

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ozvaldič, S., 2014. Samodejen zajem daljnovidov iz podatkov terestričnega in aerolaserskega skeniranja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M. somentorica Vrečko, A.): 79 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ozvaldič, S., 2014. Samodejen zajem daljnovidov iz podatkov terestričnega in aerolaserskega skeniranja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Vrečko, A.): 79 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GEODEZIJE
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

SAMO OZVALDIČ

**SAMODEJEN ZAJEM DALJNOVODOV IZ PODATKOV
TERESTRIČNEGA IN AEROLASERSKEGA
SKENIRANJA**

Diplomska naloga št.: 948/G

**AUTOMATIC EXTRACTION OF POWER LINES FROM
DATA OF TERRESTRIAL AND AIRBORNE LASER
SCANNING**

Graduation thesis No.: 948/G

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentorica:

asist. Anja Vrečko

Član komisije:

doc. dr. Miran Kuhar

Ljubljana, 26. 02. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
45	11	najmanjšo	največjo
53	6	kjer n teče od 1 do števila ρ -jev, ki smo jih obdržali po 4. točki (n predstavlja pozitivno celo število).	n predstavlja pozitivno celo število.
53	18	Vektorja V1 in S1 lahko v splošni obliki zapišemo kot:	
53	20	$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} n + 1 \\ n \end{bmatrix} \quad (19)$	
53	21	$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} n \\ n + 1 \end{bmatrix} \quad (20)$	
64	9	GK ravninski	slikovni

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SAMO OZVALDIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**»SAMODEJEN ZAJEM DALJNOVODOV IZ PODATKOV TERESTRIČNEGA IN
AEROLASERSKEGA SKENIRANJA«.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Žabljek, februar 2014

Samo Ozvaldič

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7/.8(043.2)
Avtor:	Samo Ozvaldič
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentor:	Anja Vrečko, univ. dipl. inž. geod.
Naslov:	Samodejen zajem daljnovodov iz podatkov terestričnega in aerolaserskega skeniranja
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	79 str., 13 preg., 59 sl., 20 en., 4 pril.
Ključne besede:	terestrično lasersko skeniranje, aerolasersko skeniranje, Hough-ova transformacija, ekstrakcija daljnovodov

Izveček

V diplomski nalogi so najprej podane glavne značilnosti in osnovna teorija terestričnega in aerolaserskega skeniranja. Natančneje je opisan algoritem Hough-ove transformacije, ki je bil uporabljen za iskanje daljnovodov v oblaku točk in na rastriranih podatkih laserskega skeniranja. Opisan je celoten postopek zajema daljnovodov, od predhodne obdelave podatkov do končnih rezultatov. Predstavljen je lasten program za samodejen zajem daljnovodov iz predhodno obdelanega oblaka točk laserskega skeniranja. Samodejen zajem daljnovodov je bil preizkušen tudi na rastriranem oblaku točk. Tudi v tem primeru je bil uporabljen lasten program. Oba omenjena programa sta bila napisana v programskem okolju Matlab. Za večjo učinkovitost uporabljenih programov so bile z orodji LAStools iz oblaka točk predhodno izločene odvečne točke, ki ne predstavljajo daljnovodov. Učinkovitost in uspešnost uporabljenih metod sta bili ocenjeni vizualno ter s primerjavo izračunanih koordinat identičnih presečišč daljnovodov na štirih primerih (samodejen zajem daljnovodov in izračun koordinat presečišč daljnovodov v oblaku točk terestričnega in aerolaserkega skeniranja ter samodejen zajem daljnovodov in izračun koordinat presečišč daljnovodov na rastriranih podatkih terestričnega in aerolaserskega skeniranja). Ocenili smo vpliv predhodne obdelave podatkov na časovno zaposlenost programa, s katerim smo samodejno zajeli linije. Na koncu so podane ideje za morebitne izboljšave metodologije in smernice za nadaljnji razvoj.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.7/.8(043.2)
Author: Samo Ozvaldič
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-advisor: Anja Vrečko, B.Sc. of Geodesy
Title: Automatic extraction of power lines from data of terrestrial and airborne laser scanning
Document Type: Graduate thesis – university studies
Notes: 79 p., 13 tab., 59 fig., 20 eq., 4 ann.
Key words: terrestrial laser scanning, airborne laser scanning, Hough transform, extraction of power lines

Abstract:

In graduation thesis the main features and theoretical frameworks of terrestrial and airborne laser scanning are presented. The algorithm for Hough transform that is described in detail, was used for searching power lines in a point cloud and on a raster that is generalized from the laser scanning data. The whole procedure of extraction of power lines is described from the pre-processing of data to the final results. Our own program was used for automatic extraction of power lines from pre-treated point cloud. Automatic extraction of power lines was tested from the raster with another program of our own. Both programs that are mentioned above were written in Matlab programming language. In order to increase the effectiveness of both programs, the redundant points that do not represent power lines were eliminated by LAStools. Effectiveness of the methods was estimated in two ways. First it was estimated visually and then by comparing the calculated coordinates of identical intersections of power lines. Estimation was made for all four examples (automatic extraction of power lines and calculation of coordinates of intersections of power lines in the point cloud of terrestrial laser scanning and airborne laser scanning; automatic extraction of power lines and calculation of coordinates of intersections of power lines on raster that is generalized from the terrestrial and airborne laser scanning data). The effect of pre-treated data on processing speed of the program that automatically extracts power lines was evaluated. At the end there are ideas for possible improvements of the methodology and guidelines for further development.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Hvala vsem, ki ste karkoli prispevali k nastanku te diplomske naloge.

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras za vse koristne nasvete, podporo in obilo dobre volje.

Velika zahvala gre somentorici Anji Vrečko, univ. dipl. inž. geod., ki me je vodila skozi praktičen del diplomske naloge. Hvala za obilo koristnih nasvetov in idej, predvsem pa hvala, za sproščene konstruktivne pogovore.

Zahvaljujem se tudi podjetjema DFG CONSULTING d.o.o. in FLYCOM d.o.o., ki sta nam priskrbeli podatke, brez katerih te diplomske naloge ne bi bilo.

Velika zahvala gre moji družini, ki me je podpirala in spodbujala na moji izobraževalni poti. Hvala prijateljem in sošolcem, s katerimi sem preživel nepozabna študijska leta.

Metka, hvala za potrpežljivost in razumevanje.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

Izjave	III
Bibliografsko – dokumentacija stran in izvleček	V
Bibliographic – documentalistic information and abstract	VII
Zahvala	IX
1 UVOD	1
1.1 Motiv	1
1.2 Opredelitev cilja in namena	2
1.3 Pregled sorodnih del	3
1.4 Struktura naloge	7
2 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE	8
2.1 Princip terestričnega laserskega skeniranja	8
2.2 Načini merjenja razdalj	9
2.3 Parametri skeniranja	10
2.3.1 Velikost odtisa laserskega žarka	10
2.3.2 Kotna ločljivost	11
2.4 Koordinatni sistemi, registracija in georeferenciranje	11
2.5 Natančnost terestričnih laserskih skenerjev	13
2.6 Uporaba podatkov terestričnega laserskega skeniranja	13
3 AEROLASERSKO SKENIRANJE	14
3.1 Princip aerolaserskega skeniranja	14
3.2 Laserski razdaljemer	15
3.3 Fizikalne lastnosti laserskega žarka	16
3.3.1 Dolžinska ločljivost	16
3.3.2 Velikost odtisa laserskega žarka	16
3.3.3 Odboj na linijskih tarčah	19
3.4 Beleženje zaporednih odbojev	19
3.5 Natančnost 3D koordinat	20
3.6 Uporaba podatkov aerolaserskega skeniranja	21
4 FAZE OBDELAVE PODATKOV	22
4.1 Filtriranje	22
4.2 Klasifikacija	23

4.3	Segmentacija	23
4.3.1	Hough-ova transformacija	24
4.3.1.1	Hough-ova transformacija za zajem linij	24
4.3.1.2	Prednosti in slabosti Hough-ove transformacije za zajem linij	27
5	UPORABLJENI PODATKI IN PROGRAMSKA OPREMA	30
5.1	Podatki	30
5.2	Zajem podatkov	32
5.2.1	LiteMapper (LM) 5600	32
5.2.2	Riegl VZ-400	34
5.3	Uporabljeni programi	36
5.3.1	FugroViewer	36
5.3.2	LAStools	37
5.3.3	Matlab	37
6	METODOLOGIJA IN PREDSTAVITEV VMESNIH TER KONČNIH REZULTATOV	39
6.1	Pregled podatkov v programu FugroViewer	39
6.2	Predhodna obdelava oblaka točk z LAStools orodji	40
6.2.1	Rastriranje predhodno obdelanih oblakov točk	44
6.3	Zajem daljnovodov	45
6.3.1	Zajem daljnovodov iz predhodno obdelanega oblaka točk	45
6.3.1.1	Shematski prikaz delovanja programa	50
6.3.2	Zajem daljnovodov na rastru	54
6.3.2.1	Delovanje programa	58
7	REZULTATI IN DISKUSIJA	62
7.1	Rezultati zajema daljnovodov iz oblaka točk	62
7.2	Rezultati zajema daljnovodov iz rastriranih podatkov	64
7.3	Primerjava položajev presečišč linij	66
8	ZAKLJUČEK	72
VIRI		74

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Doseg merjenje dolžine in maksimalna višina leta (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013).	33
Preglednica 2:	Ostale specifikacije laserskega skenerja pri merjenju dolžin (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013; LiteMapper 5600 (IGI), 2013).	33
Preglednica 3:	Optično mehanski skener (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013; LiteMapper 5600 (IGI), 2013).	34
Preglednica 4:	Tehnične specifikacije laserskega skenerja Riegl VZ-400 pri merjenju dolžin (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013).	35
Preglednica 5:	Zmogljivosti skenerja (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013).	35
Preglednica 6:	Pregled nekaterih LAStools orodij.	37
Preglednica 7:	Sestava izhodnega argumenta funkcije <i>houghlines</i> (povzeto po (MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013).	61
Preglednica 8:	Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz obeh oblakov točk (ALS in TLS).	67
Preglednica 9:	Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz obeh rastrov (ALS in TLS).	68
Preglednica 10:	Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz rastra in oblaka točk ALS.	68
Preglednica 11:	Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz rastra in oblaka točk TLS.	68
Preglednica 12:	Izračunane aritmetične sredine razlik položajev presečišč.	69
Preglednica 13:	Povprečen čas delovanja glavne programske funkcije za vse štiri primere.	70

KAZALO SLIK

Slika 1:	Rezultati statistične analize (Liu in sod., 2009).	3
Slika 2:	a) slika intenzitete, b) zaznane linije (Liu in sod., 2009).	4
Slika 3:	Prileganje krivulje v 3D, ki prestavlja daljnovod (Melzer in Briese, 2004).	5
Slika 4:	»Surovi« podatki (Bilc, 2002).	6
Slika 5:	Osnovna tematska klasifikacija (Bilc, 2002).	6
Slika 6:	Prikaz poteka daljnovoda čez avtocesto (Bilc, 2002).	7
Slika 7:	Povezava med polarnimi in 3D lokalnimi kartezičnimi koordinatami točke T (Kraus, 2004, cit. po Grilc 2004).	8
Slika 8:	Osnovni princip impulznega načina merjenja razdalj (povzeto po Kogoj, 2005).	9
Slika 9:	Primeri dveh različni kotnih ločljivosti (Carr, Douglas, Crosby, 2013).	11
Slika 10:	Predstavitve koordinatnih sistemov pri TLS (Carr, Douglas, Crosby, 2004).	12
Slika 11:	Zračni in terenski segment aerolaserskega skeniranja (povzeto po Kosmatin Fras, 2009).	15
Slika 12:	Vpliv divergence na položaj tarč (Švab Lenarčič, 2009).	18
Slika 13:	Določitev položaja odboja na linijski tarči.	19
Slika 14:	Večkratni odboj in polnovalovni način beleženja impulzov: (a) diskretni način, (b) polnovalovni način, (c) digitalizacija polnovalovnega načina (Vosselman in Mass, 2010).	20
Slika 15:	a) študijsko območje (podoba pridobljena iz Google Earth; b) perspektivni pogled na oblak točk klasificiran po višini (Yunfei in sod., 2008).	23
Slika 16:	a) xy ravnina; b) parametrski prostor (Gonzales in sod., 2004).	25
Slika 17:	a) (ρ, θ) parametrizacija linije v xy ravnini; b) sinusoide krivulje v $\rho\theta$ ravnini s presečiščem v točki (ρ', θ') ; c) zbiralne celice parametrskega prostora $\rho\theta$ (Gonzales in sod., 2004).	26
Slika 18:	Prikaz delovanja Hough-ove transformacije (Grigillo, 2010).	27
Slika 19:	Uporabljeni podatki (a) in Hough-ov zbiralni prostor (b) (Savarese, 2011).	28
Slika 20:	Šum v podatkih (a) in Hough-ov zbiralni prostor (b) (Savarese, 2011).	28
Slika 21:	Šum v podatkih (a) in primerna kvantizacija parametrskega prostora (b) (Savarese, 2011).	29
Slika 22:	Panoramska fotografija obravnavanega območja.	31
Slika 23:	Obravnavano območje, označeno na ortofotu.	31
Slika 24:	Sestava merskega sistema LiteMapper (LM) 5600 (Zalokar, 2011)	32
Slika 25:	Laserski skener Riegl VZ-400 (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013).	34
Slika 26:	Prikaz prečnega profila izbranega območja v programu FugroViewer.	36
Slika 27:	Glavne faze postopka ekstrakcije daljnovodov.	39

Slika 28:	a) ALS in b) TLS oblak točk.	40
Slika 29:	Rezultat klasifikacije na talne (vijolične) in ostale (bež) točke z orodjem lasground: a) ALS, b) TLS.	41
Slika 30:	Rezultat klasifikacije oblaka točk a) ALS in b) TLS.	42
Slika 31:	Rezultat predhodne obdelave oblakov točk a) ALS in b) TLS.	43
Slika 32:	Napake klasifikacije in daljnovodi, ki z laserskim skeniranjem niso bili zajeti (oblak točk ALS).	43
Slika 33:	Napake klasifikacije in daljnovodi, ki z laserskim skeniranjem niso bili zajeti (oblak točk TLS).	44
Slika 34:	Raster iz predhodno obdelanih oblakov točk a) ALS in b) TLS.	45
Slika 35:	Oblika dela vhodne txt datoteke.	46
Slika 36:	Izpis v ukaznem oknu v primeru, ko smo vnesli napačno ime txt datoteke.	47
Slika 37:	Izpis koordinat točk na ekranu in vnos parametrov.	48
Slika 38:	Končni del izpisa na ekranu.	49
Slika 39:	Lokacija obravnavanega območja.	49
Slika 40:	Izris obravnavanih točk (rdeče točke), linij daljnovodov (modre linije) in presekov linij z mejo območja (modre točke).	50
Slika 41:	Shematski prikaz delovanja programa.	51
Slika 42:	Prikaz potencialnih linij, ki so kandidati za nadaljnjo obravnavo.	52
Slika 43:	Oblika dela vhodne datoteke asc.	54
Slika 44:	Vnos imena asc datoteke in izpis podatkov na zaslon.	55
Slika 45:	Razdelitev območja na rastru.	56
Slika 46:	Parametrski prostor razdeljen na zbiralne celice.	56
Slika 47:	Prikaz obravnavanega območja.	57
Slika 48:	Samodejno zajet daljnovod na rastru.	58
Slika 49:	Sivinska slika.	59
Slika 50:	Slika z vrednostima 0 in 1.	59
Slika 51:	Izris samodejno prepoznanih linij iz oblaka točk ALS.	63
Slika 52:	Izris samodejno prepoznanih linij iz TLS oblaka točk.	63
Slika 53:	Izris linij za primer a) ALS in b) TLS brez oblaka točk.	64
Slika 54:	Izris linij za primer ALS.	65
Slika 55:	Izris linij za primer TLS.	65
Slika 56:	Izris linij za primer ALS (a) in TLS (b) brez podlage.	66
Slika 57:	Obravnavana presečišča. Podlaga je predhodno obdelan ALS oblak točk.	66
Slika 58:	Presečišči 4 in 7.	67
Slika 59:	a) velikost celic 0,1 m x 0,1 m, b) velikost celic 0,05 m x 0,05 m.	70

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

2D	Dvorazsežen, dvodimenzionalen
3D	Trirazsežen, tridimenzionalen
ALS	Aerolasersko skeniranje (angl. Airborne laser scanning)
DEM	Digitalni model višin (angl. Digital elevation model)
DMP	Digitalni model površja
DMR	Digitalni model reliefa
DMV	Digitalni model višin
DTM	Digitalni model reliefa (angl. Digital terrain model)
EMV	Elektromagnetno valovanje
GIS	Geografski informacijski sistem (angl. Geographic information system)
GLCS	Globalni koordinatni sistem (angl. Global coordinat system)
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistem (angl. Global navigation satellite system)
GPS	Globalni sistem za pozicioniranje (angl. Global position system)
ICP	ang. Iterative closest point
IMU	Inercialna merska naprava (angl. Inertial measurement unit)
INS	Inercialni navigacijski sistem (angl. Inertial navigation system)
KS	Koordinatni sistem
LIDAR	angl. Light detection and ranging
LS	Lasersko skeniranje (angl. Laser scanning)
MLS	Mobilni laserski sistem (angl. Mobile laser system)
MMS	Mobilni kartirni sistem (angl. Mobile mapping sistem)
PRF	Frekvenca laserja (angl. Pulse repetition frequency)
PRR	Frekvenca laserja (angl. Pulse repetition rate)
RANSAC	Soglasje naključnega vzorca (angl. The RANdom SAmple Consensus)
PRCS	Projektni koordinatni sistem (angl. Project coordinat system)
TIN	Nepravilna trikotniška mreža (angl. Triangulated irregular network)
TLS	Terestrično lasersko skeniranje (angl. Terrestrial laser scanning)
TOF	Čas potovanja svetlobnega impulza (angl. Time of flight)
UAV	Zračno plovilo brez posadke (angl. Unmanned aerial vehicle)

1 UVOD

V uvodu razložimo motiv za izdelavo diplomske naloge, opredelimo cilj in namen, podamo kratek pregled sorodnih del in opišemo strukturo diplomske naloge.

1.1 Motiv

Sistem daljnovodov oskrbuje z elektriko na milijone hiš in podjetij. Električna energija se oddaja preko linijskih prevodnikov. Glede na električno napetost, ki se prevaja po žicah, lahko sistem daljnovodov razdelimo na tri ravni: daljnovodi z napetostjo med 69 in 765 kV, daljnovodi z napetostjo med 34,5 in 69 kV in daljnovodi z napetostjo med 7 in 13 kV, ki skrbijo za distribucijo električne energije do končnih uporabnikov. Zaradi nenadnih izpadov elektrike trpijo ljudje, posledice pa se lahko pokažejo tudi v gospodarstvu in na drugih ravneh povezanih z elektriko. Upravljanje in nadzorovanje električnih koridorjev je zato zelo pomembno. Osredotoča se na identifikacijo morebitne vegetacije, ki lahko povzroči izpad elektrike ali celo požar. Obstaja programska oprema, s katero lahko merimo razdalje med daljnovodom in bližnjo vegetacijo, opozarja nas na prehode daljnovodov preko objektov ... Takšen pristop spremljanja in upravljanja električnih koridorjev zagotavlja varnost, privarčuje porabljen čas za nadzor in je tudi cenovno učinkovit (Jwa, Sohn, Kim, 2009).

Lasersko skeniranje (LS), za katerega se uporablja tudi izraz lidar (angl. light detection and ranging, LIDAR), je relativno nova tehnologija zajema 3D prostorskih podatkov. V splošnem se lasersko skeniranje deli na: aerolasersko skeniranje (ALS, angl. airborne laser scanning), terestrično lasersko skeniranje (TLS, angl. terrestrial laser scanning) in lasersko skeniranje iz kratkih razdalj (angl. short range laser scanning) (Kosmatin Fras, 2009). Podatki, pridobljeni z ALS, so zelo uporabni za nadzorovanje zunanjih konstrukcij, kot so nasipi, cevovodi, železniške proge s svojim žičnim sistemom in visoko napetostni daljnovodi (Vosselman in Mass, 2010). Podatki, pridobljeni s TLS, se, zaradi obsežnosti obravnavanega območja, za take naloge redko uporabijo. Tehnologiji ALS in TLS se razlikujeta tudi v sami implementaciji laserskega sistema na različnih platformah, v načinu kalibriranja sistema, registriranju podatkov, georeferenciranju itd.

Potrebno je omeniti, da se v strokovni literaturi za to tehnologijo uporablja več izrazov: LIDAR, ZLS (zračno lasersko skeniranje), kartiranje LIDAR (angl. LIDAR mapping), zračno lasersko kartiranje (angl. airborne laser mapping) (Bitenc, 2006), oziroma aerolasersko skeniranje (ALS), ki se pogosteje uporablja v Evropi (Kraus in Pfeifer, 2001). Slednjega bomo uporabljali tudi v tej diplomski nalogi. V slovenski strokovni literaturi se zelo pogosto uporablja tudi izraz lidar in njegove izpeljanke (npr. lidarski oblak točk, lidarsko snemanje idr.). Za sam merski sistem se uporabljata še izraza laserski višinomer (angl. laser altimeter) in laserski radar (angl. laser radar) (Bitenc, 2006).

V zadnjih petdesetih letih je napredek v razvoju elektronike, fotonike, računalniškega vida in grafike, omogočil konstrukcijo zanesljivih, visoko ločljivih in natančnih terestričnih ter zračnih laserskih skenerjev. Razvijala se je tudi programska oprema za obdelavo podatkov, ki omogoča učinkovito obdelavo velikega števila točk. Tako se je ta tehnologija začela uporabljati za številne topografske namene, njena uporabnost pa se kaže tudi v okoljskem in industrijskem nadzoru ter v pridobitvi 3D (trirazsežnih) podatkov o kulturni dediščini (Vosselman in Mass, 2010).

Po svetu je lasersko skeniranje med geodetskimi podjetji že dodobra uveljavljena tehnologija. Tudi pri nas, v Sloveniji, vse več podjetij vidi prednosti tega dela daljinskega zaznavanja pred drugimi geodetskimi tehnikami. Le-te pa še vedno uporabimo za georeferenciranje in kontrolo kakovosti podatkov laserskega skeniranja. Podjetja, ki se ukvarjajo z laserskim skeniranjem, so predvsem mlada in ambiciozna ter z natančno opredeljenimi cilji. DFG CONSULTING d.o.o. in FLYCOM d.o.o., od katerih smo pridobili podatke za to diplomsko nalogo, sta eni izmed njih.

Zgoraj navedena dejstva, hiter razvoj, perspektivnost in uporabnost te tehnologije ter moje zanimanje za ta del geodezije so glavni razlogi za obravnavanje samodejnega zajema daljnovidov iz podatkov laserskega skeniranja v moji diplomski nalogi.

1.2 Opredelitev cilja in namena

Naš cilj je izdelati metodologijo in napisati lasten računalniški program za čim bolj samodejen zajem daljnovidov iz podatkov laserskega skeniranja. Poizkušali bomo poiskati izvirne rešitve in se čim manj ozirati na že uveljavljene tehnike, metode in rešitve tovrstne problematike. Namen naše diplomske naloge je tudi primerjava postopkov in rezultatov samodejnega zajema daljnovidov pri različnih vhodnih podatkih. Obravnavali smo štiri primere:

- oblak točk, pridobljen s TLS,
- oblak točk, pridobljen z ALS,
- raster, izdelan iz relativnih višin točk, pridobljenih s TLS,
- raster, izdelan iz relativnih višin točk, pridobljenih z ALS.

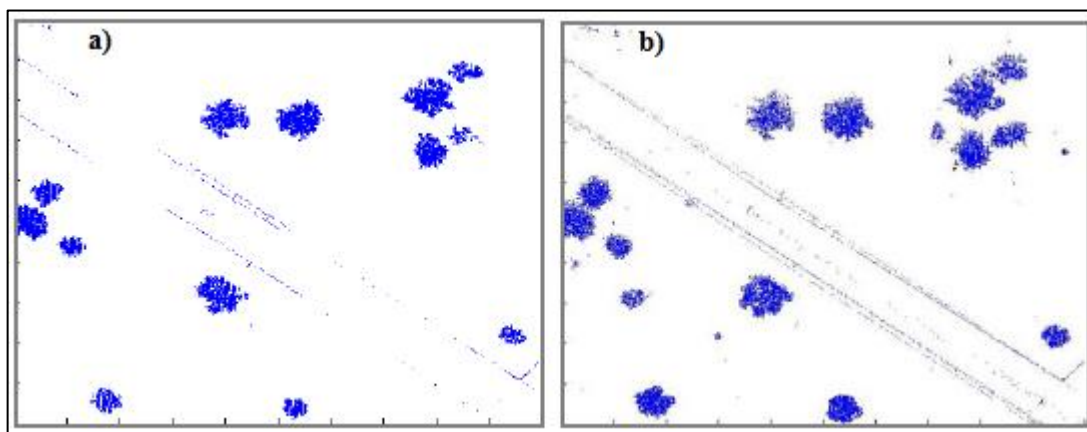
Učinkovitost in uspešnost uporabljenih metod za samodejen zajem daljnovidov bomo ocenili vizualno in s primerjavo ravninskih GK (Gauss-Krügerjevih) koordinat identičnih presečišč daljnovidov. Analizirali bomo vpliv značilnosti tehnologij TLS in ALS ter vpliv predhodne obdelave oblaka točk na kakovost zajetih daljnovidov ter na časovno zaposlenost delovanja programa. Izpostavili bomo prednosti in slabosti samodejnega zajema daljnovidov v oblaku točk in na rastriranih podatkih laserskega skeniranja. V diplomski nalogi ne obravnavamo podrobno posameznih faz obdelave

(poteka kalibracije, georeferenciranja, registriranja in obravnavanje vsake komponente teh dveh sistemov posebej), ker je v strokovni literaturi o tem že veliko napisanega. Na koncu naloge pa bomo nakazali še druge možnosti za izboljšanje našega postopka zajema daljnovidov iz oblaka točk in zajema daljnovidov na rastiranih podatkih oblakov točk, ki bi jih v nadaljnjih raziskavah še lahko preizkusili.

1.3 Pregled sorodnih del

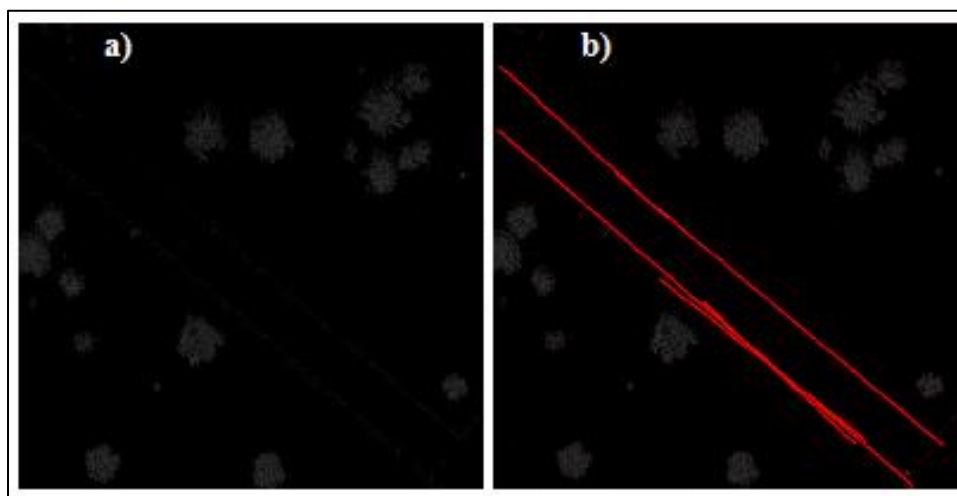
Obstaja veliko člankov o zajemu in modeliranju daljnovidov iz podatkov laserskega skeniranja. Zaznavanje daljnovidov iz lidarskih podatkov lahko razdelimo na dva glavna pristopa. Prvi pristop temelji na modeliranju daljnovidov iz 3D oblaka točk (Melzer in Briese (2004), Clode in Rottensteiner (2005), McLaughlin (2006), Vale in Mota (2007), Jwa, Sohn, Kim (2009), Sohn, Jwa, Kim (2012)), drugi temelji na zajemu daljnovidov iz 2D podob (Yan in sod. (2007), Li in sod. (2009), Liu in sod. (2009)). V tem podpoglavju bomo omenili le nekaj pristopov različnih avtorjev.

Liu in sod. (2009) opisujejo uporabo podatkov o intenziteti ALS za klasifikacijo lidarskih točk na podlagi statističnih analiz. V članku je ocenjena uporaba Hough-ove transformacije za detekcijo daljnovidov in učinkovitost uporabljene metode na podatkih o intenziteti in na višinskih podatkih. Za identifikacijo zelenih objektov v koridorjih daljnovidov so predpostavili, da so talne lidarske točke normalno porazdeljene in da ostale točke rušijo to porazdelitev. Statistično analizo za ločitev talnih točk od netalnih so preizkusili na podatkih o intenziteti in na višinskih podatkih. Slika 1 a) prikazuje rezultate statistične analize na višinskih podatkih in b) na podatkih o intenziteti. Ugotovili so, da je z uporabo statističnih analiz težje ločiti talne točke od netalnih pri višinskih podatkih kot pri podatkih o intenziteti, zato so rezultati iskanja netalnih točk s to analizo boljši pri podatkih o intenziteti.



Slika 1: Rezultati statistične analize (Liu in sod., 2009: 466 str.).

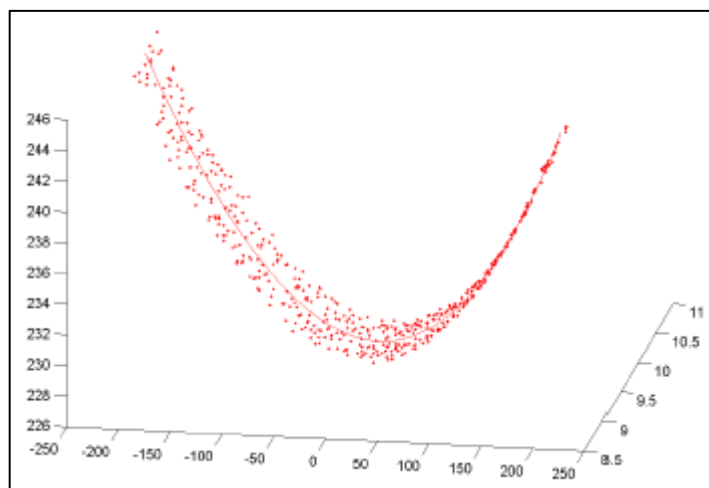
Podobo b) iz slike 1 so pretvorili v sivinsko sliko in preizkusili Hough-ovo transformacijo. Slika 2 a) prikazuje sliko intenzitete, pod b) je prikazana učinkovitost Hough-ove transformacije.



Slika 2: a) slika intenzitete, b) zaznane linije (Liu in sod., 2009: 466 str.).

Li in sod. (2009) so izvedli ekstrakcijo daljnovidov na podobah, ki so bile pridobljene s snemanjem zračnega plovila brez posadke (angl. unmanned aerial vehicles – UAV). T.i. pulse coupled neural filter (PCN filter) je bil razvit za odstranitev šuma in za odkritje robov daljnovidov. Primerjali so učinkovitost PCN filtra s Sobel filtrom in Canny filtrom na originalni podobi in na podobi s prisotnim t.i. poper in sol šumom (angl. pepper and salt noise). V obeh primerih je bil učinkovitejši PCN filter. Predhodno obdelavo podatkov so izvedli s poenostavljenim PCNN (Pulse Coupled Neural Network) modelom. Za zaznavanje daljnovidov na tako pripravljenih podatkih so uporabili izboljššan algoritem Hough-ove transformacije, ki sta ga v svojem delu predstavila Fernandes in Oliveira (2008).

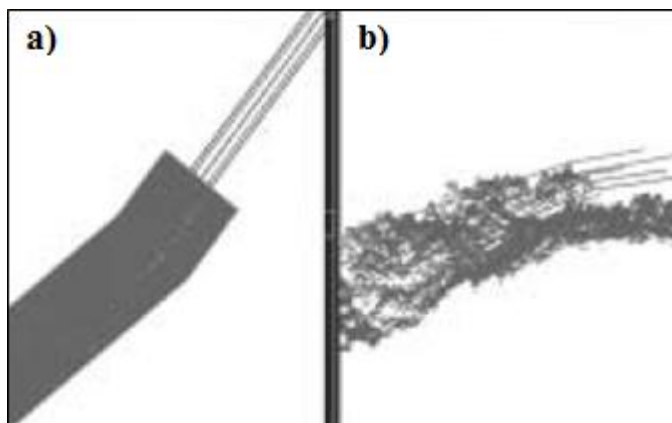
Melzer in Briese (2004) v svojem članku predstavita raziskave o zaznavanju in rekonstrukciji daljnovidov v 3D prostoru iz ALS oblaka točk. Talne lidarske točke sta odstranila z izračunom DMR-ja (digitalni model reliefa, angl. digital terrain model – DTM), koordinatno izhodišče pa sta prestavila približno na sredino skeniranega območja. Vzpostavila sta mrežo z velikostjo celice 1 m x 1 m. Vrednost 1 sta nastavila za neprazne celice in vrednost 0 za prazne. Večina vegetacije in drugih šumov sta odstranila z odstranitvijo celic, ki nimajo sosednjih celic ali pa imajo več kot 3 sosednje celice z vrednostjo 1. Standardna Hough-ova transformacija se na tako pripravljenih podatkih ni obnesla dobro. Nehomogenost daljnovidov in odboji od različnih žic, ki so na različni višinah, povzročajo podobno gostoto kot vegetacija. Ta problem sta rešila z razvojem iterativne Hough-ove transformacije, ki pri vsaki iteraciji odstrani točke, ki so dobile največ glasov. Za določitev 3D modela poteka daljnovoda med dvema nosilcema kablov sta uporabila algoritem RANSAC. Na sliki 3 je prikazan modeliran potek kabla daljnovoda.



Slika 3: Prileganje krivulje v 3D, ki prestavlja daljnovod (Melzer in Briese, 2004: 7 str.).

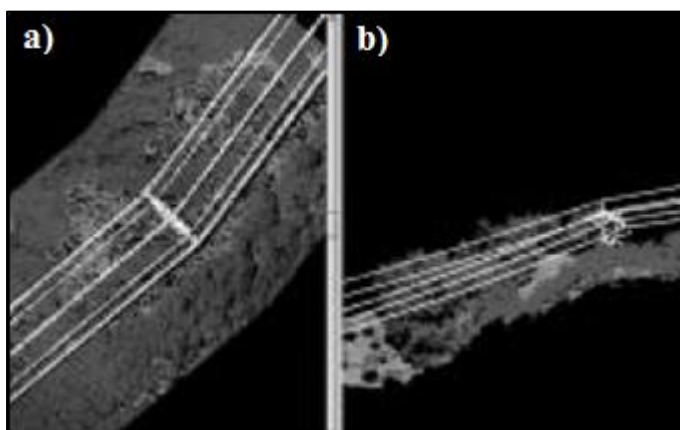
Jwa, Sohn, Kim (2009) v članku opisujejo postopek 3D rekonstrukcije daljnovodov iz lidarskih podatkov, ki temelji na postopku modeliranja krivulje po odsekih. Metoda se imenuje Voxel-based Piece-wise Line Detector (VPLD). Lidarske podatke so porazdelili v celice velikosti 3 m x 3 m x 3 m. Klasifikacijo točk so izvedli na podlagi Hough-ove transformacije, lastnih vrednosti in gostote točk. Z uporabo kompas-linijskega filtra (angl. compass line filter – CLF) so določili začetni orientacijski kot daljnovodov. Na podlagi podobnosti orientacijskega kota so izvedli s statistično analizo približno ekstrakcijo daljnovodov. Za dokončno ekstrakcijo daljnovodov so uporabili izravnavo po metodi najmanjših kvadratov (nelinearno).

V tem podpoglavju želimo omeniti tudi prvi projekt uporabe laserskega skeniranja približno 400 km dolge trase daljnovoda napetosti 400 kV v Sloveniji. Snemanje se je izvedlo v mesecu septembru, leta 2002. Naročnik projekta je bil ELES-Elektro Slovenija. V projekt je bilo vključenih več podjetij. C&G d.o.o. je prevzel celotni projekt, vsi ostali so bili v vlogi podizvajalca. Podjetje FLYCOM je prevzelo logistične naloge in lidarsko snemanje. Iz ALTEX Technology so prišli strokovnjaki za izvajanje meritev in obdelavo podatkov. 2B geoinformatika je priskrbela podatke za navigacijo, terenske GPS meritve in potrebne preračune za transformacijo v državni KS (koordinatni sistem). Terenski del projekta je bil izveden v treh dneh. Prvi dan se je izvedel let nad traso Ljubljana-Žalec (50 km). Drugi dan se je izvedlo snemanje trase Ravne (avstrijska meja)-Žalec-Kidričevo-Maribor-Dobova (hrvaška meja). Tretji dan se je izvedel let nad traso Ljubljana-Divača (italijanska meja) in Kostanjevica na Krasu-Podgrad (hrvaška meja). Vsak večer po zaključenem poletu so strokovnjaki iz podjetja ALTEX Technology izvedli predhodno procesiranje meritev. Primer surovih podatkov prikazuje slika 4. Pod a) je viden tloris, pod b) pa naris skeniranih točk.



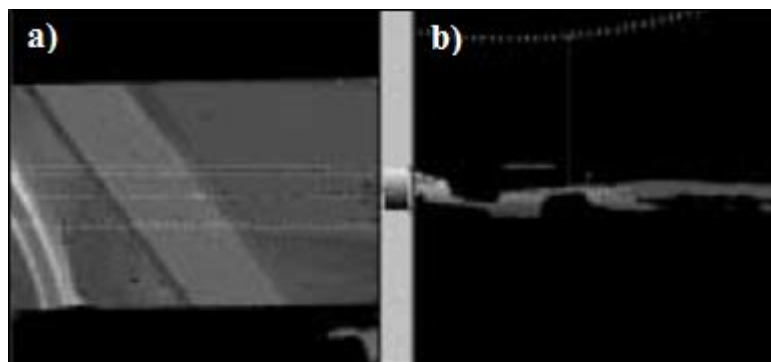
Slika 4: »Surovi« podatki (Bilc, 2002: 409 str.).

Štiri dni po zaključku snemanja so bili naročniku predstavljeni prvi rezultati meritev, ki so bili že klasificirani (slika 5). Na sliki so že vidni objekti, vegetacija in teren. Prepoznamo lahko žice in stebre daljnovodov. S posebnim programom je mogoče meriti razdalje od daljnovodov do objektov, razdalje med žicami in podobno.



Slika 5: Osnovna tematska klasifikacija (Bilc, 2002: 409 str.).

Mesec dni kasneje so naročniku predali tematsko obdelane podatke za prvih 50 km trase. Naročnik je dobil zraven koordinat točk tudi licenco za uporabo programa, s katerim so lahko opravljali določene analize in izdelovali različne prikaze. Na sliki 6 je primer takšnih prikazov. Pod a) je viden floris, pod b) pa naris poteka daljnovoda čez avtocesto. Naročniku je bil tudi posredovan seznam koordinat stebrov z višinami pritrditvenih mest, seznam križanj z objekti z odmiki ter seznam položajev, na katerih je odmik vegetacije manjši od 10 m (Bilc, 2002).



Slika 6: Prikaz poteka daljnovoda čez avtocesto (Bilc, 2002: 409 str.).

1.4 Struktura naloge

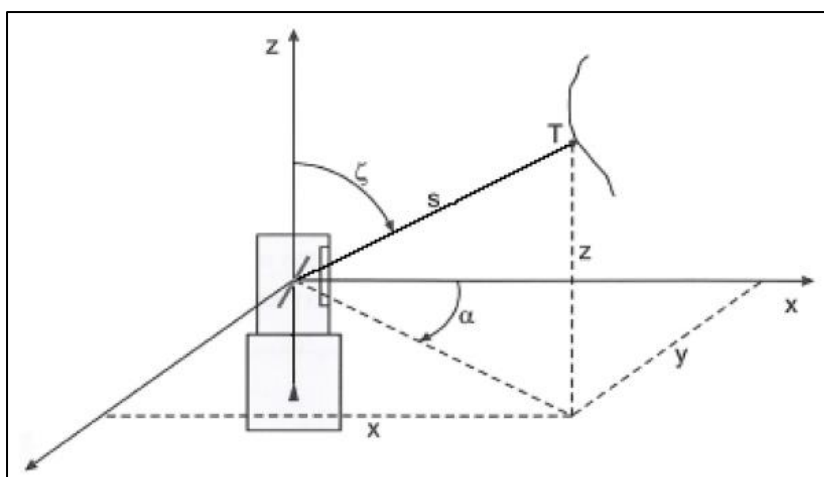
Diplomska naloga je sestavljena iz osmih glavnih poglavij. Prvo poglavje obsega uvod, v katerem so predstavljeni motivi, cilj in namen diplomske naloge, pregled sorodnih del in struktura diplomske naloge. V drugem, tretjem in četrtem poglavju so predstavljena teoretična izhodišča, ki so pomembna za razumevanje obravnavane tematike. V drugem in tretjem poglavju so izpostavljene lastnosti TLS in ALS, ki so pomembne za oceno kakovosti oblaka točk. Četrto poglavje obsega faze obdelave podatkov. Predstavljeni so postopki filtracije, klasifikacije in segmentacije oblaka točk. Natančneje je opisan algoritem Hough-ove transformacije. V petem poglavju predstavimo uporabljene podatke in navedemo njihovo lokacijo. Podane so specifikacije uporabljenih merskih sistemov v primeru aerolaserskega skeniranja in terestričnega laserskega skeniranja. Opisana je tudi uporabljena programska oprema. V šestem poglavju je predstavljen celoten postopek samodejnega zajema daljnovidov, vse od predhodne obdelave podatkov do končnih rezultatov. Sedmo poglavje obsega analizo končnih rezultatov in diskusijo. V zadnjem (osmem poglavju) smo povzeli ugotovitve in predstavili možnosti za nadaljnje delo. Na koncu diplomske naloge so navedeni viri in priloga.

2 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE

Prvi laserski skenerji so prišli na trg okoli leta 1996. Težko je natančno raziskati, kateri proizvajalci so se najprej pojavili na tržišču. Zagotovo pa lahko trdimo, da sta eni od pionirskih podjetij Riegl iz Avstrije in Cyrax iz Združenih držav Amerike na področju terestričnih laserskih skenerjev (Staiger, 2011).

2.1 Princip terestričnega laserskega skeniranja

Glavni namen terestričnega laserskega skeniranja je pridobitev oz. določitev 3D koordinat točk skeniranega objekta. Terestrični laserski skenerji uporabljajo valovno dolžino med 500 nm in 1.500 nm (Pfeifer in Briese, 2007). Po navadi se beleži tudi amplituda odbitega impulza (tj. intenziteta). Za določitev dolžine se uporabljata impulzni in fazni način, v primerjavi z ALS, kjer je dominanten impulzni način določitev dolžin. Medtem ko je pri ALS potrebna le ena smer skeniranja (druga je določena s smerjo leta letala), je potrebno pri terestričnem laserskem skeniranju beležiti tako horizontalne kot vertikalne kote. Na sliki 7 je razvidno delovanje terestričnega laserskega skenerja z enim zrcalom. Sicer je določitev lokalnih kartezičnih koordinat točke enaka tako za skenerje z enim kot z dvema zrcalom, ki odklanjata laserske žarke v horizontalni in vertikalni smeri. V sistemu z enim zrcalom je horizontalna smer definirana z rotacijo inštrumenta okoli vertikalne osi, velikost vertikalnega kota oz. zenitne razdalje (ζ) pa določa odklon zrcala. Ko inštrument zajame celoten vertikalni profil, se zavrti za majhen kot (α) in postopek se ponovi. α , ζ in s predstavljajo polarne koordinate določenih točk.



Slika 7: Povezava med polarnimi in 3D lokalnimi kartezičnimi koordinatami točke T (Kraus, 2004, cit. po Grilc 2004).

Lokalne kartezične koordinate posamezne točke (Kraus, 2004, cit. po Grilc 2004):

$$x = s \sin \zeta \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = s \sin \zeta \sin \alpha \quad (2)$$

$$z = s \cos \zeta \quad (3)$$

Kjer so:

x, y, z : lokalne kartezične koordinate,

s : poševna dolžine,

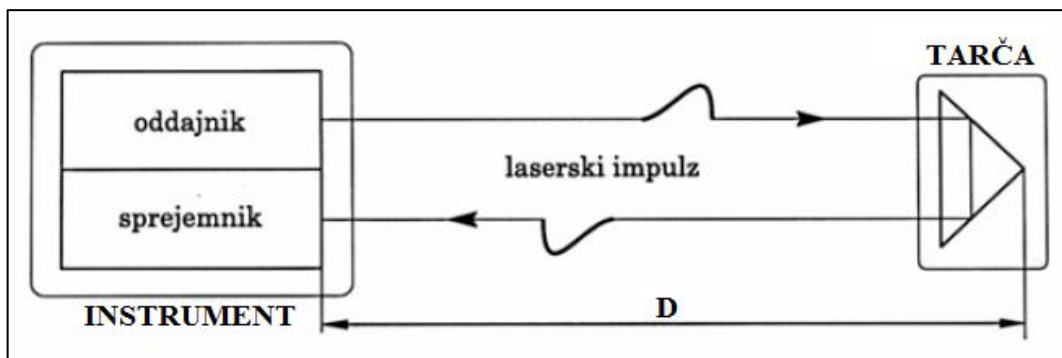
α : horizontalni kot zasuka okoli vertikalne osi,

ζ : zenitna razdalja.

Tako za »impulzne« kot tudi za »fazne« laserske skenerje je določitev kartezičnih koordinat točk enak. Ta je drugačna pri uporabi triangulacijskih skenerjev. Določitev kartezični koordinat točk s triangulacijskim skenerjem je predstavljena v Grilc (2007).

2.2 Načini merjenja razdalj

Za impulzni način merjenja razdalj se v angleškem jeziku uporablja izraz »time of flight« (TOF).



Slika 8: Osnovni princip impulznega načina merjenja razdalj (povzeto po Kogoj, 2005: 16 str.).

Razdalja, določena z impulznimi načinom, je odvisna od časa potovanja generirane svetlobe v obliki impulza (glej sliko 8):

$$D = \frac{c\Delta t}{2} \quad (4)$$

Kjer so:

D : razdalja med laserskim skenerjem in tarčo,

c : hitrost svetlobe v sredstvu,

Δt : čas potovanja impulza.

Izmerjen čas dejansko pripada dvakratni poti žarka (tja in nazaj), zato ga moramo razpoloviti (Kogoj, 2005).

Poznamo še fazni način merjenja razdalj, ki je opisan v Kogoj (2005) in triangulacijske skenerje, ki so bolj primerni za skeniranje bližnje okolice oz. objektov.

2.3 Parametri skeniranja

Potek skeniranja je različen za terestrične skenerje in tiste, ki so implementirani na letala ali kakšno drugo plovilo oz. vozilo. ALS in MLS (angl. mobile laser system) vsebujeta podobne senzorske sisteme, ki omogočajo dokončno določitev 3D koordinat točk. Med tem ko je stacionarni terestrični laserski skener nekoliko bolj podoben klasičnim geodetskim inštrumentom (npr. total station).

Velikost odtisa laserskega žarka je pričakovano manjša pri terestričnih laserskih skenerjih v primerjavi z aerolaserskim sistemom. Terestrični laserski skenerji zato omogočajo detajlnejšo predstavitev površja.

2.3.1 Velikost odtisa laserskega žarka

Velikost odtisa laserskega žarka pri terestričnem laserskem skeniranju lahko izračunamo po enačbi (5). Enačbo sestavlja konstantni in linearni člen. Uporaba enačbe (5) je v pomoč za določitev stojišča skenerja, glede na v projektu zahtevano ločljivost.

$$D_f = (BD d) + D_i \quad (5)$$

Kjer so:

D_f : končni premer laserskega žarka,

BD : divergenca laserskega žarka,

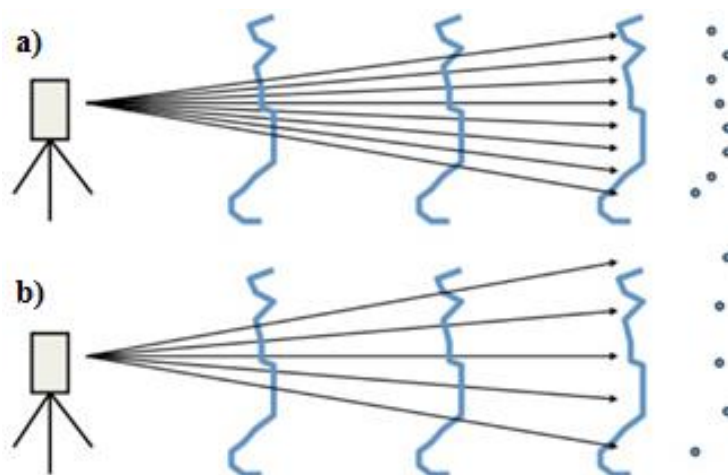
d : dolžina potovanja žarka,

D_i : začetni premer laserskega žarka.

Za terestrični laserski skener Riegl VZ-400 znaša divergenca 0,35 mrad, začetni premer laserskega žarka je 0,007 m (Carr, Douglas, Crosby, 2013). Pri skeniranju na razdalji 100 m je torej premer laserskega žarka 4,2 cm.

2.3.2 Kotna ločljivost

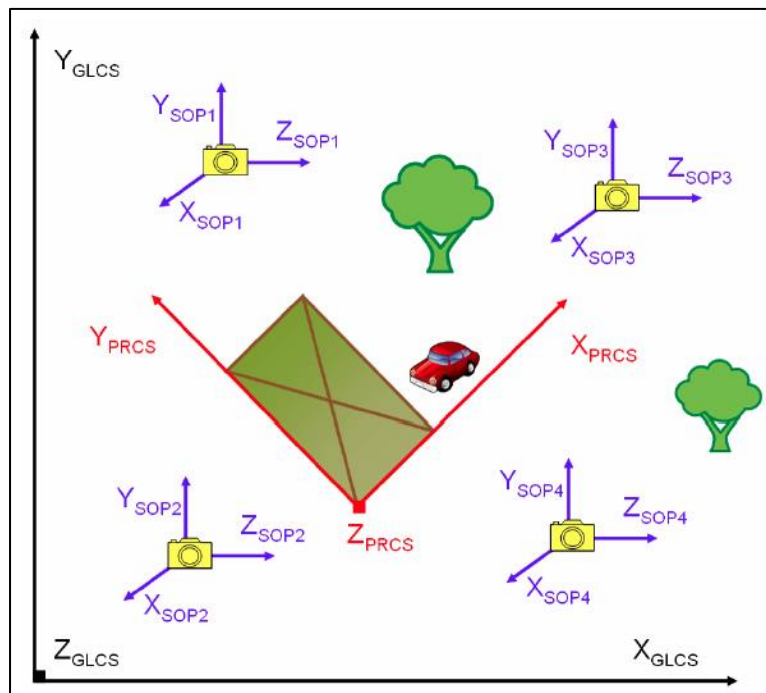
Kotna ločljivost (angl. angular resolution, znana tudi kot »spot spacing«) vpliva na gostoto točk in posredno na stopnjo zaznanega detajla. Velikost prostora med posnetimi točkami je odvisna od kotnega koraka laserja in razdalje do tarče. Ta prostor in s tem stopnja detajla, ki ga z zajemom zaznamo, se lahko poveča ali zmanjša z nastavitvijo koraka odklona laserskega žarka v programu skenerja. Kotni korak se lahko nastavi tako za horizontalno kot za vertikalno smer. Glede na želene rezultate nastavimo primerno kotno ločljivost. S spreminjanem tega parametra skeniranja vplivamo na količino zajetih točk in na čas obdelave podatkov. Na sliki 9 pod a) je predstavljena boljša kotna ločljivost, pod b) slabša kotna ločljivost (Carr, Douglas, Crosby, 2013).



Slika 9: Primera dveh različni kotnih ločljivosti (Carr, Douglas, Crosby, 2013: 7 str.).

2.4 Koordinatni sistemi, registracija in georeferenciranje

Pri TLS uporabljamo več koordinatnih sistemov. Slika 10 ponazarja koordinatne sisteme in njihovo medsebojno vzpostavitev. SOP_{1-4} predstavljajo skenerjev lastni koordinatni sistem. Ti se registrirajo v projektnem koordinatnem sistemu PRCS (angl. project coordinate system). GLCS (angl. global coordinate system) predstavlja globalni koordinatni sistem.



Slika 10: Predstavitev koordinatnih sistemov pri TLS (Carr, Douglas, Crosby, 2004: 11 str.).

V skenerjevem lastnem KS je določen prvi niz koordinat (enačbe 1-3). Definiran je s skenerjevo rotacijsko osjo in z referenčno osjo (npr. azimut = 0°). Projektni KS je lokalni KS, ki ima po navadi izhodišče v KS prvega skenograma. Vsi ostali se transformirajo glede na KS prvega skenograma. Projektni KS se umesti v globalni KS, po navadi je to državni referenčni KS. Skenerji imajo lahko implementiran fotoaparati. V tem primeru imamo opravka še s KS fotoaparata.

Med različnimi KS je potrebno vzpostaviti povezavo, ki jo po navadi opisuje 3D Evklidova transformacija s parametri: 3-je premiki in 3 rotacije (Pfeifer in Briese, 2007). To omogoča transformacijo koordinat točk v želen koordinatni sistem.

Postopek, pri katerem skenerjeve lastne KS iz različnih stojišč transformiramo v enoten KS (projektni KS), imenujemo registracija oz. relativna orientacija. Poznamo dve metodi, ki se lahko uporabljata za relativno orientacijo. Prva je podobna relativni orientaciji fotografij z uporabo veznih točk. Druga metoda ne zahteva identičnih točk. Skenogrami se registrirajo z eno izmed metod ICP (ang. iterative closest point), pri tem pa morajo biti približne vrednosti parametrov dovolj kakovostno določene. Postopek je popolnoma avtomatiziran. Opravš (2008) je opisal več načinov izvedbe registracije oblaka točk.

Po navadi želimo imeti 3D koordinate točk v referenčnem državnem koordinatnem sistemu. Ta postopek imenujemo georeferenciranje, ki se lahko izvede sočasno z relativno orientacijo skenogramov (če imamo koordinate veznih točk v globalnem KS), lahko pa se izvede direktno

georeferenciranje. Pri direktnem georeferenciranju transformiramo koordinate točk iz skenerjevega lastnega KS v globalni KS.

2.5 Natančnost terestričnih laserskih skenerjev

Na končno natančnost 3D koordinat točk, posnetih s TLS, vpliva več dejavnikov: natančnost merjenja razdalj, natančnost določitve smeri laserskega žarka, natančnost transformacij med koordinatnimi sistemi, topografija terena, geometrične in fizikalne lastnosti tarče ... Sistem mora biti pred uporabo kalibriran. Terestrični laserski skenerji so po konstrukcijskem principu podobni teodolitom in elektronskim tahimetrom. Instrumentalni pogreški kot tudi kotna ločljivost in dolžinska natančnost sistema se lahko določi. Večina proizvajalcev navede dolžinsko natančnost sistema, namesto celotne natančnosti sistema, ki je odvisna od natančnosti različnih specifikacij (doseg, zrcala, temperatura ...) (Fröhlich in Mettenleiter, 2004). Za impulzne laserske skenerje je natančnost in točnost izmerjenih razdalj v rangi 1 cm ali boljše, odvisno od merjene razdalje. Za fazne laserske skenerje je natančnost in točnost izmerjenih razdalj nekaj mm (IAEG, 2010). S terestričnim laserskim skenerjem (impulzni način merjenja razdalj) in z direktnim georeferenciranjem z GPS opazovanji se lahko doseže natančnost za oblak točk, ki je boljše od 1 cm (v pozicijskem in višinskem smislu), na razdalji do 70 m (Reshetyuk, 2010). Več o natančnosti terestričnih laserskih skenerjev si lahko preberete v Opravš (2008).

2.6 Uporaba podatkov terestričnega laserskega skeniranja

Uporaba podatkov terestričnega laserskega skeniranja je zelo raznolika. Naštete so le nekatere možnosti uporabe le-teh:

- podrobni mestni modeli (modeli stavb z jasno določenimi strehami in fasadami),
- skeniranje in izdelava 3D modelov objektov kulturne dediščine za morebitno rekonstrukcijo le-teh,
- opazovanje plazov,
- opazovanje deformacij jezov, objektov,
- 3D modeliranje stanj odlagališč odpadkov, odkopov,
- izdelava geodetskih načrtov,
- izdelava 3D modelov različnih predmetov,
- uporaba v forenziki.

3 AEROLASERSKO SKENIRANJE

V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je bil sistem ALS zmožen izmeriti dolžino od zrakoplova do tarč na zemeljskem površju z natančnostjo 1 m. Kljub temu se ta tehnologija takrat še ni množično uporabljala v topografskem kartiranju, predvsem zaradi dveh razlogov. Prvi je nezmožnost natančne določitve vertikalnega položaja zrakoplova. Drugi je nepoznavanje horizontalnega položaja odtisa laserskega žarka. Z razvojem posameznih komponent ALS se je natančnost in uporabnost tako pridobljenih podatkov drastično spremenila (Vosselman in Mass, 2010).

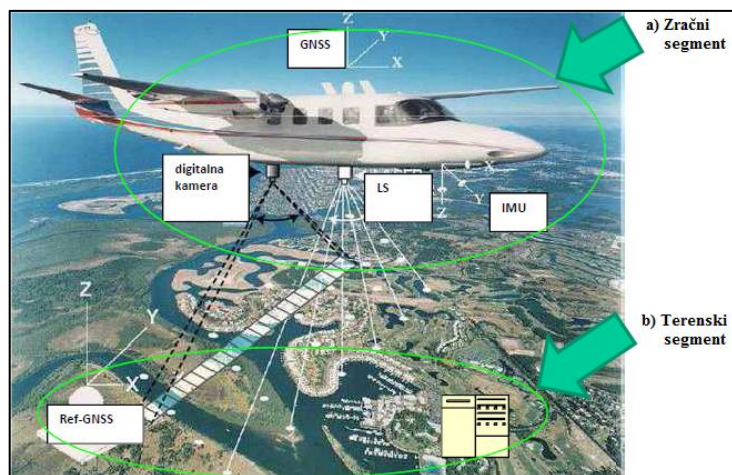
3.1 Princip aerolaserskega skeniranja

Laserski skenerji spadajo med aktivne senzorje, ki za snemanje uporabljajo lastni vir EMV (elektromagnetnega valovanja) oziroma energije. Prednost aktivnih senzorjev pred pasivnimi je ta, da lahko izvajamo snemanje tudi ponoči (Oštir, 2006).

ALS se opravlja iz zrakoplova (letalo, helikopter ...). Sistem lidarskega snemanja je sestavljen iz zračnega in terenskega segmenta. Zračni segment sestavlja plovilo, laserski skener, sistem za pozicioniranje in orientacijo (GNSS (angl. global navigation satellite system, globalni navigacijski satelitski sistem) in IMU (angl. inertial measurement unit, inercialna merska naprava)). Laserski skener se deli na laserski razdaljemer (angl. laser ranging unit), optično mehanski skener (angl. opto-mechanical scanning device) in napravo za nadzor in beleženje podatkov (angl. controlling and data sampling unit). Senzorski sistemi morajo biti natančno časovno sinhronizirani in kalibrirani (vsak zase in skupaj kot celota).

Po navadi je na plovilo implementirana tudi digitalna kamera, s katero se izvaja snemanje terena istočasno z laserskim skeniranjem. Fotografije predstavljajo pomoč pri interpretaciji pomena objektov. Optimalna pozicija za digitalno kamero je na skenerjevi montažni plošči. Tako se lahko že obstoječa IMU registracija uporabi za georeferenciranje posnetkov. V nasprotnem primeru, ko ni prostora za takšno namestitev kamere in laserskega skenerja na isto mersko platformo, pa je potrebna ločena naprava IMU.

Terenski segment sestavljajo referenčna GNSS postaja in programska ter strojna oprema, ki je potrebna za obdelovanje podatkov po letalni misiji (Kosmatin Fras, 2009). Na sliki 11 sta jasno ločena zračni in terenski segment.



Slika 11: Zračni in terenski segment aerolaserskega skeniranja (povzeto po Kosmatin Fras, 2009: 2 str.).

Uporablja se diferencialna metoda GNSS, da se zmanjšajo atmosferski vplivi, ki slabšajo natančnost določitve položaja. Ta metoda zagotavlja decimetrsko natančnost. Razdalja med plovilom in referenčno GNSS postajo na Zemeljskem površju ne sme presegati 30 kilometrov. Posamezne države imajo svoje omrežje permanentnih postaj (v Sloveniji je to omrežje SIGNAL), tako da ni potrebe po vzpostavitvi svoje bazne postaje.

Zraven zgoraj naštetih komponent aerolaserskega skeniranja Vosselman in Mass (2010) omenjata še prenosni računalnik, ki služi za komunikacijo z napravo za nadzor in beleženje podatkov, za nastavitev parametrov misije in za spremljanje »sistemskega obnašanja« med meritvami. Omenjen je še sistem za opravljanje letala za izris planirane poti leta misije.

Osnovni namen aerolaserskega skeniranja je pridobitev 3D koordinat točk. Umestitev točk v referenčni prostor imenujemo georeferenciranje. Poznamo več postopkov georeferenciranja. Najenostavnejša metoda georeferenciranja je direktno georeferenciranje, za doseganje večje natančnosti pa je nujno uporabiti oslonilne točke.

3.2 Laserski razdaljemer

Laserski razdaljemer, ki meri poševno razdaljo med senzorjem in z laserjem osvetljenim površjem, sestavljajo laserski oddajnik, elektro optični sprejemnik in elektronska razdaljna enota (angl. ranging electronics box) (Kosmatin Fras, 2009). Večina ALS sistemov uporablja impulzni način merjenja razdalj (opisan v podpoglavju 2.2) (Pfeifer in Briese, 2007). Obstajajo še zvezno valovni (fazni) razdaljemerji (analogija z elektronskimi tahimetri). Generalno gledano je značilno za zvezno valovne sisteme, da imajo veliko hitrost snemanja (več kot 1 milijon 3D točk na sekundo), vendar so bolj primerni za krajše razdalje (manj kot 100 metrov). Sistemi, ki temeljijo na impulznem merjenju

dolžin, imajo sicer manjšo hitrost skeniranja (manj kot 50.000 točk na sekundo za terestrične skenerje in manj kot 200.000 točk na sekundo za aerosolarske skenerje), vendar je njihov doseg večji (npr. 800 m) (Vosselman in Mass, 2010).

Natančnost impulznega načina merjenja razdalj je odvisna od natančnosti beleženja časa potovanja žarka. Pri faznem oz. zvezno moduliranem načinu merjenja razdalj pa je natančnost odvisna od faze ločljivosti in valovne dolžine valovanja (Kosmatin Fras, 2009). Elektromagnetno valovanje, ki se uporablja za tovrstne meritve, sodi med vidni in bližnji infrardeči del spektra EMV (za komercialne aerosolarske sisteme se uporabljajo valovne dolžine med 800 nm in 1550 nm) (Vosselman in Mass, 2010).

3.3 Fizikalne lastnosti laserskega žarka

3.3.1 Dolžinska ločljivost

Časovna dolžina trajanja oddanega impulza $\Delta\tau$ vpliva na zmožnost razločevanja med različnimi tarčami. Recimo, da sta dve točki med seboj oddaljeni za ρ , potem sta dva zaporedna odboja ločena s časovnim zamikom Δt :

$$\Delta t = \frac{2\rho}{v_g} \quad (6)$$

V enačbi (6) predstavlja v_g grupno hitrost svetlobe, ki je odvisna od efektivne valovne dolžine in laboratorijsko določenih konstant.

Če želimo, da zaznamo z enim impulzom obe tarči, je potrebno, da je $\Delta\tau < \Delta t$. Najmanjšo dolžino $\Delta\rho$ med dvema zaporednima tarčama, ki ju še lahko jasno ločimo na podlagi istega impulza imenujemo dolžinska ločljivost, ki je dana z enačbo (7) (Wagner, 2005):

$$\Delta\rho = \frac{v_g \Delta\tau}{2} \quad (7)$$

Za $\Delta\tau = 10$ ns je dolžinska ločljivost približno 1,5 m.

3.3.2 Velikost odtisa laserskega žarka

Kadar svetloba naleti na ozke odprtine, se ukloni. Temu pojavu pravimo uklon ali difrakcija (angl. diffraction). Zaradi te lastnosti govorimo o divergenci laserskega žarka. To je kot, ki opisuje

razširjanje laserskega žarka v obliki stožca pri svojem potovanju skozi prostor. Pri tem se zmanjšuje tudi njegova jakost. Odtis (angl. footprint) laserskega žarka na površju je lahko okrogle ali eliptične oblike, odvisno od vpadnega kota in od oblike oz. nagnjenosti terena. Velikost odtisa je odvisna od višine leta in od velikosti odprtine na laserju. Ker je teren v splošnem razgiban, sprejeti signal predstavlja povprečje mešanice odbojev znotraj odtisa laserskega žarka (Kosmatin Fras, 2009). Velikost odtisa laserskega žarka pod vpadnim kotom 0° se izračuna z enačbo (8) (Vosselman in Mass, 2010):

$$D_s = 2h \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (8)$$

Kjer so:

- D_s : premer odtisa laserskega žarka,
- h : višina leta,
- γ : divergenca laserskega žarka.

Divergenco laserskega žarka lahko približno opišemo z enačbo (9) (Wagner, 2005). Za ALS sistem je določena s strani proizvajalca laserskega skenerja. Divergenca laserskega žarka je običajno od 0,1 do 1,0 mrad.

$$\beta \approx \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

Kjer so:

- β : aproksimirana divergenca laserskega žarka,
- λ : valovna dolžina laserskega žarka,
- d : premer reže.

Z upoštevanjem vpadnega kota skeniranja se velikost odtisa laserskega žarka izračuna z enačbo (10).

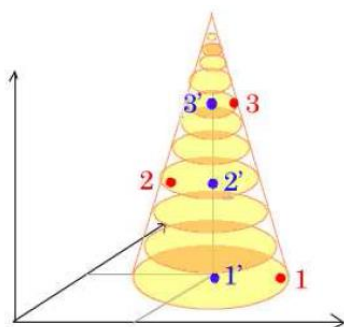
$$D_s = \frac{D}{\cos(\theta)} \gamma \quad (10)$$

Kjer so:

- D_s : velikost odtisa laserskega žarka,
- D : razdalja med laserskim skenerjem in tarčo,
- θ : vpadni kot,
- γ : divergenca laserskega žarka, določena s strani proizvajalca.

Pri $\gamma = 1$ mrad, $h = 2000$ m, žarek je oddan v smeri nadira ($\theta = 0^\circ$), je premer odtisa laserskega žarka na vodoravni podlagi 2 m, ob vpadnem kotu skeniranja 20° in izmerjeni razdalji laserski skener – tarča pa je 2,13 m (Wagner, 2005).

Na sliki 12 je predstavljen vpliv divergence žarka na lokacijo tarč. Vse tarče, ki ležijo znotraj enega odtisa žarka, imajo določen položaj središča stožca. Točke 1, 2, 3 prikazujejo dejansko lokacijo tarč znotraj odtisa žarka. Točke 1', 2', 3' pa prikazujejo določen položaj tarč v središču odtisa. Napaka položaja je v velikosti polmera laserskega žarka (Švab Lenarčič, 2009).



Slika 12: Vpliv divergence na položaj tarč (Švab Lenarčič, 2009: 52 str.).

Širina skeniranega pasu se izračuna po enačbi (11) (Vosselman in Mass, 2010):

$$sw = 2h \tan\left(\frac{\sigma_{max}}{2}\right) \quad (11)$$

Kjer so:

sw: širina pasu skeniranja,

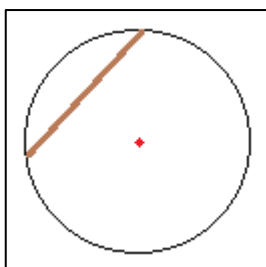
σ_{max} : največji kot skeniranja.

Širina skeniranega pasu bo znašala 574 m v primeru višine leta 1000 m in maksimalnega kota skeniranja 32° . Po navadi se snemanja izvajajo v več pasovih, ki se med seboj v prečni smeri malo prekrivajo. Izjema je snemanje koridorjev.

Za organizacijo letalne misije je potrebno poznati tudi želeno gostoto točk, ki se izraža kot število točk na m^2 . Gostota točk je odvisna od frekvence oddajanja impulzov (PRF - angl. pulse repetition frequency ali PRR – angl. pulse repetition rate), hitrosti zajema skenirnih linij (angl. scan rate), od hitrosti letenja in od višine snemanja (Kosmatin Fras, 2009).

3.3.3 Odboj na linijskih tarčah

Pri linijskih tarčah je vpliv divergence laserskega žarka na položaj izmerjenih točk podoben kot pri točkovnih tarčah, ki je bil predstavljen v podpoglavju 3.3.2 (slika 12). Koliko bodo točke razpršene okoli dejanskega poteka linijske tarče (npr. daljnovoda) je odvisno od premera odtisa laserskega žarka. Tako lahko rečemo, da bodo točke razpršene na vsako stran daljnovoda v rangju polmera odtisa laserskega žarka. Kajti položaj tarče, ki je še znotraj odtisa laserskega žarka, se določi za središče odtisa laserskega žarka. Na sliki 13 je predstavljen dejanski potek linijske tarče znotraj odtisa laserskega žarka (rjava črta) in položaj točke (rdeča barva), določen pri skeniranju linijskih tarč.



Slika 13: Določitev položaja odboja na linijski tarči.

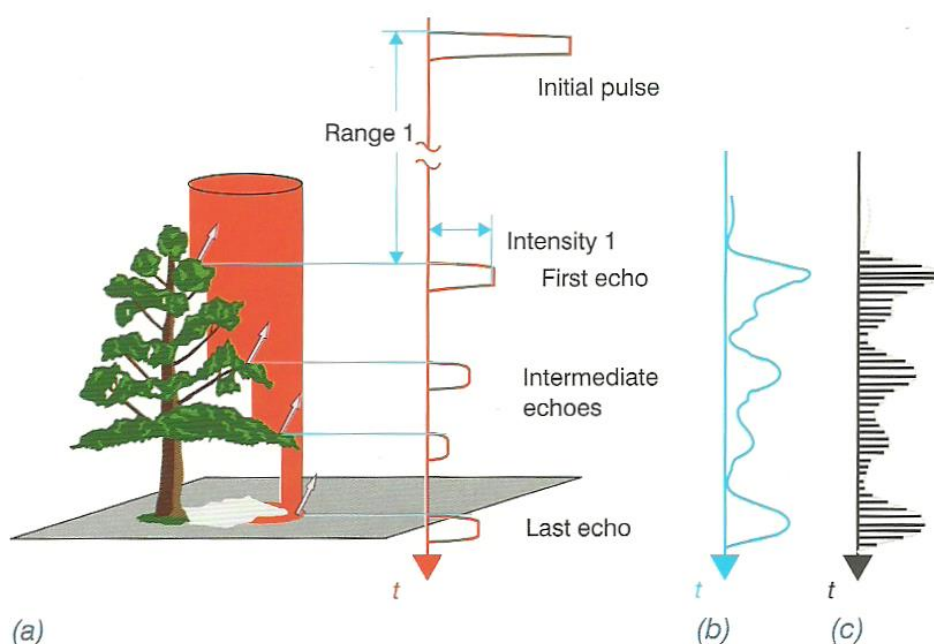
3.4 Beleženje zaporednih odbojev

Lasersko skeniranje ima prednost pred letalskim snemanjem z digitalno ali analogno kamero zaradi delnega prodiranja laserskega žarka skozi vegetacijo (del laserskega žarka lahko najde prosto pot skozi vegetacijo) in večkratnega odboja le-tega. Po navadi se beleži prvi in zadnji odboj pa tudi vmesni odboji. Koliko odbojev bo laserski sistem uspel zaznati je odvisno od tehničnih zmogljivosti laserskega sistema. Žarek ne more prodirati skozi material (npr. listje na krošnjah dreves), zato je potrebno izbrati primeren čas snemanja. Potrebno je biti pozoren tudi na konfiguracijo terena.

Večkratni odboji so v veliko pomoč pri filtriranju podatkov. Tako prvi odboj po vsej verjetnosti predstavlja vrh vegetacije, strehe ... Izmed zadnjih odbojev določimo točke, ki predstavljajo tla (Kosmatin-Fras, 2009). Zaradi zgoraj naštetih lastnosti velja, da lahko iz lidarskih podatkov izdelamo bistveno natančnejši digitalni model reliefa (DMR) v primerjavi z ustaljenimi fotogrametričnimi metodami.

Napredek v sposobnosti interpretacije pridobljenih podatkov predstavljajo najnovejši laserski sistemi, ki imajo implementirano polnovalovno tehnologijo (angl. full-wave). Prednost te tehnologije pred diskretnim beleženjem odbitih impulzov je zmožnost digitalizacije vrnjenega impulza z zelo visoko resolucijo (npr. 1 GHz). Takšen način ponuja več informaciji o površju, ki je osvetljeno z laserskim

žarkom. Digitaliziran odbit žarek od strehe bo tako nekoliko bolj raztegnjen kot žarek odbit od ravnih tal. Tako se v vertikalnem profilu prikažejo karakteristike površja oz. objektov, ki jih snemamo. Problem tega sistema je velika količina pridobljenih podatkov. V povezavi s tem je potrebno imeti večjo kapaciteto enote za shranjevanje. Podatki pa se obdelujejo dlje časa (Kosmatin-Fras, 2009). Sistemi, ki podpirajo polnovalovno tehnologijo, omogočajo intervale digitalizacije med 0,5 ns in 1 ns, kar pomeni v dolžinskih enotah med 0,075 m in 0,15 m. Pri diskretnem beleženju odbojev bodo lahko posamezni objekti zaznani, kadar bo med njimi večja razdalja od polovice širine impulza. Za širino impulza 5 ns je to dolžina 0,75 m (Vosselman in Mass, 2010). Slika 14 prestavlja diskretni način in polnovalovni način beleženja odbitih laserskih žarkov od različnih delov drevesa in tal.



Slika 14: Večkratni odboj in polnovalovni način beleženja impulzov: (a) diskretni način, (b) polnovalovni način, (c) digitalizacija polnovalovnega načina (Vosselman in Mass, 2010: 29 str.).

3.5 Natančnost 3D koordinat

Na pozicijsko in višinsko natančnost lidarskih točk vpliva več dejavnikov. Glavni izvor napak, ki zmanjšujejo natančnost, so:

- napake, zaradi napačne kalibracije GNSS, IMU in laserskega skenerja,
- napake, zaradi omejene natančnosti vzpostavitve letalske poti,
- napake, zaradi kompleksnosti tarč (nagnjen teren se odraža tako v napakah določitve položaja kot višine),
- napake, ki imajo izvor v večkratnih odbojih impulza,
- napake v transformacijah koordinat med koordinatnimi sistemi.

Standardna pozicijska natančnost koordinat izmerjenih točk je od 0,2 do 1 m, standardna višinska natančnost pa je od 0,05 do 0,2 m (višina leta do 2000 m) (Vosselman in Mass, 2010). Več o natančnosti 3D koordinat lidarskih točk si lahko preberete v poglavju 3.3 v Bitenc (2006).

Kljub temu, da je sistem umerjen, pride na območjih prekrivanja pasov do manjših ali večjih višinskih odstopanj. Za odpravo teh odstopanj se izvede postopek izravnave pasov (angl. strip adjustment).

3.6 Uporaba podatkov aerolaserskega skeniranja

Najpogosteje se podatki aerolaserskega skeniranja uporabijo za:

- kartiranje koridorjev, kot so ceste, železniške proge, nasipi, vodotoki,
- kartiranje daljnovidov v povezavi z oddaljenostjo od tal oz. dreves,
- izdelavo DMR (digitalni moder reliefa) v gozdu; za planiranje cest in poti v gozdu,
- spremljanje obalnih predelov,
- spremljanje poplavnih območij, izračune volumnov v odprtih rudnikih, pri načrtovanju in modeliranju cest,
- izdelavo DMR in DMP (digitalni model površine) v urbanih območjih, ekstrakcijo stavb, izdelavo modelov mest za urbano planiranje, za planiranje širjenja hrupa in onesnaževanja,
- kartiranje za namene ocenjevanja škode po katastrofalnih nesrečah (hurikani, potresi ...)
- spremljanje snežnih in ledenih površin, vključno z spremljanjem ledenikov,
- spremljanje mokrišč,
- spremljanje gozdne biomase, višine dreves, gostote dreves; določevanje velikosti gozdnih območij,
- hidrografske meritve do globine 70 m.

Naštete so bile samo nekateri možnosti uporabe lidarskih podatkov. Praktično pa je njihova uporaba skoraj neomejena. Zaradi natančnosti, hitrosti in prilagodljivih merskih tehnik lahko lidarski podatki dopolnjujejo ali delno zamenjajo druge obstoječe tehnologije pridobitve geografskih podatkov (Wehr in Lohr, 1999).

4 FAZE OBDELAVE PODATKOV

Po georeferenciranju oblaka točk sledi dodatna obdelava podatkov, ki lahko obsega filtriranje, klasifikacijo, segmentacijo in modeliranje. Vizualizacija oblaka točk se pogosto uporablja za preverjanje ali so bili objekti in območje v celoti zajeti ter za pridobitev prvega vtisa o kakovosti podatkov. Različne tehnike (npr. senčenje in barvanje) se uporabljajo za interpretacijo pregleda ali za interpretacijo izrazitih lokalnih pojavov. Najpogostejše podobe, izdelane iz oblakov točk, so podobe, izpeljane iz višinskih podatkov (angl. height images), osenčene podobe (angl. shaded images), podobe gostote oblaka točk (angl. point density images), podobe odbojne jakosti površja (angl. reflectance strength images) (Vosselam in Mass, 2010).

Oblaki točk, pridobljeni z LS, vsebujejo veliko implicitnih informacij. Različni nameni uporabe podatkov laserskega skeniranja zahtevajo dodatne korake obdelave podatkov za ekstrakcijo informacij kot so razgibanost površja, višine in gostota dreves, modeli objektov ... V Vosselman in Mass (2010) je predstavljeno, zakaj se daje prednost drugim strukturam podatkov (Delaunay triangulation, k-D trees in octrees) pred podobami, ki so izpeljane iz oblaka točk. Opisani so nekateri postopki segmentacije oblaka točk in načini stiskanja podatkov. Dejstvo pa je, da diskretni podatki v obliki filtriranih in klasificiranih lidarskih točk ter v obliki pravilne kvadratne mreže, niso dovolj dobri za določene analize. Z izdelavo ploskovnih modelov z modeliranjem ploskev, se v podatke vnesejo dodatni topološki odnosi (definirajo se ploskve, robovi), ki omogočajo različne analize (izračun prostornin, dolžin), vizualizacije in simulacije (Kosmatin Fras, 2010).

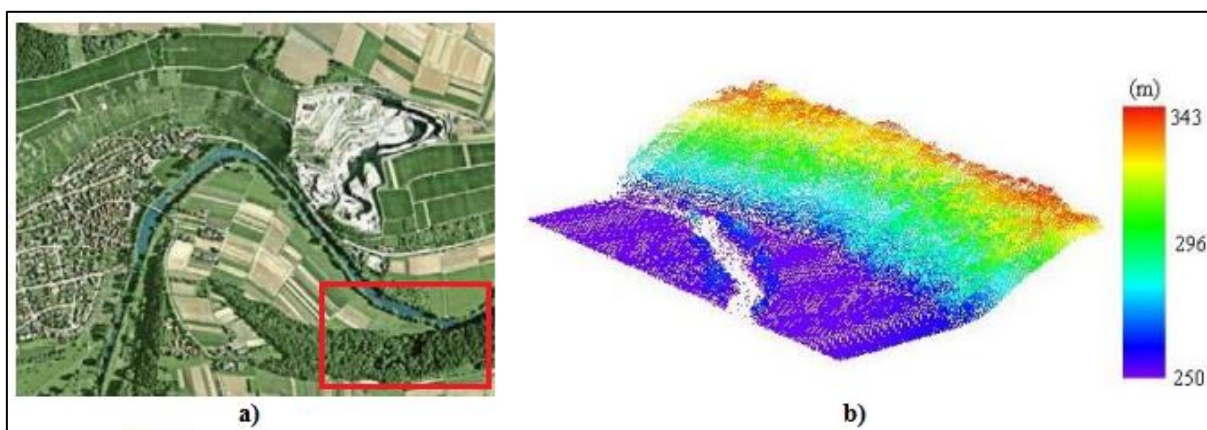
4.1 Filtriranje

S filtriranjem podatkov želimo ločiti zelene podatke od neželenih. Pred filtriranjem poskrbimo, da so iz oblaka točk odstranjene morebitne grobe napake in nelogičnosti v podatkih (npr. posledice večkratnih odbojev laserskih žarkov). To se lahko stori vizualno (ročno) ali z ustreznimi orodji znotraj programskega okolja. Po navadi s filtriranjem ločimo točke, ki pripadajo tlam in ostale točke. Pri tem je v veliko pomoč informacija o zaporednosti odboja impulza. Največ problemov predstavlja nizko rastje. V tem primeru je potrebno izbrati laserski skener s primerno dolžinsko ločljivostjo, pri katerem je bolj verjetno, da kljub nizkemu rastju zadnji odboj predstavlja tla (Kosmatin Fras, 2009).

Filtriranje se izvaja z različnimi metodami, kot so morfološki, površinski in segmentacijski filtri, progresivno zgoščevanje (Kosmatin Fras, 2009) ... Filtriramo lahko ne samo višinske podatke, ampak tudi podatke o intenziteti vrnjenih impulzov.

4.2 Klasifikacija

Filtriranju sledi dodatno ločevanje točk na tiste, ki predstavljajo npr. vegetacijo, stavbe, ceste. Ta postopek imenujemo klasifikacija oblaka točk (podatke razvrščamo v vsebinske razrede). Oblak točk lahko klasificiramo tudi glede na višinske podatke (slika 15) in podatke o intenziteti. Podrobnejša analiza o uporabnosti informacije o intenziteti odbitega laserskega žarka za klasifikacijo oblaka točk je predstavljena v Bitenc (2006).



Slika 15: a) študijsko območje (podoba pridobljena iz Google Earth; b) perspektivni pogled na oblak točk klasificiran po višini (Yunfei in sod., 2008: 314 str.).

4.3 Segmentacija

Segmentacijski algoritmi razvrščajo točke glede na določene kriterije. Najpogostejše se grupirajo točke, ki pripadajo določeni ravnini, valju ali gladkemu površju. Tako lahko rečemo, da je postopek segmentacije v bistvu postopek iskanja ali prepoznavanja preprostih oblik v oblaku točk. Prepoznavanje ploskovnih oblik je potrebno pri ekstrakciji stavb in pri postopku registracije skenogramov brez uporabe veznih točk. Prepoznavanje valjev je potrebno pri modeliranju industrijskih inštalacij. Segmenti gladkih površin se lahko uporabijo pri generiranju površine terena iz oblakov točk.

V diplomski nalogi smo uporabili 2D (dvorazsežno) Hough-ovo transformacijo za zaznavanje linij v 2D prostoru, zato je natančneje opisan le ta postopek segmentiranja. Vosselman in Mass (2010) v poglavju 2.3 opisujeta še nekatere druge postopke segmentacije. Eden od opisanih postopkov je algoritem RANSAC (angl. random sample consensus algorithm). Kandare (2013) je ocenila uporabnost slednjega za ekstrakcijo oblike debla dreves iz terestričnega laserskega oblaka točk. Vosselman in Mass (2010) opisujeta postopek segmentacije »surface growing«, ki se lahko obravnava kot razširitev algoritma rast regij (angl. region growing) v 3D prostor.

4.3.1 Hough-ova transformacija

Hough-ova transformacija je bila prvič formulirana v 60-ih letih prejšnjega stoletja. Originalno je bila uporabljena za zaznavanje oblik, ki imajo analitični opis, kot so linije, krogi in elipse na intenzivnih slikah v 2D prostoru (Bevilacqua, Casorio, Mastronardi, 2008). Razvoj je potekal v smeri zaznavanje zapletenejših oblik v 2D in 3D prostoru. Hough-ovo transformacijo lahko uporabimo za zaznavanje krogov, elips, stožcev in poljubnih drugih oblik. V primeru uporabe transformacije za zaznavanje poljubnih oblik govorimo o generalizirani Hough-ovi transformaciji (angl. generalized Hough transform), ki je opisana v Ballard (1981). Opis nekaterih metod Hough-ove transformacije za zaznavanje ravnin v 3D prostoru, ki so bile razvite predvsem z namenom zmanjšati čas obdelave in povečati natančnost transformacije, lahko najdemo v Borrmann in sod. (2011).

4.3.1.1 Hough-ova transformacija za zajem linij

S Hough-ovo transformacijo obravnavamo vsako točko posebej na binarni sliki ali v oblaku točk. Obravnavamo točko (x_i, y_i) in vse premice, ki potekajo skozi to točko. Enačbo poljubne premice (12), ki poteka skozi dano točko (x_i, y_i) zapišemo kot:

$$y_i = ax_i + b \quad (12)$$

Kjer so:

x_i, y_i : koordinati obravnavane točke v xy ravnini,

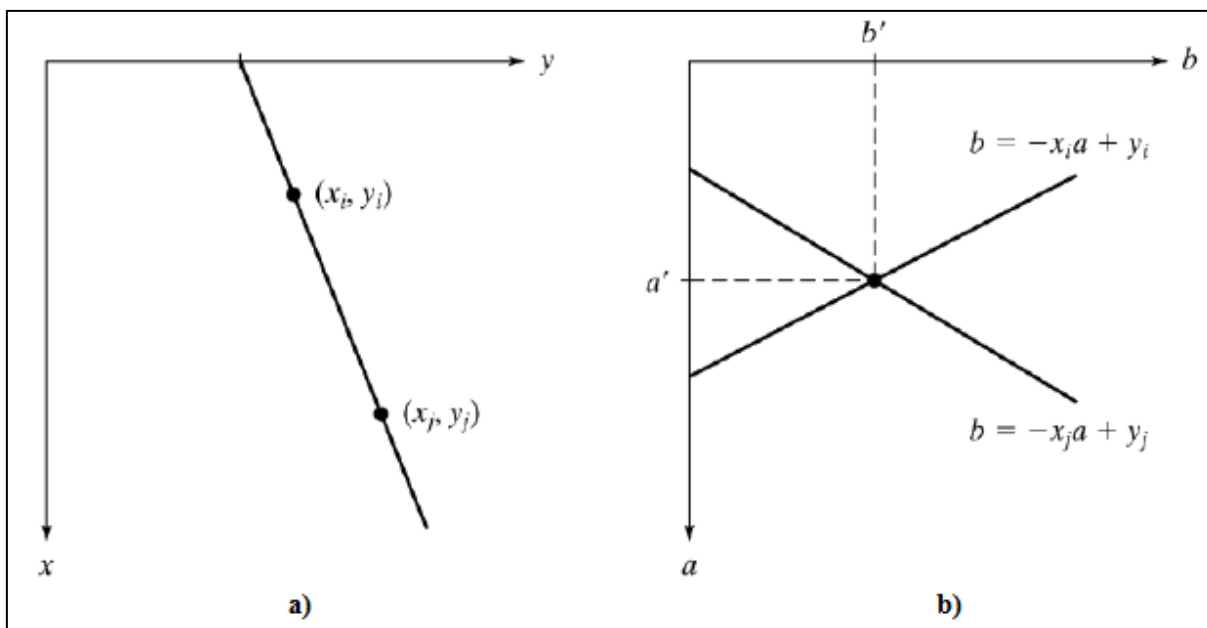
a : smerni koeficient linearne funkcije v xy ravnini,

b : začetna vrednost linearne funkcije v xy ravnini.

Če enačbo (12) preoblikujemo v obliko enačbe (13) dobimo na ab ravnini (imenovanem parametrski prostor) enačbo ene premice za točno določeno točko (x_i, y_i) .

$$b = -x_i a + y_i \quad (13)$$

Tudi za drugo točko (x_j, y_j) lahko zapišemo enačbi (12) in (13). Če se tako določeni premici sekata v parametrskem prostoru v točki (a', b') , potem predstavljata vrednosti a' in b' parametra premice v xy ravnini. Tako smo določili premico na kateri ležita obe točki s koordinatama (x_i, y_i) in (x_j, y_j) . Osnovni koncept Hough-ove transformacije ponazarja slika 16 (Gonzales, Woods, Eddins, 2004).



Slika 16: a) xy ravnina; b) parametrski prostor (Gonzales in sod., 2004: 394 str.).

Na takšen način lahko izberemo oz. pridobimo enačbo premice na kateri leži največ točk. Parametra tako pridobljene enačbe premice (a', b') , bi predstavljala presečišče v katerem se je sekalo največ premic v parametrskem prostoru. Težava se pojavi kadar se premica približuje vertikali oz. vrednost parametra a se približuje neskončnosti, zato enačbo premice raje zapišemo v normalni obliki po Hesse-ju¹ (14):

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (14)$$

Kjer sta:

- ρ : parameter iz parametrskega prostora $\rho\theta$, oddaljenost premice od izhodišča koordinatnega sistema,
- θ : parameter iz parametrskega prostora $\rho\theta$, naklonski kot premice.

V tem primeru obravnavamo xy ravnino in parametrski prostor $\rho\theta$. Za vsako točko v xy ravnini lahko zapišemo enačbo (14), ki predstavlja v parametrskem prostoru $\rho\theta$ sinusoido. Enačba (14) predstavlja funkcijo $\rho(\theta)$. Ti dve izračunani vrednosti predstavljata potencialne parametre za izračun premice v xy ravnini. Točka, v kateri se sekajo sinusoidi, predstavlja parametre skupne premice. V tem primeru so obravnavane točke v xy ravnini kolinearne, torej ležijo na isti premici.

¹ Ludwig Otto Hesse je bil nemški matematik, rojen 22. aprila 1811 v Prusiji (danes Rusija), umrl je 4. avgusta 1874 v Nemškem cesarstvu (danes Nemčija) (Wikipedija, 2013).

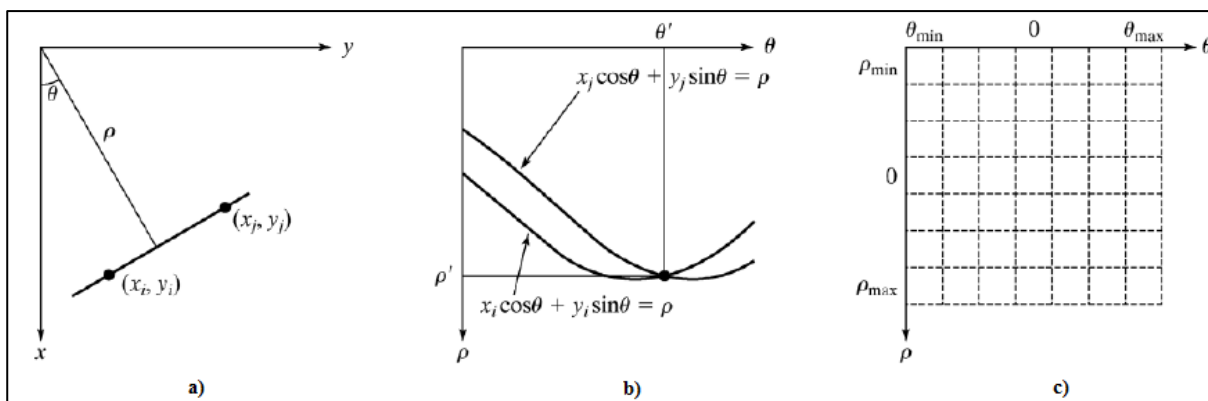
Enačbo premice zapišemo kot (Zadnikar, 2009):

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right) x + \left(\frac{\rho}{\sin \theta}\right) \quad (15)$$

Kjer so:

y : odvisna spremenljivka,

x : neodvisna spremenljivka.



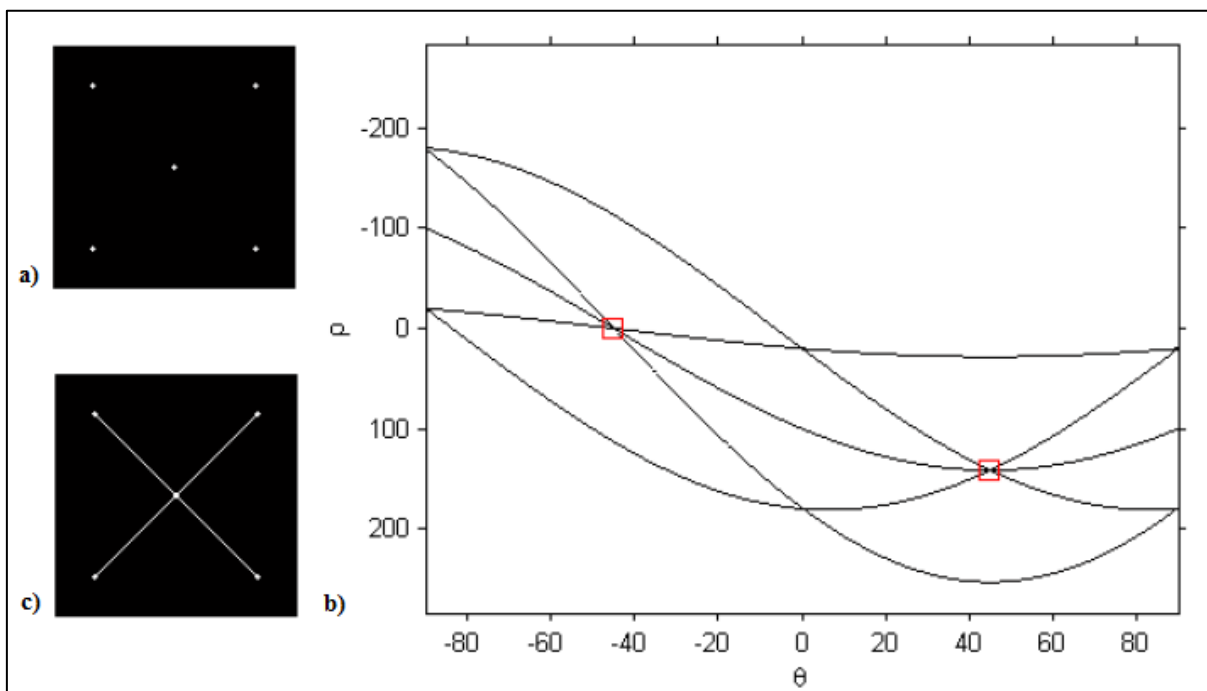
Slika 17: a) (ρ, θ) parametrizacija linije v xy ravnini; b) sinusoide krivulje v $\rho\theta$ ravnini s presečiščem v točki (ρ', θ') ; c) zbiralne celice parametrskega prostora $\rho\theta$ (Gonzales in sod., 2004: 394 str.).

Na sliki 17 a) je predstavljen geometrijski pomen parametrov ρ in θ . Pod b) sta predstavljeni dve sinusoidi, ki potekata skozi določeni točki (x_i, y_i) , (x_j, y_j) . Presek (ρ', θ') predstavlja parametre linije, ki poteka skozi obe prej omenjeni točki. Zbiralne celice (slika 17 c)) nastanejo z razdelitvijo parametrskega prostora $\rho\theta$ v celično strukturo. $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$ in $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$ predstavljajo pričakovane vrednosti parametrov. Za θ po navadi veljajo meje $-90^\circ \leq \theta < 90^\circ$, za D (razdalja diagonale slike) $-D \leq \rho \leq D$ (Gonzales, Woods, Eddins, 2004). Število celic je odvisno od nastavljene ločljivosti θ in od nastavljene ločljivosti ρ .

Vrednost zbiralnih celic se nastavi na nič. Za vsako točko, ki predstavlja ciljni objekt, se izračuna po enačbi (14) ρ , ki je odvisen od vrednosti θ . Tako pridobljena vrednost ρ se zaokroži na najbližjo vrednost zbiralne celice vzdolž osi ρ v Hough-ovem zbiralnem prostoru (imenovanem tudi Hough-ova transformacijska matrika). Vrednost te celice se poviša za ena. Celica, ki ima največ glasov predstavlja parametre ρ in θ , na podlagi katerih se izračuna premica na kateri leži največ točk.

Slika 18 predstavlja delovanje Hough-ove transformacije na konkretnem primeru. Pod a) so predstavljeni obravnavane točke, ki so zaradi boljše vidljivosti povečane. Za vsako točko se izračuna pripadajočo sinusoido v parametričnem prostoru $\rho\theta$ (b)). Z rdečim kvadratom sta označena presečišča,

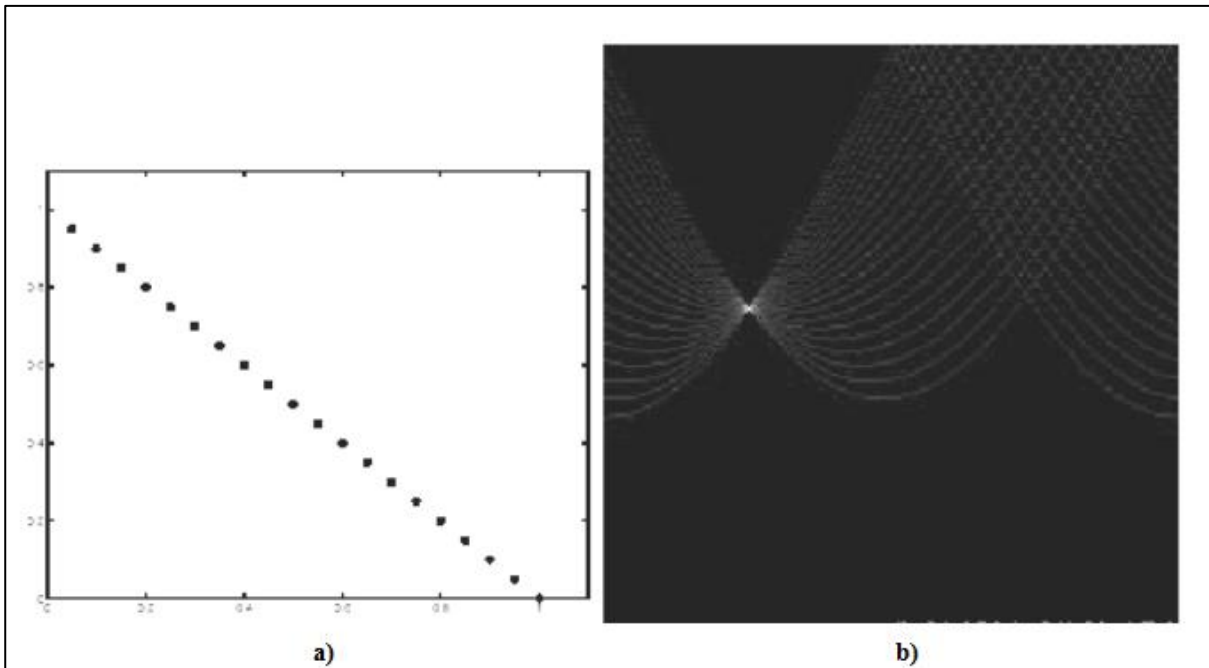
v katerih se stika največ linij. Iz grafa je razvidno, da ležijo 3 točke na vsaki od dveh premic v ravnini xy . Pod c) so ponazorjene daljice, ki povezujejo primerne točke.



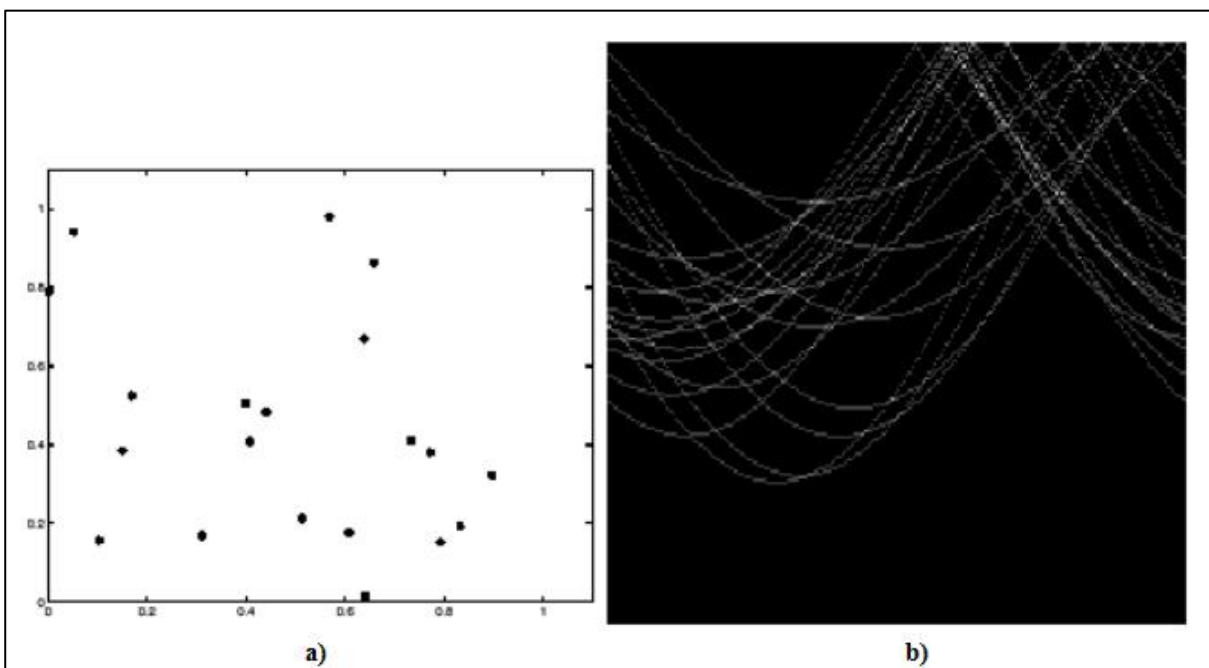
Slika 18: Prikaz delovanja Hough-ove transformacije (Grigillo, 2010: 49 str.).

4.3.1.2 Prednosti in slabosti Hough-ove transformacije za zajem linij

Velika prednost Hough-ove transformacije pred ostalimi pristopi je odpornost na šum na sliki, seveda če podatki niso preveč obremenjeni z njim. Na sliki 19 a) so prikazani podatki brez prisotnosti šuma. Pod b) je prikazan izbor parametrov v Hough-ovem zbiralnem prostoru. Največje število glasov je prikazano z najsvetlejšim območjem. Slika 20 a) prikazuje poljubno raztresene točke. Pod b) je prikazan Hough-ov zbiralni prostor in vpliv šuma v podatkih na odkritje linij. Vidimo, da je prisotno veliko svetlejših območij, ki ponazarjajo preseke sinusoid v parametrskem prostoru $\rho\theta$, ki posredno predstavljajo parametre določenih linij v ravnini xy . Algoritem ima tudi toleranco do lukenj na obravnavani liniji. Praznine na iskani liniji se pojavljajo največkrat zaradi »neoptimalne« predhodne obdelave oblaka točk oz. generiranega rastra. Ali bo algoritem našel primerno linijo ali ne, je odvisno od nastavitve ločljivosti vhodni parametrov. Merilo za nastavljanje teh parametrov je velikost prisotnosti šuma med podatki. Kot prednost bi lahko tudi opredelili zmožnost odkritja več linij na podobi in razmeroma dobra učinkovitost iskanja linij.

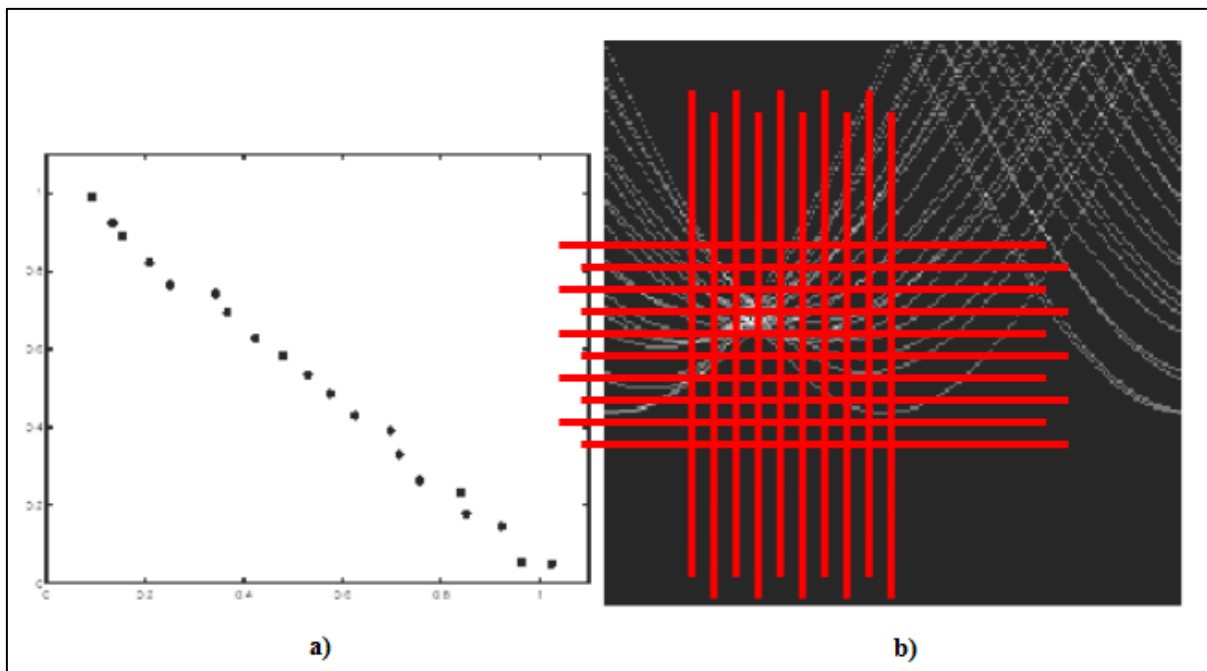


Slika 19: Uporabljeni podatki (a) in Hough-ov zbiralni prostor (b)) (Savarese, 2011).



Slika 20: Šum v podatkih (a) in Hough-ov zbiralni prostor (b)) (Savarese, 2011).

Slabost Hough-ove transformacije je velika pomnilniška obremenjenost pri nastavljenih večjih ločljivostih vhodnih parametrov, zato je pri kvantizaciji parametrov potreben kompromis med odpornostjo na šum, natančnostjo zaznanih linij in pomnilniško zahtevnostjo. Navedena dejstva prikazuje slika 21. Pod a) so prikazani podatki, v katerih je prisoten šum. Pod b) je razvidno, da se sinusoide v ravnini $\rho\theta$ ne sekajo točno v določeni točki, zato je potrebno izbrati primerno velikost zbiralnih celic, ki so odvisne od nastavljene ločljivosti ρ in θ .



Slika 21: Šum v podatkih (a)) in primerna kvantizacija parametrskega prostora (b)) (Savarese, 2011).

Hough-ova transformacija je primerna za odkrivanje enostavnejših krivulj in oblik. Z večanjem zahtevnosti le-teh se povečuje število ocenjevanih parametrov krivulj in drugih geometričnih oblik. Podatke v tem poglavju sem povzel po Savarese (2011).

5 UPORABLJENI PODATKI IN PROGRAMSKA OPREMA

5.1 Podatki

Podatke, ki so uporabljeni v diplomski nalogi, sta nam posredovali dve podjetji, ki se ukvarjata z laserskim skeniranjem. Podatke aerolaserskega skeniranja smo pridobili od podjetja FLYCOM d.o.o. iz Most pri Lescah (<http://www.flycom.si>). Specializirani so za vzdrževalne in preventivne storitve v zraku. S svojimi metodami omogočajo odkrivanje in analizo napak na električnem omrežju. Ponujajo različne končne produkte, ki so izpeljani iz lidarskih podatkov. Razvijajo svoj GIS sistem GMS (angl. Grid Monitoring System), ki je namenjen upravljanju z gospodarsko infrastrukturo (daljnovodi, plinovodi) in za pregled klasičnih geodetskih podatkov (kataster, ortofoto). Strankam omogočijo panoramske lete in transportne storitve.

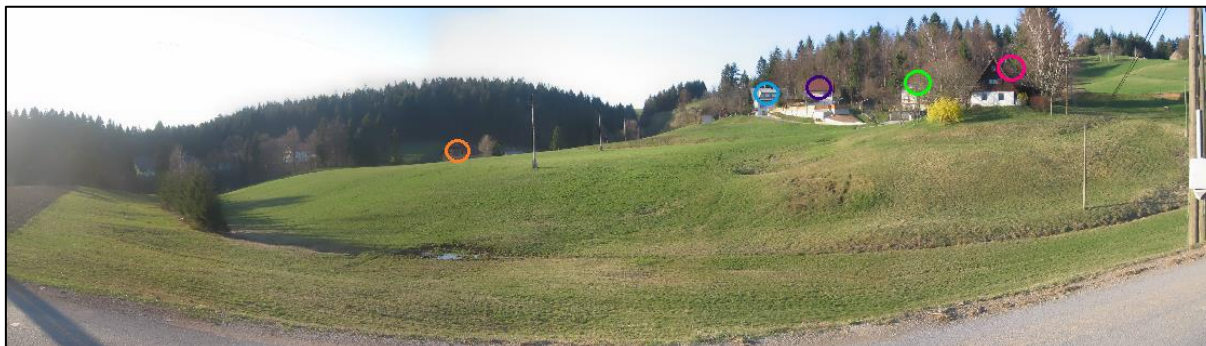
Podatke terestričnega laserskega skeniranja smo pridobili od podjetja DFG CONSULTING d.o.o. iz Ljubljane (<http://www.dfgcon.si/>), ki izvajajo predvsem masovni zajem podatkov. Ukvarjajo se s skeniranjem in geolociranjem načrtov, vektorizacijo načrtov, skeniranjem aeroposnetkov, izdelavo DMR-ja in ortofota, s stereoskopskim 3D zajemom topografskih podatkov. Izdelujejo 3D modele, makete in druge končne produkte iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja, lastnega mobilnega kartirnega sistema (MMS – angl. mobile mapping system) WideoCar, ki za zajem uporablja dve videokameri oziroma terestrični laserski skener.

Za primer terestričnega laserskega skeniranja je bil uporabljen skener Riegl VZ-400, ki je bil med časom snemanja montiran na streho mirujočega avtomobila. Registracija je bila izvedena na podlagi retroreflektivnih tarč (valjčkov). Na 6-ih točkah, ki so bile signalizirane z omenjenimi tarčami, so izvedli hitro statično metodo izmere (čas opazovanja na vsaki točki je bil 4 min). GNSS meritve so bile opravljene s sprejemnikom Leica Viva GNSS GS15. Georeferenciranje se je izvedlo na podlagi teh 6-ih točk.

V primeru aerolaserskega skeniranja je bil uporabljen merski sistem LiteMapper (LM) 5600, nameščen na helikopter. Snemanje je bilo izvedeno aprila leta 2012 tako za primer aerolaserskega skeniranja kot za primer terestričnega laserskega skeniranja.

Naše obravnavano območje leži v občini Logatec in obsega del naselja Petkovec. Za lažje predstavbo konfiguracije terena prikazuje slika 22 panoramsko fotografijo območja. Tloris območja je prikazan na sliki 23. Rdeče linije predstavljajo mejo obravnavanega območja. Velikost območja, zaokroženo na metre, je 159 m x 171 m. Na obeh slikah je označenih nekaj identičnih točk za lažjo umestitev stojišča

posnete panorame, ki leži zunaj mej slike 23. Pri panoramski fotografiji so identične točke označene z barvnimi krogi, na podlagi ortofota pa z barvnimi točkami.



Slika 22: Panoramska fotografija obravnavanega območja.



Slika 23: Obravnavano območje, označeno na ortofotu.

Na podatkih terestričnega laserskega skeniranja še ni bila izvedena klasifikacija oblaka točk, nasprotno pa so bili v primeru aerolaserskega skeniranja podatki že osnovno klasificirani, vendar te klasifikacije nismo upoštevali. Koordinate točk so za obe vrsti podatkov določene v GK (Gauss-Krügerjevem) ravninskem koordinatnem sistemu D48/GK. Podatek o intenziteti odbitega laserskega impulza je bil na voljo samo za ALS oblak točk.

5.2 Zajem podatkov

5.2.1 LiteMapper (LM) 5600

LM 5600 je sestavljen iz več komponent (slika 24): skener Riegl LMS Q560, digitalna kamera Hasselblad H39, GPS sprejemnik Novatel OEV/OEM4 internal, INS AEROcontrol 256 Hz in navigacijski sistem CCNS4 (Zalokar, 2011).



Slika 24: Sestava merskega sistema LiteMapper (LM) 5600 (Zalokar, 2011: 26 str.)

Skener Riegl LMS Q560 omogoča polnovalovni način skeniranja. S svojimi lastnostmi pokriva široko polje uporabe. Njegova oblika omogoča gladko integracijo instrumenta v letalski skenirni mehanizem. Način določitve razdalje je »time of flight« (impulzni način). Uporablja se laserska svetloba valovne dolžine 1550 nm. Skener ima vgrajeno vrtečo se prizmo, ki zagotavlja paralelen vzorec skeniranja. Kompaktnost in teža obravnavanega laserskega skenerja omogoča njegovo implementacijo tako na

letala kot tudi na lažje zrakoplove, kot so helikopterji ali zrakoplovi brez pilota (Riegl LMS Q560, 2013).

Preglednica 1: Doseg merjenje dolžine in maksimalna višina leta (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013).

Frekvenca laserja	50 kHz	100 kHz	180 kHz	200 kHz	240 kHz
Maksimalna merjena dolžina					
Naravna tarča ($\rho \geq 20\%$)	1200 m	1000 m	780 m	700 m	580 m
Naravna tarča ($\rho \geq 60\%$)	1800 m	1200 m	800 m	700 m	580 m
Maksimalna operativna višina leta	1000 m	800 m	600 m	550 m	450 m

Preglednica 1 prikazuje maksimalno merjeno razdaljo in maksimalno višino leta kot funkciji frekvence laserja in reflektivnosti naravnih tarč. Maksimalna dolžina je določena za naslednje razmere: tarča je večja od odtisa laserskega žarka, povprečna osvetljenost okolice, pravokotnost vpadnega žarka, vidnost 23 km. Pri določitvi maksimalne višine leta se je upoštevalo: $\rho \geq 20\%$, maksimalni kot skeniranja 60° , dodatni nagib $\pm 5^\circ$ (Riegl LMS Q560, 2013).

Preglednica 2: Ostale specifikacije laserskega skenerja pri merjenju dolžin (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013; LiteMapper 5600 (IGI), 2013).

Minimalna merjena dolžina	30 m
Točnost	20 mm
Natančnost	10 mm
Frekvenca laserja	do 240 kHz
Valovna dolžina laserske svetlobe	bližnja IR (infrardeča) svetloba
Divergenca laserskega žarka	$\leq 0,5$ mrad
Maksimalno število tarč/impulz	neomejeno
Dolžinska ločljivost laserskega skenerja	0,6 m
Trajanje laserskega impulza	3,5 ns

Točnost in natančnost laserskega skenerja pri merjenju dolžin je določena za dolžino 250 m pod Riegl-ovimi pogoji testiranja. Točnost je definirana kot stopnja podobnosti merjene vrednosti pravi vrednosti. V preglednici 2 omenjeno natančnost, imenovano tudi kot ponovljivost, razumemo kot stopnjo, do katere ponovljene meritve kažejo enake rezultate. Frekvenco laserja lahko poljubno spreminjamo. Število zaznanih tarč na impulz je praktično omejeno le z maksimalno frekvenco beleženja podatkov enote za shranjevanje (Riegl LMS Q560, 2013). Navedeno dolžinsko ločljivost izračunamo po enačbi (7).

Preglednica 3: Optično mehanski skener (povzeto po Riegl LMS Q560, 2013; LiteMapper 5600 (IGI), 2013).

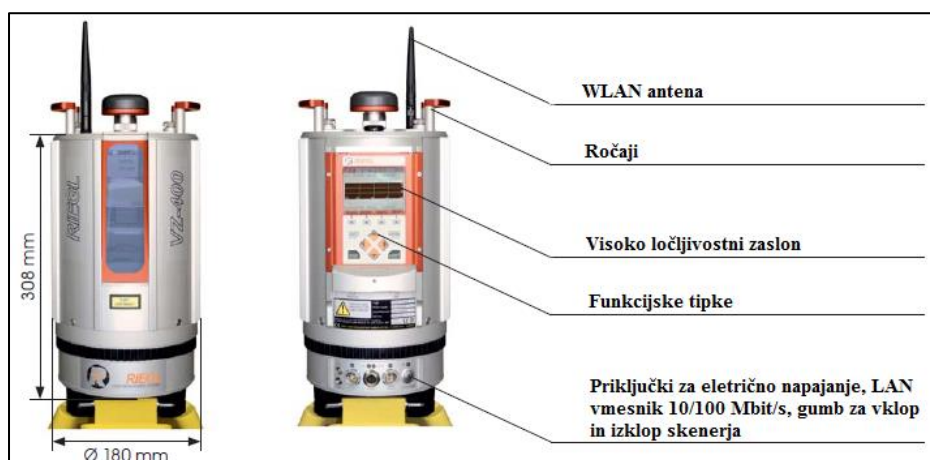
Skenirni mehanizem	skener z vrtečo se prizmo
Vzorec skeniranja	paralelne linije
Kot skeniranja	+/- 22,5° (45°), +/- 30° (60°)
Frekvenca skenerja	10 - 160 linij/s
Velikost kotnega koraka med dvema zaporednima impulzama	$\Delta\theta \geq 0,004^\circ$, za PRR, ki presegajo 100 kHz
Kotna resolucija	0,001°
Širina pasu skeniranja	0,83 x višina (za maksimalni kot skeniranja 45°)
	1,15 x višina (za maksimalni kot skeniranja 60°)

Velikost kotnega koraka (preglednica 3) med dvema zaporednima laserskima impulzoma narašča linearno do 0,008° (za PRR 50 kHz).

Natančnost merskega sistema v horizontalni smeri je 0,08 m in v vertikalni smeri 0,03 m. Doseže razred 1 pri zaščiti oči. Natančnost naprave IMU za zaznavanje kotov nagiba je 0,003 deg, kotov naklona 0,003 deg in kotov zasuka 0,007 deg. Merski sistem brez upoštevanja digitalne kamere in drugih dodatnih opcjskih naprav je težak okoli 40 kg (LiteMapper 5600 (IGI), 2013).

5.2.2 Riegl VZ-400

Laserski skener Riegl VZ-400 (slika 25) uporablja impulzni način merjenja razdalj. Na zgornji del skenerja je možna implementacija digitalnega fotoaparata za boljšo interpretacijo pridobljenih podatkov.



Slika 25: Laserski skener Riegl VZ-400 (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013).

Obravnani laserski skener se največ uporablja v arhitekturnih meritvah, meritvah fasad, pri dokumentiranju arheoloških najdišč in kulturne dediščine. Uporablja se tudi pri modeliranju mest in tunnelskih meritvah, gradbeništvu, gozdarstvu in raziskovanju (datasheet Riegl VZ-400, 2013).

Vrednosti frekvenca laserja in efektivne hitrosti skeniranja v preglednici 4 so zaokrožene na cela števila. Maksimalna merjena dolžina je določena za naslednje pogoje: ravna ploščata tarča z velikostjo, ki presega premer laserskega žarka, pravokotni vpadni žarek, vidljivost 23 km. Maksimalna izmerjena dolžina je večja pri sončnem vremenu kot pri oblačnosti. Točnost in natančnost merjenja dolžin so določili za 100 m razdaljo pod Riegl-ovimi pogoji testiranja (datasheet Riegl VZ-400, 2013).

Preglednica 4: Tehnične specifikacije laserskega skenerja Riegl VZ-400 pri merjenju dolžin (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013).

	1. način za merjenje daljših dolžin	2. način za doseganje velike hitrosti skeniranja
Frekvenca laserja	100 kHz	300 kHz
Efektivna hitrost skeniranja	42.000 meritev/s	122.000 meritev/s
Maksimalna merjena dolžina		
Naravna tarča ($\rho \geq 90\%$)	600 m	350 m
Naravna tarča ($\rho \geq 20\%$)	280 m	160 m
Maksimalno število tarč/impulz	neomejeno	
Točnost	5 mm	
Natančnost	3 mm	
Minimalna izmerjena dolžina	1,5 m	
Valovna dolžina laserske svetlobe	bližnja infrardeča svetloba	
Divergenca laserskega žarka	0,35 mrad	

Preglednica 5: Zmožljivosti skenerja (povzeto po datasheet Riegl VZ-400, 2013) .

	Vertikalno skeniranje	Horizontalno skeniranje
Kot skeniranja	max. 100° (60°/-40°)	360°
Mehanizem skeniranja	rotirajoča prizma	rotirajoča glava
Frekvenca skenerja	od 3 linije/s do 120 linij/s	od 0°/s do 60°/s
Velikost kotnega koraka med dvema zaporednima impulzama ($\Delta\vartheta$ (vertikalen), $\Delta\varphi$ (horizontalen))	$0,0024^\circ \leq \Delta\vartheta \leq 0,288^\circ$	$0,0024^\circ \leq \Delta\varphi \leq 0,5^\circ$
Kotna ločljivost	boljša od 0,0005°	boljša od 0,0005°

Velikost kotnega koraka med dvema zaporednima impulzama (preglednica 5) se lahko poljubno spreminja, glede na situacijo. Laserski skener ima vgrajen inklinacijski senzor, vgrajen ima tudi GPS sprejemnik z anteno in opcijsko kompas za direktno georeferenciranje (natančnost kompasa je reda

1°). Vsebuje sistem za časovno sinhronizacijo sistema. Teža laserskega skenerja je približno 9,6 kg ((datasheet Riegl VZ-400, 2013).

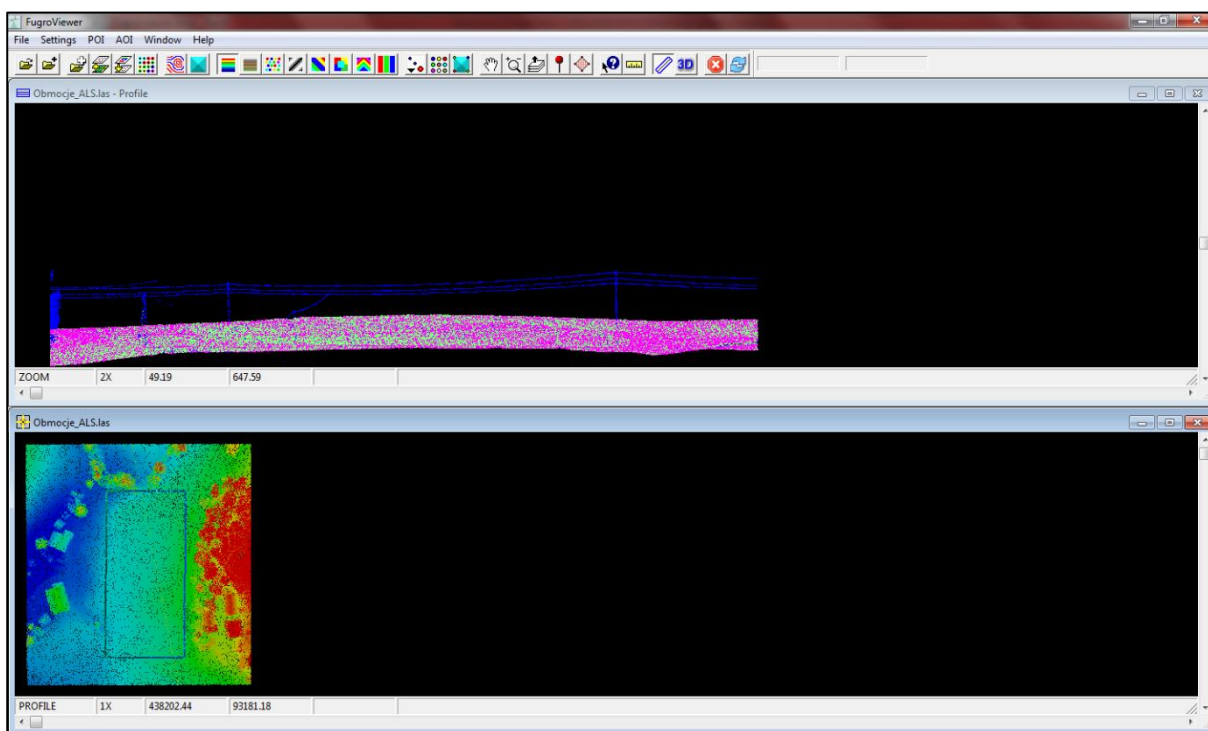
5.3 Uporabljeni programi

V diplomski nalogi so v glavnem uporabljeni trije programi (FugroViewer, LAStools, Matlab). Vsak program posebej smo uporabili za specifične naloge pri obdelavi podatkov. V podpoglavjih 5.3.1, 5.3.2 in 5.3.3 so navedene glavne značilnosti uporabljenih programov.

5.3.1 FugroViewer

FugroViewer je program, ki je uporabniku v veliko pomoč pri delu z večino prostorskih podatkov. Razvili so ga v Fugro Geospatial Services. Program je zasnovan za upravljanje z različnimi rastrskimi in vektorskimi bazami prostorskih podatkov, vključno s fotogrametričnimi, LIDAR in INSAR podatki.

V programu je mogoče pregledati podatke v različnih slojih in barvnih lestvicah (glede na višino točk, intenziteto, zaporednost odboja laserskega žarka, glede na ID vir ...). Možen je tudi 3D pogled in pogled s profila (slika 26).



Slika 26: Prikaz prečnega profila izbranega območja v programu FugroViewer.

Spodnji del slike prikazuje izbrano območje za prikaz prečnega profila. Celotno obravnavano območje je prikazano v barvni lestvici »Blue to Red«. Zgornji del slike prikazuje prečni profil.

5.3.2 LAStools

Programski paket LAStools vsebuje več manjših odprtokodnih programov oz. orodij za analizo in obdelavo lidarskih podatkov. Martin Isenburg je avtor LAStools-ev in jih tudi neprestano posodablja in izboljšuje. V večini orodij je zahtevan format vhodnih datotek LAS/LAZ ali kakšna druga oblika ASCII datoteke. Izhodni format je odvisen od funkcije izbranega orodja. V vsakem programu si lahko pod zavihkom README preberemo njegove lastnosti in značilnosti. V preglednici 6 so zbrana nekatera orodja in opisi njihovih funkcij (LAStools, 2013).

Preglednica 6: Pregled nekaterih LAStools orodij.

Orodje	Funkcija orodja
lasground	Klasifikacija lidarskih točk v talne in ne-talne točke.
lasclassify	Klasifikacija lidarskih točk zgradb in visoke vegetacije (t.j. dreves).
las2dem	Lidarske točke triangulira v TIN ² ; TIN rasterizira v DEM ³ .
lasheight	Izračuna višine točk nad tlemi.
las2las	Bere in zapisuje v format LAS/LAZ/ASCII, točke transformira, filtrira, redči ...
las2txt	LAS format pretvori v TXT datoteko.
las2shp	LAS/LAZ/ASCII format pretvori v ESRI-jev SHP format.
lasinfo	Izda poročilo o splošni vsebini oblaka točk.
lasview	Pregledovalnik lidarskih podatkov v formatu LAS/LAZ/ASCII.

5.3.3 Matlab

Matlab (angl. matrix laboratory) je programski paket za numerično analizo, vizualizacijo in programiranje. S programom lahko analiziramo podatke, izdelujemo svoje algoritme, modele in aplikacije.

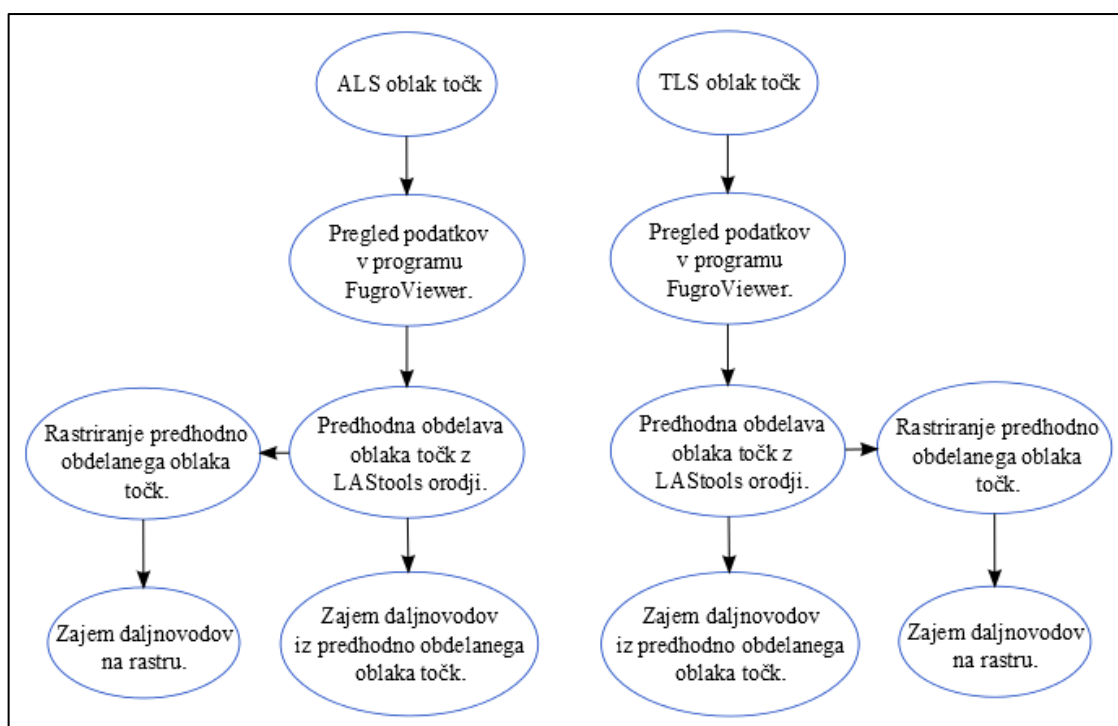
² TIN (angl. Triangulated Irregular Network, mreža nepravilnih trikotnikov) je digitalna podatkovna struktura, ki se uporablja v GIS-ih (angl. Geographic Information System, geografski informacijski sistemi) za prikaz površja (Wikipedia, 2013).

³ DEM (angl. Digital Elevation Model, DMV - digitalni model višin) je 2D kvadratna celična mreža (matrična oblika oz. rastrska oblika). Višina ima podane kot atribut. Uporablja se predvsem v GIS orodjih za prikaz zemeljskega površja. V primerjavi z DMV lahko DMR (digitalni model reliefa) predstavimo še z drugimi značilnimi črtami (plastnice, padnice ...) in točkami (Podobnikar, 2001).

Matlab-ov programski jezik je podoben C++ jeziku. Program vsebuje vgrajene funkcije in orodja, s katerimi lahko pridemo do hitre rešitve problema. Omogoča zahtevne operacije z matrikami, risanje funkcij. Lahko izvedemo analize slik, analize sistemov in izdelamo filtre. Program, ki je napisan v Matlab-u lahko povežemo s knjižnicami drugih programskih jezikov, kot so C, C++, JAVA, FORTRAN. Matlab uporabljajo predvsem inženirji in znanstveniki v industriji in akademskem okolju. (Wikipedia, 2013; MathWorks, 2013).

6 METODOLOGIJA IN PREDSTAVITEV VMESNIH TER KONČNIH REZULTATOV

Naše naloge, da čim bolj samodejno zajamemo daljnovode iz oblaka točk laserskega skeniranja (aerolaserskega in terestričnega) in iz rastriranih podatkov laserskega skeniranja (aerolaserskega in terestričnega), smo se lotili sistematično. Pridobljene podatke smo najprej pregledali v programu FugroViewer. Oblak točk smo nato primerno obdelali, odstranili »odvečne točke«, ga rastrirali z LAStools orodji. Samodejen zajem daljnovidov smo izvedli na dva načina. Prvi način je predstavljal zajem direktno iz oblaka točk, drugi način pa iz rastriranega oblaka točk v programu Matlab. Slika 27 prikazuje glavne faze obdelave podatkov in ekstrakcije daljnovidov.



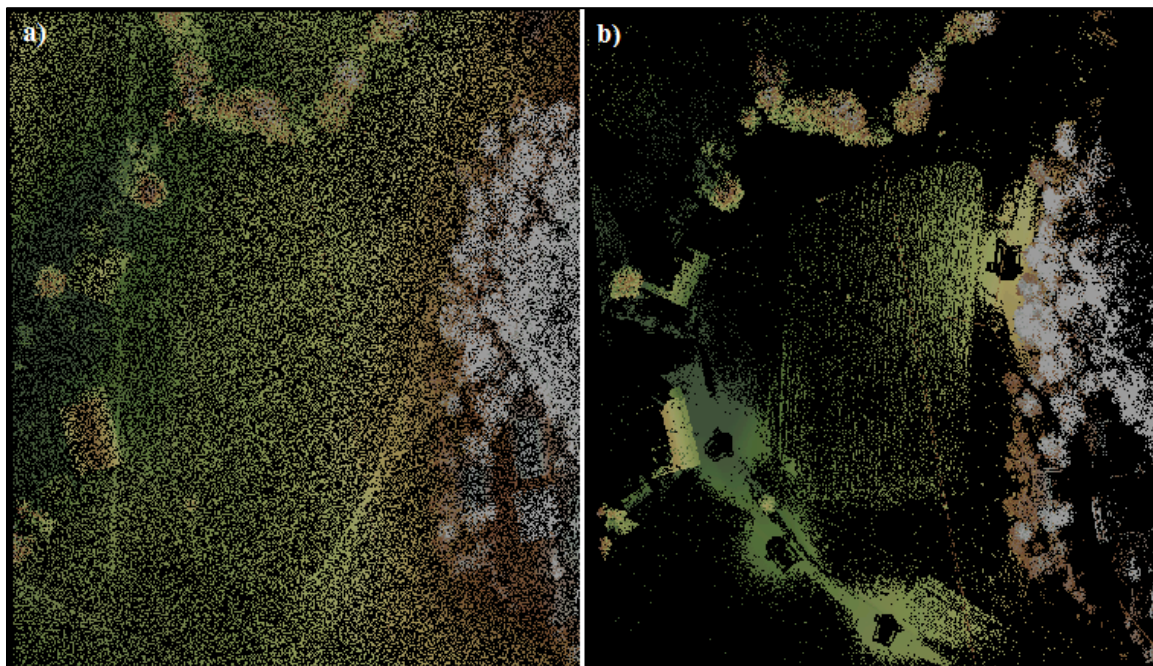
Slika 27: Glavne faze postopka ekstrakcije daljnovidov.

6.1 Pregled podatkov v programu FugroViewer

S programom FugroViewer smo pregledovali začetne podatke, vmesne in končne rezultate pri obdelavi oblakov točk z LAStools orodji. Slika 28 a) prikazuje ALS oblak točk in b) TLS oblak točk.

Iz slike 28 je razvidno, da je v primeru oblaka točk ALS (v nadaljevanju »v primeru ALS«) gostota točk bolj homogena kot v primeru oblaka točk TLS (v nadaljevanju »v primeru TLS«). Pri b) vidimo 4 stojišča avta, na katerem je bil pritrjen terestrični laserski skener. Z oddaljenostjo od stojišča se gostota točk manjša. Točke so obarvane glede na njihovo višino v barvni lestvici »Earth tones«. Bela barva predstavlja krošnje najvišjih dreves. Najtemnejši odtenek zelene barve predstavlja točke z najnižjo

višino. S pomočjo slike 22 lahko vidimo, da se teren iz zahoda proti vzhodu postopoma dviguje. Rdečkasta barva (slika 28 a)) tako prikazuje na zahodu streho hiše in drevesne krošnje, na vzhodu pa predstavlja nizko rastje (trava, grmičevje). Na jugovzhodnem delu slike 28 a) so rahlo vidne hiše pravokotne oblike, bele barve. Na sliki 28 b) hiše niso vidne v celoti, zaradi drugačne perspektive meritev TLS in zaradi omejenega števila stojišč. Daljnovodi so vidni na TLS oblaku točk predvsem zaradi neenakomerne gostote točk.



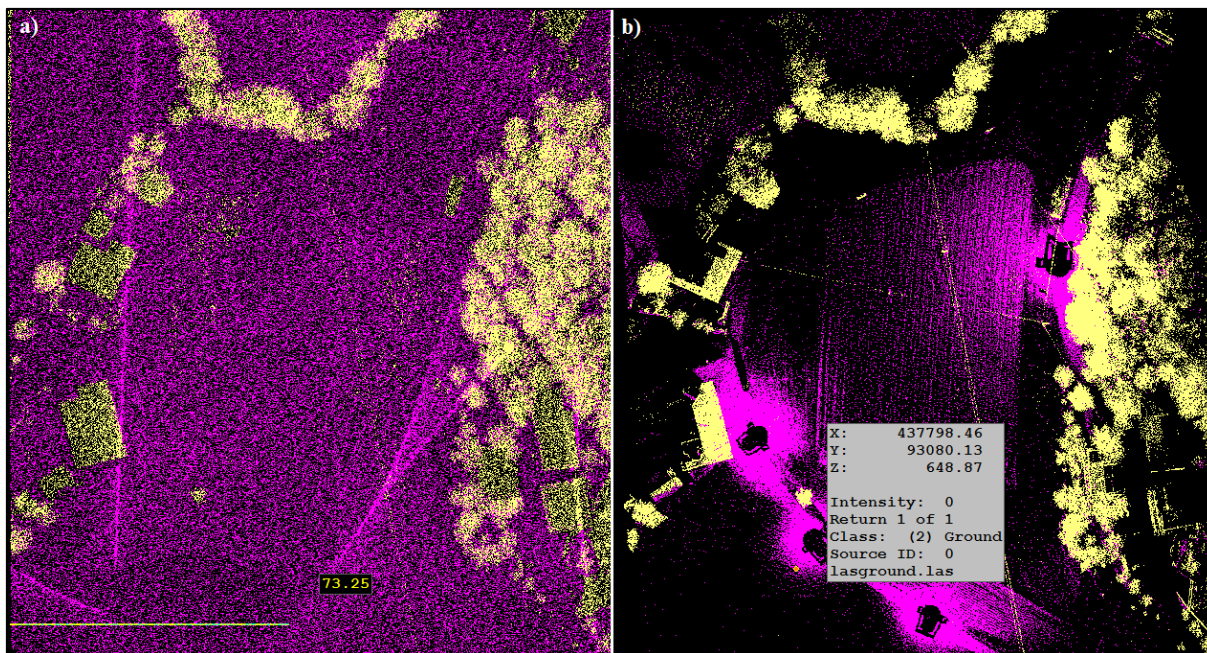
Slika 28: a) ALS in b) TLS oblak točk.

6.2 Predhodna obdelava oblaka točk z LAStools orodji

Vrstni red uporabljenih orodij je bil enak tako za ALS kot za TLS oblak točk, tako da bomo predstavili predhodno obdelavo za oba oblaka točk skupaj. Pri tem bomo izpostavili morebitne drugačne nastavitve parametrov.

Za ločitev talnih in ostalih točk (tako imenovano filtriranje oblaka točk) smo uporabili orodje lasground. Talne točke so dobile vrednost 2 (vijolična barva), ostale točke pa 1 (bež barva). Takšno razdelitev točk prikazuje za ALS slika 29 a), za TLS pa slika 29 b).

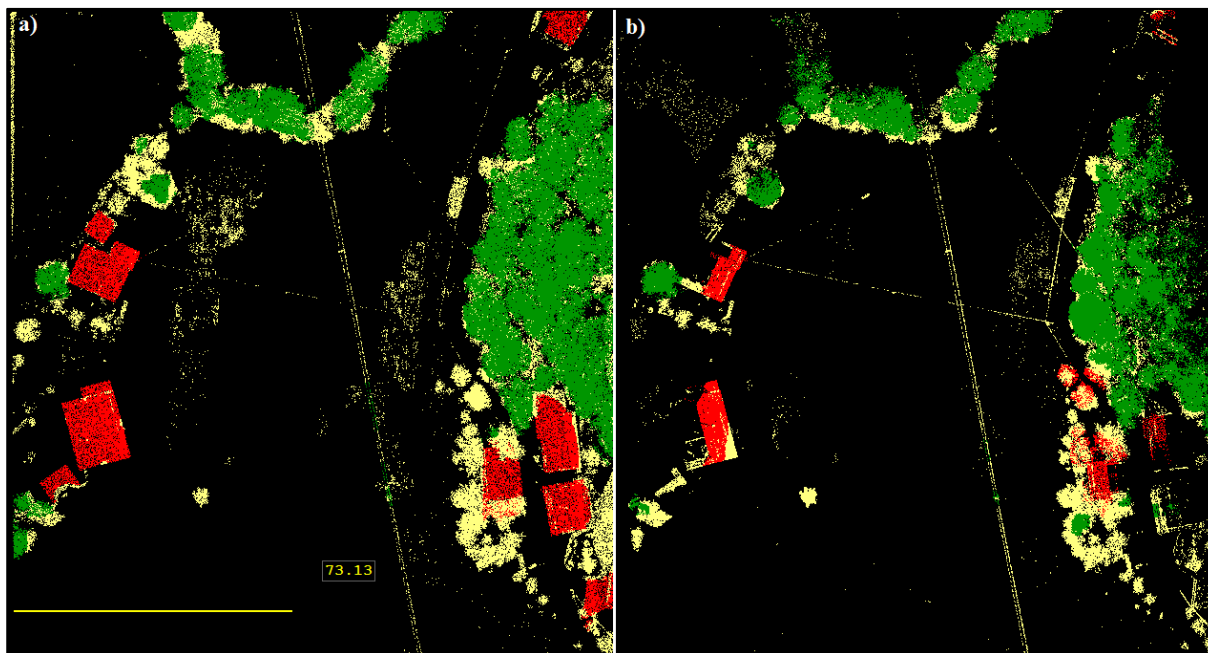
Označena razdalja, podana v metrih, na sliki 29 a) služi kot grafično merilo. Vse ostale slike, izpeljane iz rezultatov obdelav z orodji LAStools, bodo opremljene s podobni grafičnim merilom. Pod b) so prikazane informacije pri poizvedbi za talno točko. V obeh primerih so že vidne prve linije daljnovodov.



Slika 29: Rezultat klasifikacije na talne (vijolične) in ostale (bež) točke z orodjem lasground: a) ALS, b) TLS.

Po uporabi orodja lasground imajo točke absolutne višine (v državnem višinskem koordinatnem sistemu). Za klasifikacijo oblaka točk na razrede kot so: stavbe in visoka vegetacija (tj. drevesa), moramo predhodno uporabiti orodje lasground in lasheight. Slednje nam služi za izračun relativnih višin točk nad tlemi. Šele nato se lahko odstranijo točke z vrednostjo 2 (talne točke). Tako dobljen oblak točk pa se uporabi kot vhodni podatek za klasifikacijo.

Z največ težavami v predhodni obdelavi oblakov točk smo se srečali pri uporabi orodja lasclassify (klasifikacija oblaka točk). Za pravilno klasifikacijo točk so najpomembnejše nastavitve parametrov kot sta »building planarity« in »forest ruggedness«. Parametre, ki so nam dali »optimalen« rezultat klasifikacije, smo določili empirično po več poskusih. Za ALS oblak točk smo uporabili vrednost 0,4 za parameter »building planarity«, za parameter »forest ruggedness« smo nastavili vrednost 3,2. V obravnavo smo vključili točke, ki so 2 metra nad tlemi ali več. Pri nastavitvi te vrednosti smo pazili, da noben od daljnovidov ne sega pod to višino. Za TLS oblak točk smo nastavili vrednost za parameter »building planarity« na 0,4 in za parameter »forest ruggedness« na 3. Tudi v tem primeru smo v obravnavo zajeli točke, ki imajo višino 2 metra ali več. Slika 30 a) prikazuje klasifikacijo ALS in b) TLS oblaka točk.

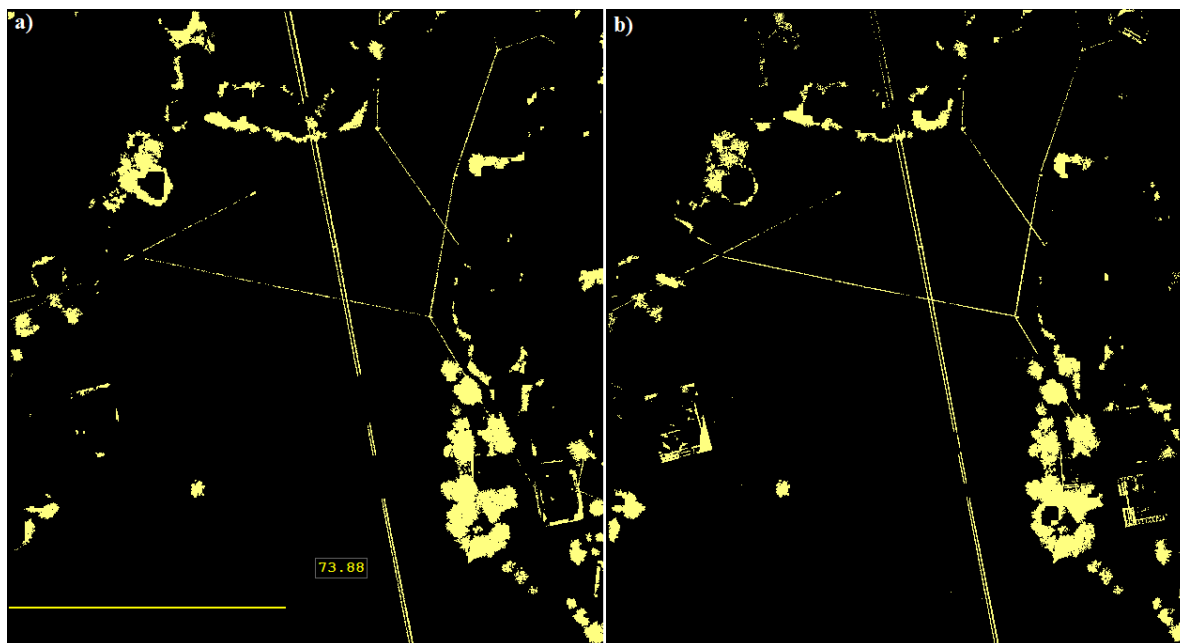


Slika 30: Rezultat klasifikacije oblaka točk a) ALS in b) TLS.

Zelena barva predstavlja visoko vegetacijo (klasifikacijski razred 5), rdeča barva predstavlja strehe stavb (klasifikacijski razred 6), bež barva predstavlja neklasificirane točke (klasifikacijski razred 1), katere predstavljajo med drugim tudi daljnovode. Glede na vizualno analizo lahko rečemo, da je bila klasifikacija v obeh primerih zadovoljiva. Pri ALS oblaku točk so bile strehe stavb odkrite natančnejše, pri TLS oblaku točk pa smo odkrili nekoliko več visoke vegetacije v primerjavi z ALS oblakom točk.

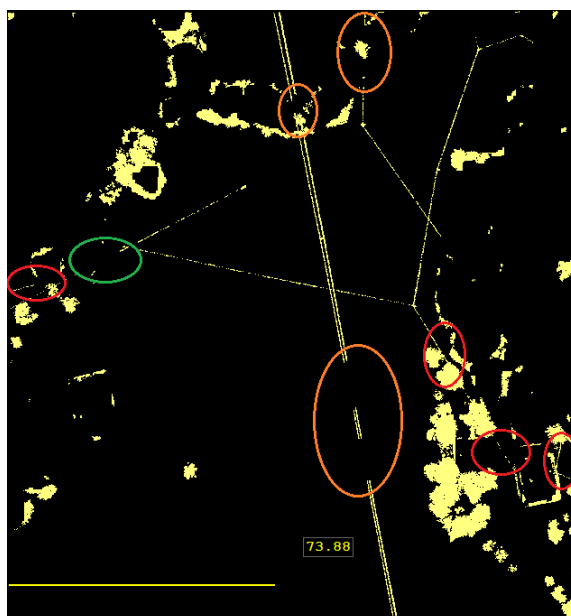
Pri obeh primerih smo zavrgli klasificirana razreda 5 in 6. Za primer ALS smo naknadno upoštevali samo prve odboje laserskega impulza. Iz klasifikacijskega razreda 1 smo obdržali točke z višinami med 3,55 m in 11,81 m. Zgornjo in spodnjo mejo intervala smo določili v programu FugroViewer s pomočjo prečnega pogleda na območjih, kjer se nahajajo daljnovodi. V izbranem intervalu naj bi ležale vse točke, ki pripadajo daljnovodom. Nad in pod obravnavano mejo ležijo točke, ki nas ne zanimajo (nizko grmičevje, morebitne ne odkrite drevesne krošnje ...). Pri TLS oblaku točk ni bilo podatka o zaporednosti odbojev laserskega impulza. Obdržali pa smo točke z višinami med 3,44 in 11,40 m.

Slika 31 prikazuje končni rezultat predhodne obdelave oblaka točk ALS (a) in TLS (b)).

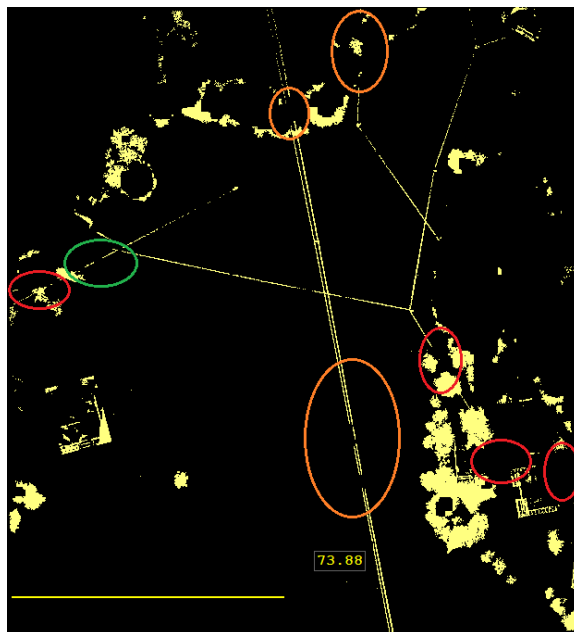


Slika 31: Rezultat predhodne obdelave oblakov točk a) ALS in b) TLS.

Po pričakovanju je pri oblaku točk ALS vidno nekoliko več linij kot pri oblaku točk TLS, predvsem zaradi perspektive snemanja. Na sliki 32 (oblak točk ALS) in 33 (oblak točk TLS) smo označili tri tipe območij. Z rdečo barvo smo označili lokacije, kjer so vidni daljnovodi v oblaku točk ALS, niso pa vidni v oblaku točk TLS. Vzrok za slednje je v glavnem neprodornost laserskih žarkov v primeru TLS skozi gosto vegetacijo ob upoštevanju izbire stojišč terestričnega laserskega skenerja. Z zeleno barvo smo označili območje, kjer so vidni daljnovodi v oblaku točk TLS, niso pa vidni v oblaku točk ALS, zaradi napak klasifikacije. Oranžna barva predstavlja območja, kjer manjkajo deli daljnovodov v obeh primerih (ALS in TLS) zaradi napak v klasifikaciji.



Slika 32: Napake klasifikacije in daljnovodi, ki z laserskim skeniranjem niso bili zajeti (oblak točk ALS).



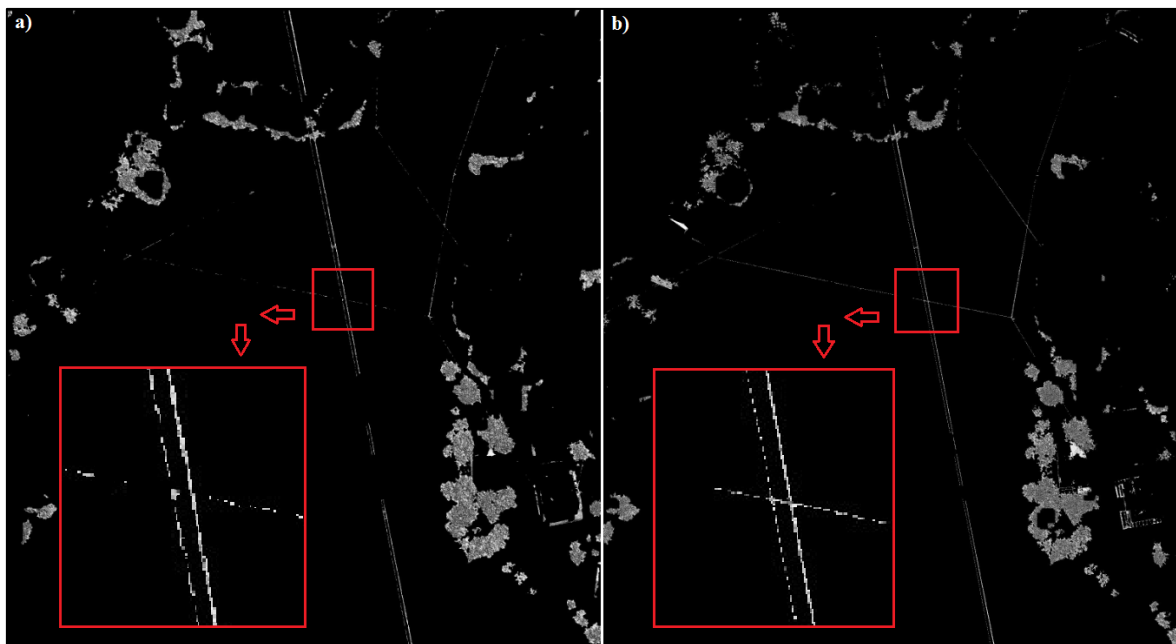
Slika 33: Napake klasifikacije in daljnovodi, ki z laserskim skeniranjem niso bili zajeti (oblak točk TLS).

Za lažje zaznavanje daljnovodov iz oblaka točk smo območje ALS in TLS (slika 31) razdelili na 16 enakih delov. Širina podobmočja je 39,805 m, višina podobmočja je 42,55 m. Koordinate točk, ki pripadajo tako razdeljenim območjem, smo z orodjem las2txt zapisali v tekstovno datoteko. Urejena tekstovna datoteka nam je služila kot vhodna datoteka za naš lasten program za samodejno zaznavanje linij v oblaku točk, ki smo ga izdelali v Matlab-ovem programskem okolju.

6.2.1 Rastriranje predhodno obdelanih oblakov točk

Predhodno obdelana oblaka točk ALS in TLS (slika 31) smo rastrirali z orodjem las2dem. Orodje začasno triangulira lidarske točke v nepravilno trikotniško mrežo (TIN), ki jo nato rastrira. Izdelali smo raster z velikostjo celice 0,1 m x 0,1 m.

Slika 34 prikazuje raster a) za oblak točk ALS in b) za TLS. Rastra sta prikazana s senčenjem. Iz povečave dela območja je razvidno, da so linije na rastru, izpeljanem iz TLS podatkov, ožje. To je posledica večje gostote in boljše prostorske ločljivosti (manjšega premera laserskega žarka) terestričnega laserskega skeniranja.



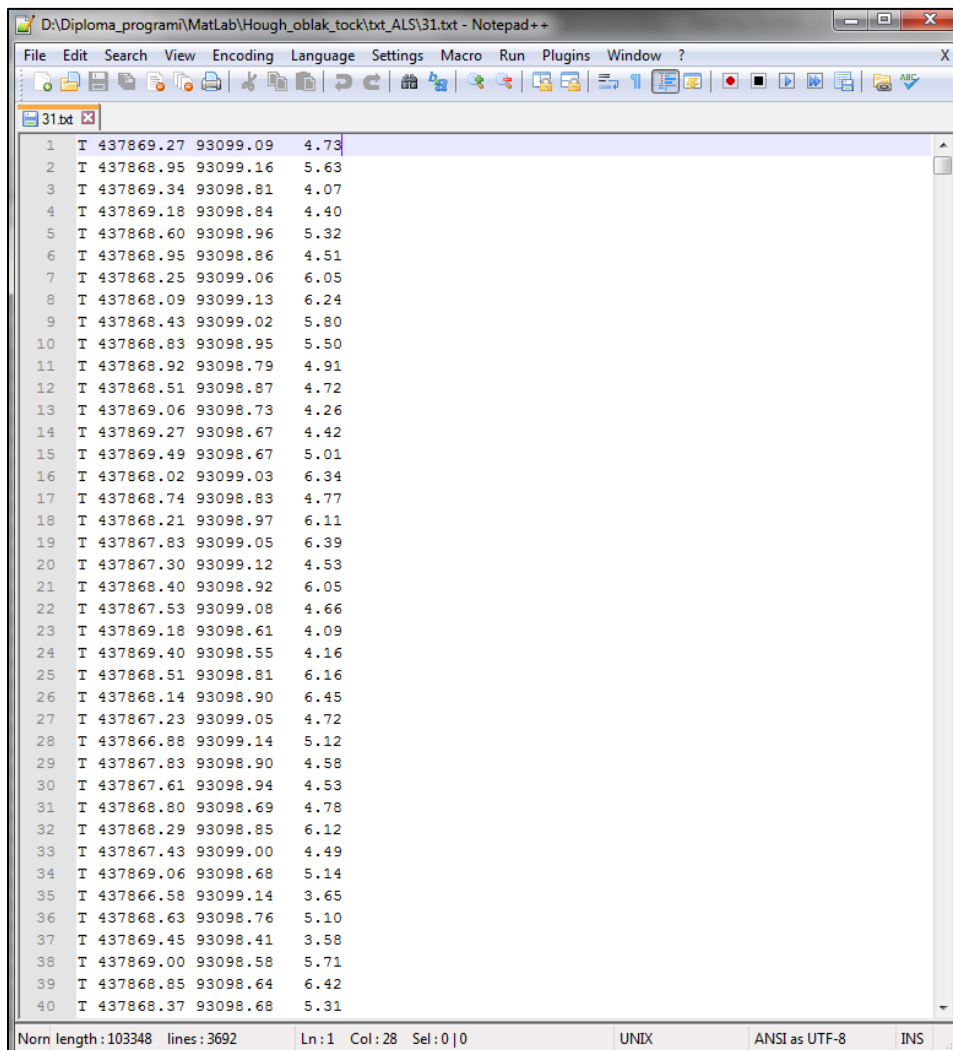
Slika 34: Raster iz predhodno obdelanih oblakov točk a) ALS in b) TLS.

Velikost celic v kvadratni celični mreži je potrebno skrbno izbrati, kajti od ločljivosti rastra je odvisna uspešnost operacij na njem (v našem primeru so te operacije iskanje linij). Velikost celic rastra smo določili glede na prostorsko ločljivost podatkov laserskega skeniranja in glede na časovno potratnost izvajanja operacij na rastru v programu Matlab. Z izdelavo rastra z znatno večjimi celicami bi izgubili ločljivost in detajl na rastru. Z nastavitvijo velikosti celic 1 m x 1 m bi bil prikazan na rastru en električni vod namesto dveh, ki sta med seboj v naravi oddaljena za približno 1,2 m. Pri postopku rastriranja z orodjem las2dem je pomembna nastavev parametra »kill triangles«, ki določa kakšno najmanjšo velikost trikotnikov v nepravilni trikotniški mreži bomo ohranili in jih upoštevali pri generiranju rastra. Parameter smo nastavili na vrednosti 0,5 za primer oblaka točk ALS, v primeru oblaka točk TLS smo izbrali vrednost 0,3. Vrednosti v rastru predstavljajo višine nad terenom. Tako dobljen raster smo zapisali v asc datoteko, ki smo jo uporabili kot vhodno datoteko v programskem okolju Matlab.

6.3 Zajem daljnovodov

6.3.1 Zajem daljnovodov iz predhodno obdelanega oblaka točk

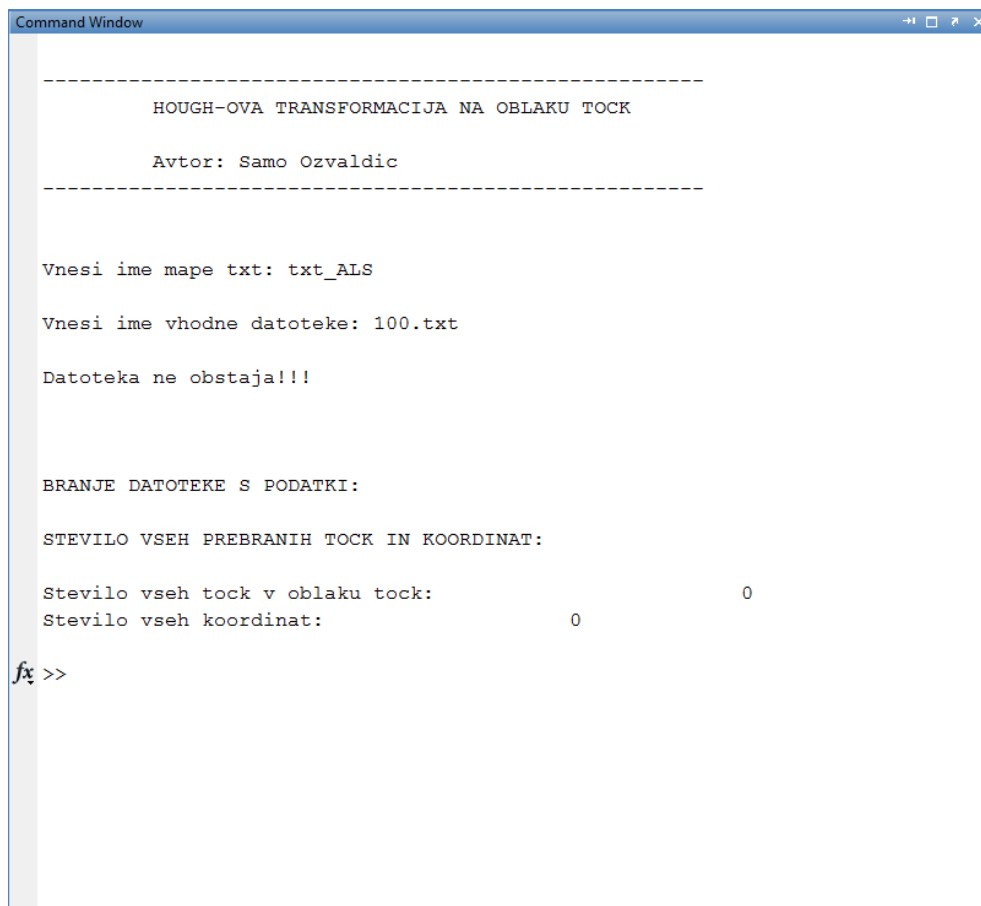
Algoritem za samodejen zajem daljnovodov iz oblaka točk temelji na Hough-ovi transformaciji, tako za primer ALS, kot za primer TLS. Napisan program smo najprej preizkusili na testnem območju. Med testiranjem smo ga dopolnjevali in izboljševali.



```
1 T 437869.27 93099.09 4.73
2 T 437868.95 93099.16 5.63
3 T 437869.34 93098.81 4.07
4 T 437869.18 93098.84 4.40
5 T 437868.60 93098.96 5.32
6 T 437868.95 93098.86 4.51
7 T 437868.25 93099.06 6.05
8 T 437868.09 93099.13 6.24
9 T 437868.43 93099.02 5.80
10 T 437868.83 93098.95 5.50
11 T 437868.92 93098.79 4.91
12 T 437868.51 93098.87 4.72
13 T 437869.06 93098.73 4.26
14 T 437869.27 93098.67 4.42
15 T 437869.49 93098.67 5.01
16 T 437868.02 93099.03 6.34
17 T 437868.74 93098.83 4.77
18 T 437868.21 93098.97 6.11
19 T 437867.83 93099.05 6.39
20 T 437867.30 93099.12 4.53
21 T 437868.40 93098.92 6.05
22 T 437867.53 93099.08 4.66
23 T 437869.18 93098.61 4.09
24 T 437869.40 93098.55 4.16
25 T 437868.51 93098.81 6.16
26 T 437868.14 93098.90 6.45
27 T 437867.23 93099.05 4.72
28 T 437866.88 93099.14 5.12
29 T 437867.83 93098.90 4.58
30 T 437867.61 93098.94 4.53
31 T 437868.80 93098.69 4.78
32 T 437868.29 93098.85 6.12
33 T 437867.43 93099.00 4.49
34 T 437869.06 93098.68 5.14
35 T 437866.58 93099.14 3.65
36 T 437868.63 93098.76 5.10
37 T 437869.45 93098.41 3.58
38 T 437869.00 93098.58 5.71
39 T 437868.85 93098.64 6.42
40 T 437868.37 93098.68 5.31
```

Slika 35: Oblika dela vhodne txt datoteke.

Na sliki 35 je predstavljena oblika dela vhodne txt datoteke. Program zahteva specifično obliko datoteke. Vsaka vrstica datoteke se mora začeti s črko T (asociacija na besedo točka), nato sledi y in x koordinata in višina točke nad terenom. Če datoteka ne vsebuje na začetku vrstice črko T, ali pa je ta zamenjana s kakšnim drugim znakom, ga program izpostavi in zahteva popravo vhodne datoteke. V primeru, da vnesemo ime txt datoteke, ki ne obstaja, nas o tem program obvesti (slika 36). Možna je tudi situacija, ko vnesemo prazno datoteko. Program se tudi v tem primeru predhodno zaključí.



```
Command Window
-----
          HOUGH-OVA TRANSFORMACIJA NA OBLAKU TOCK
          Avtor: Samo Ozvaldic
-----

Vnesi ime mape txt: txt_ALS
Vnesi ime vhodne datoteke: 100.txt
Datoteka ne obstaja!!!

BRANJE DATOTEKE S PODATKI:
STEVILLO VSEH PREBRANIH TOCK IN KOORDINAT:

Stevilo vseh tock v oblaku tock:           0
Stevilo vseh koordinat:                   0

fx >>
```

Slika 36: Izpis v ukaznem oknu v primeru, ko smo vnesli napačno ime txt datoteke.

Kot je razvidno iz slike 37, je potrebno najprej navesti ime mape, v kateri se nahaja vhodna txt datoteka. Šele nato se vnese ime txt datoteke. Pravilno urejena datoteka z veljavnim imenom program »pozove« na nadaljevanje. Najprej se prebere celotna vsebina datoteke, ki se izpiše na ekranu (slika 37). Nato program zahteva vnos devetih parametrov (slika 37), ki bodo podrobneje opisani v nadaljevanju. Sledi procesiranje vnesenih podatkov in parametrov. Na ekran se izpiše maksimalno število točk z istimi ρ -ji pri določeni θ in števila točk, ki »ležijo« na neki premici (delno na sliki 37 in 38). V primeru, ko program obravnava 5 linij ali manj, se dolžina le teh izpiše na ekran (slika 38). Ti dve navedeni informaciji sta koristni v primeru iskanja najboljše kombinacije nastavitve parametrov. Dolžina linij se izpiše s štirinajstimi decimalnimi mesti. Takšen izpis nam pomaga pri odstranitvi odvečne linije v primeru zelo podobnih dolžin linij. Sledi še informacija o preseku odkritih linij z mejo območja, ki je določena za vsak del od 16 delov posebej z upoštevanjem, da je celotno območje razdeljeno na 16 delov. Za primerjavo časovne zahtevnosti računanja na različnih območjih obravnave se na koncu izpiše čas delovanja celotnega programa in čas delovanja funkcije Hough (slika 38), katera predstavlja bistvo celotnega algoritma.

```

Command Window
-----
          HOUGH-OVA TRANSFORMACIJA NA OBLAKU TOCK

          Avtor: Samo Ozvaldic
-----

Vnesi ime mape txt: txt_ALS

Vnesi ime vhodne datoteke: 31.txt

DANE KOORDINATE TOCK [m]:
      X           Y           Z
437869.27      93099.09       4.73
437868.95      93099.16       5.63
437869.34      93098.81       4.07
437869.18      93098.84       4.40
437868.60      93098.96       5.32
437868.95      93098.86       4.51
437868.25      93099.06       6.05
437868.09      93099.13       6.24
437868.43      93099.02       5.80
437868.83      93098.95       5.50
437868.92      93098.79       4.91
437868.51      93098.87       4.72
437869.06      93098.73       4.26
      ●
      ●
      ●
437858.20      93057.77       8.21
437858.38      93057.71       6.43
437858.28      93057.44       8.35
437858.35      93057.03       8.69
437857.51      93057.26       7.68
437858.65      93056.82       7.07
437857.60      93056.93       8.09

min x: 437850.15  min y: 93056.67
max x: 437869.49  max y: 93099.17

BRANJE DATOTEKE S PODATKI:

STEVILO VSEH PREBRANIH TOCK IN KOORDINAT:

Stevilo vseh tock v oblaku tock:                3691
Stevilo vseh koordinat:                          11073

NASTAVITEV PARAMETROV:

Vnesi locljivost thete (v kotnih stopinjah): 1
Vnesi locljivost ro-ja (1000 za 0.001 m, 100 za 0.01 m, itd.): 1000
Vnesi spodnjo mejo stevila tock: 8
Vnesi zgornjo mejo stevila tock: 100000
Vnesi spodnjo mejo dolzine linij (v metrih): 30
Vnesi zgornjo mejo dolzine linij (v metrih): 10000
Vnesi spodnjo mejo razlike med ro-ji (v metrih): 0
Vnesi zgornjo mejo razlike med ro-ji (v metrih): 0.6
Vnesi stevilo vrstice za obdrzanje ro-ja glede na razliko z drugimi ro-ji (1 ali 2): 2

MAKSIMALNO STEVILO TOCK Z ISTIM RO-JEM PRI DOLOCENI THETI: 25

STEVILO TOCK Z ISTIMI RO-JI PRI DOLOCENI THETI:

1
2
3
4
5
6

```

Slika 37: Izpis koordinat točk na ekranu in vnos parametrov.

```
Command Window
13
14
15
16
17
18
19
20
22
23
24
25

Dolzina 1 1: 35.53284114730609
Dolzina 2 1: 30.71420029887618

Koordinate preseka linije 1 1 z mejo obmocja:
y1=437849.50
y2=437857.77
x1=93099.18
x2=93056.63

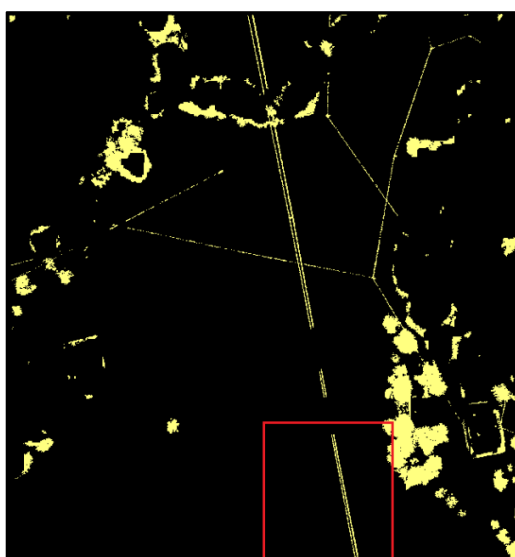
Koordinate preseka linije 2 1 z mejo obmocja:
y1=437850.27
y2=437858.54
x1=93099.18
x2=93056.63

Cas delovanja funkcije Hough: h=0 min=0 sek=4.47

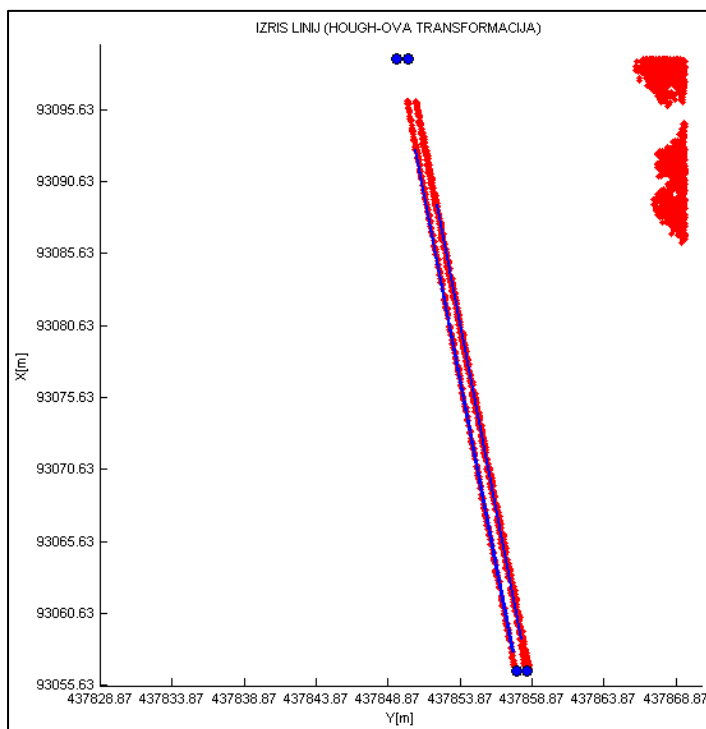
Cas delovanja celotnega programa: h=0 min=0 sek=32.97
fx >> |
```

Slika 38: Končni del izpisa na ekranu.

Vzporedno z izpisom na ekranu program izriše obravnavane točke (rdeča barva), izračunane linije (modra barva) in točke preseka linij z obravnavanim območjem (modra barva) na grafikon (slika 40). Slika 39 prikazuje lokacijo obravnavanega območja v oblaku točk ALS.



Slika 39: Lokacija obravnavanega območja.



Slika 40: Izris obravnavanih točk (rdeče točke), linij daljnovodov (modre linije) in presekov linij z mejo območja (modre točke).

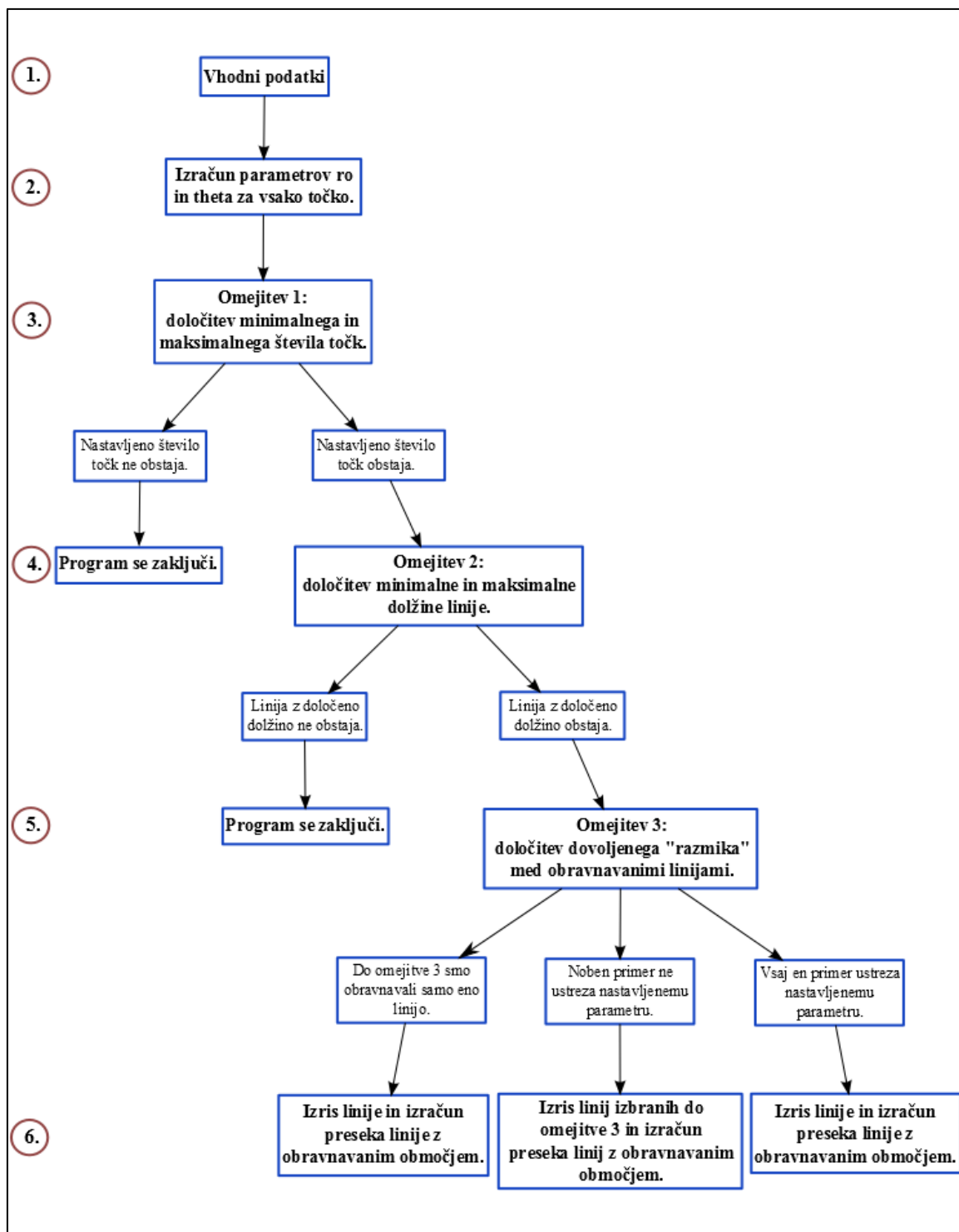
6.3.1.1 Shematski prikaz delovanja programa

Potek programa bi lahko enostavno opisali z naslednjimi alinejami:

- vključitev map s funkcijami in map s txt datotekami,
- odpiranje txt datoteke,
- branje txt datoteke,
- vnos parametrov,
- Hough-ova transformacija,
- izključitev vseh map,
- zapiranje txt datoteke,
- določitev porabljenega časa programa za izračun.

Slika 41 prikazuje potek algoritma. Točko 1, vhodne podatke, smo že obravnavali v prejšnjem podpoglavju.

Točka 2 predstavlja izračun parametra ρ glede na interval kota θ in glede na ločljivosti kota. Parametra ρ in θ se izračunata za vsako točko. ρ predstavlja vrstični vektor. Njegova velikost je odvisna od števila obravnavanih točk in od nastavljene ločljivosti kota θ .



Slika 41: Shematski prikaz delovanja programa.

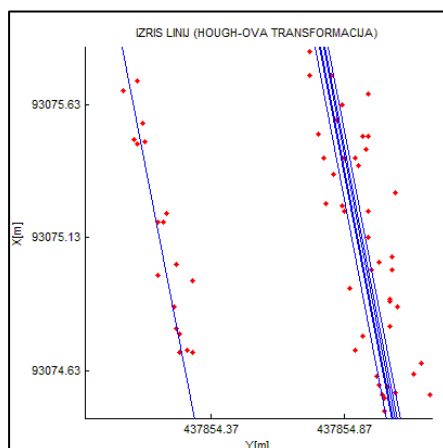
Za primer s 3600 točkami in z resolucijo kota θ 1° je velikost vektorja \mathbf{p} 1×648000 . Parameter za ločljivost kota θ vnašamo v kotnih stopinjah (npr. 1° , $0,5^\circ$, $0,1^\circ$...). Večja kot je omenjena ločljivost, več časa bo program porabil za izračun, zato smo se mi omejili na ločljivost 1° . Robustnost programa je odvisna tudi od nastavljene dolžinske ločljivosti (ločljivosti ρ). Dolžinska ločljivost se vnese v program kot drugi parameter. Od nje je odvisno, koliko točk bo predstavljalo neko linijo. Pri večji

ločljivosti bo to število manjše in obratno. Ne moremo pa trditi, da boljša ločljivost vodi k boljšim končnim rezultatom, kajti boljša ločljivost pomeni manjšo robustnost in tako se izriše linija glede na manjše število točk, ki mogoče ne predstavljajo najboljših rešitev. Možna smer poteka linij pa omejuje kotna ločljivost.

V našem programu parametrskega prostora nismo razdelili na zbiralne celice. Izbor parametrov ρ in Θ smo se lotili nekoliko drugače. Iz izračunanega vektorja \mathbf{p} smo poiskali edinstvene vrednosti in prešteli, koliko teh vrednosti vsebuje vektor \mathbf{p} . Predhodno smo vrednosti vektorja \mathbf{p} , izračunanega v točki 2, zaokrožili na določeno decimalno mesto (nastavili smo dolžinsko ločljivost). Točka 3 predstavlja nastavev števila točk, ki »ležijo« na liniji (minimalno in maksimalno število). Od te vrednosti je odvisno, kateri ρ nas bo zanimal. Tako izbranemu ρ -ju smo poiskali kot Θ , na podlagi katerega je bil izračunan. Izbrali smo vrednost kota Θ , ki se je največkrat pojavil, kajti možno je, da so bile izračunane enake vrednosti ρ -ja pri različnih vrednostih kota Θ . Če se največkrat ponovijo dve različni vrednosti kota, obdržimo obe liniji. Katere točke pripadajo liniji, ki je predstavljena s parametroma ρ in Θ , smo izračunali s pomočjo lokacije obravnavane vrednosti ρ znotraj vrstičnega vektorja \mathbf{p} in glede na izbrano ločljivost kota Θ .

Če nastavljeno število točk obstaja, program izbere pripadajoče ρ -je in Θ -te. V nasprotnem primeru se zaključí. Točka 4 predstavlja nastavev parametra za minimalno in maksimalno dolžino linije. Obdržijo se samo linije, ki zadostujejo pogoju. Če linij z nastavljeno dolžino ni, se program zaključí.

Pod točko 5 se nastavi parameter za razliko med ρ -ji. Za vzpostavitev tega parametra smo se odločili, ker se v več primerih izriše več linij na mestu, kjer bi morala potekati le ena linija (slika 42). Če gre za veliko število takšnih linij in so vse primerne za izbor, bi bila njihova selekcija glede na parameter dolžin nekoliko zamudna. Pri pravilni nastavitvi parametra v točki 5 (nastavlja se minimalna in maksimalna vrednost parametra), se ohrani samo ena izmed obravnavanih linij.



Slika 42: Prikaz potencialnih linij, ki so kandidati za nadaljnjo obravnavo.

Problema smo se lotili s sestavo matrike razlik med ρ -ji. Za primer, ko imamo opravka z n ρ -ji, je omenjena matrika oblike:

$$\mathbf{RAZ}_{n \times n} = \begin{bmatrix} |\rho_1 - \rho_1| & |\rho_1 - \rho_2| & \cdots & |\rho_1 - \rho_n| \\ |\rho_2 - \rho_1| & |\rho_2 - \rho_2| & \cdots & |\rho_2 - \rho_n| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |\rho_n - \rho_1| & |\rho_n - \rho_2| & \cdots & |\rho_n - \rho_n| \end{bmatrix}, \quad (16)$$

kjer n teče od 1 do števila ρ -jev, ki smo jih obdržali po 4. točki (n predstavlja pozitivno celo število).

Matrika **RAZ** ima po diagonali vrednosti 0 in je diagonalno simetrična matrika. Razlike ρ -jev, ki zadostujejo pogoju se zberejo v posebnem vektorju. Tem razlikam smo nato poiskali lokacijo v matriki **RAZ**. Vrednost ene razlike se v matriki pojavi dvakrat. Vektorja, ki podata informacijo o lokaciji obravnavane razlike v matriki **RAZ**, sta stolpčna in velikosti 2×1 .

Za primer, ko razlika med ρ_1 in ρ_2 zadostuje pogoju, sta prej omenjena vektorja oblike:

$$\mathbf{V1} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{S1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Vektorja **V1** in **S1** lahko v splošni obliki zapišemo kot:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} n + 1 \\ n \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} n \\ n + 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

V programu obravnavamo samo vektor **V1**. Zadnjemu parametru lahko vnesemo vrednost 1 ali 2. V primeru vnosa števila 2, se bo ohranila linija, ki jo določa ρ_2 . Če vnesemo vrednost 1, se bo ohranila linija, ki jo določa ρ_1 . V primeru da več razlik ρ -jev zadostuje pogoju, se lahko ohranita samo liniji, ki ju določata ρ z najmanjšim indeksom oz. ρ z največjim indeksom.

Slabost te metode je, da se ne morejo ohraniti linije, ki jih določajo ρ -ji z vmesnimi indeksi. V primeru, ko je oblak točk daleč od koordinatnega izhodišča, je lahko ovira dejstvo, da že majhna sprememba kota naklona premice, povzroča veliko spremembo ρ -ja. Tako je lahko razlika ρ -jev pri premicah, ki se sekajo in so skoraj vzporedne, večja, kot pa razlika ρ -jev dveh vzporednih premic, ki sta med seboj premaknjeni za določeno dolžino. Če pa bi prestavili oblak točk bližje koordinatnemu izhodišču pa bi majhna sprememba kota naklona premice, povzročala majhno spremembo ρ -ja in ne bi

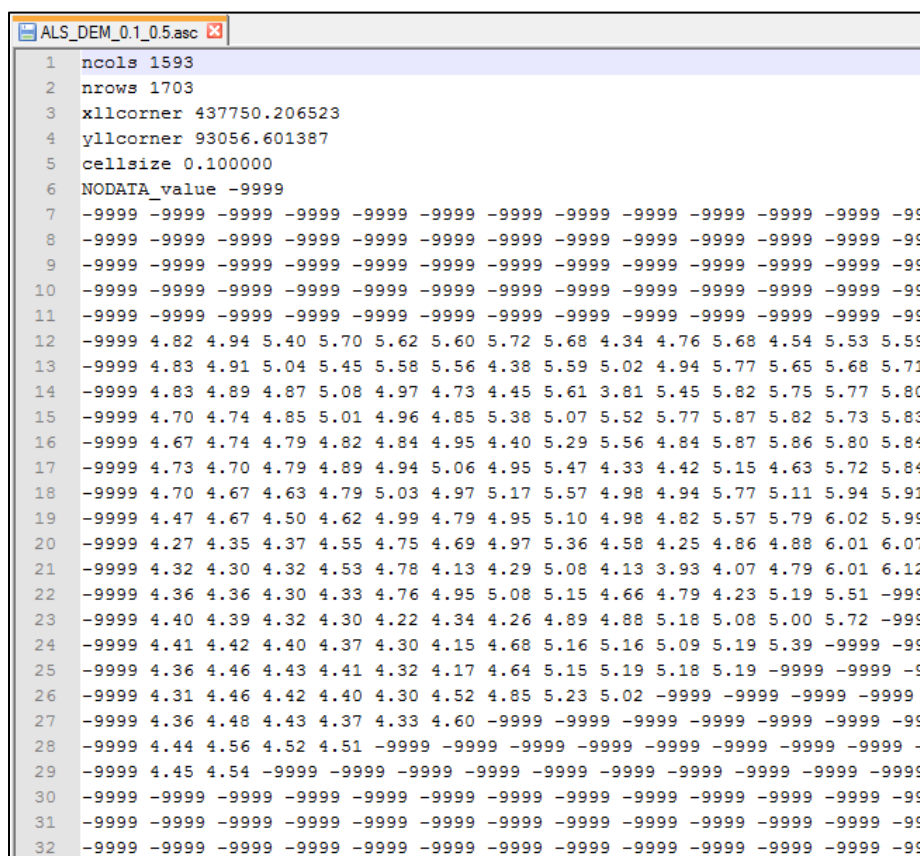
imeli težav z odstranjevanjem zelene linije. Problem, ki nastane zaradi oddaljenega koordinatnega izhodišča pri odstranitvi odvečnih linij, smo rešili s primerno nastavitvijo minimalne in maksimalne razlike med ρ -ji.

Točka 6 predstavlja zaključno fazo samodejnega zajema daljnovidov iz oblaka točk. Po 5 točki imamo lahko tri primere. V prvem primeru obdržimo do točke 5 samo eno linijo, ki jo izrišemo in izračunamo presečišče z obravnavanim območjem. V drugem primeru ni razlik med ρ -ji, ki bi zadostovale pogoju, zato se izrišejo linije in njihovi preseki z območjem, ki smo jih obdržali do točke 5. V primeru razlik med ρ -ji, ki zadostujejo pogoju, se izvede opisan postopek z matriko **RAZ**. Izrišejo se obdržane linije in njihovi preseki z območjem. V vseh treh primerih je podlaga oblak točk.

Dodatno smo izračunali še preseke linij znotraj posameznega območja. 16 območij smo nato združili v eno samo veliko območje.

6.3.2 Zajem daljnovidov na rastru

Kot je zapisano v podpoglavju 6.2.1 rastrirane podatke zapišemo v asc datoteko, ki predstavlja vhodno datoteko za program. Obliko vhodne datoteke predstavlja slika 43 za primer ALS.



```

ALS_DEM_01_0.5.asc
1 ncols 1593
2 nrows 1703
3 xllcorner 437750.206523
4 yllcorner 93056.601387
5 cellsize 0.100000
6 NODATA_value -9999
7 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
8 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
9 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
10 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
11 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
12 -9999 4.82 4.94 5.40 5.70 5.62 5.60 5.72 5.68 4.34 4.76 5.68 4.54 5.53 5.59
13 -9999 4.83 4.91 5.04 5.45 5.58 5.56 4.38 5.59 5.02 4.94 5.77 5.65 5.68 5.71
14 -9999 4.83 4.89 4.87 5.08 4.97 4.73 4.45 5.61 3.81 5.45 5.82 5.75 5.77 5.80
15 -9999 4.70 4.74 4.85 5.01 4.96 4.85 5.38 5.07 5.52 5.77 5.87 5.82 5.73 5.83
16 -9999 4.67 4.74 4.79 4.82 4.84 4.95 4.40 5.29 5.56 4.84 5.87 5.86 5.80 5.84
17 -9999 4.73 4.70 4.79 4.89 4.94 5.06 4.95 5.47 4.33 4.42 5.15 4.63 5.72 5.84
18 -9999 4.70 4.67 4.63 4.79 5.03 4.97 5.17 5.57 4.98 4.94 5.77 5.11 5.94 5.91
19 -9999 4.47 4.67 4.50 4.62 4.99 4.79 4.95 5.10 4.98 4.82 5.57 5.79 6.02 5.99
20 -9999 4.27 4.35 4.37 4.55 4.75 4.69 4.97 5.36 4.58 4.25 4.86 4.88 6.01 6.07
21 -9999 4.32 4.30 4.32 4.53 4.78 4.13 4.29 5.08 4.13 3.93 4.07 4.79 6.01 6.12
22 -9999 4.36 4.36 4.30 4.33 4.76 4.95 5.08 5.15 4.66 4.79 4.23 5.19 5.51 -9999
23 -9999 4.40 4.39 4.32 4.30 4.22 4.34 4.26 4.89 4.88 5.18 5.08 5.00 5.72 -9999
24 -9999 4.41 4.42 4.40 4.37 4.30 4.15 4.68 5.16 5.16 5.09 5.19 5.39 -9999 -9999
25 -9999 4.36 4.46 4.43 4.41 4.32 4.17 4.64 5.15 5.19 5.18 5.19 -9999 -9999 -9999
26 -9999 4.31 4.46 4.42 4.40 4.30 4.52 4.85 5.23 5.02 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
27 -9999 4.36 4.48 4.43 4.37 4.33 4.60 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
28 -9999 4.44 4.56 4.52 4.51 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
29 -9999 4.45 4.54 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
30 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
31 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
32 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999

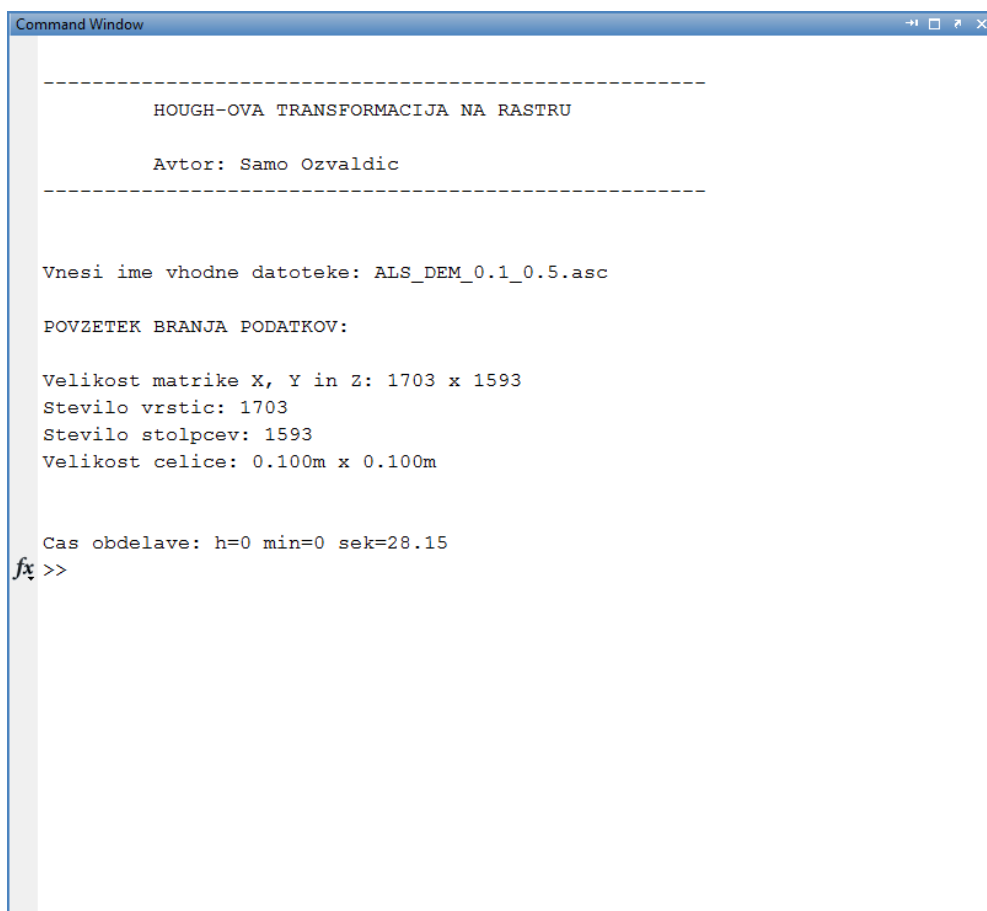
```

Slika 43: Oblika dela vhodne datoteke asc.

Iz datoteke je razvidno, da ima raster 1703 vrstic in 1593 stolpcev. Koordinata Y koordinatnega sistema D48/GK spodnjega levega kota rastra ima vrednost 437750,206523, koordinata X pa ima vrednosti 93056,601387. Velikost celice je 0,1 m x 0,1 m. Vrednost, kjer ni podatka, je nastavljena na -9999.

Iz slike 31 je razvidno, da se je na robnih predelih območja TLS odstranilo nekoliko več točk kot pri območju ALS, tako da je raster izdelan iz oblaka točk TLS nekoliko ožji kot raster izdelan iz ALS oblaka točk. V TLS primeru ima raster 1703 vrstic in 1553 stolpcev. Koordinata Y koordinatnega sistema D48/GK spodnjega levega kota rastra ima vrednost 437754,206523, koordinata X pa ima vrednosti 93056,601387. Ostale specifikacije so enake kot v primeru ALS.

Ob zagonu program zahteva vnos imena asc datoteke (slika 44). Če asc datoteka ne obstaja, se program zaključi.



```
Command Window
-----
HOUGH-OVA TRANSFORMACIJA NA RASTRU

Avtor: Samo Ozvaldic
-----

Vnesi ime vhodne datoteke: ALS_DEM_0.1_0.5.asc

POVZETEK BRANJA PODATKOV:

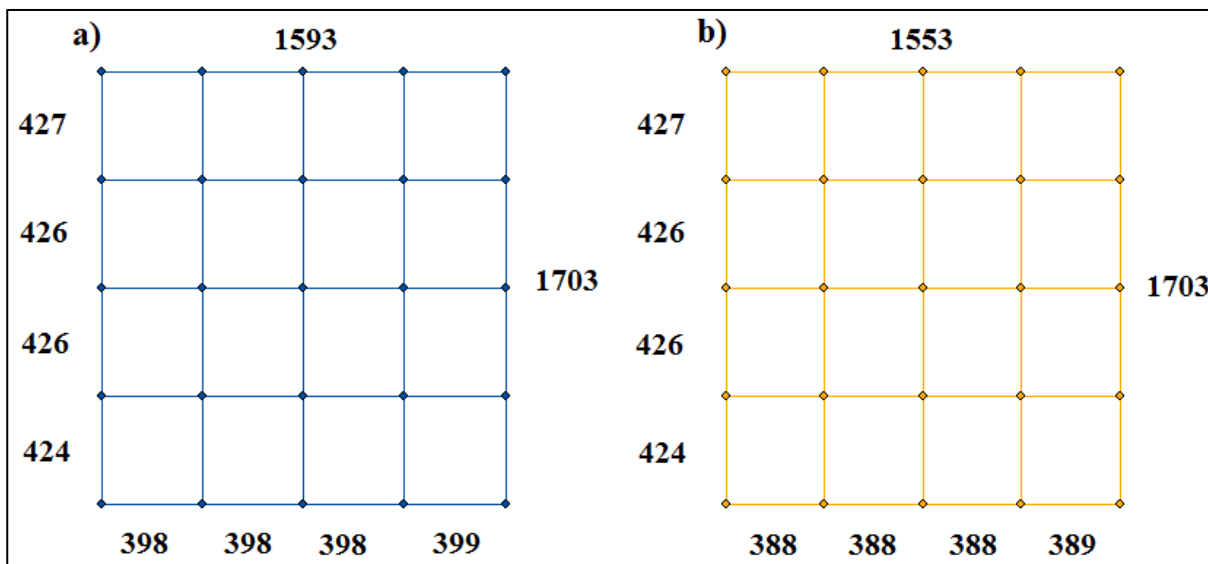
Velikost matrike X, Y in Z: 1703 x 1593
Stevilo vrstic: 1703
Stevilo stolpcev: 1593
Velikost celice: 0.100m x 0.100m

Cas obdelave: h=0 min=0 sek=28.15
fx >>
```

Slika 44: Vnos imena asc datoteke in izpis podatkov na zaslon.

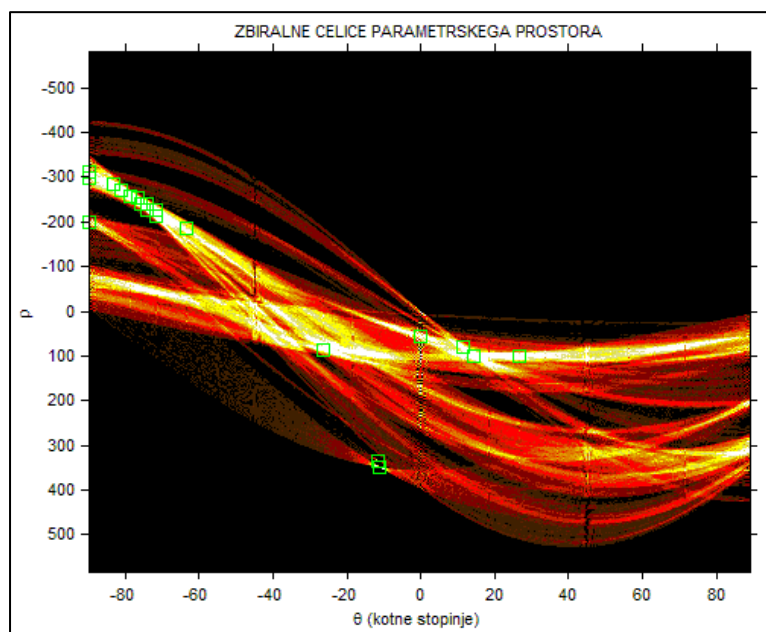
Tudi v primeru iskanja daljnovidov na rastru, smo območje razdelili na 16 podobmočij. Z razliko od razdelitve območja z orodji LAStools v primeru iskanja linij v oblaku točk, smo v tem primeru razdelili območje v programu Matlab. Zaradi različnega števila stolpcev rastra v primeru ALS in TLS,

se velikosti podobmočij med primeroma razlikujejo. Slika 45 a) prikazuje razdelitev območja za ALS primer, b) pa za TLS primer. Števila na levi strani mreže ponazarjajo število vrstic rastra posameznega podobmočja, števila pod mrežo pa predstavljajo števila stolpcev rastra posameznega podobmočja. Števila desno in nad mrežo predstavljajo skupno število vrstic in stolpcev v rastru.



Slika 45: Razdelitev območja na rastru.

Program zahteva vnos določenih parametrov, ki bodo predstavljeni v naslednjem podpoglavju. Slednje smo spreminjali kar s spreminjanjem programske kode. Po končanem izračunu se izriše območje zbiralnih celic parametrskega prostora (slika 46). Predstavljen primer obravnava ALS.



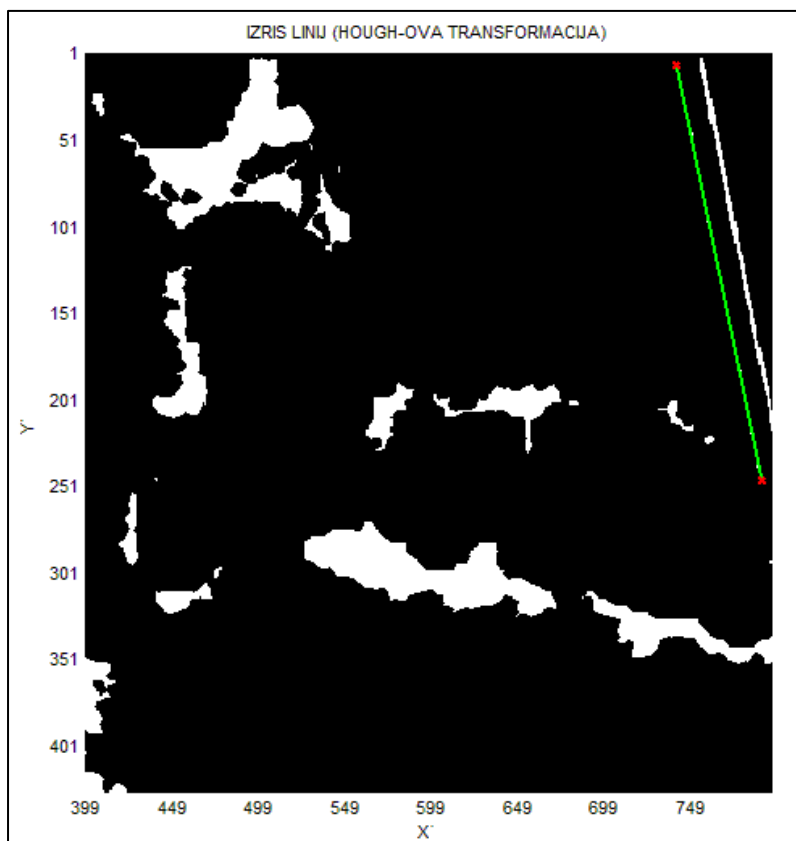
Slika 46: Parametrski prostor razdeljen na zbiralne celice.

Vodoravna koordinatna os predstavlja vrednosti kota θ , navpična os pa vrednosti ρ -ja. Pričakovano vrednost ρ -ja se izračuna iz slikovnih koordinat. Slika 46 prikazuje primer, ko smo ločljivost ρ -ja nastavili na 0,5, ločljivost kota θ pa na $0,05^\circ$. Svetlejša barva predstavlja večje število v zbiralnih celicah, temnejša barva predstavlja nižje število v zbiralnih celicah. Zeleni kvadrati ponazarjajo zbiralne celice z največjim številom glasov, glede na nastavljene parametre.

Linije se izrišejo v slikovnem koordinatnem sistemu (slika 48). Zelena linija je zajet daljnovod. Končne točke linije so označene z rdečim križcem. V nekaterih primerih je bilo odkritih več daljnovodov z enkratno nastavitvijo parametrov. V večini primerov smo daljnovode zajemali posamezno. Podobno smo se problema lotili v primeru iskanja linij, ki predstavljajo daljnovod, na primeru oblaka točk. Bela barva označuje vrednost 1 na rastru. Vrednost 0 (ni podatka) pa predstavlja črna barva. Na sliki 47 je prikazano območje obravnave. Podlaga je raster predstavljen s senčenjem. Naknadno smo pretvorili slikovne koordinate krajnih točk linij in presečišč linij v GK ravninske koordinate, da smo lahko primerjali med seboj rezultate v oblaku točk in na rastru. Podoba, na kateri so bili vsi zaznani daljnovodi, smo pridobili z združitvijo rezultatov iz posameznih območij. Znotraj posameznega območja smo še izračunali preseke linij.



Slika 47: Prikaz obravnavanega območja.



Slika 48: Samodejno zajet daljnovid na rastru.

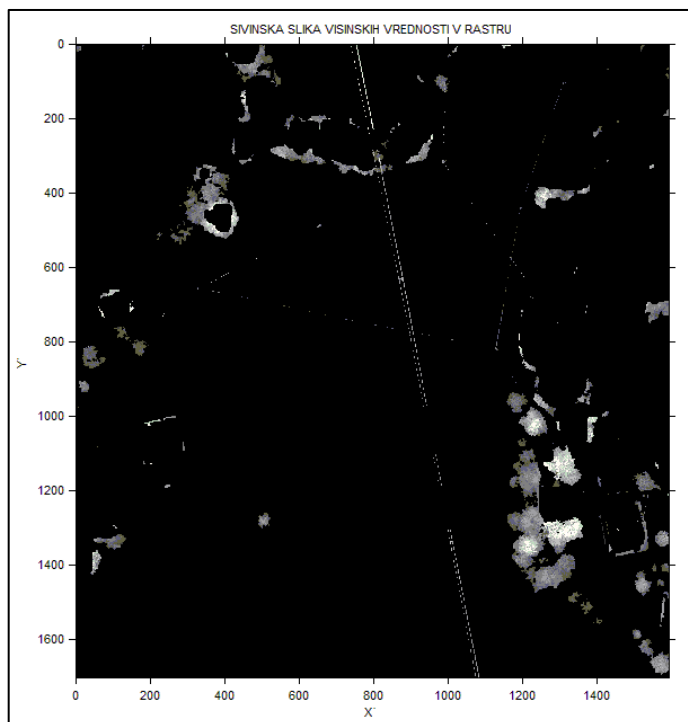
6.3.2.1 Delovanje programa

Večina programske kode temelji na obstoječih matematičnih funkcijah iz Matlab-ove knjižnice ter na predstavitvi primera delovanja teh funkcij na spletni strani MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013.

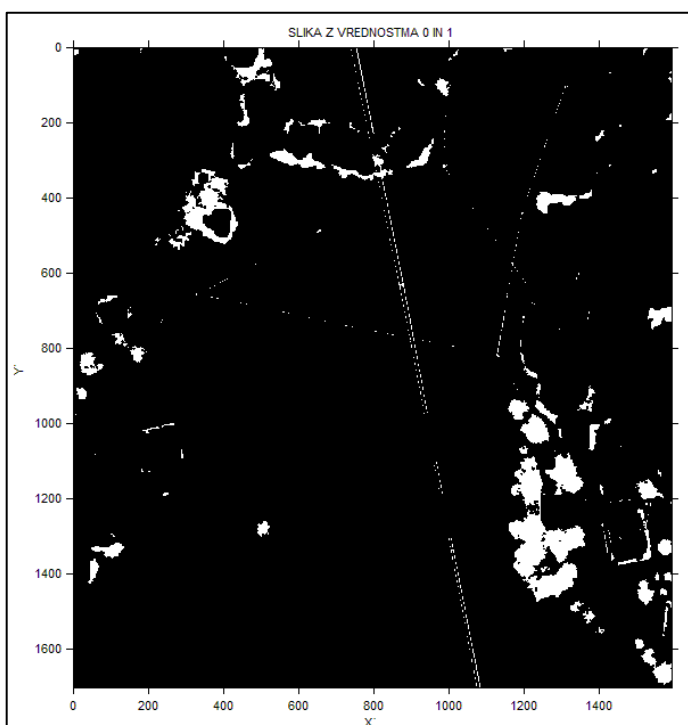
Potek programa lahko opišemo z naslednjimi alinejami:

- vključitev map s funkcijami in map z asc datotekami,
- odpiranje asc datoteke,
- branje asc datoteke,
- vnos parametrov,
- Hough-ova transformacija,
- izključitev vseh map,
- zapiranje asc datoteke,
- določitev porabljenega časa programa za izračun.

Po branju vhodne datoteke nas zanima predvsem matrika višin rastriranih podatkov. Velikost te matrike je odvisna od števila vrstic in stolpcov rastra. Matriko smo pretvorili v sivinsko sliko s funkcijo `mat2gray` (slika 49 – primer ALS). Vrnjena matrika vsebuje vrednosti od 0 (črna barva) do 1 (bela barva). Mi smo nastavili vse vrednosti, ki so večje od 0 na vrednost 1 (slika 50).



Slika 49: Sivinska slika.



Slika 50: Slika z vrednostima 0 in 1.

Slika 50 razdeljena na 16 delov predstavlja vhodni podatek za funkcijo *hough*. Funkcija *hough* (implementirana Hough-ova transformacija) je predstavljena z naslednjim zapisom: $[H, \theta, \rho] = \text{hough}(BW, \text{ParameterName}, \text{ParameterValue})$.

»BW« predstavlja vhodno podobo. Parameter »RhoResolution« specificira ločljivost ρ -ja. Vrednost, ki jo lahko nastavimo za ta parameter zajema interval med 0 in največje možno dolžino na sliki (dolžina diagonale). Privzeta vrednost za parameter »RhoResolution« je 1. Parameter »Theta« specificira vrednosti, ki jih zajame kot Θ . Privzete vrednosti za parameter »Theta« so določene z intervalom $-90^\circ \leq \theta < 90^\circ$, pri čemer je korak spreminjanja kota 1° . Izhodni argument »H« predstavlja Houghovo transformacijsko matriko. Izhodna argumenta sta tudi »rho« in »theta« (v kotnih stopinjah), ki vsebujeta vrednosti obravnavanih parametrov (MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013).

Naslednja uporabljena funkcija je *houghpeaks*: $\text{peaks} = \text{houghpeaks}(H, \text{numpeaks}, \text{param1}, \text{val1})$. Naloga funkcije je, da identificira zbiralne celice v Hough-ovem zbiralnem prostoru z največ glasovi.

Vhodni argument »H« je enak izhodnemu argumentu funkcije *hough*. Število poiskanih maksimumov v matriki H predstavlja skalar »numpeaks«. Če bomo nastavili vrednost za »numpeaks« na 5, nam bo funkcija poiskala 5 »vrhov« matrike H. Pri funkciji *houghpeaks* smo nastavili parameter »Threshold«, ki predstavlja mejo števila glasov v zbiralnih celicah, ki se upoštevajo pri iskanju zbiralnih celic z največ glasovi (podobno kot parameter minimalnega in maksimalnega števila točk pri našem lastnem programu). Parametra »Threshold« lahko zavzame vrednost od 0 do neskončnosti. Nastavljeno privzeto vrednost dobimo, če pomnožimo maksimalno vrednost matrike H z 0,5. Izhodni argument »peaks« je matrika velikosti $m \times 2$. Pri čemer m lahko zavzame vrednosti od 0 do nastavljenе vrednosti za »numpeaks«. Matrika vsebuje števila vrstic in stolpcev poiskanih »vrhov« matrike H (MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013).

Maksimumom v Hough-ovem zbiralnem prostoru, smo poiskali primerne linije s funkcijo *lines = houghlines* (BW, theta, rho, peaks, param1, val1, param2, val2, param3, val3).

»BW« predstavlja obravnavano podobo, na kateri iščemo daljnovode. Parameter »peaks« je izhodni argument funkcije *houghpeaks*. Vhodna argumenta »theta« in »rho« pa predstavljata izhodna argumenta funkcije *hough*. V funkciji *houghlines* smo nastavljali 3 parametre. Z nastavitvijo parametra »FillGap« smo združili vse segmente linij, ki so med seboj oddaljeni manj kot je nastavljena vrednost parametra. V obravnavo so vključeni segmenti linije, ki so določeni na podlagi koordinat izpeljanih iz ene zbiralne celice. Privzeta vrednost je 20. Parameter »MinLength« določa minimalno dolžino linije, ki jo obdržimo. Privzeta vrednost je 40. Sami smo še dodali parameter »MaxLength«, ki

določa maksimalno dolžino linije. Privzeto vrednost za parameter smo nastavili na 100. Sestava izhodnega argumenta »lines« funkcije *houghlines* je prikazana v preglednici 7 (MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013).

Preglednica 7: Sestava izhodnega argumenta funkcije *houghlines* (povzeto po (MathWorks (Analyzing Images. Detection Lines Using the Hough Transform), 2013).

Polje	Opis
point1	Vektor, ki vsebuje slikovne koordinate x in y prvega krajišča linije.
point2	Vektor, ki vsebuje slikovne koordinate x in y drugega krajišča linije.
theta	Kot v kotnih stopinjah, ki pripada izbrani zbiralni celici.
rho	Vrednost ρ -ja, ki pripada izbrani zbiralni celici.

7 REZULTATI IN DISKUSIJA

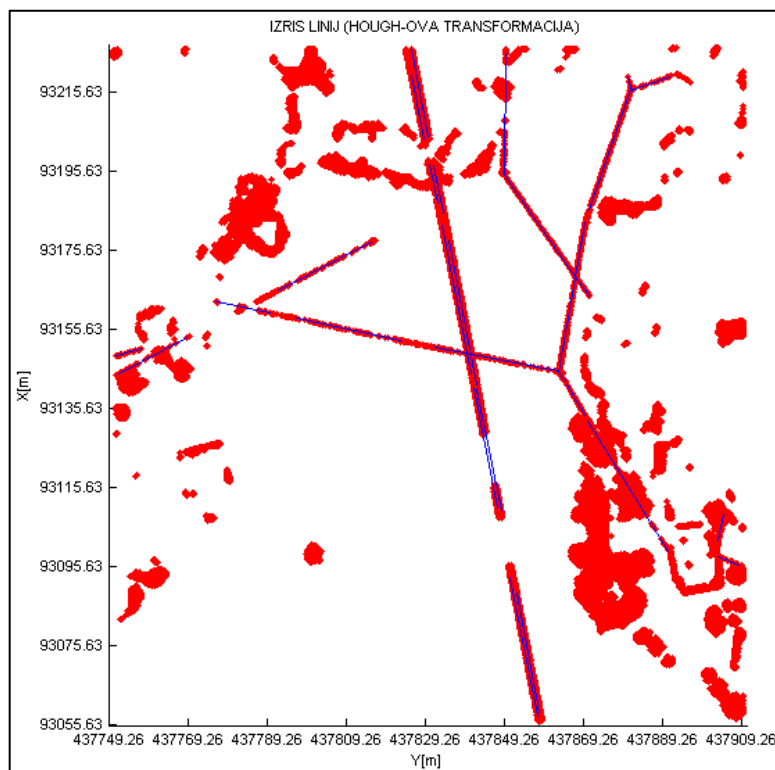
Rezultati so predstavljeni posebej za oblak točk in za raster. Navedena sklopa sta razdeljena na območje ALS in TLS. Primerjava položajev identičnih presečišč linij za štiri primere predstavlja svoj sklop. Primerjali smo ALS in TLS oblak točk, rastra, generirana iz ALS in TLS oblakov točk, ALS oblak točk in raster, generiran iz ALS oblaka točk ter TLS oblak točk in raster, generiran iz TLS oblaka točk. V prilogah A so grafično predstavljena obravnavana presečišča za primer ALS oblaka točk. V prilogi B so grafično predstavljena obravnavana presečišča za primer TLS oblaka točk. V prilogi C so grafično predstavljena obravnavana presečišča za primer rastriranih podatkov ALS, v prilogi D pa za primer rastriranih podatkov TLS.

7.1 Rezultati zajema daljnovodov iz oblaka točk

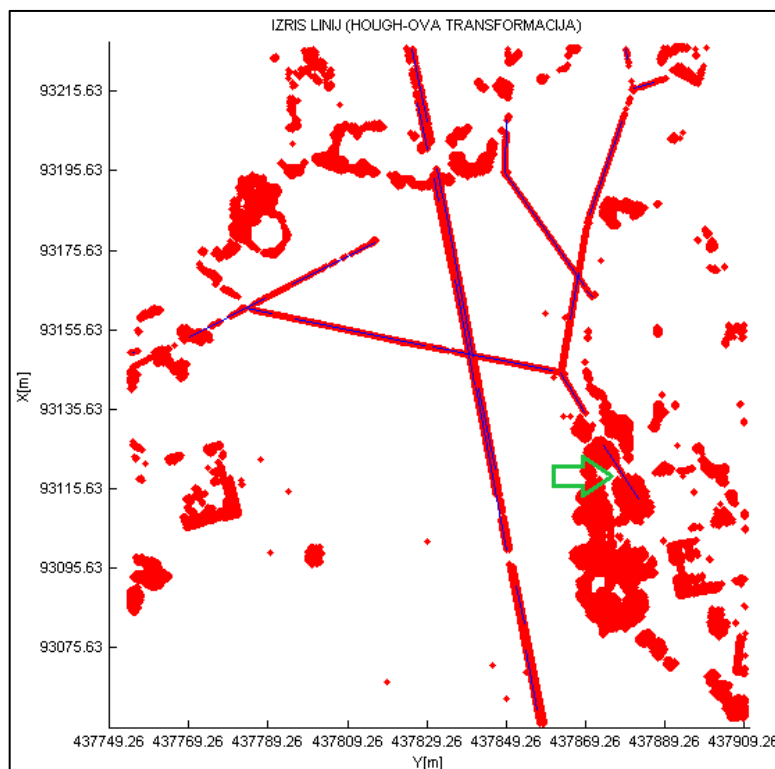
Na slikah 51 in 53 (a)) so prikazane linije oz. daljnovodi, ki smo jih samodejno zajeli iz predhodno obdelanega oblaka točk ALS. Na sliki 52 in 53 (b)) pa so prikazani rezultati za primer TLS. Vseh 16 podobmočij smo združili v celoto. Rdeče točke so točke, pridobljene z laserskim skeniranjem. Daljnovodi so umeščeni v GK ravninskem koordinatni sistem. Sliki 53 (a)) in 53 (b)) nekoliko bolj nazorno prikazujeta, kje so bili daljnovodi zajeti in kje ne. V splošnem so bili zajeti vsi daljnovodi, ki so bili posneti v postopku ALS in TLS (vsaj del, če ne v celoti). Na prvi pogled nam daje popolnejšo sliko o poteku daljnovodov primer ALS. Zajetih je bilo več daljnovodov kot v primeru TLS. V večini primerov so bili zajeti po vsej svoji dolžini znotraj podobmočij. Drugačno sliko nam daje primer TLS. Nekaterih daljnovodov ni bilo mogoče zajeti, ker niso bili posneti v postopku terestričnega laserskega skeniranja (sliki 32 in 33). Za razliko od primera ALS, smo v primeru TLS odkrili daljnovode nekoliko manj popolno (daljnovodi niso bili zajeti po celotni dolžini linije). Število zajetih daljnovodov je odvisno predvsem od perspektive snemanja ALS in TLS, od klasifikacije podatkov laserskega skeniranja in od »optimalne« izbire parametrov v programu Matlab. Ali bodo daljnovodi zajeti po vsej svoji dolžini ali ne, pa je odvisno predvsem od klasifikacije podatkov laserskega skeniranja in od »optimalne« izbire parametrov v programu Matlab.

V splošnem sta bila oba primera podobno klasificirana, zato klasifikacija ne more biti glavni vzrok manj popolnega zajetja daljnovodov v primeru TLS. Vzroke za nastalo situacijo lahko iščemo v večji količini podatkov terestričnega laserskega skeniranja in v perspektivi snemanja v primeru ALS in TLS. V primeru TLS smo imeli več težav z »optimizacijo« vnesenih parametrov in trajanjem programa. Oblaka točk ALS nismo redčili, v splošnem tudi oblaka TLS ne. Za primer daljnovoda, ki poteka skozi gozd do hiše, smo zajeli v primeru TLS na razredčenem oblaku točk (obdržali smo vsako četrto točko). Daljnovod je na sliki 52 označen z zeleno puščico. Dejstvo pa je, da večja količina podatkov vodi k večjemu številu kombinacij nastavljenih parametrov. Ne moremo trditi, da v primeru

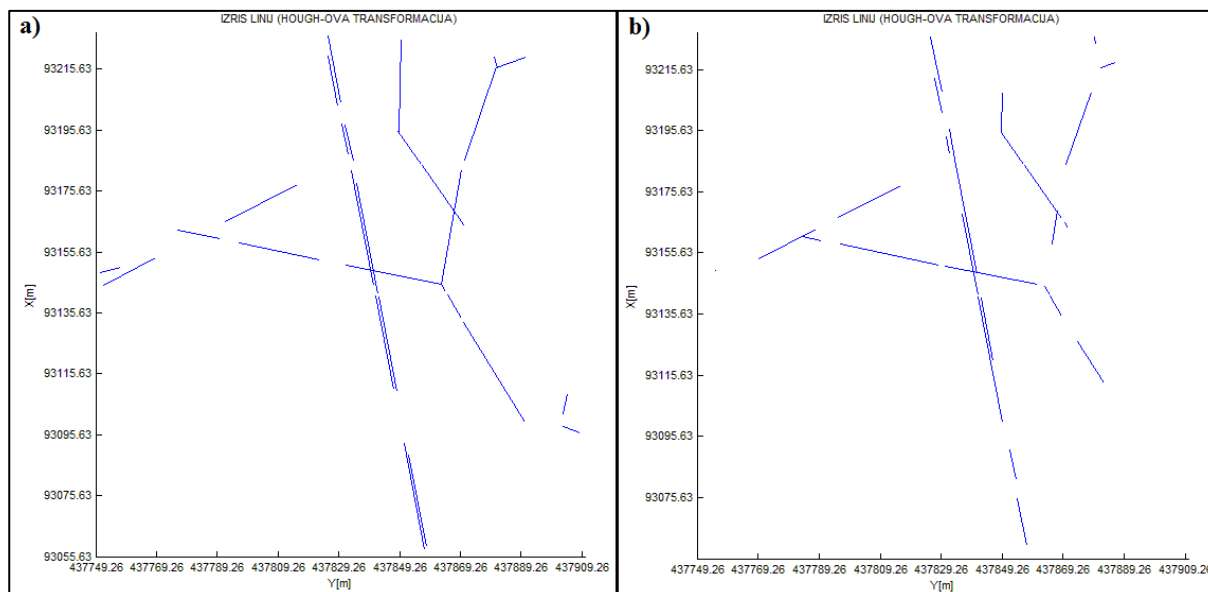
TLS ne bi mogli doseči podobne učinkovitosti kot v primeru ALS, vendar bi porabili veliko več časa kot za odkrivanje daljnovodov na primeru ALS.



Slika 51: Izris samodejno prepoznanih linij iz oblaka točk ALS.



Slika 52: Izris samodejno prepoznanih linij iz TLS oblaka točk.

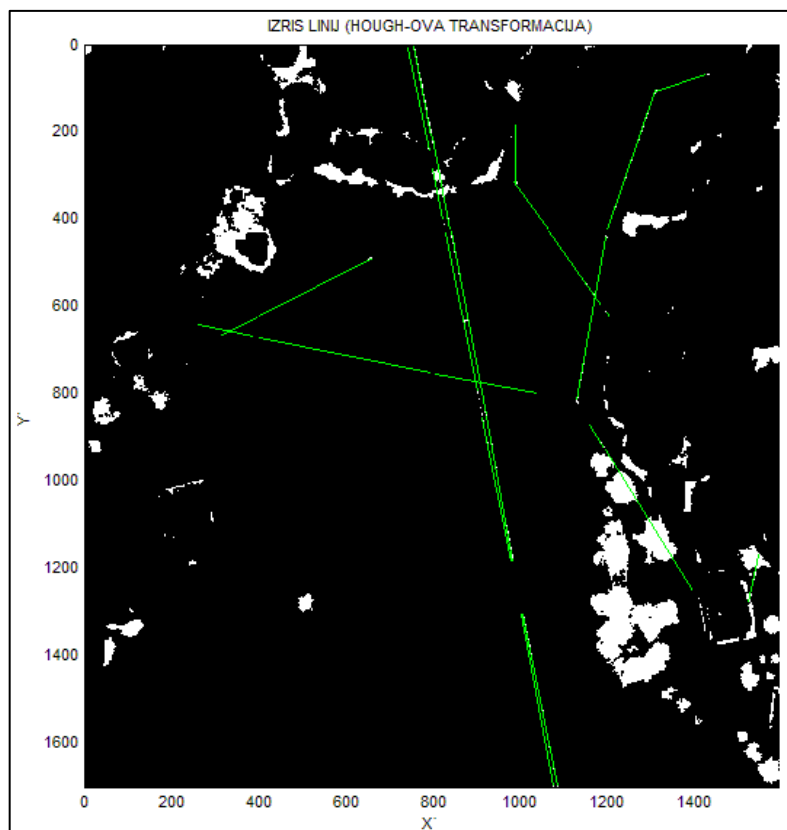


Slika 53: Izris linij za primer a) ALS in b) TLS brez oblaka točk.

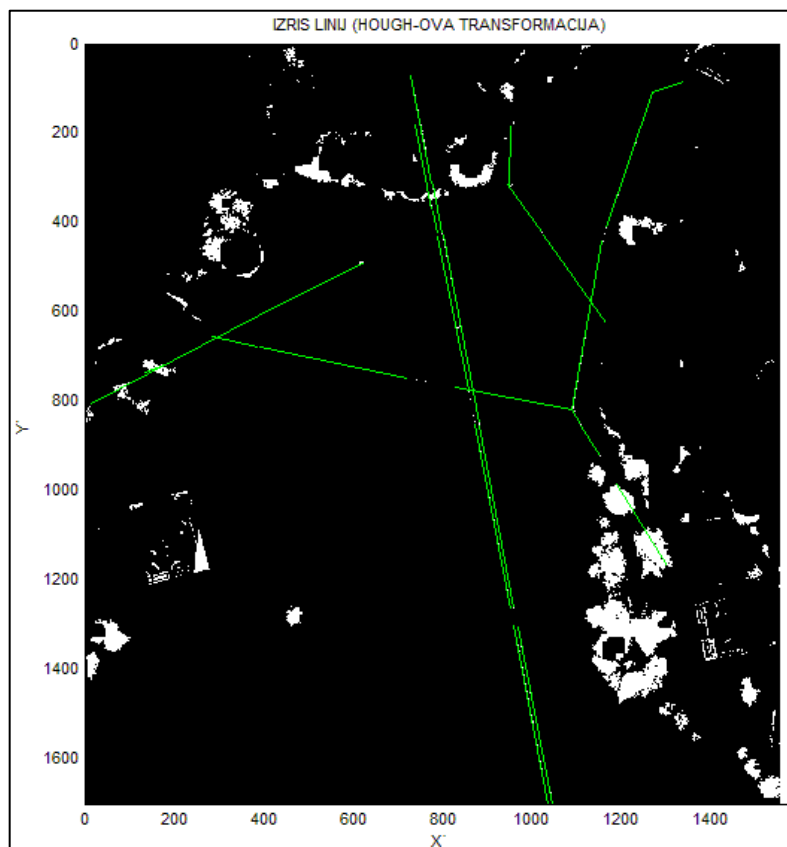
7.2 Rezultati zajema daljnovodov iz rastriranih podatkov

Slika 54 in 55 prikazujeta samodejen zajem linij oz. daljnovodov na rastru za primer ALS in TLS. Zelene linije predstavljajo zajete daljnovode. Bela barva predstavlja rastrirane podatke z vrednostjo 1, črna barva ima vrednost 0. Daljnovodi so umeščeni v slikovni koordinatni sistem. Slika 56 prikazuje zajete daljnovode brez podlage, umeščene v GK ravninski koordinatni sistem.

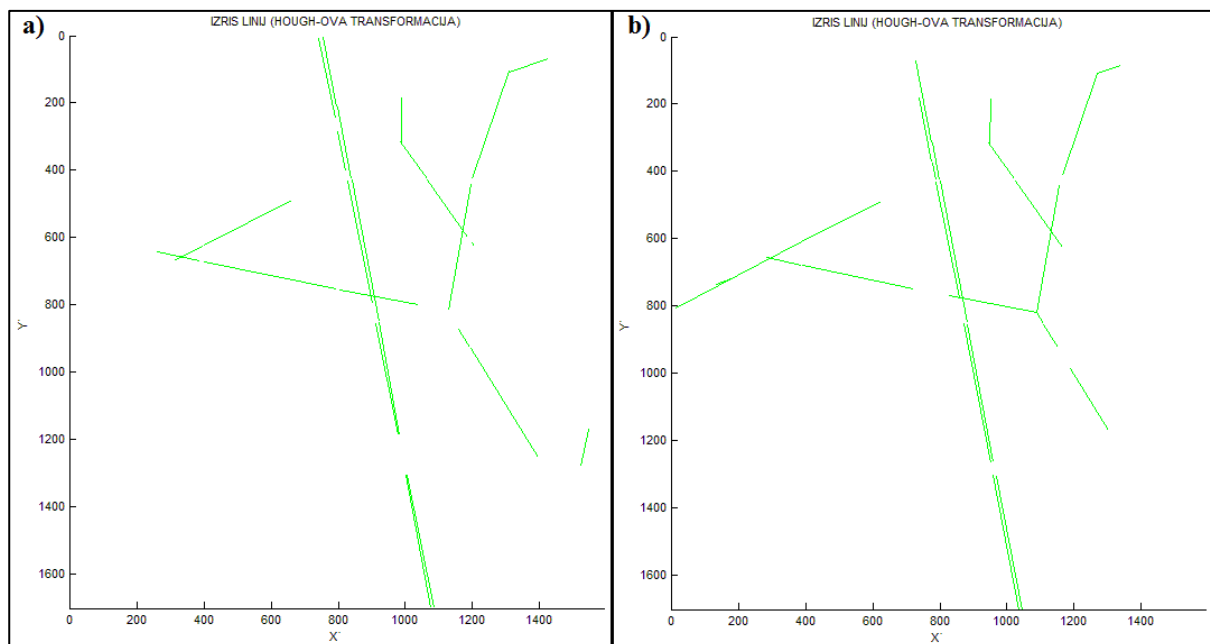
V primeru iskanja daljnovodov na rastru smo prišli do nekoliko boljših rezultatov na primeru TLS. Koliko linij bomo zajeli na rastru in kako popolno jih bomo zajeli je odvisno predvsem od ločljivosti rastra. Kot sem že omenil v podpoglavju 6.2.1 smo izdelali raster z velikostjo celic 0,1 m x 0,1 m. Primerno ločljivost smo izbrali glede na dosežene prostorske ločljivosti podatkov, glede na gostoto točk in glede na porabljen čas programa za zajem daljnovodov. Nekoliko popolnejši raster smo pridobili za primer TLS, zaradi boljše prostorske ločljivosti podatkov laserskega skeniranja in večje gostote točk kot v primeru ALS. V primeru manjših celic rastra bi obravnavali večjo količino podatkov in tako bi se porabljen čas za »optimalno« nastavitvev parametrov in posredno za odkritje linij znatno povečal. Teoretično pa bi lahko dosegli boljše prostorsko točnost. V primeru celic rastra, ki so znatno večje od dimenzije 0,1 m x 0,1 m, bi se izgubilo preveč informacij in samodejen zajem daljnovodov ne bi bil uspešen.



Slika 54: Izris linij za primer ALS.



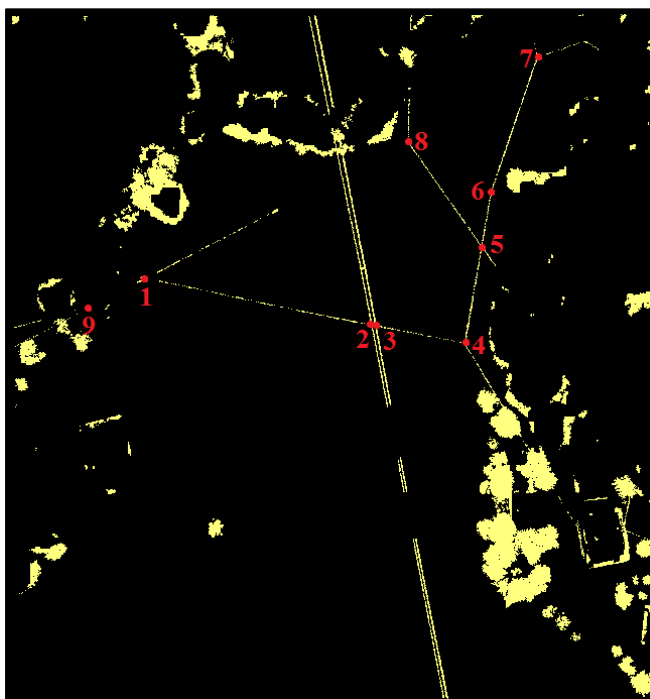
Slika 55: Izris linij za primer TLS.



Slika 56: Izris linij za primer ALS (a) in TLS (b)) brez podlage.

7.3 Primerjava položajev presečišč linij

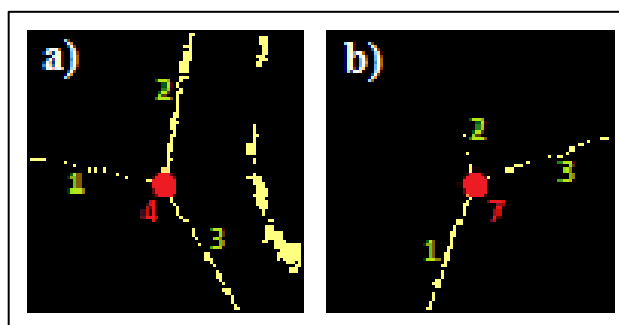
Z medsebojno primerjavo položajev presečišč linij (označenih na sliki 57), ki so bila izračunana za vsakega od štirih primerov, smo analizirali razlike v rezultatih, ki nastanejo zaradi različnega načina ekstrakcije daljnovidov (iz oblaka točk, iz rastra) in zaradi uporabe različnih podatkov (ALS, TLS).



Slika 57: Obravnavana presečišča. Podlaga je predhodno obdelan ALS oblak točk.

O absolutni položajni natančnosti ekstrahiranih daljnovidov ne moremo reči veliko, saj nismo imeli neodvisnih referenčnih podatkov, ki bi predstavljali prave položaje presečišč. Sklepamo, da je položajna natančnost zajetih daljnovidov v okviru specificirane natančnosti sistema TLS in ALS.

Zaradi prisotnih napak pri zajemu daljnovidov dobimo pri stičišču treh linij tri presečišča namesto enega. V analizo smo vključili vsa tri presečišča. Linije smo označili s številkami od 1 do 3 (slika 58). Npr. presečišče linije 1 in 2 na lokaciji 4 smo poimenovali presek 4 (12) (preglednice 8-12).



Slika 58: Presečišči 4 in 7.

Preglednice 8-12 prikazujejo za koliko se razlikujejo izračunane koordinate identičnih presečišč iz različnih primerov. dyx je izračunan kot $\sqrt{dy^2 + dx^2}$ in predstavlja razlike koordinat identičnih presečišč v 2D smislu. Izdelali smo 4 primerjave. V preglednicah smo z rdečo barvo označili razlike, ki so večje od 0,30 m.

Preglednica 8: Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz obeh oblakov točk (ALS in TLS).

ALS_OBLAK_TOCK - TLS_OBLAK_TOCK			
	dy [m]	dx [m]	dyx
presek 1	-0,30	0,16	0,34
presek 2	-0,14	0,22	0,26
presek 3	-0,25	0,25	0,35
presek 4 (12)	-0,17	0,23	0,29
presek 4 (13)	-0,14	0,23	0,27
presek 4 (23)	-0,16	0,27	0,31
presek 5	-0,16	0,27	0,31
presek 6	-0,29	-0,54	0,61
presek 7 (12)	0,05	0,46	0,46
presek 7 (13)	0,00	-0,05	0,05
Presek 7 (23)	0,13	0,03	0,13
presek 8	0,09	-0,13	0,16
presek 9	-0,76	-0,30	0,82

Preglednica 9: Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz obeh rastrov (ALS in TLS).

ALS_RASTER - TLS_RASTER			
	<i>dy</i> [m]	<i>dx</i> [m]	<i>dyx</i> [m]
presek 1	-0,02	0,24	0,24
presek 2	-0,08	0,19	0,21
presek 3	-0,05	0,18	0,19
presek 4 (12)	-0,10	0,21	0,23
presek 4 (13)	-0,06	0,20	0,21
presek 4 (23)	-0,09	0,25	0,27
presek 5	-0,07	0,16	0,17
presek 6	-0,04	0,22	0,23
presek 7 (12)	/	/	/
presek 7 (13)	-0,05	0,25	0,25
Presek 7 (23)	/	/	/
presek 8	0,10	0,15	0,18
presek 9	/	/	/

Preglednica 10: Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz rastra in oblaka točk ALS.

ALS_RASTER - ALS_OBLAK_TOCK			
	<i>dy</i> [m]	<i>dx</i> [m]	<i>dyx</i> [m]
presek 1	0,21	-0,07	0,22
presek 2	0,25	-0,14	0,28
presek 3	0,18	-0,12	0,22
presek 4 (12)	0,15	-0,13	0,20
presek 4 (13)	0,14	-0,13	0,19
presek 4 (23)	0,15	-0,15	0,22
presek 5	0,11	-0,06	0,12
presek 6	0,11	0,15	0,19
presek 7 (12)	/	/	/
presek 7 (13)	0,05	0,05	0,07
Presek 7 (23)	/	/	/
presek 8	-0,02	0,15	0,15
presek 9	/	/	/

Preglednica 11: Razlike v položajih presečišč, dobljenih iz rastra in oblaka točk TLS.

TLS_RASTER - TLS_OBLAK_TOCK			
	<i>dy</i> [m]	<i>dx</i> [m]	<i>dyx</i> [m]
presek 1	-0,07	-0,15	0,16
presek 2	0,19	-0,10	0,22
presek 3	-0,02	-0,06	0,07

...se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 11

presek 4 (12)	0,08	-0,11	0,14
presek 4 (13)	0,05	-0,10	0,11
presek 4 (23)	0,08	-0,14	0,16
presek 5	0,02	0,05	0,05
presek 6	-0,14	-0,61	0,62
presek 7 (12)	/	/	/
presek 7 (13)	0,10	-0,25	0,27
Presek 7 (23)	/	/	/
presek 8	-0,04	-0,14	0,14
presek 9	0,92	0,25	0,96

Za lažjo predstavo in analizo rezultatov smo za vsak obravnavani primer posebej izračunali aritmetično sredino za dy , dx in d_{yx} . V izračun smo vzeli absolutne vrednosti dy in dx . Preglednica 12 prikazuje opisano statistiko.

Preglednica 12: Izračunane aritmetične sredine razlik položajev presečišč.

	Aritmetična s_{dy} [m]	Aritmetična s_{dx} [m]	Aritmetična $s_{d_{yx}}$ [m]
ALS_OBLAK_TOCK - TLS_OBLAK_TOCK	0,20	0,24	0,34
ALS_RASTER - TLS_RASTER	0,07	0,21	0,22
ALS_RASTER - ALS_OBLAK_TOCK	0,14	0,12	0,19
TLS_RASTER - TLS_OBLAK_TOCK	0,14	0,16	0,24

Do največjih razlik je prišlo pri primerjavi rezultatov na podlagi obeh oblakov točk. V povprečju so bile vrednosti dy , dx in d_{yx} v tem primeru največje. Rdeča polja se pojavijo pri preseku 1, preseku 3, preseku 4 (23), preseku 5, preseku 6, preseku 7 (12) in pri preseku 9.

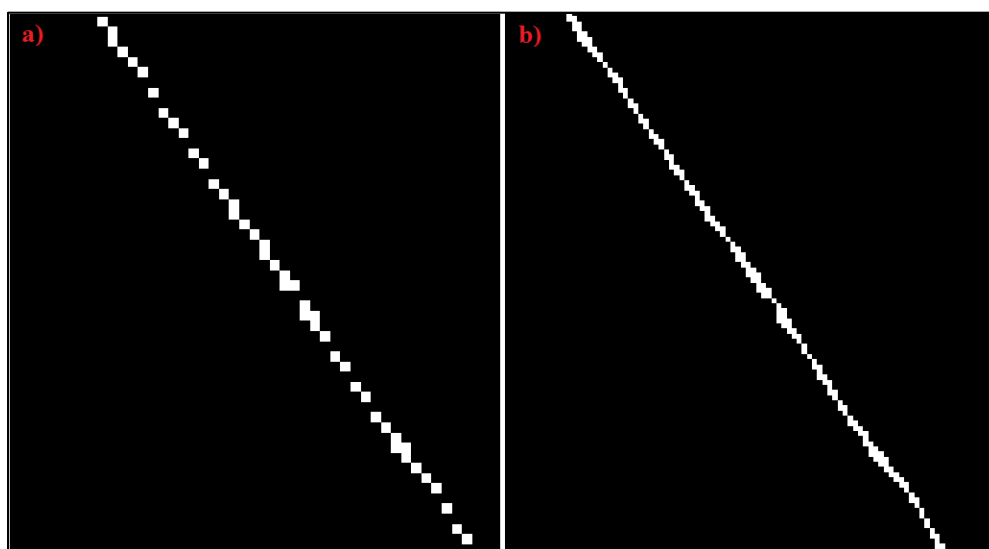
Do največje razlike je prišlo ravno pri slednjem. Po analizi rezultatov smo prišli do ugotovitve, da je do tako velikih razlik prišlo zaradi več dejavnikov. Zaradi prevelike časovne potrebe programa za samodejen zajem daljnovodov v oblaku točk, smo ločljivost kota θ v vseh primerih nastavili na 1° . Pri boljši kotni ločljivosti pričakujemo manjše razlike. S tem pa potrebuje program več časa za odkritje potencialnih linij. Preglednica 13 prikazuje povprečno časovno zaposlenost delovanja glavne programske funkcije pri odkrivanju daljnovodov na vseh štirih primerih (na oblakih točk ALS in TLS ter na rastrih, ki sta pridobljena iz ALS in TLS oblakov točk) pri nastavljeni ločljivosti kota $\theta 1^\circ$. Pri določitvi x koordinate krajnih točk linije nismo upoštevali enačbe (15) (v enačbi (15) predstavlja y koordinata našo x koordinato, tako da bi lahko zapisali funkcijo $x(y)$), ampak smo za minimalno in maksimalno vrednost x koordinate uporabili kar koordinate točk, ki so bile izbrane v postopku

glasovanja. Z izračunom x koordinate krajnih točk linije z enačbo (15) in s primerno nastavitvijo parametrov pričakujemo, da bi dobili boljše rezultate. Časovno veliko manj potratno pa bi bilo iskanje daljnovodov pri manjši gostoti točk in pri popolnejši odstranitvi vegetacije iz oblaka točk. Bolj problematične so najdene krajše linije. Pri njih je težje vizualno določiti, katero od najdenih linij, ki predstavljajo en daljnovod, bi bilo najbolje obdržati. Na manjšem območju se neoptimalna izbira naklona premic ne opazi. Bolj kot se oddaljujemo od krajne točke odkrite linije, večji vpliv ima slabša določitev naklona premice.

Preglednica 13: Povprečen čas delovanja glavne programske funkcije za vse štiri primere.

	Oblak točk ALS	Oblak točk TLS	Raster ALS	Raster TLS
Povprečen čas delovanja glavne programske funkcije	3 min 31 s	1 min 26 s	11 s	7 s

Pričakovano je prišlo do najmanjših razlik pri primerjavi presečišč linija, ki so bile odkrite na rastru in oblaku točk, pridobljenima iz istega sistema meritev (ALS ali TLS). Že v osnovi ni bilo razlik med podatki zaradi georeferenciranja. Do manjših razlik kot pri primerjavi primerov iz oblaka točk je prišlo v primeru rezultatov izpeljanih iz rastra (ALS in TLS primer). Odločitev za velikost celice rastra 0,1 m x 0,1 m se je izkazala kot pravilna. Posamezen kabel daljnovoda v večini primerov predstavlja ena linija celic (slika 59 a)), primer TLS). V primeru, ko so kabli daljnovoda zelo skupaj (en kabel nad drugim), potem le-te predstavlja ena linija celic rastra. Če bi generirali raster z večjo ločljivostjo, bi imeli na voljo več variant poteka linije skozi celice rastra in tako bi lahko prišlo do večjih razlik pri primerjavi koordinat identičnih presečišč (slika 59 b)).



Slika 59: a) velikost celic 0,1 m x 0,1 m, b) velikost celic 0,05 m x 0,05 m.

Glede na to, da pri primerjavi rezultatov na rastru ALS in TLS ni prišlo do večjih razlik in glede na pregled poteka linije pri kritičnih presečiščih, lahko rečemo, da so vzrok večjih razlik pri preseku 9 in 6 (preglednica 8) slabše odkrite linije v oblaku točk TLS. Večje položajno odstopanje pri presečišču 7 (12) (preglednica 8) se pojavi zaradi »neoptimalnega prileganja« linije v primeru ALS in TLS oblaka točk.

8 ZAKLJUČEK

Aerolasersko skeniranje in terestrično lasersko skeniranje spadata pod eno samo tehnologijo – lasersko skeniranje. Predstavljata le različne načine uporabe te tehnologije. Produkt laserskega skeniranja je oblak točk. Zaradi različnega načina poteka meritev in zaradi različnih specifikacij laserskih skenerjev, ki se uporabljajo pri aerolaserskem skeniranju in terestričnem laserskem skeniranju, se tako pridobljena oblaka točk razlikujeta med seboj po natančnosti, gostoti točk in s tem po stopnji odkritega detajla ... Po navadi se pri aerolaserskem skeniranju določi natančnost celotnega oblaka točk. Standardna pozicijska natančnost je med 0,2 m in 1 m, standardna višinska natančnost je med 0,05 m in 0,2 m (višina leta do 2000 m) (Vosselman in Mass, 2010). Pri terestričnih laserskih skenerjih je po navadi objavljena le natančnost dolžinskih meritev, ne pa natančnost sistema kot celote. V splošnem je natančnost merjenja dolžin in posledično koordinat točk v oblaku točk pridobljenem iz terestričnega laserskega skeniranja boljša kot v primeru aerolaserskega skeniranja.

TLS se uporablja predvsem za primere, kjer je stopnja detajla in zahtevana natančnost večja. ALS pa je uporabno predvsem za snemanje večjih območij, kot so koridorji daljnovidov, plinovodov ... Podatki ALS se uporabljajo za generiranje DMR-ja, DMP-ja. Lahko rečemo, da bi bilo snemanje s terestričnim laserskim skenerjem daljnovidov na večjem območju zamudno in neekonomično. Za vsak specifični primer je potrebno izbrati primeren način uporabe ponujene tehnologije, kjer pridejo do izraza njene prednosti.

Cilj, ki smo si ga zadali na začetku naloge, izdelati lasten program za čim bolj samodejen zajem daljnovidov iz oblaka točk, je dosežen. Pri predhodni obdelavi podatkov in pri pisanju kode smo se poskušali čim manj ozirati na že predstavljene rešitve različnih avtorjev. Za primernost zajetih linij in časovno učinkovitost programske kode je pogoj uspešna predhodna obdelava podatkov. Ta zajema filtriranje, klasificiranje, rastriranje podatkov na čim bolj učinkovit način.

Največji problem pri nastavitvi parametrov v programu za samodejen zajem daljnovidov iz oblaka točk nam je predstavljala velika gostota točk (tako v primeru ALS, kot tudi v primeru TLS) in neenakomerna gostota točk v primeru TLS. Z manjšo gostoto točk bi se število kombinacij nastavitve parametrov zmanjšalo in bi prišli hitreje do rešitev. Po drugi strani pa bi s tem tvegali večji vpliv nenatančno določenih koordinat točk na potek linije. Ta vpliv je manjši (se nekako izravna), pri večjem številu točk. Zaradi velike količine podatkov in posledično zaradi velike časovne zahtevnosti problema, smo ločljivost kota θ imeli konstantno nastavljeno na 1° . Pri boljši kotni ločljivosti predvidevamo optimalnejšo prileganje zajetih linij, ki predstavljajo daljnovode. Menimo, da bi težavo s trajanjem programa, lahko zmanjšali z razdelitvijo območja na še manjša podobmočja. Zaradi

predstavljenih dejstev smo bili pri zajemu daljnovodov iz oblaka točk TLS manj učinkoviti. Največji problem je predstavljala primerna nastavitev parametrov.

Odločitev za velikosti celic rastra 0,1 m x 0,1 m pri njegovem generiranju se nam zdi primerna. S takšno nastavljeno velikostjo celic rastra nismo pretirano časovno obremenili programa, pa tudi glede na doseženo prostorsko ločljivost sistemov, nismo izgubili pomembnih informacij. Tako v primeru zajema linij iz oblaka točk ALS in TLS, kot v primeru zajema linij na rastru, ki smo ga generirali iz oblaka točk ALS in TLS, je bila uspešnost poiskanih linij 100 %. Metoda zajema linij na rastru je veliko hitrejša kot metoda zajema linij iz oblaka točk. Njena učinkovitost pa bi se še povečala pri obravnavanju večjih območji.

Dosedanja dela in raziskave na tem področju nam dajejo ideje za dodatne izboljšave in za nadgradnjo doseženega, ki sicer presegajo okvir te diplomske naloge. 2D ekstrakcijo daljnovodov bi lahko podkrepili s 3D modeliranjem kablov. Tako bi pridobili dodatno dimenzijo, ki bi omogočala predstavitev poteka daljnovodov v višinskem smislu. Izračuna se lahko povs kabla in velikost vplivov na povs (veter, led ...). 3D modeli daljnovodov nam dajejo tudi učinkovitejša orodja za upravljanje in gospodarjenje z električnimi omrežji.

VIRI

Ballard, D. H. 1981. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern recognition, Vol. 13, No. 2: 111-122.

<http://www.cs.utexas.edu/~dana/HoughT.pdf> (Pridobljeno: 16. 11. 2013)

Bevilacqua, V., Casorio, P., Mastronardi, G. 2008. Extending Hough Transform to a Points' Cloud for 3D-Face Nose-Tip Detection. V: ICIC 2, Volume 5227 of Lecture Notes in Computer Science, 2005. Springer: p. 1200-1209.

Bilc, A. 2002. Ali dobiva klasična fotogrametrija konkurencu? Poročilo o prvem projektu LIDAR v Sloveniji. Geodetski vestnik 46, 2002 - 4: 404-410.

Bitenc, M. 2007. Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skenerja na projektu Neusidler See. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bitenc): 123 f.

Borrmann, D., Elseberg, J., Lingemann, K., Nüchter, A. 2011. The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Cloud: A Review and a new Accumulator Design. 3D Res. 02, 02003: 1-13.

http://www.itttelkom.ac.id/staf/kru/TA/andri/6_REFERENSI/%23REFERENSI%20PAPER/pdf/3d%20Hough%20Transform%20for%20plane%20Detection.pdf (Pridobljeno: 16. 11. 2013)

Carr, S., Douglas, B., Crosby, C. 2013. Terrestrial Laser Scanning (TLS Field Camp Manual). V: UNAVCO Boulder, CO v1.3, 2013: p. 1-20.

<http://facility.unavco.org/kb/questions/787/Terrestrial+Laser+Scanning+%28TLS%29+Field+Camp+Manual> (Pridobljeno: 9. 11. 2013)

Clode, S., Rottensteiner, F. 2005. Classification of Trees and Powerlines from medium resolution Airborne Laserscanner data in Urban Environments. V: APRS workshop on digital image computing, Brisbane, Australia, 21. February, 2005. Brisbane, Australia, The University of Queensland: p. 27-102.

<http://www.aprs.org.au/wdic2005/papers/17.pdf> (Pridobljeno: 19. 11. 2013)

datasheet Riegl VZ-400. 2013.

http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/DataSheet_VZ-400_18-09-2013.pdf

(Pridobljeno: 27. 10. 2013)

Fernandes, L. A. F., Oliveira, M. M. 2008. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme. *Pattern Recognition* 01/2008, 41: 299-314.

Fröhlich, C., Mettenleiter, M. 2004. Terrestrial laser scanning – new perspectives in 3D surveying. V: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVI – 8/W2, Freiburg, Germany, 3-6 October, 2004: p. 7-13.

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/FROEHLICH.pdf> (Pridobljeno: 9. 11. 2013)

Gonzales, R. C., Woods, R. E., Eddins, S. L. 2004. *Digital image processing using Matlab*. New Jersey, Pearson Prentice-Hall: p. 378-425.

Grigillo, D. 2010. Samodejno odkrivanje stavb na visokoločljivih slikovnih virih za potrebe vzdrževanja topografskih podatkov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Grigillo): 156 f.

Grilc, M. 2007. Analiza karakteristik terestričnega laserskega skenerja domače izdelave. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Grilc): 67 f.

IAEG, International Association for Engineering Geology and the environment, Commission 19. What is 3D laser scanning?

http://www.iaeg.info/index.php/commissions22/doc_download/88-what-is-3d-laser-scanning

(Pridobljeno 22. 1. 2014)

Jwa, Y., Sohn, G., Kim, H. B. 2009. Automatic 3D powerline reconstruction using airborne lidar data. V: *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXVIII, Part 3/W8, Paris, France, September 1-2, 2009: p. 105-110.

<http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/3-w8/papers/p105b.pdf> (Pridobljeno: 18. 11. 2013)

Kandare, K. 2013. Ekstrakcija oblike debla drevesa iz terestričnega laserskega oblaka točk z uporabo algoritma RANSAC. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kandare): 81 f.

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: p. 9-42, 45-71.

Kosmatin Fras, M. 2009. Zračno lasersko skeniranje. Gradivo za strokovne izpite. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 15 str. Poslano od Fras, M. K. 6. 11. 2013. Osebna komunikacija.

Kraus, K., Pfeifer, N. 2001. Advanced DTM generation from LIDAR data. V: International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W3 Annapolis, MD, 22-24 Oct., 2001: p. 23-30.

<http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w4/pdf/kraus.pdf> (Pridobljeno: 5. 11. 2013.)

LAStools. 2013.

<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> (Pridobljeno: 18. 10. 2013)

Li, Z., Liu, Y., Walker, R., Hayward, R., Zhang, J. 2009. Towards Automatic Power Line Detection for UAV Surveillance System Using Pulse Coupled Neural Filter and Hough Transform. Machine Vision and Applications, 21(5): 677-686.

<http://eprints.qut.edu.au/29121/1/29121.pdf> (Pridobljeno: 19. 11. 2013)

LiteMapper 5600 (IGI). 2013.

http://ecogis.pl/PDF/IGI_LiteMapper_5600.pdf (Pridobljeno: 21. 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. V: DICTA, 2009: p. 462-467. Poslano od Vrečko, A. 1. 3. 2013. Osebna komunikacija.

MathWorks. 2013. Matlab, The Language of Technical Computing.

<http://www.mathworks.com/products/matlab/> (Pridobljeno: 21. 11. 2013)

MathWork. 2013. Analyzing Images. Detecting Lines Using the Hough Transform.

<http://www.mathworks.com/help/images/analyzing-images.html#f11-27827> (Pridobljeno: 5. 11. 2013)

McLaughlin, R. A., 2006. Extracting Transmission Lines From Airborne LIDAR Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 3, NO. 2: 222-226.

Melzer, T., Briese, C. 2004: Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds. Österreichische Computer Gesellschaft: 1-8. Poslano od Vrečko, A. 1. 3. 2013. Osebna komunikacija.

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: p. 37-44.

Opravš, R. 2008. Postopek in natančnost tehnologije terestričnega 3R laserskega skeniranja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Opravš): 102 f.

Pfeifer, N., Briese, C. 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. V: International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXVI, Part 3 / W52, Espoo, Finland, 2007: p. 311-319. Poslano od Vrečko, A. 1. 3. 2013. Osebna komunikacija.

Pfeifer, N., Briese, C. 2007. Laser scanning – principles and applications. Vienna University of Technology. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Austria: 1-20.

Podobnika, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Podobnikar): 343 f.

Reshetyuk, Y. 2010. Direct Georeferencing with GPS in Terrestrial Laser Scanning. zfv 135. Jg., 3/2010: 151-159.

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:360232/FULLTEXT01> (Pridobljeno: 10. 11. 2013)

Riegl LMS Q560. 2013.

http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Q560_20-09-2010_01.pdf

(Pridobljeno: 21. 11. 2013)

Savarese, S. 2011. 2D and 3D visual recognition: approaches and methods. Powerpoint prezentacija. V: 2nd PLUS Advanced School on Computer Vision, Pattern Recognition, and Image Processing, Genova, Italy, March 21-24, 2011: p. 1-81.

http://web.eecs.umich.edu/~silvio/outgoing/iit_school_pdf/IIT_lecture3_2D_part_based.pdf

(Pridobljeno: 18. 11. 2013)

Sohn, G., Jwa, Y., Kim, H. B. 2012. Automatic powerline scene classification and reconstruction using airborne lidar data. V: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September, 2012, Melbourne, Australia: p. 167-172.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b_pdf/63.pdf (Pridobljeno 18. 11. 2013)

Staiger, R. 2011. 10 years of terrestrial laser scanning – technology, system and applications. Germany, Bochum, University of Applied Sciences Bochum: 1-13.

http://www.fig.net/news/news_2011/geosiberia_april_2011/Novosibirsk_Geosiberia_2011_Paper_Rudolf_Staiger.pdf (Pridobljeno: 9. 11. 2013)

Švab Lenarčič, A. 2009. Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Š. Lenarčič): 135 f.

Vale, A., Mota, J. G. 2007. LIDAR Data Segmentation for Track Clearance Anomaly Detection on Over-head Power Lines. V: Proceedings of IFAC Workshop, 2007, Turkey: p. 17-19.

Vosselman, G. (ur.), Maas, H.-G. (ur.) 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Scotland, Whittles Publishing: p. 1-39, 4-79, 23-266.

Wagner, W. 2005. Physical Principles of Airborne Laser Scanning. Paper from University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005: p. 4-11.

Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. V: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Volume 54, Issues 2-3: p. 68-82.

<http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1136.pdf> (Pridobljeno: 5. 11. 2013)

Wikipedia. 2013. Matlab.

<http://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (Pridobljeno: 21. 11. 2013)

Yan, G., Li, C., Zhou, G., Zhang, W., Li, X., 2007. Automatic Extraction of Power Lines from Aerial Images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No. 3: 387-391.

Yunfei, B., Guoping, L., Chunxiang, C., Xiaowen, L., Hao, Z., Qisheng, H., Linyan, B., Chaoyi, C. 2008. Classification of lidar point cloud and generation of DTM from lidar height and intensity data in forested area. V: ISPRS Archives, Volume XXXVII Part B3b, XXIst ISPRS Congress, Technical Commission III, July 3-11, 2008, Beijing, China: p. 313-318.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b_pdf/63.pdf (Pridobljeno: 11. 11. 2013)

Zadnikar, A. 2009. Zaznavanje objektov na topografskih kartah. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko (samozaložba A. Zadnikar): 49 f.

Zalokar, M. 2010. Trirazsežno modeliranje zgradb iz lidarskih podatkov na primeru mesta Domžale. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Zalokar): 50 f.

»Ta stran je namenoma prazna.«

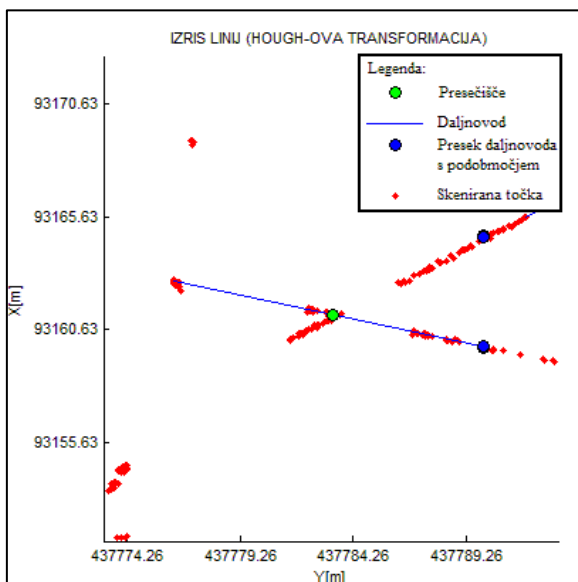
SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA OBLAKU TOČK AEROLASERSKEGA SKENIRANJA	A1
Slika A.1: Presečišče 1	A1
Slika A.2: Presečišče 2 in 3	A1
Slika A.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)	A1
Slika A.4: Presečišče 5	A1
Slika A.5: Presečišče 6	A2
Slika A.6: Presečišče 7 (12), 7 (13), 7 (23)	A2
Slika A.7: Presečišče 8	A2
Slika A.8: Presečišče 9	A2
PRILOGA B: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA OBLAKU TOČK TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA	B1
Slika B.1: Presečišče 1	B1
Slika B.2: Presečišče 2 in 3	B1
Slika B.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)	B1
Slika B.4: Presečišče 5	B1
Slika B.5: Presečišče 6	B2
Slika B.6: Presečišče 7 (12), 7 (13), 7 (14)	B2
Slika B.7: Presečišče 8	B2
Slika B.8: Presečišče 9	B2
PRILOGA C: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA RASTRIRANIH PODATKIH AEROLASERSKEGA SKENIRANJA	C1
Slika C.1: Presečišče 1	C1
Slika C.2: Presečišče 2 in 3	C1
Slika C.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)	C1
Slika C.4: Presečišče 5	C1
Slika C.5: Presečišče 6	C2
Slika C.6: Presečišče 7 (13)	C2
Slika C.7: Presečišče 8	C2

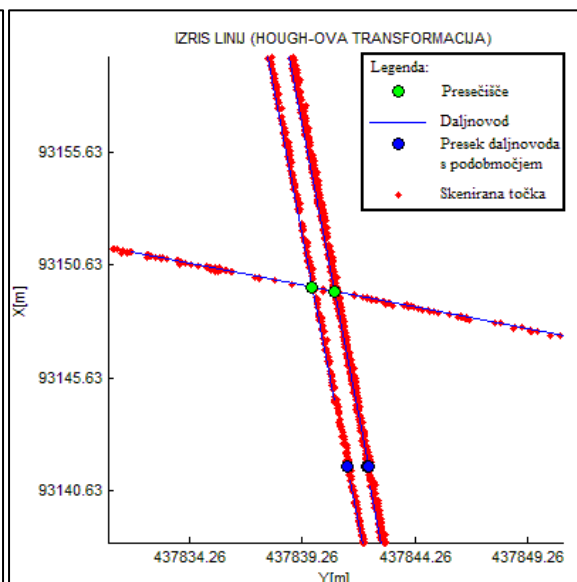
**PRILOGA D: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA
RASTRIRANIH PODATKIH TERESTRIČNEGA LASERSKEGA
SKENIRANJA**

	D1
Slika D.1: Presečišče 1	D1
Slika D.2: Presečišče 2 in 3	D1
Slika D.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)	D1
Slika D.4: Presečišče 5	D1
Slika D.5: Presečišče 6	D2
Slika D.6: Presečišče 7 (13)	D2
Slika D.7: Presečišče 8	D2
Slika D.8: Presečišče 9	D2

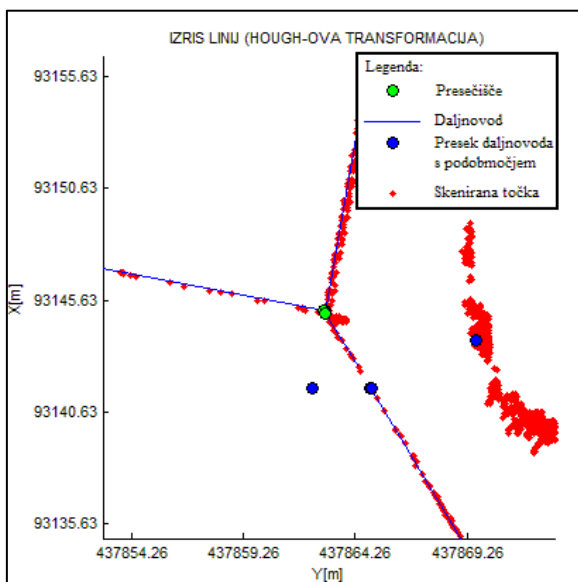
PRILOGA A: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA OBLAKU TOČK AEROLASERSKEGA SKENIRANJA



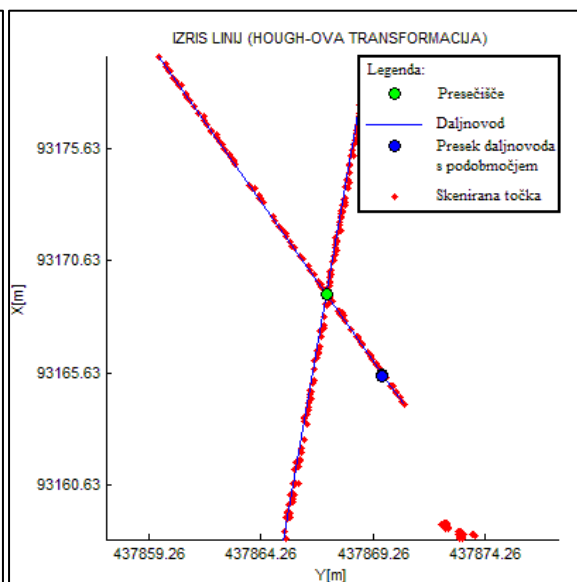
Slika A.1: Presečišče 1



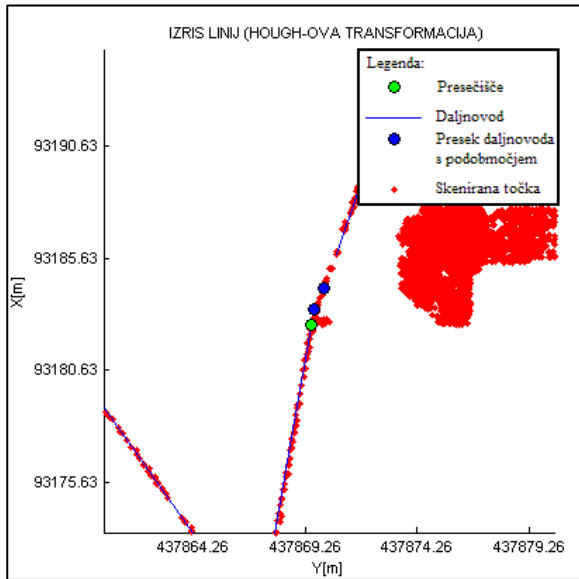
Slika A.2: Presečišče 2 in 3



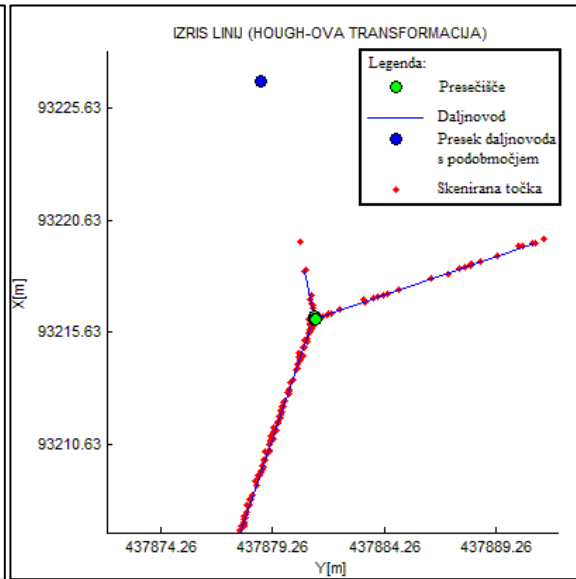
Slika A.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)



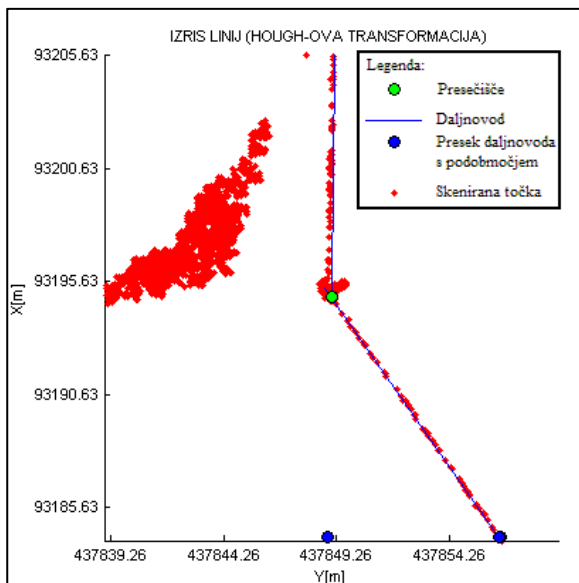
Slika A.4: Presečišče 5



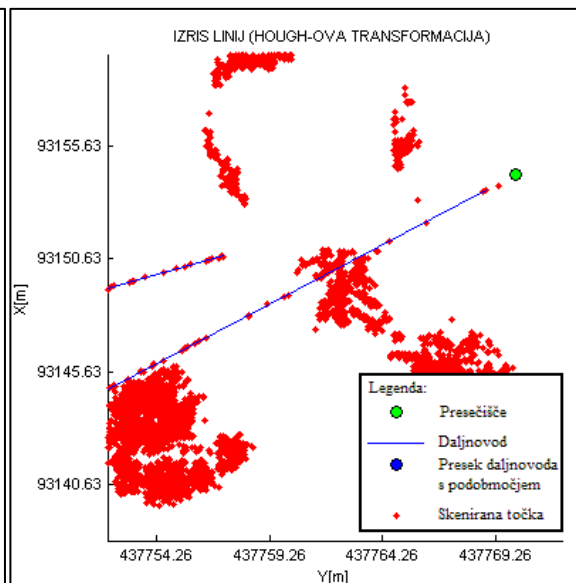
Slika A.5: Presečišče 6



Slika A.6: Presečišče 7 (12), 7 (13), 7 (23)

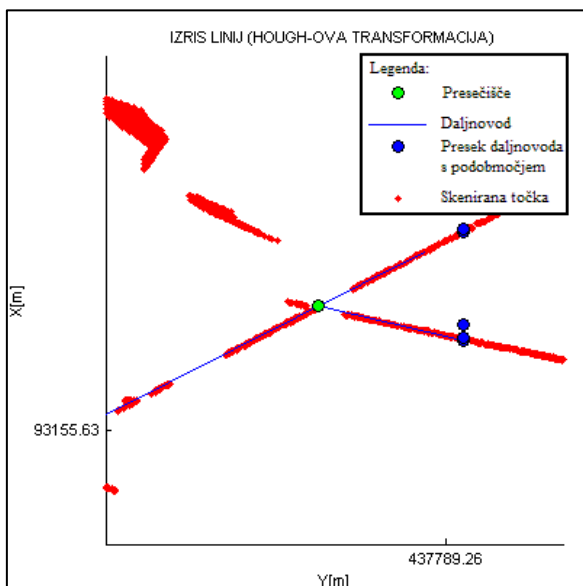


Slika A.7: Presečišče 8

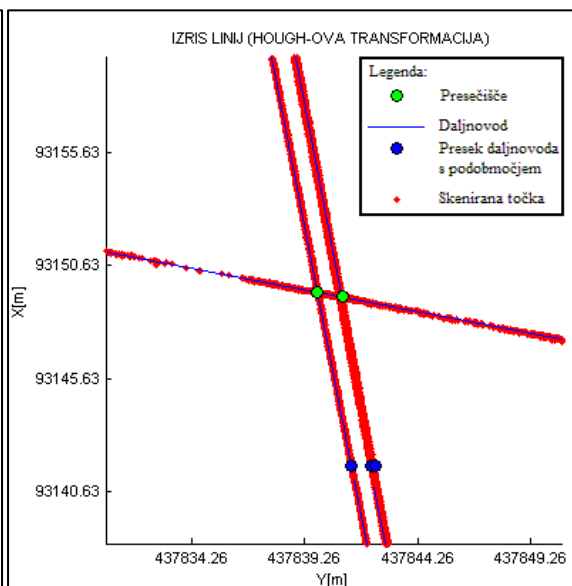


Slika A.8: Presečišče 9

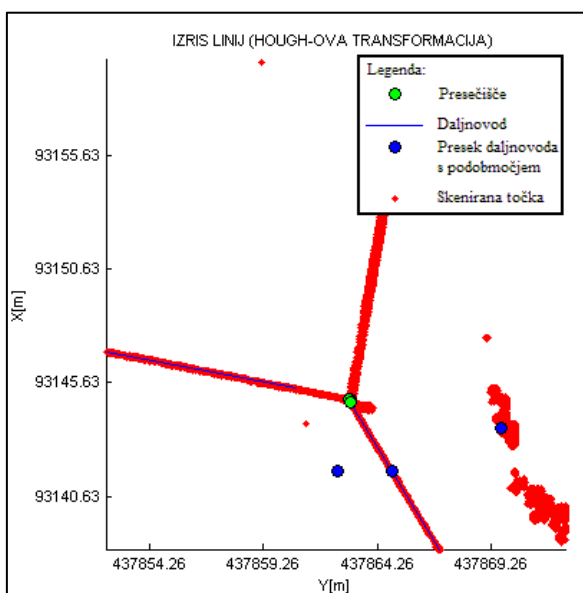
PRILOGA B: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA OBLAKU TOČK TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA



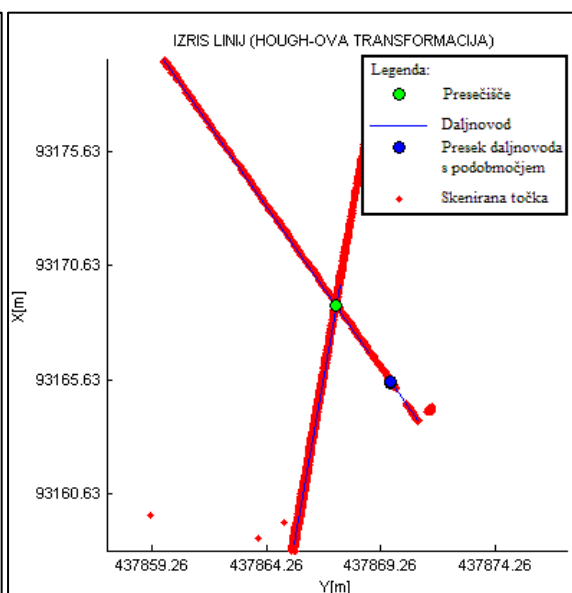
Slika B.1: Presečišče 1



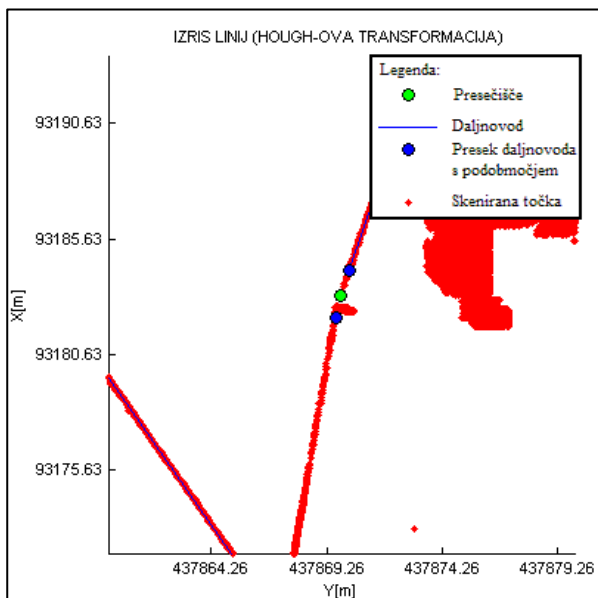
Slika B.2: Presečišče 2 in 3



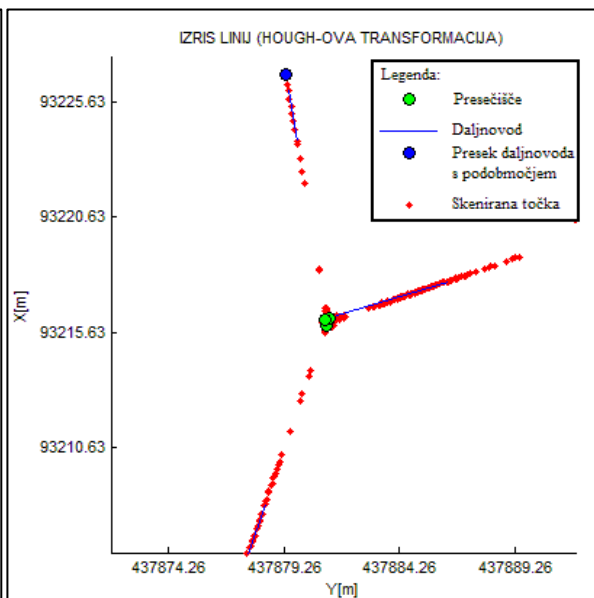
Slika B.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)



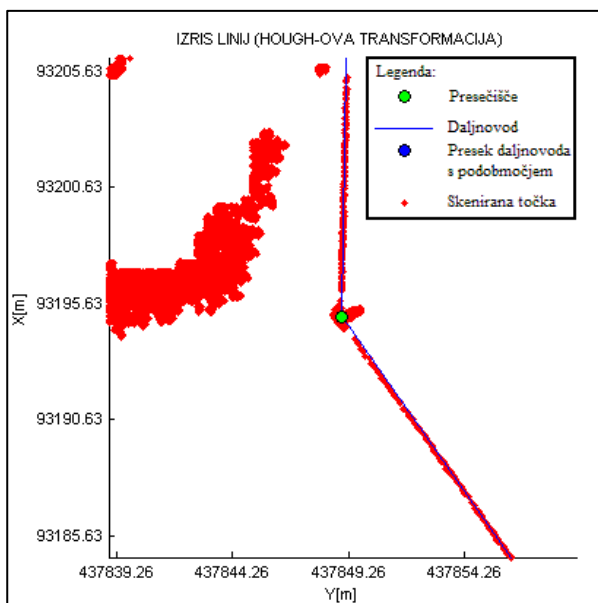
Slika B.4: Presečišče 5



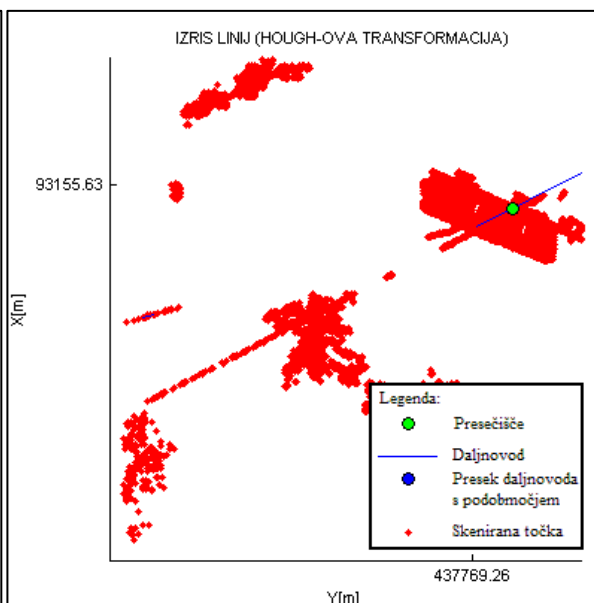
Slika B.5: Presečišče 6



Slika B.6: Presečišče 7 (12), 7 (13), 7 (23)

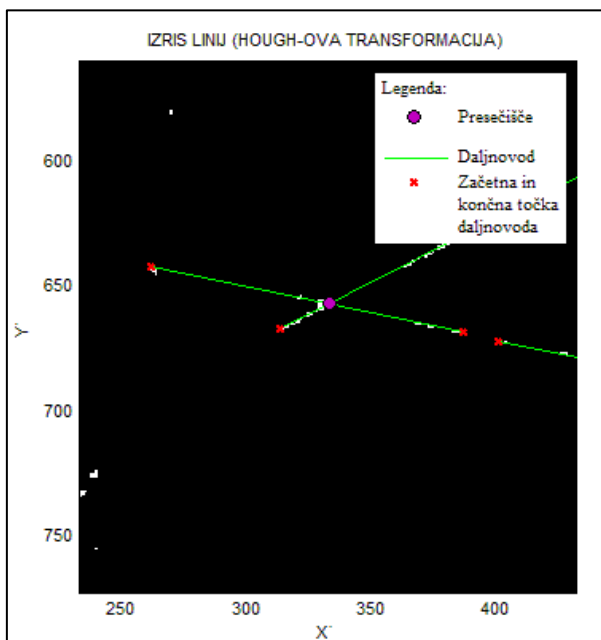


Slika B.7: Presečišče 8

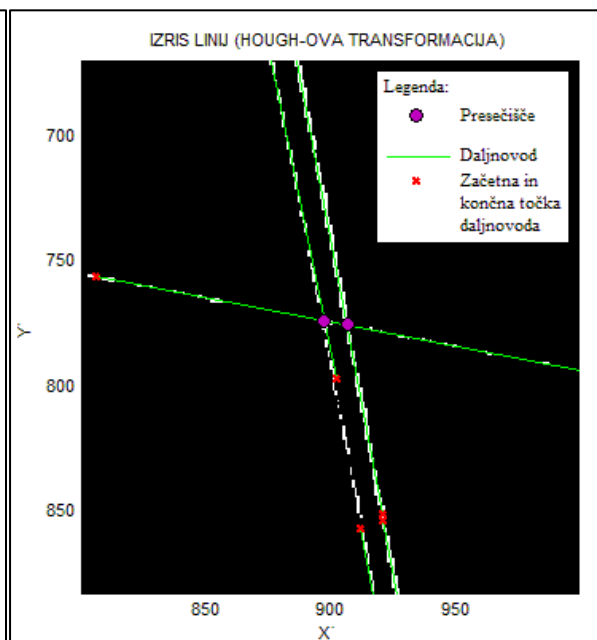


Slika B.8: Presečišče 9

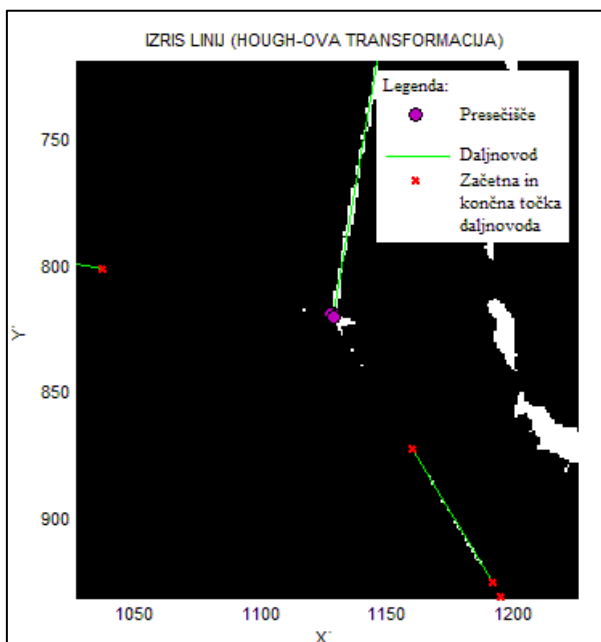
PRILOGA C: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA RASTRIRANIH PODATKIH AEROLASERSKEGA SKENIRANJA



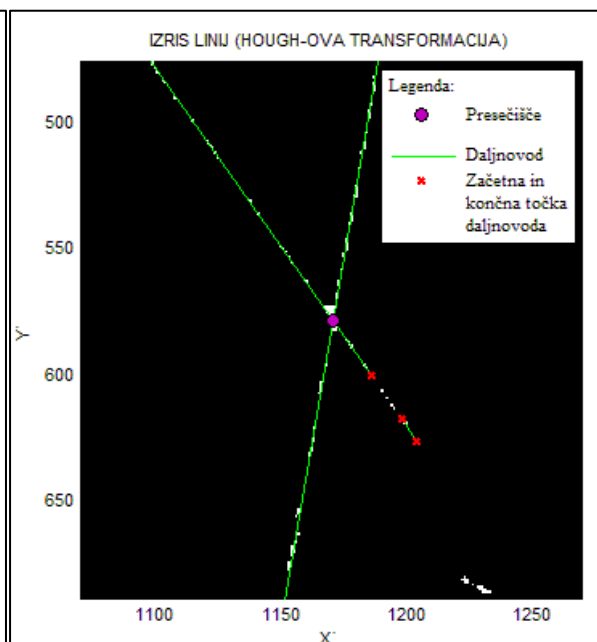
Slika C.1: Presečišče 1



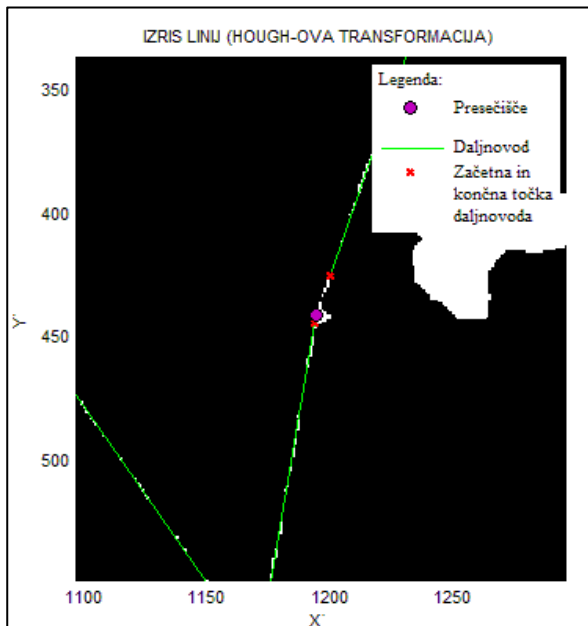
Slika C.2: Presečišče 2 in 3



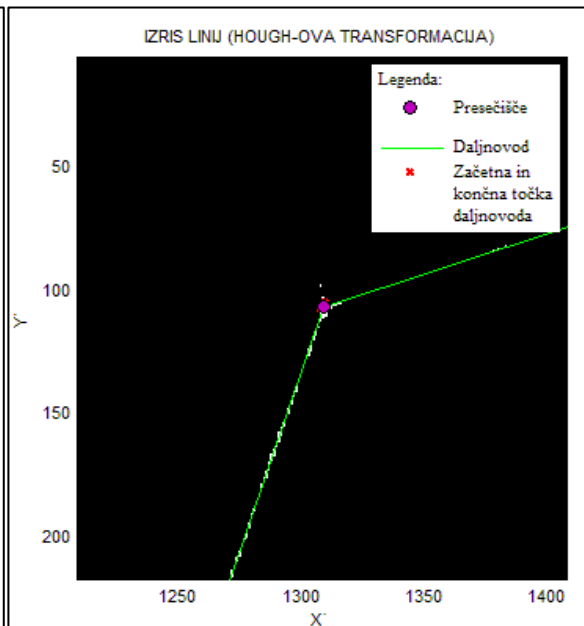
Slika C.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)



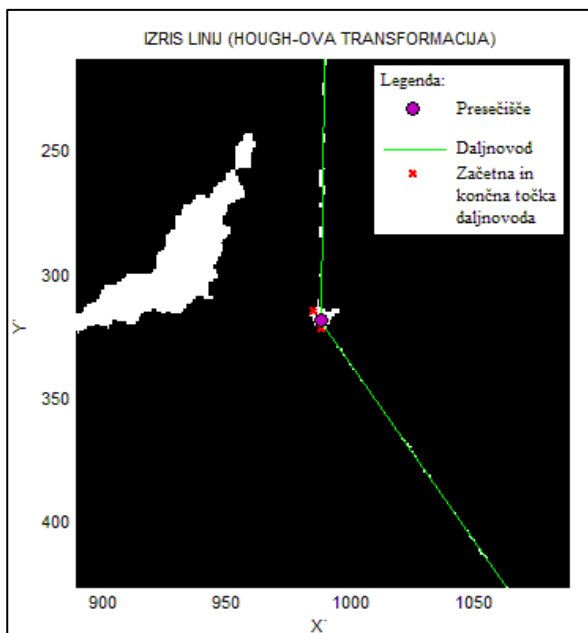
Slika C.4: Presečišče 5



Slika C.5: Presečišče 6

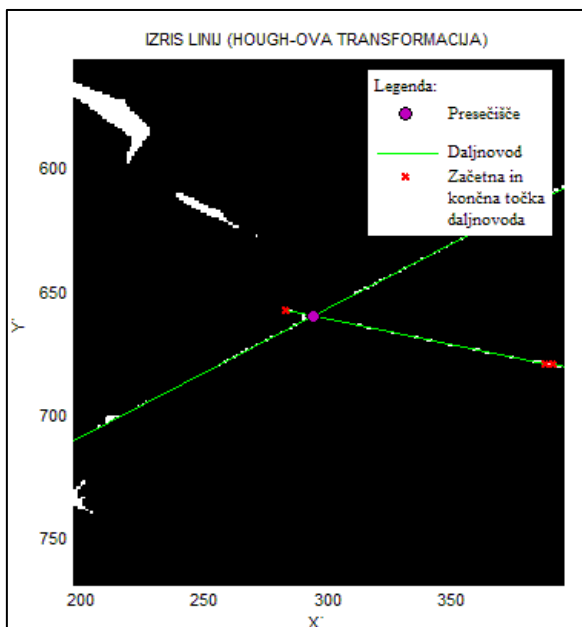


Slika C.6: Presečišče 7 (13)

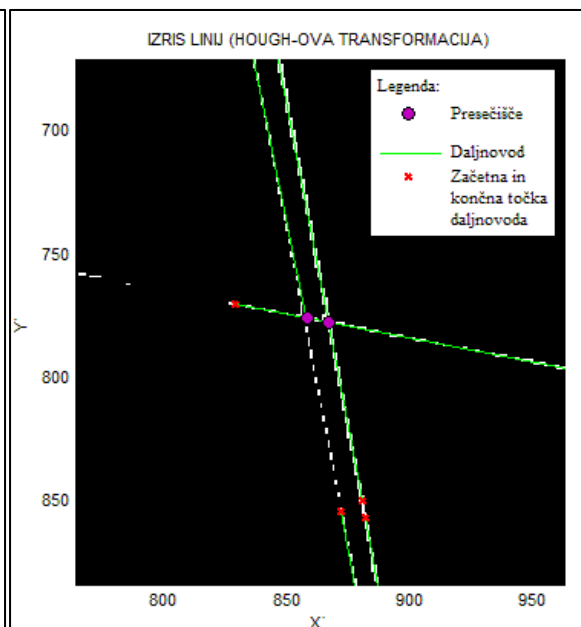


Slika C.7: Presečišče 8

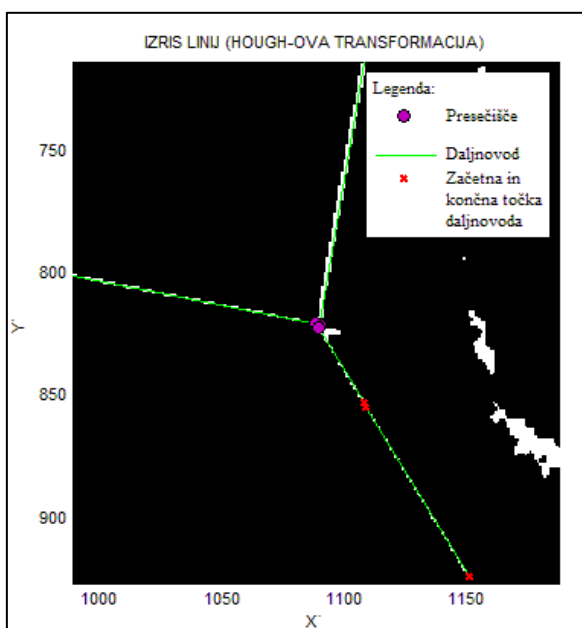
PRILOGA D: GRAFIČNA PREDSTAVITEV PRESEČIŠČ LINIJ PO ODSEKIH NA RASTRIRANIH PODATKIH TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA



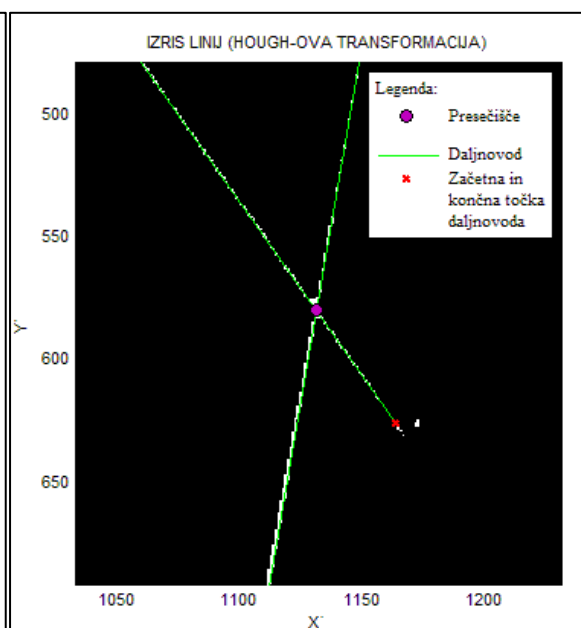
Slika D.1: Presečišče 1



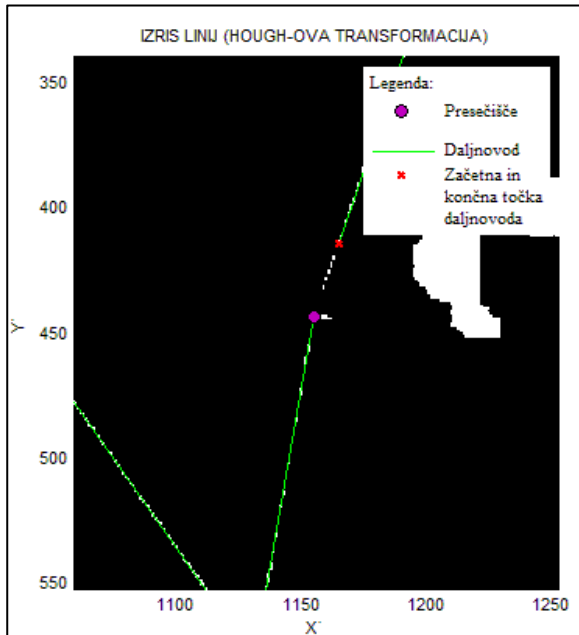
Slika D.2: Presečišče 2 in 3



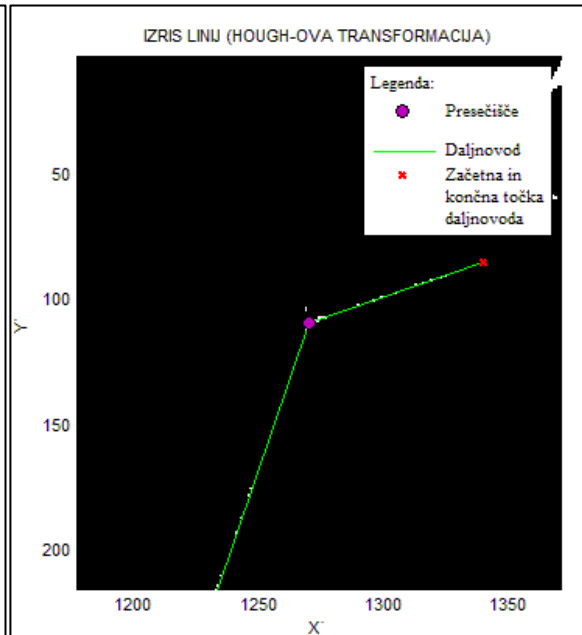
Slika D.3: Presečišče 4 (12), 4 (13), 4 (23)



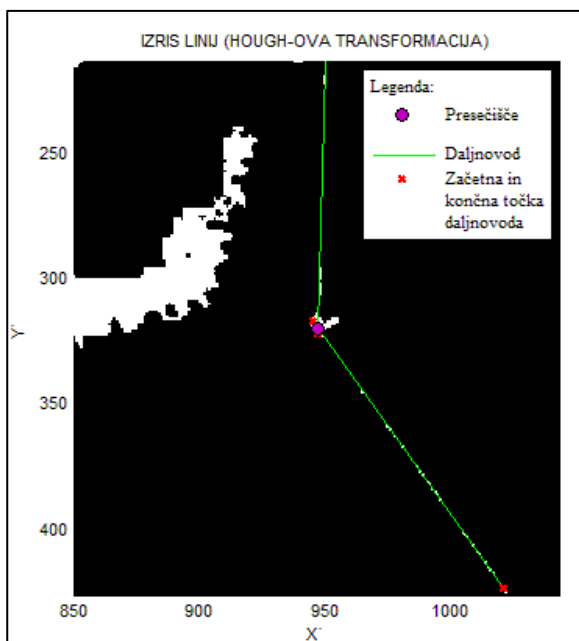
Slika D.4: Presečišče 5



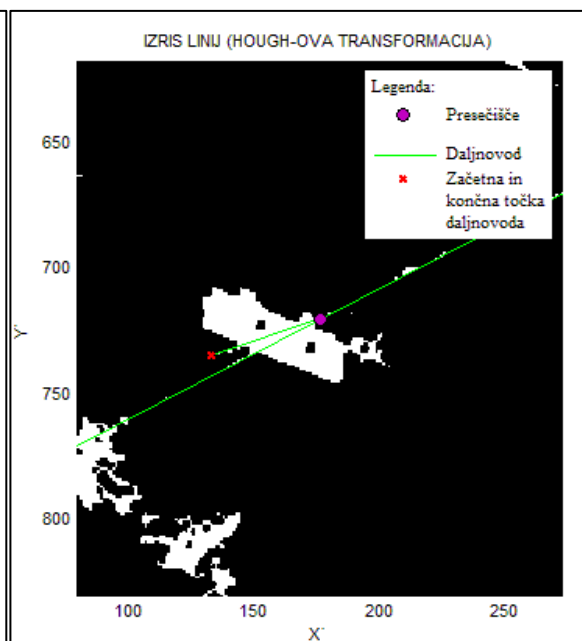
Slika D.5: Presečišče 6



Slika D.6: Presečišče 7 (13)



Slika D.7: Presečišče 8



Slika D.8: Presečišče 9