl. angular resolution ali spot spacing) skenerja vpliva na gostoto točk in s tem na stopnjo zaznanega detajla. Razdalja med posnetimi točkami je odvisna od kotnega koraka laserja in razdalje laserski skener–tarča. V našem primeru je pri podatkih ALS povprečen razmik med točkami 0,07 metra, pri podatkih TLS pa 0,05 metra. V splošnem je ta razmik pri ALS zaradi večje višine snemanja še večji. Pri filtriranju podatkov ALS je v pomoč beleženje več odbojev istega impulza.



Slika 2: Položaj linijske tarče je geometrično določen s središčem odtisa žarka.

Oblaka točk, ki ju obravnavamo v članku, v tlorisu prikazuje slika 3, ki nazorno prikaže enakomerno gostoto točk pri podatkih ALS (slika 3a) in neenakomerno gostoto točk pri podatkih TLS (slika 3b). Povprečna gostota vseh točk je 228 točk/m² v oblaku ALS in 400 točk/m² v oblaku TLS.



Slika 3: Oblak točk v tlorisnem pogledu: a) ALS in b) TLS.

3 METODOLOGIJA

Določitev poteka vodnikov v 2D smo za obe vrsti podatkov (ALS in TLS) izvedli v naslednjih korakih:

- predobdelava s klasifikacijo oblaka točk,
- filtriranje oblaka točk po predobdelavi,

- prepoznavanje točk na vodnikih s Houghovo transformacijo,
- vektorizacija vodnikov in izračun njihovih presečišč.

Osnovno klasifikacijo smo izvedli v programu LAStools, za razpoznavo vodnikov smo razvili lasten program.

3.1 Klasifikacija oblaka točk

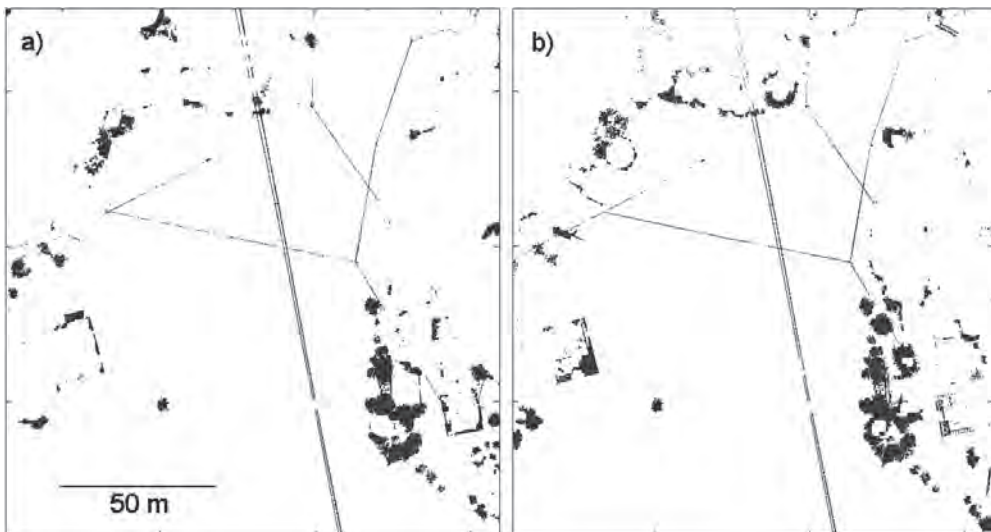
Klasifikacija podatkov laserskega skeniranja pomeni razvrstitev točk v zelene razrede. Z orodji LAStools lahko točke razvrstimo v razrede, kot so stavbe, vegetacija, tla in neklasificirane točke, ki nam jih s postopkom ni uspelo razvrstiti. Kot končni rezultat klasifikacije smo za potrebe določevanja vodnikov izvozili le točke, ki pripadajo razredu neklasificirano in imajo relativno višino med 3,5 metra in 12 metri, na kateri pričakujemo vodnike. Pri podatkih ALS smo obdržali le točke prvega odboja. Zagonski datoteki (preglednica 1), ki smo ju uporabili za klasifikacijo, se zaradi v poglavju 2 opisanih razlik v naravi podatkov ALS in TLS, razlikujeta. Opisi ukazov orodij LAStools so dostopni na spletnih straneh programa (rapidlasso GmbHs, 2014) in v diplomski nalogi (Ozvaldič, 2014).

Preglednica 1: Zagonski datoteki za izločanje točk vodnikov v razred neklasificirano v orodju LAStools.

ALS:	lasground -i ALS.las -o ALS1.las lasheight -i ALS1.las -replace_z -o ALS2.las lasclassify -i ALS2.las -planar 0.8 -rugged 3.2 -o ALS3.las las2las -i ALS3.las -keep_class 1 -first_only -clip_z_below 3.5 -clip_z_above 12 -o ALS4.las
TLS:	lasground -i TLS.las -o TLS1.las lasheight -i TLS1.las -replace_z -o TLS2.las las2las -i TLS2.las -keep_classification 1 -o TLS3.las lasclassify -i TLS3.las -planar 0.4 -rugged 3 -o TLS4.las las2las -i TLS4.las -keep_class 1 -clip_z_below 3.5 -clip_z_above 12 -o TLS5.las

Na sliki 4 je prikazan rezultat predobdelave oblaka točk s klasifikacijo za podatke a) ALS in b) TLS. Splošno je potek vodnikov v obeh primerih jasno določljiv. Poleg vodnikov so v oblaku točk ostale še druge točke (pretežno visoka vegetaciji in deli stavb), ki s klasifikacijo niso bile razvrščene. Na sliki 4 so opazne tudi nekatere pomanjkljivosti predhodne obdelave. Obakrat se nakazujejo težave s prepoznavanjem vodnikov v desnem spodnjem delu območja, ki je poraščeno z gostejšo vegetacijo. Tu so izpadli nekateri deli vodnikov. Izpad vodnikov je večji pri podatkih TLS, saj med vegetacijo ni bilo postavljenega nobenega stojišča skenerja. S predobdelavo smo med podatki ALS izgubili del vodnika v srednjem levem delu območja. Ponekod so opazne prekinitve v poteku vodnikov, ki predvidoma ne bi smele vplivati na iskanje vodnikov s HT. Med podatki TLS so v zgornjem delu območja opazne redkeše točke na vodnikih (na sliki 3b opazimo, da so bila stojišča skenerja – avtomobila – postavljena v spodnjem delu območja).

V nadaljnjem postopku določevanja vodnikov in njihovih presečišč smo uporabili položajne (x , y) koordinate točk, prikazanih na sliki 4.



Slika 4: Rezultati predobdelave oblakov točk s klasifikacijo za podatke a) ALS in b) TLS.

3.2 Filtriranje oblaka točk po predobdelavi

S predobdelavo smo obdržali točke, ki predstavljajo vodnike, in preostale točke, ki niso bile razvrščene s klasifikacijo (predvsem točke visoke vegetacije in delov stavb). Izmed njih bomo s HT izbrali le tiste, ki pripadajo vodnikom. Časovna obdelava HT je med drugim odvisna od števila točk, ki jih obravnava. Poleg tega lahko točke na primer visoke vegetacije tvorijo mnoge linije, ki bi jih odkrili s HT. Zato je smiselno pred iskanjem vodnikov točke dodatno filtrirati. Filtriranje temelji na izdelavi binarne rastrske maske, njenem morfološkem odpiranju in uporabi izdelane maske za zmanjšanje števila točk v obdelavi.

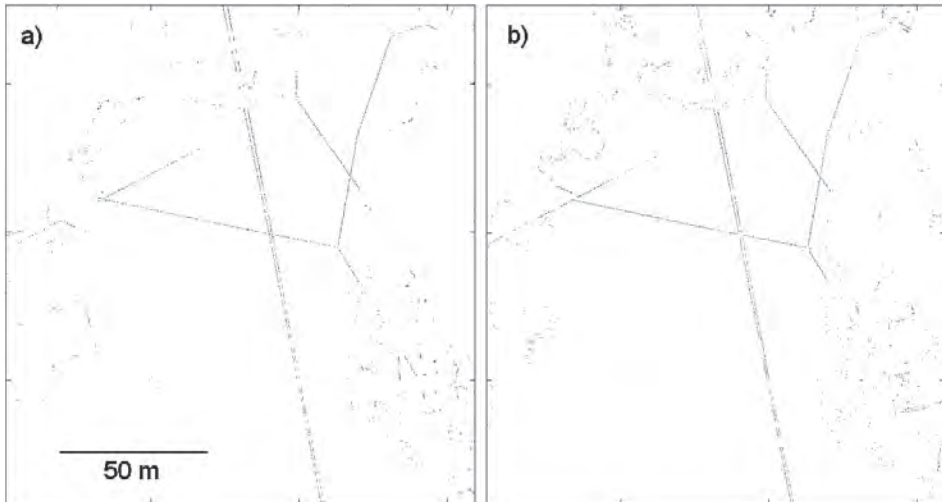
Začetna binarna rastrska maska s prostorsko ločljivostjo 0,5 metra je izdelana iz nabora vseh točk v obdelavi. Piksli, ki vsebujejo vsaj eno točko, imajo vrednost 1, ostali piksli imajo vrednost 0. V naslednjem koraku z morfološkim odpiranjem (Najman in Talbot, 2013; Gonzales, Woods in Eddins., 2004) s strukturnim elementom oblike

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

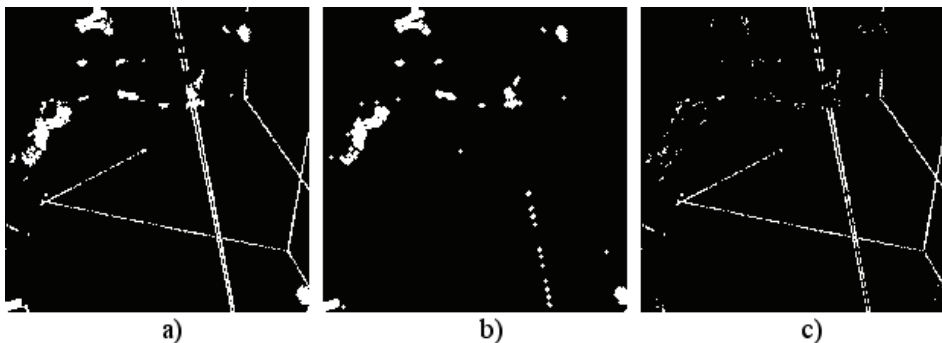
iz maske izločimo tanke objekte. Končno binarno rastrsko masko izdelamo s cilindrično transformacijo (angl. top-hat), ki jo izvedemo tako, da rezultat odpiranja odštejemo od začetne maske (Mongus, Triglav Čekada in Žalik, 2013).

Filter obdrži le točke na območjih, na katerih ima končna binarna rastrska maska vrednost 1. Točke, ki ležijo v območju enega piksla (torej znotraj okna 0,5 m x 0,5 m), nadomesti z njihovim težiščem, če je v oknu manj kot 45 točk (empirično določen parameter). Če je v oknu več kot 45 točk, sklepamo, da je v njem visoka vegetacija, in točke znotraj tega okna v celoti odstranimo. Rezultat filtriranja je prikazan na

sliki 5. Slika 6 na manjšem območju prikazuje korake v izdelavi binarne rastrske maske. Po izvedenem filtriranju ostaneta na en linijski meter vodnika slabi dve točki, ki opisujeta vodnik.



Slika 5: Rezultati filtriranja točk: a) ALS, b) TLS.



Slika 6: Izdelava binarne rastrske maske: a) rastriran vhodni oblak točk, b) odprta maska, c) končna binarna rastrska maska.

3.3 Prepoznavanje točk na vodnikih s Houghovo transformacijo

Houghova transformacija (HT) je postopek, s katerim lahko v množici podatkov (na primer v oblaku točk) poiščemo geometrično pravilne oblike (na primer premico). V našem primeru smo jo uporabili za iskanje premic, ki opisujejo vodnike v ravnini xy . Enačbo poljubne premice skozi točko (x_i, y_i) zapišemo v normalni obliki (Vosselman in Maas, 2010):

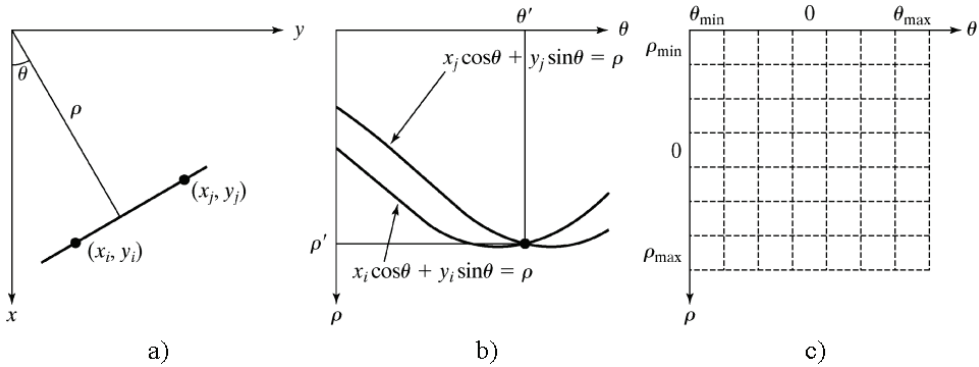
$$x_i \cos \Theta + y_i \sin \Theta = \rho, \quad (1)$$

kjer sta parametra:

ρ : oddaljenost premice od izhodišča koordinatnega sistema,

Θ : naklonski kot premice.

Premico skozi točki (x_i, y_i) in (x_j, y_j) v ravnini xy ter geometrijski pomen parametrov ρ in Θ prikazuje slika 7a. HT rešuje problem v parametričnem prostoru. Pri tem koordinati točke (x_i, y_i) obravnava kot parametra premice (1) v ravnini $\rho\Theta$. Vse premice, ki potekajo skozi točko, so v parametričnem prostoru $\rho\Theta$ predstavljene s sinusoido. V parametričnem prostoru enako opišemo vse premice skozi točko (x_j, y_j) . Koordinati presečišča sinusoid (ρ', Θ') v parametričnem prostoru sta parametra premice v ravnini xy , ki poteka skozi točki (x_i, y_i) in (x_j, y_j) (slika 7b). Za praktično izvedbo je parametrični prostor razdeljen na zbiralne celice (slika 7c). Velikost zbiralnih celic je določena z izbrano ločljivostjo parametrov premice.



Slika 7: a) premica v ravnini xy ; b) sinusoidi v parametričnem prostoru $\rho\Theta$ s presečiščem v točki (ρ', Θ') ; c) zbiralne celice parametričnega prostora (Gonzales, Woods in Eddins, 2004: 394 str.).

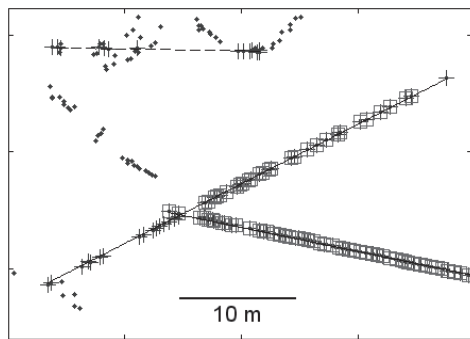
Vrednosti zbiralnih celic predstavimo z matriko Houghove transformacije H . Število stolpcov matriki H ustreza vsem različnim vrednostim kotov Θ . Za Θ smo v našem primeru izbrali interval z ločljivostjo $0,1^\circ$ (v povezavi s sliko 7c: $\Theta_{min} = -90^\circ$, $\Theta_{max} = 90^\circ$). Po enačbi (1) smo za vsako točko v oblaku točk pri vseh kotih Θ izračunali oddaljenosti ρ . Izračunane ρ smo zaokrožili na $0,1$ metra (izbrana ločljivost za ρ v našem primeru). Mejni vrednosti ρ (ρ_{min} , ρ_{max}) sta v našem primeru najmanjši in največji izračunan in zaokrožen ρ . Z (ρ_{min} , ρ_{max}) in ločljivostjo $0,1$ metra je določeno število vrstic v matriki H . Začetne vrednosti elementov v matriki H so enake 0. Končno matriko Houghove transformacije dobimo tako, da za vsak zaokrožen ρ in pripadajoči Θ povečamo ustrezen element (vrstica, stolpec) v matriki H za 1. Položaj največje vrednosti v matriki H določa parametra ρ' in Θ' premice, ki gre skozi največ točk. Analogno se v tej točki v parametričnem prostoru seka največ sinusoid.

V naslednjem koraku je treba ugotoviti, ali ta premica dejansko predstavlja vodnik ali pa morda povezuje točke na primer visoke vegetacije, ki so po filtriranju ostale v oblaku točk. V ta namen je treba najprej s postopkom, ki smo ga za potrebe članka poimenovali *obratna Houghova transformacija*, poiskati točke, ki so prispevale k največji vrednosti v matriki H . To so točke, ki imajo pri kotu Θ' (zaokroženo) oddaljenost od izhodišča enako ρ' . Za ugotovitev, ali so te točke na vodniku, smo opredelili 2 parametra: najkrajši segment S_{min} in najdaljšo vrzel V_{max} . Premica torej predstavlja vodnik, če v urejenem nizu točk, iz katerih je bila s HT izračunana, obstaja podniz točk, v katerem sta vsaki sosednji točki med seboj oddaljeni manj kot V_{max} , razdalja med skrajnima točkama podniza pa je vsaj S_{min} . Pri iskanju vodnikov smo uporabili empirično določena parametra $S_{min} = 8$ metrov in $V_{max} = 2,5$ metra. Urejen niz točk smo dobili tako, da smo točke projicirali na izračunano premico in

njihove projekcije razvrstili glede na položaj vzdolž premice. Tudi medsebojno oddaljenost sosednjih točk in dolžino segmenta smo računali iz projekcij točk na premico (zanimala nas je torej le dolžinska komponenta vzdolž premice).

Pri HT običajno poiščemo vse premice, ki jih tvorijo točke v ravnini, tako da v matriki H poiščemo lokalne maksimume. Pri daljnovidih, kjer obravnavamo točke, ki so razpršene v okolici vodnika, poleg tega lahko dva vodnika potekata vzporedno na majhni medsebojni oddaljenosti, je določitev razsežnosti okolice lokalnega maksimuma problematična. Za iskanje vseh vodnikov, ki jih sestavljajo točke v ravnini, smo ubrali drugačen pristop. Z obratno HT smo poiskali vse točke, ki imajo pri kotu Θ' oddaljenost od izhodišča na intervalu $[\rho' - 0,4, \rho' + 0,4]$ (tako izbran interval pomeni, da morajo biti vzporedni vodniki med seboj oddaljeni približno pol metra, da jih postopek lahko prepozna ločeno). Samo za te točke smo izračunali matriko Houghove transformacije in jo odšteli že obstoječi matriki H . Tako smo dobili novo matriko H , v kateri smo ponovno poiskali največjo vrednost, s tem pridobili parametra premice in jo analizirali, če premica opisuje vodnik. Celoten postopek se izvaja iterativno, dokler so največje vrednosti v matriki H nad določenim pragom (v našem primeru smo prag nastavili na 15; tj. premico naj določa vsaj 15 točk v ravnini).

Slika 8 na manjšem izseku podatkov prikazuje rezultat iskanja vodnikov s HT. Z znakom plus (+) so označene točke, ki prispevajo k maksimumu v matriki H . S kvadrati (\square) so označene točke, ki izpolnjujejo pogoja S_{min} in V_{max} . Z linijami so označene premice, pridobljene s HT (na sliki 8 je razpon premic omejene s skrajnimi točkami, ki so prispevale k maksimumu v matriki H). Črtkana linija povezuje točke visoke vegetacije. Ker noben podniz točk, ki tvorijo črtkano daljico, ne izpolnjuje pogojev S_{min} in V_{max} , te točke izključimo iz nadaljnje obravnave.



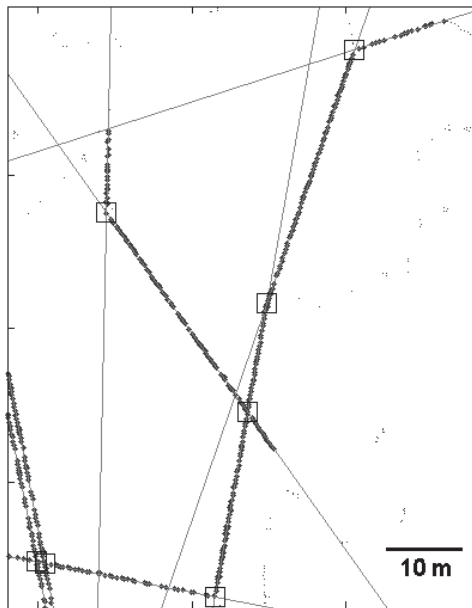
Slika 8: Rezultat Houghove transformacije in analize segmentov točk.

Z opisano metodo lahko vodnike naenkrat poiščemo na celotnem območju, vendar iskanje točk, ki ležijo na premici, na velikih območjih ni priporočljivo (večja matrika H zahteva daljši čas obdelave; pojav premic, ki na primer povezujejo dele vegetacije na različnih delih območja). Območje smo med obdelavo razdelili na 100 m x 100 m velika podobmočja z 10-metrskim prekrivanjem na robovih. Za izračun parametrov ρ in Θ smo izbrali veliko ločljivost (0,1 m in $0,1^\circ$), s čimer je bilo omogočeno zanesljivo iskanje vzporednih vodnikov. Pred izračunom matrike Houghove transformacije H smo posamezna podobmočja premaknili glede na najmanjši koordinati x in y , ki sta se pojavili v posameznem podobmočju. Po izračunu smo rezultate z istima premikoma translirali v prvotni koordinatni sistem.

3.4 Vektorizacija vodnikov in izračun presečišč

Čeprav smo za HT uporabili visoko ločljivost parametrov ρ in Θ , smo končen potek vodnikov natančneje izračunali po metodi najmanjših kvadratov (MNK). Uporabili smo singularni razcep (Demmel, 2000) matrike, ki vsebuje koordinate x in y točk, ki tvorijo premice in so bile pridobljene z obratno HT (iz izračuna smo izločili le izolirane točke, ki v okolici V_{max} nimajo nobene sosednje točke). Smerni vektor premice predstavlja desni singularni vektor, ki pripada največji singularni vrednosti. Točko na premici smo izračunali kot težišče vseh točk, ki tvorijo premico.

Iz premic, dobljenih z MNK (linije na sliki 9), smo izračunali vsa presečišča. Drugi niz presečišč smo izračunali iz podaljšanih daljic, ki jih tvorijo podnizi točk obratne HT ter zadoščajo pogoju S_{min} in V_{max} (odebeljene točke na sliki 9). Daljice smo od vsakega krajišča podaljšali za 5 metrov. Kot presečišča vodnikov (kvadrati \square na sliki 9) smo obdržali tista presečišča premic, ki so v neposredni bližini kateregakoli presečišča iz drugega niza presečišč, izračunanih iz podaljšanih daljic. Tam, kjer se seka več premic, smo presečišča izračunali kot aritmetično sredino posameznih presečišč. Aritmetično sredino smo uporabili tudi za presečišča, ki so na preseku sosednjih območij. Izračunana presečišča niso koordinate stebrov vodnikov, temveč navidezna presečišča vodnikov. Ker smo podatke obdelovali v 2D, smo na opisani način kot presečišča določili tudi zunajnivojska križanja vodnikov.

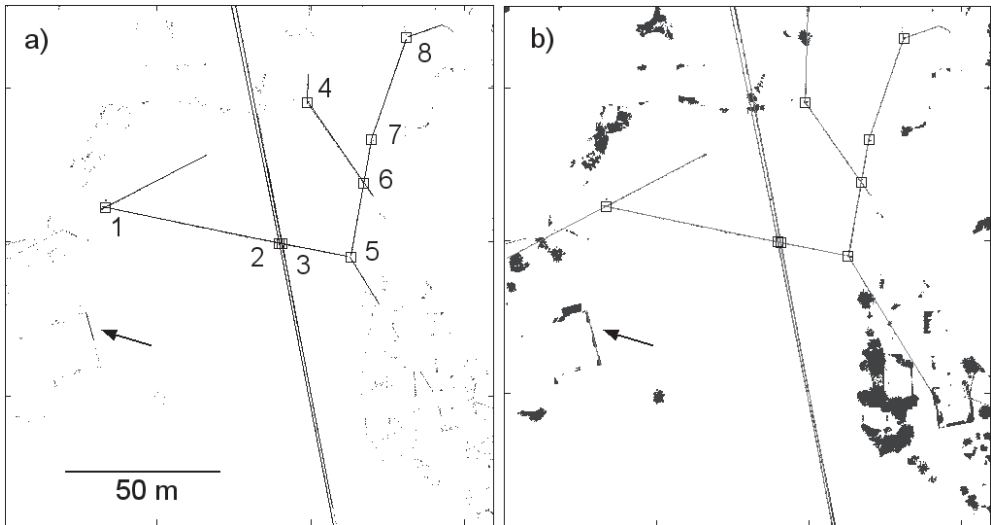


Slika 9: Določitev presečišč vodnikov.

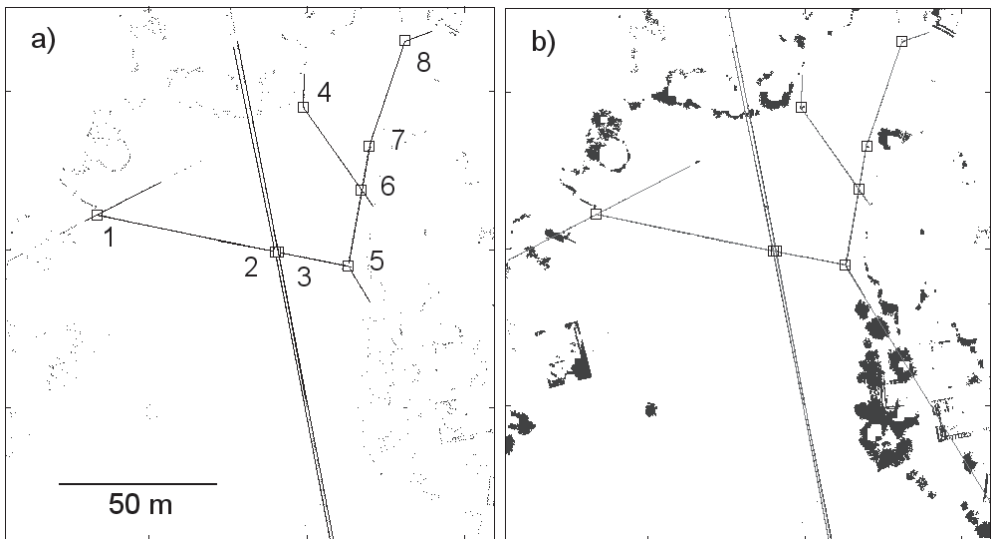
4 REZULTATI

Sliki 10 (ALS) in 11 (TLS) prikazujeta rezultate vektorizacije vodnikov. Na slikah 10a in 11a je potek vodnikov prikazan na filtriranem oblaku točk. Daljice povezujejo krajišča vseh segmentov, ki izpolnjujejo pogoja S_{min} in V_{max} . Na slikah 10b in 11b so kot daljice prikazane premice, izračunane po metodi

MNK, njihov razpon omejujejo skrajne točke, ki so prispevale k njihovemu izračunu. Kvadrati (□) prikazujejo presečišča vodnikov.



Slika 10: Vodniki in presečišča iz podatkov ALS.



Slika 11: Vodniki in presečišča iz podatkov TLS.

S kombiniranjem premic in segmentov lahko zanesljivo ugotovimo potek vodnikov. Rezultati obdelave obeh vrst podatkov (ALS in TLS) so precej podobni. Odseke vodnikov v sredini območja smo prepoznali v celoti. Proti robovom območja so nizi točk »prekratki«, da bi lahko zanesljivo določili celoten potek vodnika. To je še nekoliko izraziteje v zgornjem delu območja pri podatkih TLS, pri katerih gostota zajetih točk pada proti robu območja. V podatkih ALS smo odkrili lažni vodnik, ki dejansko povezuje neklasificirane točke na robu grajenega objekta (puščica na sliki 10). V obeh primerih so se za iskanje

vodnikov kot problematična izkazala območja visoke vegetacije (desno spodaj). Z algoritmom nam ni uspelo ločeno prepoznati vodnikov, ki sicer potekajo na različnih višinah, v ravnini xy pa je oddaljenost med njimi majhna (dva vodnika tečeta na primer med presečišči 5, 6, 7 in 8).

Za opisana presečišča smo v raziskavi izdelali relativno oceno njihovega položaja. Za oceno točnosti v referenčnem koordinatnem sistemu žal nismo imeli na voljo terenskih kontrolnih meritev, zato smo izdelali nekaj relativnih primerjav. Za izračun referenčnih presečišč smo iz oblaka točk, dobljenega v predobdelavi, ročno odstranili vse točke, ki ne predstavljajo vodnikov. Preostale točke smo ročno razdelili na odseke (od presečišča do presečišča oziroma roba območja) posameznih vodnikov. Iz točk v posameznem odseku smo z MNK izračunali premice. Referenčna presečišča smo izračunali s preseki premic. Koordinate referenčnih presečišč so podane v 2. in 3. stolpcu preglednice 2 (ALS) in preglednice 3 (TLS). Prvi stolpec v preglednicah 2 in 3 vsebuje oznake presečišč, kot so označena na slikah 10 in 11. V 4. in 5. stolpcu so podane koordinatne razlike presečišč (referenčnemu presečišču smo odšteli presečišče izračunano s postopkom, opisanim v poglavju 3). V zadnjem stolpcu je podana 2D-razdalja med presečišči.

Preglednica 2: Primerjava koordinat referenčnih in izračunanih presečišč iz podatkov ALS.

Presečišče	Y [m]	X [m]	dY [m]	dX [m]	D [m]
1	437783,49	93161,21	0,03	0,03	0,04
2	437839,90	93149,42	0,07	-0,14	0,16
3	437840,78	93149,41	-0,03	0,05	0,05
4	437848,89	93195,14	0,01	-0,03	0,03
5	437862,99	93145,00	0,07	-0,05	0,08
6	437867,23	93169,10	-0,01	0,03	0,03
7	437869,64	93182,93	-0,08	-0,24	0,25
8	437881,08	93216,22	-0,01	-0,02	0,02

Preglednica 3: Primerjava koordinat referenčnih in izračunanih presečišč iz podatkov TLS.

Presečišče	Y [m]	X [m]	dY [m]	dX [m]	D [m]
1	437783,49	93161,00	0,02	0,02	0,03
2	437839,95	93149,23	0,05	-0,14	0,15
3	437840,83	93149,25	-0,02	0,05	0,06
4	437848,90	93195,04	0,00	0,01	0,01
5	437863,05	93144,84	0,04	-0,03	0,05
6	437867,29	93168,99	-0,01	0,02	0,02
7	437869,67	93182,68	-0,05	-0,12	0,13
8	437881,14	93216,07	0,03	0,02	0,04

S pregledom rezultatov v preglednicah 2 in 3 ugotovimo, da se v obeh primerih (ALS in TLS) večje odstopanje pojavlja pri presečišču 7. Do njega namreč vodita vodnika na različnih višinah, ki nista bila prepoznana ločeno. Poleg tega je kot sekanja premic v tem presečišču zelo oster, kar še poslabša natančnost njegove določitve. Izstopa še odstopanje presečišča 2. Kot smo že omenili v poglavju 3.3, smo območje med obdelavo razdelili na 100 m x 100 m velika podobmočja z 10-metrskim prekrivanjem na robovih. Presečišči 2 in 3 sta v sredini celotnega območja in sta se v postopku izračunali štirikrat. Vsakič sta na

robu podobmočij in sta zato izračunani iz krajših odsekov. Iz preglednic 2 in 3 lahko razberemo tudi razlike v koordinatah referenčnih presečišč, izračunanih iz obeh vrst podatkov (ALS in TLS). Analizi teh razlik se v članku nismo posvetili, saj lahko na razlike vplivajo tudi različne metode, uporabljene za registracijo in georeferenciranje oblaka točk.

V preglednici 4 opisujemo vpliv filtriranja podatkov pred izvedbo HT. Iz oblaka točk, dobljenega v predobdelavi, smo ročno odstranili vse točke, ki ne predstavljajo vodnikov, in na preostalih nefiltriranih točkah izvedli predlagani postopek, opisan v poglavju 3. Prvi stolpec v preglednici 4 vsebuje oznake presečišč, kot so označena na slikah 10 in 11. V preostalih stolpcih preglednice 4 so podane koordinatne razlike presečišč (koordinatam, dobljenim iz nefiltriranih podatkov, smo odšteli koordinate, dobljene s filtriranimi podatki) in 2D-razdalje med presečišči.

Preglednica 4: Vpliv filtriranja podatkov pred izvedbo Houghove transformacije.

Presečišče	ALS			TLS		
	dY [m]	dX [m]	D [m]	dY [m]	dX [m]	D [m]
1	0,00	0,01	0,01	-0,02	-0,02	0,03
2	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,01
3	-0,02	0,01	0,02	-0,01	0,01	0,02
4	0,01	-0,03	0,03	-0,08	0,12	0,15
5	0,06	-0,03	0,07	0,03	0,03	0,04
6	-0,00	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,01
7	-0,06	-0,27	0,28	0,00	0,16	0,16
8	-0,03	-0,02	0,04	0,10	0,05	0,11

Rezultati v preglednici 4 kažejo, da je dodatno filtriranje spremenilo položaje večine presečišč za manj kot 5 centimetrov, največje odstopanje se spet pojavlja pri presečišču 7. Pri podatkih TLS izstopa tudi presečišče 4. Eden od segmentov vodnikov za izračun presečišča 4 je zelo kratek. Težava lahko izhaja iz neenakomerne gostote točk, pridobljenih s TLS, ki pada proti zgornjemu robu območja. Glede na rezultate v preglednici 4 lahko sklepamo, da je dodatno filtriranje podatkov pred izvedbo HT, kot ga predlagamo v članku, uporabno, saj zmanjša možnost zaznave lažnih vodnikov (na primer linije, ki povezujejo točke visoke vegetacije) in močno skrajša čas obdelave podatkov. Postopek se na filtriranih podatkih, ki še vedno vključujejo tudi nekatere točke, ki ne predstavljajo vodnikov, izvede petkrat hitreje kot na nefiltriranih podatkih, iz katerih so bile ročno odstranjene vse točke, ki ne predstavljajo vodnikov.

5 SKLEP

V članku smo opisali postopek za samodejno prepoznavanje poteka daljnovodnih vodnikov v 2D iz podatkov ALS in TLS. V obeh primerih je postopek sestavljen iz istih korakov: klasifikacije, filtriranja, iskanja vodnikov s Houghovo transformacijo in končnega izračuna poteka vodnikov s premicami, določenimi po metodi najmanjših kvadratov. Uporabljene nastavitve programskih parametrov za klasifikacijo se za podatke ALS in TLS razlikujejo. V članku predlagamo dodatni filter, ki iz rezultatov klasifikacije večinoma odstrani točke, ki ne pripadajo vodnikom, in dodatno zmanjša število točk na vodnikih. Filtriranje omogoči hitrejšo časovno obdelavo in zmanjša verjetnost za odkrivanje lažnih vodnikov. Obenem

deloma izniči tudi različno naravo podatkov ALS in TLS ter tako omogoči, da se vse nadaljnje operacije na podatkih ALS in TLS izvajajo popolnoma enako.

Rezultate smo analizirali vizualno in s primerjavo koordinat presečišč vodnikov z referenčnimi presečišči. Referenčna presečišča smo iz oblaka točk določili iz ročno filtriranega oblaka točk. Pomanjkljivost te ocene je, da smo referenčne koordinate presečišč določili iz obravnavanih oblakov točk in ne s terenskimi meritvami. Poleg tega je vzorec, na katerem smo izvajali obdelavo, premajhen, da bi rezultate lahko ocenili tudi s statističnimi testi. Kljub temu lahko podamo nekaj sklepov. Ocenjujemo, da lahko z opisano metodo presečišča vodnikov določimo z decimetrsko natančnostjo. Presečišča so slabše določena, kadar jih računamo iz krajših odsekov, ki se pojavijo na robu območja ali na območjih goste vegetacije, med katero se deli vodnikov »izgubijo«.

Pomanjkljivost opisanega postopka, ki je posledica obravnave podatkov v 2D, je, da ne zmore ločeno prepoznati vzporednih vodnikov, ki potekajo na različnih višinah. Nadaljevanje dela vidimo predvsem v nadgradnji algoritma z odkrivanjem in modeliranjem vodnikov v 3D. Tako bi pridobili dodatno razsežnost, ki bi omogočala predstavo poteka vodnikov v višinskem smislu. 3D-modeli daljnovodnih vodnikov nam dajejo še učinkovitejše orodje za upravljanje električnih omrežij in gospodarjenje z njimi.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujemo podjetjema DFG Consulting d. o. o. in Flycom d. o. o. za podatke laserskega skeniranja, na podlagi katerih je bilo mogoče izvesti opisano raziskavo.

Literatura in viri:

- Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data – Algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 138–147. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00008-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00008-8)
- Bilc, A. (2002). Ali dobiva klasična fotogrametrija konkurenco? Poročilo o prvem projektu LIDAR v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 46(4), 404–410.
- Cheng, L., Tong, L., Wang, Y., Li, M. (2014). Extraction of Urban Power Lines from Vehicle-Borne LiDAR Data. *Remote Sensing*, 6, 3302–3320. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs6043302>
- Demmel, J. W. (2000). *Uporabna numerična linearna algebra*. Ljubljana: DMFA – založništvo.
- Fernandes, L. A. F., in Oliviera, M. M., (2008). Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme. *Pattern Recognition*, 41(1), 299–314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2007.04.003>
- Gonzales, R. C., Woods, R. E., Eddins, S. L. (2004). *Digital image processing using Matlab*. New Jersey: Pearson Prentice-Hall.
- Guo, B., Huang, X., Zhang, F., Sohn, G. (2014). Classification of Airborne Laser Scanning Data Using JointBoost. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 124–136. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjrs.2014.03.004>
- Jwa, Y., Sohn, G., Kim, H. B. (2009). Automatic 3D Powerline Reconstruction Using Airborne Lidar Data. *IAPRS, XXXVIII, (3/W8)*, 105–110. <http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/3-w8/papers/p105b.pdf>, pridobljeno 18. 11. 2013.
- Liu, Y., Li, Z., Hayward, R., Walker, R., Jin, H. (2009). Classification of Airborne LIDAR Intensity Data Using Statistical Analysis and Hough Transform with Application to Power Line Corridors. *DICTA, 2009*, 462–467. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/dicta.2009.83>
- Melzer, T., Briesche, C. (2004). Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds. *Österreichische Computer Gesellschaft*, 1–8.
- Mongus, D., Triglav Čekada, M., Žalik, B. (2013). Analiza samodejne metode za generiranje digitalnih modelov reliefa iz podatkov lidar na območju Slovenije. *Geodetski vestnik*, 57(2), 245–259.
- Najman, L., Talbot, H. (2013). *Mathematical Morphology*. ISTE, John Wiley & Sons. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118600788>
- Ozvaldič, S. (2014). Samodejen zajem daljnovodov iz podatkov terestričnega in aerolaserskega skeniranja. *Diplomska naloga*. Ljubljana, UL – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Pfeifer, N., Briesche, C. (2007). Geometrical Aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning. *IAPRS, XXXVI, (3/W52)*, Espoo, Finska, 311–319.
- rapidlasso GmbH (2014). *LAStools* | rapidlasso GmbH. <http://rapidlasso.com/lastools>, pridobljeno 3. 3. 2014.
- Riegl (2014). *RIEGL Laser Measurements Systems*. <http://www.riegl.com>, pridobljeno 9. 12. 2014.
- Urbančič, T., Koler, B., Stopar, B., Kosmatin Fras, M. (2014). Analiza kakovosti

določitve parametrov krogle pri terestričnem laserskem skeniranju. Geodetski vestnik, 58(1), 11–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.slv.2014.01.011-027>

Vosselman, G. (ur.), Maas, H.-G. (ur.) (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Dunbeath, Scotland: Whittles Publishing.

Zhu, L., Hyypä, J. (2014). Fully-Automated Power Line Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds in Forest Areas. Remote Sensing, 6(11), 11267–11282. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs61111267>

Grigillo D., Ozvaldič S., Vrečko A., Kosmatin Fras M. (2015). Vektorizacija poteka daljnovodnih vodnikov s Houghovo transformacijo iz podatkov aero- in terestričnega laserskega skeniranja. Geodetski vestnik, 59 (2): 246-261 DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.02.246-261

asist. dr. Dejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si

Samo Ozvaldič, univ. dipl. inž. geod.

Žabljek 38a, 2318 Laporje
e-naslov: samo.ozvaldic@gmail.com

asist. Anja Vrečko, univ. dipl. inž. geod.

e-naslov: vrecko.anja@gmail.com

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si