

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:

Dougan, J.N., 2015. Uporaba brezpilotnega sistema za zajem prostorskih podatkov in ocena kakovosti klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentorja Grigillo, D., Valič, R.): 78 str.

Datum arhiviranja: 11-11-2015

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:

Dougan, J.N., 2015. Uporaba brezpilotnega sistema za zajem prostorskih podatkov in ocena kakovosti klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisors Grigillo, D., Valič, R.): 78 pp.

Archiving Date: 11-11-2015

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

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA

Kandidat:

JERNEJ NEJC DOUGAN

**UPORABA BREZPILOTNEGA SISTEMA ZA ZAJEM
PROSTORSKIH PODATKOV IN OCENA KAKOVOSTI
KLASIFIKACIJE FOTOGRAMETRIČNEGA OBLAKA
TOČK**

Magistrsko delo št.: 7/II.GIG

**SPATIAL DATA ACQUISITION WITH UNMANNED
AERIAL SYSTEM AND EVALUATION OF
PHOTOGRAMMETRIC POINT CLOUD
CLASSIFICATION QUALITY**

Graduation – Master Thesis No.: 7/II.GIG

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

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

Ljubljana, 03. 11. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Podpisani **JERNEJ NEJC DOUGAN** izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:
**»UPORABA BREZPILOTNEGA SISTEMA ZA ZAJEM PROSTORSKIH PODATKOV IN
OCENA KAKOVOSTI KLASIFIKACIJE FOTOGRAMETRIČNEGA OBLAKA TOČK«.**

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 30. 9. 2015

Jernej Nejc Dougan

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7:629.7 (043.3)
Avtor:	Jernej Nejc Dougan
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.
Somentor:	asist. dr. Dejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod.
Somentor:	Rok Valič, univ. dipl. inž. geod.
Naslov:	Uporaba brezpilotnega sistema za zajem prostorskih podatkov in ocena kakovosti klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk
Tip dokumenta:	Magistrsko delo – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	78 str., 30 pregl., 43 slik., 33. en, 3 pril.,
Ključne besede:	Brepilotni sistemi, brezpilotni letalnik, fotogrametrični oblak točk, klasifikacija, ocena kakovosti, prostorski podatki

Izvleček

Magistrsko delo »Uporaba brezpilotnega sistema za zajem prostorskih podatkov in ocena kakovosti klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk« zajema pregled področja brezpilotnih letalnikov za zajem prostorskih podatkov, teorijo obdelave in možnosti klasifikacije fotogrametričnih oblakov točk z oceno kakovosti. V delu smo opredelili brezpilotne sisteme in podali značilnosti brezpilotnih sistemov, namenjenih za zajem prostorskih podatkov. Opredelili smo delitev brezpilotnih sistemov in opisali podsisteme, ki sestavljajo brezpilotne sisteme za uporabo v geodeziji. Na kratko opišemo pravno podlago in zračni prostor v Republiki Sloveniji. Opišemo brezpilotni sistem senseFly eBee, katerega smo tudi uporabili za izvedbo praktičnega dela. Podrobneje opišemo programski paket za obdelavo posnetkov PostFlight Terra 3D. Opišemo delovni postopek za zajem podatkov z brezpilotnim sistemom. V teoretičnem delu podrobno opišemo metode in postopke, ki jih implementirajo programi za obdelavo fotografij, pridobljenih z brezpilotnimi sistemi. Predstavimo, kako je narejena rekonstrukcija in orientacija posnetkov s postopkom Structure from Motion, izravnava bloka posnetkov in samokalibracija. Opišemo eno izmed metod zgoščevanja oblaka točk in pregledamo metode za klasifikacijo oblakov točk. Podamo opise izdelave drugih fotogrametričnih izdelkov kot so DMR in ortomozaik. V okviru praktične raziskave smo izvedli projekt zajema prostorskih podatkov z brezpilotnim sistemom. Načrtovali smo zajem, izvedli zajem podatkov, obdelali pridobljene aeroposnetke, iz njih izdelali oblak točk, DMP in ortomozaik. Brepilotni sistemi lahko v nekaterih pogledih nadomestijo aerolasersko skeniranje, zato smo izvedli primerjavo med fotogrametričnim oblakom točk in oblakom točk, pridobljenim z aerolaserskim skeniranjem. Fotogrametrični oblak točk smo klasificirali z različnimi metodami in programi. Za oceno kakovosti klasifikacije smo izdelali referenčni oblak točk ter lasten program za ocenjevanje kakovosti klasifikacije. Podali smo ocene kakovosti različni metod klasificiranja. Podamo možnosti za izboljšave klasifikacij fotogrametričnega oblaka točk.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 528.7:629.7 (043.3)
Author: Jernej Nejc Dougan
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Dejan Grigillo, Ph.D.
Co-supervisor: Rok Valič
Title: Spatial data acquisition with unmanned aerial system and evaluation of photogrammetric point cloud classification quality
Document type: M. Sc. Thesis
Scope and tools: 78 p., 30 tab., 43 fig., 33. eq, 3 ann.
Keywords: unmanned aerial system, unmanned aerial vehicle, photogrammetric point cloud, classification, quality assessment, spatial data

Abstract

Master thesis “Spatial data acquisition with unmanned aerial system and evaluation of photogrammetric point cloud classification quality” provides an overview of the field of unmanned aerial systems for spatial data acquisition, theory of data processing and possibilities of automatic photogrammetric point cloud classification with quality evaluation. We define unmanned aerial systems for spatial data acquisition, their characteristic and describe necessary subsystems. We briefly describe the legal basis and the airspace of the Republic of Slovenia. We describe unmanned aerial system senseFly eBee, which was also used to carry out practical work and PostFlight Terra 3D, software for data processing. We define typical workflow for spatial data acquisition with unamend aerial systems. The theoretical part is comprised of the detailed description of the methods and procedures used for data processing and automatic point cloud classification. We describe methods for 3D reconstruction and orientation from images with the procedure Structure from Motion, bundle block adjustment, self-calibration. We describe one of the methods for densifying point cloud and review some methods for automatic classification. In the context of practical research we carried out a project with unamend aerial system. The practical work included survey flight planning, carrying out survey flight and processing of the data. Three main products were created: dense point cloud, digital elevation model and orthomosaic. Photogrammetric unmanned aerial systems may in some aspects replace aerial laser scanning, so we carried out a comparison between photogrammetric point cloud and laser scanning point cloud. The main goal of the practical part of the thesis was to test automatic classification of the photogrammetric point cloud. We performed many classification with different software’s, with different input parameters and evaluate quality of different methods according to ground truth data.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju magistrskega dela se iskreno zahvaljujem doc. dr. Mojci Kosmatin Fras, asist. dr. Dejanu Grigillu in Roku Valiču.

Hvala za pomočijo podjetju LGB d.o.o. in podjetju Geavis d.o.o., ki sta mi omogočila izvesti magistrsko delo. Podjetji sta tudi podprli Društvo študentov geodezije Slovenije z donacijo za izgradnjo lastnega brezpilotnega sistema FlyEye za študijske namene. Donacija je omogočila meni in drugim študentom geodezije in geoinformatike ogromno možnosti za učenje o tehnologij ki predstavlja bodočnost v geodeziji. Za kar sem jim izredno hvaležen

Posebna zahvala gospodu Iztoku Slatinšku, ki me je navdušil nad geodezijo. S strokovnimi nasveti mi je stal ob strani tekom študija in mi pomagal pridobiti ogromno neprecenljivih strokovnih in praktičnih izkušenj že tekom študija.

Hvala Aleksandru Šašotu, Blažu Vidmarju in Urhu Tržanu za pomoč na terenu in dobro družbo tekom študija.

Hvala mojim najdražjim za potrpežljivost in podporo.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA	IX
KAZALO VSEBINE	XI
KAZALO PREGLEDNIC.....	XV
KAZALO SLIK	XVII
OKRAJŠAVE	XIX
1 UVOD.....	1
1.1 Motivacija	1
1.2 Hipoteze	1
2 BREZPILOTNI SISTEMI	2
2.1 Opredelitev osnovnih terminov.....	2
2.2 Prednosti in slabosti brezpilotnih sistemov.....	2
2.3 Tržni potencial	3
2.4 Pravna podlaga.....	4
2.5 Zračni prostor v RS	5
2.6 Delitve brezpilotnih sistemov	7
2.7 Podsystemi brezpilotnih sistemov za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje.....	9
2.7.1 Brezpilotni letalnik.....	9
2.7.2 Kontrolna postaja	10
2.7.3 Komunikacijski kanal.....	10
2.7.4 Senzorji za zajem podatkov.....	11
2.7.5 Programska oprema za fotogrametrično obdelavo	11
3 BREZPILOTNI SISTEM eBee.....	12
3.1 Podjetje senseFly	12
3.2 Brezpilotni letalnik eBee.....	12
3.3 Možni senzorji na letalniku eBee.....	14
3.4 Kontrolna postaja – eMotion	17
3.5 Program za obdelavo fotografij PostFlight Terra 3D.....	17
3.5.1 Vhodni podatki.....	18

3.5.2	Obdelava.....	18
3.5.3	Urejevalniki	19
3.5.4	Izvoz	19
4	OPIS DELOVNEGA POSTOPKA PRI SNEMANJU Z BREZPILOTNIMI SISTEMI....	20
4.1	Načrtovanje	20
4.1.1	Lokacija snemanja	20
4.1.2	Površina območja snemanja	21
4.1.3	Prostorska ločljivost fotografij	21
4.1.4	Cilji projekta	21
4.1.5	Primer načrtovanja v programu eMotion 2.....	21
4.2	Terensko delo	22
4.3	Obdelava posnetkov	23
5	TEORIJA OBDELAVE POSNETKOV IN SPLOŠNE ZNAČILNOSTI IZDELKOV	24
5.1	Osnovni pojmi	24
5.1.1	Centralna projekcija posnetka	24
5.1.2	Notranja orientacija	26
5.1.3	Zunanja orientacija	26
5.2	Orientacija posnetkov.....	26
5.2.1	Direktna določitev zunanje orientacije	34
5.3	Zgoščevanje oblaka točk	34
5.4	Klasifikacija	35
5.5	Lastnosti fotogrametričnega oblaka točk	36
5.6	Pregled algoritmov za klasifikacijo aerolaserskega oblaka točk.....	37
5.6.1	Metode klasifikacije terena.....	37
5.6.2	Klasifikacija stavb in vegetacije	38
5.7	Program gLIDAR.....	38
5.8	Klasifikacija fotogrametričnih oblakov točk.....	39
5.9	Fotogrametrični izdelki	39
5.9.1	Digitalni model reliefa.....	39
5.9.2	Ortomosaik	42

6	PRAKTIČNE RAZISKAVE	44
6.1	Načrtovanje zajema in raziskave.....	44
6.2	Terensko delo.....	46
6.3	Obdelava posnetkov v programu PostFlight Terra 3D	49
6.3.1	Rezultati obdelave posnetkov.....	49
6.3.2	Kontrola georeferenciranja.....	50
6.4	Primerjava fotogrametričnega oblaka z oblakom aerolaserskega skeniranja.....	52
6.4.1	Gostota oblaka točk.....	54
6.4.2	Primerjava različnih vrst modelov višin.....	56
6.4.3	Zajem karakterističnih točk.....	59
6.5	Uspešnost klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk.....	60
6.5.1	Testni oblak točk.....	62
6.5.1.1.	PostFlight Terra 3D.....	62
6.5.1.2.	Rapidlasso LAStools.....	63
6.5.1.3.	gLIDAR.....	65
6.5.1.4.	Global Mapper v16.2.....	67
6.5.2	Referenčni oblak točk.....	68
6.5.3	Ocene kakovosti klasifikacije.....	70
6.5.4	Rezultati analize kakovosti klasifikacije.....	71
6.5.4.1.	Teren.....	72
6.5.4.2.	Stavbe.....	73
6.5.4.3.	Vegetacija.....	74
6.5.5	Analiza kakovosti klasifikacije.....	76
7	ZAKLJUČKI	77
	LITERATURA	79

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrstitev slovenskega zračnega prostora za VFR (povzeto po: Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015)	5
Preglednica 2: Kategorizacija brezpilotnih sistemov (Everaerts, 2009)	8
Preglednica 3: Prednosti in slabosti letalskih in več-rotorskih sistemov	9
Preglednica 4: Tehnične specifikacije strojne opreme brezpilotnega letalnika eBee (senseFly, 2014)	12
Preglednica 5: Tehnične specifikacije operacij z brezpilotnim sistemom eBee (senseFly, 2014)	13
Preglednica 6: Možnosti največje pokritosti terena na višinah 300 m in 100 m nad terenom	14
Preglednica 7: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 RGB.....	14
Preglednica 8: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 NIR.....	15
Preglednica 9: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 RE.....	15
Preglednica 10: Tehnične specifikacije fotoaparata multiSPEC 4C	16
Preglednica 11: Tehnične specifikacije fotoaparata thermoMAP	16
Preglednica 12: Priporočene specifikacije terenskega računalnika glede na cenovno/zmogljivostno razmerje (Pix4D, 2015).....	17
Preglednica 13: Delovne postaje primerne za PostFlight Terra 3D (Pix4D, 2015)	18
Preglednica 14: ASPRS standardna klasifikacija točk (ASPRS, 2013)	35
Preglednica 15: Parametri zajema	46
Preglednica 16: Odstopanja koordinat med danimi oslonilnimi točkami in izračunanimi.....	47
Preglednica 17: Odstopanja kontrolnih točk na ortofotu in izračunan koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE).....	50
Preglednica 18: Primerjava različnih tipov oblakov točk	53
Preglednica 19: Uporabljeni oblaki točk v raziskavi.....	53
Preglednica 20: Primerjava gostot FOT, ALS, TLS	54
Preglednica 21: Numerična primerjava odstopanj modelov višin.....	58
Preglednica 22: RMSE karakterističnih točk	60
Preglednica 23: Število vzorčnih točk po razredih in interval zaupanja s stopnjo zaupanja $c=0,95$	69
Preglednica 24: Absolutni delež napak	72
Preglednica 25: Uspešnost klasifikacije - razred teren.....	72
Preglednica 26: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred teren.....	73
Preglednica 27: Uspešnost klasifikacije - razred stavbe	74
Preglednica 28: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred stavbe	74
Preglednica 29: Uspešnost klasifikacije - razred vegetacija	75
Preglednica 30: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred vegetacija	75

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO SLIK

Slika 1: Razvrstitev zračnega prostora v FIR Ljubljana (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015).	6
Slika 2: Pregled zračnega prostora Republike Slovenije (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2014)	6
Slika 3: VFR karta Slovenije (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015).....	7
Slika 4: Odtisi slik v odvisnosti od načina letenja: a), b) - daljinsko vodeno letenje c) - avtonomno letenje (Nex in Remondino, 2013).....	10
Slika 5: Brezpilotni letalnik eBee (senseFly, 2013).....	12
Slika 6: Spektralni razpon fotoaparata S110 RGB.....	14
Slika 7: Spektralni razpon fotoaparata S110 NIR.....	15
Slika 8: Spektralni razpon fotoaparata S110 RE.....	15
Slika 9: Spektralni razpon fotoaparata multiSPEC 4C.....	16
Slika 10: Spektralni razpon fotoaparata thermoMAP.....	16
Slika 11: Delovni postopek.....	20
Slika 12: Načrtovanje leta v programu eMotion 2.....	22
Slika 13: Centralna projekcija (prirejeno po Kraus, 2007).....	25
Slika 14: Presek žarkov vezne točke (X) na dveh fotografijah s projekcijskima centroma (O1, O2), kjer je R relativna rotacija in T relativna translacija med projekcijskima centrom O1 in O2.....	28
Slika 15: Razlika; digitalni model površja (rdeče), digitalni model reliefa (levo) (wikipedia, 2015)....	40
Slika 16: Krivulja skozi točke DMR (Kraus, 2007).....	41
Slika 17: Funkcija uteži (Kraus, 2007).....	41
Slika 18: Rezultati izdelave DMRja (Kraus, 2007).....	41
Slika 19: Primerjava različnih algoritmov rekonstrukcije površin (Kazhdan in Hoppe, 2013).....	41
Slika 20: Izdelava ortomozaika (McGlone in sod., 2004).....	42
Slika 21: Metodologija dela.....	44
Slika 22: Območje raziskav v mestu Radovljica.....	45
Slika 23: Načrta preleta 1.....	46
Slika 24: Trajektorija preleta 1 in lokacije proženja.....	47
Slika 25: Območje preleta in lokacije oslonilnih točk.....	48
Slika 26: Prikaz oslonilnih točk na izsekih posnetkov.....	48
Slika 27: Rezultati obdelave (levo: ortomozaik, desno zgoraj: oblak točk, desno spodaj: DMP).....	50
Slika 28: a) lokacije kontrolnih točk (rdeči križi), b) primer kontrolne točke.....	51
Slika 29: Območje primerjave oblakov točk.....	52
Slika 30: Gostota točk na 0,5 m ² : a) FOT1 b) FOT2 c) ALS d) TLS; a) b) in c) barvna lestvica 1-150, d) 1-1000.....	55
Slika 31: Gostota točk na kvadratni meter (FOT1 – ALS).....	56

Slika 32: DMR iz oblakov točk: a) TLS, b) ALS, c) FOT1, d) FOT2	57
Slika 33: Odstopanje DMR-ja od TLS DMR-ja: a) ALS b) FOT1 c) FOT2.....	58
Slika 34: Oblak točk objekta a) FOT1 b) FOT2 c) ALS d) TLS	59
Slika 35: Prikaz zajetih karakterističnih točk iz različnih oblakov na ortofotu	60
Slika 36: Metodologija dela za določitev uspešnosti klasifikacije	61
Slika 37: Segmentacija PostFlight Terra 3D za celotno območje	63
Slika 38: Klasifikacija PostFlight Terra 3D	63
Slika 39: Primer zagonske datoteke LAStools	64
Slika 40: Najboljša klasifikacija z orodjem LAStools.....	65
Slika 41: Grafični vmesnik programa <i>gLIDAR</i>	66
Slika 42: Najboljša klasifikacija z programom <i>gLIDAR</i>	67
Slika 43: Klasifikacija Global Mapper v16.2	68
Slika 44: Referenčen vzročen oblak točk	70

OKRAJŠAVE

AGL	Višina nad terenom (angl. Above Ground Level)
ATC	Kontrolna zračnega prometa (angl. Air traffic control)
DMP	Digitalni model površja
DMR	Digitalni model reliefa
FIR	Območje letalskih informacij (angl. Flight Information Region)
FL	Nivo leta (angl. Flight Level)
GCP	Oslonilna točka (angl. Ground Control Point)
GCS	Kontrolna postaja (angl. Ground Control Station)
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistem (angl. Global Navigational Sattalite System)
GPS	Globalni sistem pozicioniranja (angl. Global Positioning System)
GPU	Grafično procesna enota (angl. Graphical Procesing Unit)
GSD	Prostorska ločljivost (angl. Ground Sample Distance)
IFR	Pravila instrumentalnega letenja (angl. Instrumental flight rules)
IMU	Inercialna merska enota (angl. Inertial Mesurment Unit)
INS	Inercialni navigacijski sistem (angl. Inertial Naviagtaion System)
MSL	Srednja višina morja (angl. Mean Sea Level)
NDVI	Normiran diferencialni vegetacijski indeks (angl. Normalized Differential)
RGB	Spektralni kanali: rdeč, zelen, moder (angl. Red Green Blue)
RMZ	Območje obvezne uporabe radija (angl. Radio Mandatory Zone)
RPAS	Daljinsko vodeni zračni sistemi (angl. Remotely Piloted Airborne Systems)
RTK	Kinematična izmera v realnem času(angl. Real Time Kinematic)
SfM	Struktura iz gibanja (angl. Structure from Motion)
SIFT	Algoritem za iskanje veznih točk (angl. Scale-Invariant Feature Transform)
UAS	Brepilotni letalski sistemi (angl. Unmanned Aerial Systems)
UAV	Brepilotni letalniki (angl. Unmanned Aerial Vehicle)
VFR	Pravila vizualnega letenja (angl. Visual Flight Rules)

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

V uvodnem delu predstavimo motivacijo za nastanek magistrskega dela in hipoteze. Na kratko opišemo strukturo naloge.

1.1 Motivacija

Brepilotni sistemi postajajo vse pogostejše orodje za zajem prostorskih podatkov. Vse več podjetij v Sloveniji in tujini že ima v lasti takšne sisteme. Področje je še dokaj mlado, zato vsi postopki še niso povsem dodelani. Veliko stvari je sicer podobnih kot pri velikih letalskih sistemih, vendar se določeni postopki dela razlikujejo. Uporabniki takih sistemov potrebujejo jasne strokovne usmeritve, razumeti morajo različne vplive na kakovost izdelkov in tako izkoristiti možnosti za izboljšave izdelkov, ki bodo zanesljiv vir za pridobivanje prostorskih podatkov. Eden izmed izdelkov iz takšnih sistemov je fotogrametrično pridobljen oblak točk. Oblak vsebuje ogromno informacij vendar je delo z njim verjetno zelo težavno zaradi velike količine podatkov. Da bi lažje obvladovali takšen oblak, ga pred nadaljnjo uporabo avtomatsko klasificiramo. Glavni cilj magistrske naloge je pregled področja brezpilotnih sistemov za zajem prostorskih podatkov, algoritmov v ozadju obdelav, ter pregled metod avtomatske klasifikacije in analiza kakovosti le-teh. Opisali in analizirali bomo potek posameznih faz obdelav. Praktični del naloge bomo izvedli v sodelovanju s slovenskim podjetjem Geavis d.o.o., ki ima v lasti letalnik eBee švicarskega podjetja senseFly.

1.2 Hipoteze

V magistrskem delu smo preverili naslednje hipoteze:

1. Oblak točk, pridobljen iz posnetkov z brezpilotnega letalnika, je primerljive kakovosti (položajna točnost, gostota) kot oblak točk, pridobljen s terestričnim laserskim skeniranjem (TLS) in aerolaserskim skeniranjem (ALS).
2. V fotogrametrično pridobljenem oblaku točk lahko z avtomatsko klasifikacijo z več kot 90 % stopnjo kakovosti določimo točke naslednjih razredov: teren, vegetacija in stavbe.
3. Za klasifikacijo fotogrametrično pridobljenega oblaka točk lahko uspešno uporabimo tudi nekatere algoritme namenjene za klasifikacijo lidarskih oblakov točk.

2 BREZPILOTNI SISTEMI

V tem poglavju opredelimo brezpilotne sisteme s poudarkom na opisu lastnosti brezpilotnih sistemov za zajem prostorskih podatkov.

2.1 Opredelitev osnovnih terminov

Brepilotni sistemi se uporabljajo na številnih področjih kot so vojska, dostava paketov, filmografija in podobno. V magistrskem delu se bomo osredotočili le na sisteme, ki so namenjeni za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje (angl. Photogrammetry and Remote Sensing, PaRS).

Brepilotni letalski sistemi, krajše brezpilotni sistemi, so sistemi sestavljeni iz več podsistemov. Brepilotni sistem sestavljajo trije glavni podsistemi: brezpilotni letalnik (angl. unmanned aerial vehicle, UAV), kontrolna postaja (angl. ground control station, GCS) in komunikacijsko podatkovna povezava (angl. communication data link) (Colomina and Molina, 2014). Brepilotni sistemi so lahko daljinsko vodeni, avtomatski, avtonomni, ali kombinacija vseh (Eisenbeiss, 2009).

Brepilotni sistem, namenjen za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, je dodatno opremljen še z dodatnimi senzorji (digitalni fotoaparati, laserski skener).

2.2 Prednosti in slabosti brezpilotnih sistemov

Brepilotni sistemi imajo številne prednosti pred velikimi (klasičnimi) letalskimi sistemi. Brepilotne sisteme lahko uporabljamo v nevarnih situacijah brez ogrožanja človeških življenj, na nedostopnih območjih z možnostjo nizkih preletov. Takšne situacije so velikokrat po naravnih katastrofah. V primeru slabega vremena in nizke oblačnosti klasični optični sistemi ne morejo izvajati meritev, saj morajo leteti na ustreznih višinah. Brepilotni sistemi pa lahko letijo veliko nižje, pod mejo oblačnosti in tako lahko kljub slabemu vremenu pridobimo podatke. Pri brezpilotnih sistemih je časovna odzivnost lahko veliko krajša in omogočajo hitrejšo pridobitev podatkov. Prav tako so takšni sistemi neprimerno cenejši za nabavo kot tudi za vzdrževanje (Eisenbeiss, 2009)

Največja omejitev brezpilotnih letalnikov, predvsem nizko cenovnih, je možna dodatna teža in dimenzije tovora oziroma senzorja, ki ga lahko nesejo. V takšnih sistemih najpogosteje najdemo lahke amaterske fotoaparate majhnega ali srednjega formata. Posledično moramo zato posneti več fotografij z večjim prekrivanjem. Poleg tega tudi notranja orientacija fotoaparata ni stabilna. Zaradi omejenosti dodatne teže v letalnike ne moremo vgraditi boljših globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (GNSS) in inercialnih navigacijskih sistemov (INS). V primerjavi z velikimi sistemi imajo brezpilotni letalniki precej omejen domet. Manjši letalniki ne morejo leteti v močnejšem vetru, medtem ko lahko letala z človeško posadko letijo brez težav (Eisenbeiss, 2009).

2.3 Tržni potencial

Brepilotni sistemi so se v zadnjem desetletju preselili iz povsem vojaške domene hkrati tudi v civilno. Uporabljajo se na številnih področjih. Pregled trga za civilno uporabo je pokazal naslednje aplikacije (Everaerts, 2009):

- vladne službe:
 - policija,
 - civilna zaščita,
 - obmejna varnost,
 - obalna straža;
- požari in reševanje:
 - požari,
 - iskanje in reševanje,
 - gorsko reševanje;
- energetika:
 - nadzorovanje naftovodov in plinovodov,
 - nadzorovanje elektro omrežja;
- kmetijstvo:
 - nadzorovanje okolja,
 - precizno kmetijstvo;
- opazovanja zemlje in daljinsko zaznavanje:
 - spremljanje vremena in podnebja,
 - zračna fotografija, kartiranje in meritve,
 - opazovanje potresov,
 - nadzor onesnaženj,
- komunikacija in prenos podatkov:
 - nosilec strežnika proxy (VHALE),
 - kratkoročna pokrivanja signala (MALE / S/MUAS),
 - platforme za video kamere (prenos dogodkov, filmska industrija);
- prenos paketov:
 - prenos pošte (Amazon, Google, DHL),
 - dostava hrane (Domino).

Po študiji iz leta 2013 (MarketsandMarkets, 2013, cit. po (Colomina and Molina, 2014)) je globalni trg brezpilotnih sistemov vreden 5.400.000.000 € in naj bi do leta 2018 presegel 6.350.000.000 €. Sama industrija brezpilotnih sistemov zajema številne panoge in strokovnjake od aviacije, računalniškega vida, systemske teorije, robotike do geoinformatike in geodezije. Tako so perspektive za uporabo ogromne.

2.4 Pravna podlaga

Pravni okvirji glede brezpilotnih letalnikov so zelo zakomplicirani. Znotraj pravnih okvirjev se trenutno govori o dveh segmentih, ki jih je potrebno urediti. Prvi segment je tehnične narave in se ukvarja z integriranjem brezpilotnih sistemov v obstoječ zračni prostor in zagotavljanjem varnosti. Drug segment pa se ukvarja predvsem z varovanjem zasebnosti.

Tehnično je glavna težava, da z brezpilotnimi sistemi večinoma letimo v nekontroliranem zračnem prostoru, kar pomeni (Everaerts, 2009):

- enakovrednost z ostalimi uporabniki zračnega prostora, zagotoviti bi morali zmožnost sporočanja svoje lokacije in komunikacijo po standardnih kanalih, v nekontroliranem zračnem prostoru radijska zveza ni zahtevana,
- zmožnost zaznavanja in umikanja, brezpilotni sistemi bi morali biti sposobni zaznati druga letala in ovire (»see and avoid«) ter nato izvesti standardni postopek umikanja, prav tako mora biti viden drugim letalom in opremljen z navigacijskimi lučmi.

Predvsem drugo alinejo je zelo težko izpolniti, saj je ogromno poletov izven vidnega polja operaterja (Everaerts, 2009). Brezpilotni sistemi še niso opremljeni s tehnologijo, ki bi jim omogočala samodejno zaznavanje in umikanje. Ogromno se dela na razvoju takšne opreme, vendar bi za uspešno integriranje potrebovali standarde, ki področje urejajo. Trenutno vsi večji proizvajalci iščejo le lastne rešitve.

Organizacije, ki se ukvarjajo s pravno-tehnično problematiko brezpilotnih sistemov v Evropski uniji (Everaerts, 2009):

- Mednarodna organizacija za civilno letalstvo (International Civil Aviation Organization, ICAO),
- Evropska agencija za varnost v aviaciji (European Aviation Safety Agency, EASA),
- Evropska organizacija za varnost zračne navigacije (European Organisation for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL),
- Evropska varnostna agencija (European Defence Agency, EDA),
- Organizacija severnoatlantskega sporazuma (North Atlantic Treaty Organization, NATO),
- Mednarodno združenje za brezpilotne sisteme (Association for Unmanned Vehicle System International, AUVSI),

- Evropska organizacija za civilno letalsko opremo (European Organisation of Civil Aviation Equipment, EuroCAE),
- Mednarodno združenje za brezpilotne sisteme (UVS International).

Njihova stališča so opisana v tehničnem dokumentu EuroSDR (Everaerts, 2009).

V Slovenije se z letalstvom ukvarjajo naslednje organizacije:

- Ministrstvo za infrastrukturo, Direktorat za infrastrukturo, Sektor za letalstvo,
- Agencija za civilno letalstvo,
- Kontrola zračnega prometa Slovenije.

Pogovori o ureditvi slovenske zakonodaje že intenzivno potekajo. Inštitut za korporativne varnostne študije ICS je 22. junija 2015 v sodelovanju z Državnim svetom pripravil posvet »Dileme in izzivi uporabe brezpilotnih letalnikov ter potreba normativne ureditve uporabe«. S strani odgovornih je bilo poudarjeno, da mora biti normativna ureditev pripravljena do konca 2015 ter, da bo v pripravo ustreznih normativnih aktov povabljeni tudi strokovna javnost iz vladnega in nevladnega sektorja (Čaleta in sod., 2015).

2.5 Zračni prostor v RS

Zračni prostor Republike Slovenije v celoti pokriva Flight Information Region (FIR) Ljubljana. FIR Ljubljana je razdeljen v štiri razrede (Preglednica 1). Z daljinsko vodenimi sistemi se lahko gibljemo samo v nekontroliranem zračnem prostoru G. Sami moramo zagotavljati razdvajanje od drugih uporabnikov tega prostora. Letimo po pravilih VFR (angl. visual flight rules). Brezpilotni letalnik moramo imeti vedno v vidnem polju in spremljati drug promet. Prostor G je višinsko omejen na 305, 762 ali 2895 metrov oziroma 1000, 2500 ali 9500 čevljev nad terenom (Slika 1), odvisno od lokacije.

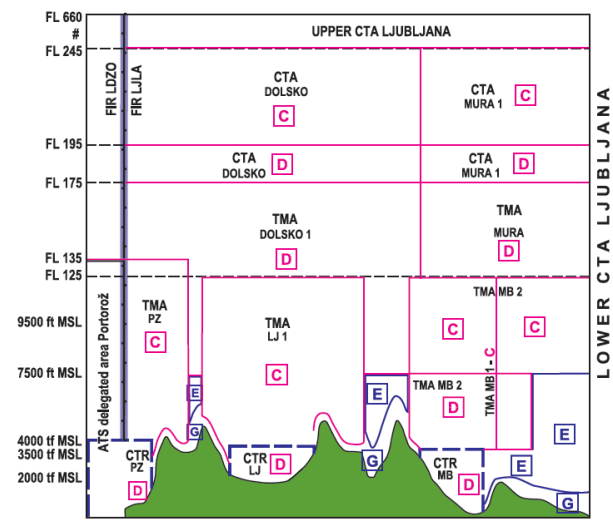
Preglednica 1: Razvrstitev slovenskega zračnega prostora za VFR (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015)

Razred	Tip leta	Razdvajanje	Zahteva za zmožnost radijske komunikacije	Zahtevana neprekinjena dvosmerna komunikacija zrak-zemlja	Potrebno dovoljenje ATC
C	VFR	VFR – IFR	DA	DA	DA
D	VFR	Brez	DA	DA	DA
E	VFR	Brez	NE*	NE*	NE
G	VFR	Brez	NE**	NE**	NE

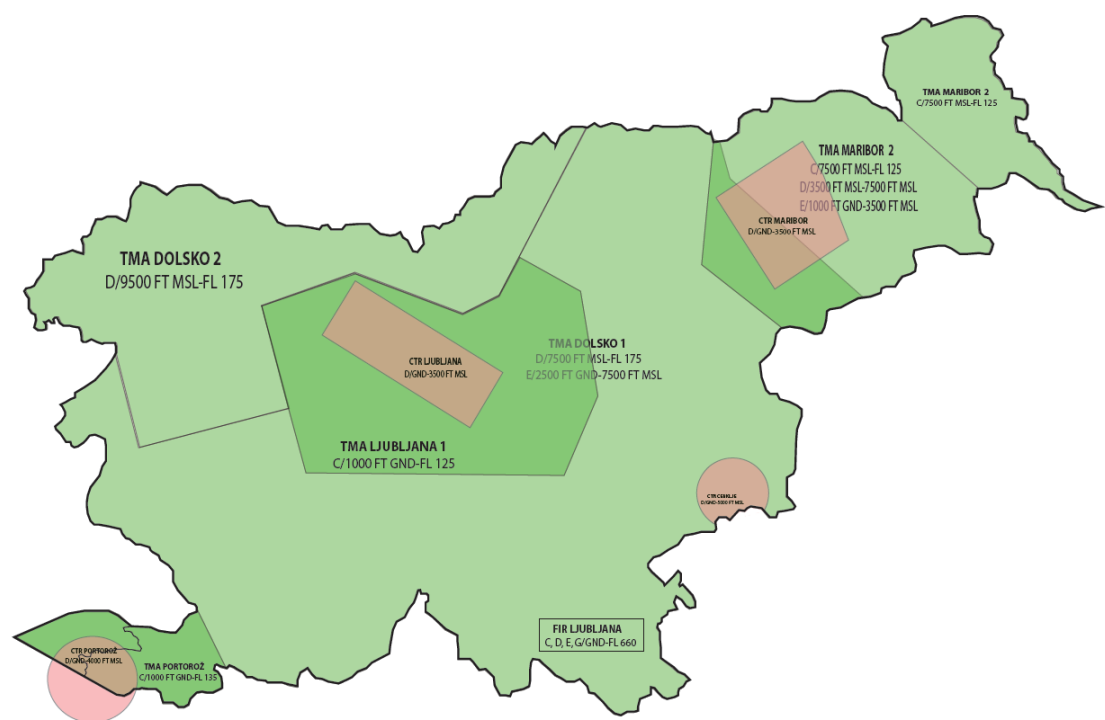
* Pilot vzdržuje neprekinjeno zvočno komunikacijo zrak-zemlja in po potrebi vzpostavi dvosmerno komunikacijo na

ustreznem komunikacijskem kanalu v območju RMZ

** Zvočna komunikacija zrak-zemlja je obvezna za lete, vključene v svetovanje. Piloti vzdržuje neprekinjeno zvočno komunikacijo zrak-zemlja in po potrebi vzpostavi dvosmerno komunikacijo na ustreznem komunikacijskem kanalu v območju RMZ.



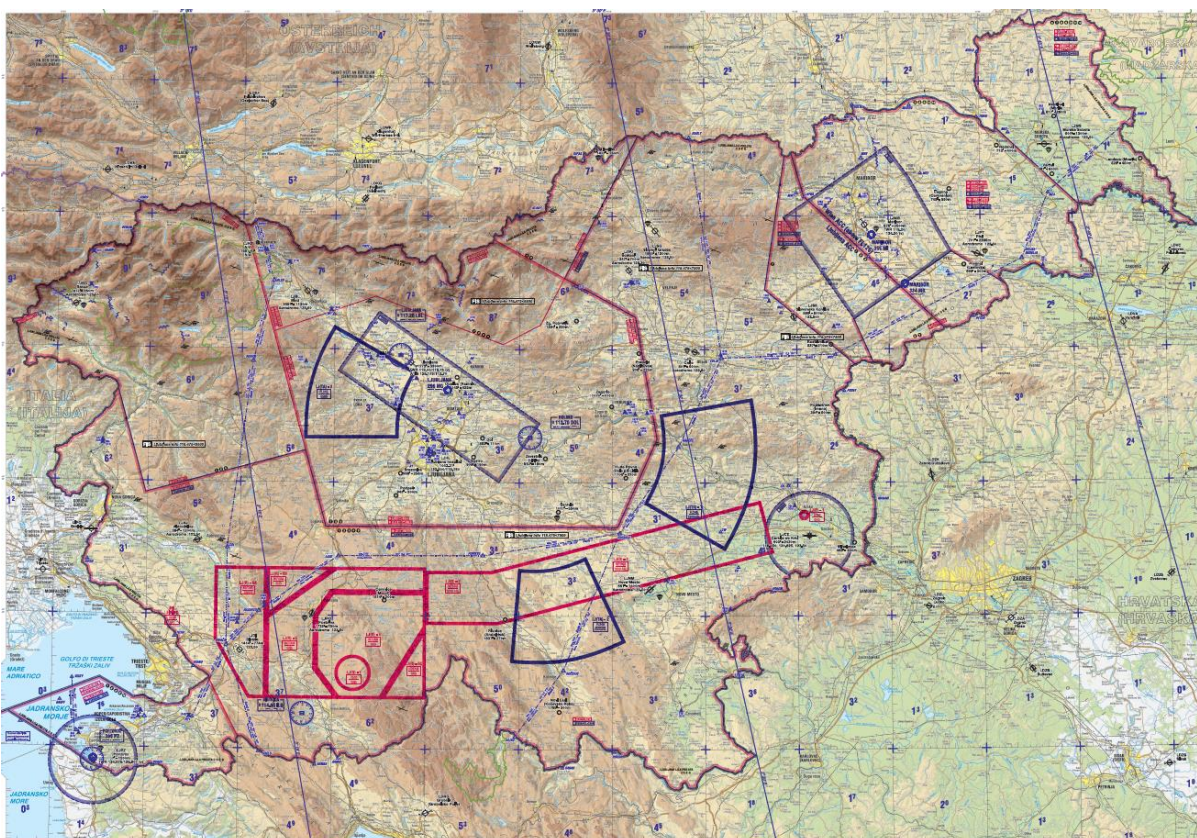
Slika 1: Razvrstitev zračnega prostora v FIR Ljubljana (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015)



Slika 2: Pregled zračnega prostora Republike Slovenije (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2014)

Višina prostora G se razlikuje v odvisnosti od lokacije. S Slika 2 je razvidno do katere višine je nekontroliran prostor. Na primer TMA DOLSKO 2 do višine 9500 čevljev nad terenom. Z rdečo barvo so označena območja kontroliranega prometa, vstop v njih je z brezpilotnimi sistemi prepovedan.

V Sloveniji imamo štiri območja kontroliranega zračnega prometa in sicer Letališče Jožeta Pučnika, Letališče Maribor, Letališče Portorož in Letališče Cerklje (Slika 3). V teh območjih z brezpilotnimi sistemi ne smemo leteti, saj je za vstop v ta prostor potrebno dovoljenje in radijska komunikacija s stolpom. V Sloveniji imamo eno prepovedano območje in sicer okoli Nuklearne elektrarne Krško. Slovenski zračni prostor ima še nekaj območij, ki pa niso vedno aktivna. Gre za vojaška vadbena območja, nevarna območja in območja omejenega letenja (Slika 3), označeno z rdečo in temno modro barvo. Ali so območja aktivna lahko preverimo na spletnih straneh Kontrole zračnega prometa Slovenije (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015).



Slika 3: VFR karta Slovenije (Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015)

2.6 Delitve brezpilotnih sistemov

Različnih brezpilotnih sistemov je ogromno in se med seboj tudi zelo razlikujejo. Kategorizacija brezpilotnih sistemov je zato težka. Ena izmed možnosti je, da jih kategoriziramo na podlagi velikosti in parametrov dosega, višine leta, vzdržljivosti, maksimalne teže vzleta ter po njihovem namenu (Preglednica 2).

Preglednica 2: Kategorizacija brezpilotnih sistemov (Everaerts, 2009)

Kategorija	Akronim	Doseg [km]	Višina leta [m]	Vzdržljivost [h]	Maksimalna teža vzleta [kg]
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025
Mikro	μ	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150-300	< 2	< 30
Bližnjega dosega	CR	10 – 30	3.000	2 – 4	150
Kratkega dosega	SR	30 – 70	3.000	3 – 6	250
Srednjega dosega	MR	70 – 200	5.000	6 – 10	1.250
Srednjega dosega z veliko vzdržljivostjo	MRE	> 500	8.000	10 – 18	1.250
Nizko leteči	LADP	> 250	50 – 9.000	0,5 – 1	350
Vzdržljivostni nizko leteči	LALE	> 500	3.000	> 24	< 30
Vzdržljivostni srednje leteči	MALE	> 500	14.000	24 – 48	1500
Vzdržljivostni visoko leteči	HALE	> 2.000	20.000	24 – 48	4.500 – 12.0000
Brepilotna bojna zračna plovila	UCAV	1500	10.000	2	10.000
Smrtonosni	LETH	300	4.000	3 – 4	250
Vaba	DEC	0 – 500	5.000	< 4	250
Stratosferski	STRATO	> 2000	20.000 – 30.000	> 48	

Za zajem prostorskih podatkov v civilne namene se največ uporabljajo brezpilotni sistemi vrste mikro, mini in bližnjega dosega. Brezpilotne sisteme lahko tudi delimo po tem kako ustvarjajo vzgon (Eisenbeiss, 2009):

- lažji od zraka (baloni),
- letalski sistemi oziroma fiksna krila,
- več-rotorski sistemi.

Ta delitev je smiselna predvsem s stališča zajema prostorskih podatkov, saj imajo različni sistemi prednosti in slabosti glede na zajem podatkov (Preglednica 3).

Preglednica 3: Prednosti in slabosti letalskih in več-rotorskih sistemov

	Letalski sistemi / fiksna krila	Več-rotorski sistemi
Doseg	veliki	manjši
Vzdržljivost	večja	srednja
Vremenski vplivi	večji vpliv vetra na stabilnost in vzdržljivost	stabilni v vetru, vpliv na vzdržljivost
Okretnost	potrebujejo veliko prostora	zelo okretni, lahko delamo v zelo omejenih prostorih
Vzlet	potrebujejo veliko prostora za vzlet in pristane	vzletijo lahko praktično kjer koli
Teža tovora	zelo omejeni s težo senzorja	večji senzorji
Prenosljivost	večina se jih da zložiti, so nekoliko večji. nekateri potrebujejo tudi vzletno rampo	zasedejo precej prostora, nekateri se dajo zložiti.
Ostalo		možnost nagiba senzorja (fasade, stene, jezovi)

2.7 Podsistemi brezpilotnih sistemov za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje

Kot že omenjeno, so brezpilotni sistemi sestavljeni iz treh ključnih podsistemov:

- brezpilotnega letalnika,
- kontrolne postaje,
- komunikacijskega kanala.

Dodatno pa imamo pri brezpilotnih sistemih, ki so namenjeni za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, še dva ključna podsistema:

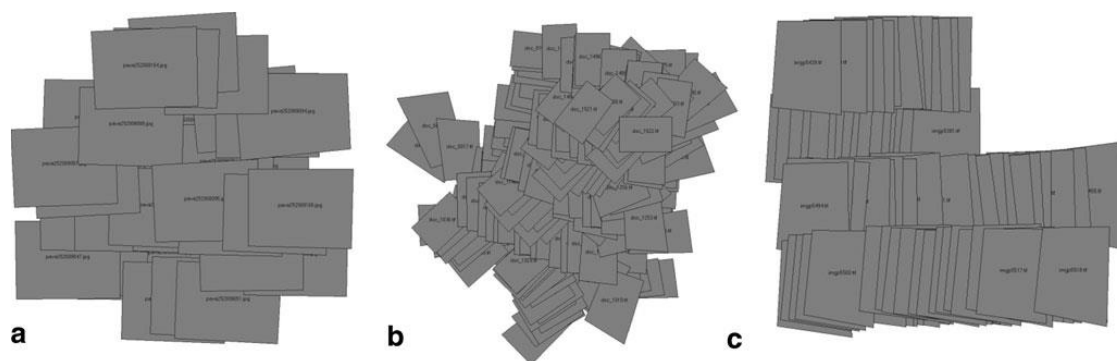
- enega ali več senzorjev za zajem podatkov,
- programsko opremo za fotogrametrično obdelavo podatkov.

2.7.1 Brezpilotni letalnik

Brepilotni letalniki, ki se uporabljajo za zajem prostorskih podatkov, so večinoma letalskega ali več-rotorskega tipa z maksimalno težo vzleta do 30 kg, dometom do 10 km in višino letenja pod 300 metri.

Brepilotni letalnik je lahko daljinsko voden preko radijske povezave ali pa leti povsem avtonomno z avtopilotom na podlagi navigacije GNSS in INS (Colomina and Molina, 2014).

Odvisno glede na potrebe projekta, zmožnosti letalnika in okoljskih razmer se odločimo za daljinsko voden ali avtonomen način letenja. Za potrebe avtonomnega letenja potrebujemo GNSS in INS (vzlet, navigacija, pristanek). Avtonomno letenje nam omogoča zagotavljanje točno določenega preklopa med slikami (Slika 4) (Nex and Remondino, 2013).



Slika 4: Odtisi slik v odvisnosti od načina letenja: a), b) - daljinsko voden letenje c) - avtonomno letenje (Nex in Remondino, 2013)

2.7.2 Kontrolna postaja

Kontrolna postaja je lahko programska ali strojna oprema, namenjena nadzoru in pošiljanju ukazov brezpilotnemu letalniku. Kontrolna postaja je pomemben del celotnega sistema, saj preko nje komuniciramo z brezpilotnim sistemom. Določamo misijo, spreminjamo pot letenja, vklapljamo ali izklapljammo senzorje. V primeru napake v brezpilotnem letalniku ali v senzorjih za zajem podatkov dobimo sporočilo preko kontrolne postaje kar nam omogoča spremembo poteka leta ali zasilni pristanek (Colomina in Molina, 2014).

2.7.3 Komunikacijski kanal

Pri brezpilotnih letalnikih je komunikacija kritičnega pomena, saj z letalnikom komuniciramo na daljavo. V primeru, ko imamo povsem avtonomno misijo, si lahko krajše izgube signala privoščimo, vendar se jim poskušamo izogibati. V primeru, da gre za povsem daljinsko voden let, pa lahko že krajša izguba signala povzroči padec brezpilotnega letalnika (Colomina in Molina, 2014). Telemetrija med kontrolno postajo in brezpilotnim letalnikom večinoma poteka na frekvenci 433 MHz, radijska povezava za daljinsko vodenje pa večinoma na 2,4 GHz.

2.7.4 Senzorji za zajem podatkov

Brepilotni sistemi za zajem prostorskih podatkov so večinoma v kategorijah mikro, mini ali bližnje dosežni letalniki. Zato so precej omejeni z velikostjo in težo senzorjev, ki jih lahko nosijo. Pomembno je izbrati najboljši senzor glede na velikost, težo in ceno senzorja v razmerju z valovno dolžino spektralnega kanala, velikostjo slikovnega senzorja, ločljivostjo, natančnostjo. Senzorji, ki se uporabljajo v fotogrametriji in daljinskem zaznavanju (Colomina in Molina, 2014), so:

- senzor v vidnem spektru,
- bližnje-infrardeči spekter,
- multi-spektralni senzorji,
- hiper-spektralni senzorji,
- termalni senzorji,
- laserski skenerji,
- radar s sintetično odprtino – SAR.

V primeru digitalnih fotoaparatorov v vidnem spektru gre večinoma za fotoaparate malega ali srednjega formata. Za te fotoaparate je značilno, da niso merski in je njihova notranja stabilnost slaba, vendar z metodo dela lahko to pomanjkljivost odpravimo.

2.7.5 Programska oprema za fotogrametrično obdelavo

Podobno kot v klasični fotogrametriji je tudi tukaj obdelava posnetkov eden ključnih korakov v celotnem procesu. V osnovi gre za podobne postopke kot v klasični aerofotogrametriji z vplivom bližnjelikovne fotogrametrije in računalniškega vida. Glavni izdelki so oblak točk, DMR/DMP in ortomozaik (Colomina in Molina, 2014). Nekaj programskih paketov:

- Pix4Dmapper (Pix4D, <https://pix4d.com/>),
- Photoscan (Agisoft, <http://www.agisoft.com/>),
- 3Dsurvey (Modri planet, <http://www.modriplanet.si/>),
- DroneMapper (DroneMapper, <https://dronemapper.com/>),
- APS (Menci, <http://www.menci.com/>),
- EnsoMOSAIC (MosaicMill, <http://www.mosaicmill.com/>),
- VisualSFM + CMVS (odprtokodna rešitev, <http://ccwu.me/vsfm/>; <http://www.di.ens.fr/cmvs/>).

3 BREZPILOTNI SISTEM eBee

Brepilotni sistem eBee je popolnoma avtonomen sistem za zajem visoko-ločljivih zračnih fotografij, primernih za izdelavo 2D ortomozaikov, 3D modelov in oblakov točk. Sestavljen je iz brezpilotnega letalnika eBee (Slika 5), kontrolne postaje eMotion in programa za obdelavo fotografij PostFlight Terra 3D.



Slika 5: Brepilotni letalnik eBee (senseFly, 2013)

3.1 Podjetje senseFly

Brepilotni sistem eBee je izdelek švicarskega podjetja senseFly. Podjetje se ukvarja z razvojem in izdelavo profesionalnih brezpilotnih sistemov za zračno fotografiranje. Izdelki podjetja so ultra lahki avtonomni brezpilotni sistemi za zajem prostorskih podatkov. Njihovi sistemi se uporabljajo v številnih področjih kot na primer geodezija, kmetijstvo, geografski informacijski sistemi, industrijski pregledi, rudarjenje, humanitarni projekti in drugo. Podjetje senseFly je leta 2009 ustanovila ekipa raziskovalcev s področja robotike v Švici. Podjetje je hitro postalo vodilno na področju izdelave brezpilotnih sistemov za zajem prostorskih podatkov (senseFly, 2015).

3.2 Brepilotni letalnik eBee

Brepilotni letalnik eBee spada med mikro brezpilotne sisteme tipa fiksnih kril. Tehnične specifikacije so prikazane v Preglednica 4, specifikacije operacij pa v Preglednica 5.

Preglednica 4: Tehnične specifikacije strojne opreme brezpilotnega letalnika eBee (senseFly, 2014)

Teža (vključno s fotoaparatom)	0,69 kg
Premer kril	96 cm
Material	EPP pena, karbonska struktura in kompozitni deli

Pogon	Električni potisni propeler, 160 W brezkrtačni DC motor
Baterija	11,1 V, 2150 mAh (1800 mAh – Geavis)
Fotoapararat	Canon S110 RGB (12MP)
Kamera 2 (opcijsko)	S110 RGB, thermoMAP, WX...

Preglednica 5: Tehnične specifikacije operacij z brezpilotnim sistemom eBee (senseFly, 2014)

Najdaljši čas letenja	50 minut
Normalna hitrost letenja	40 – 90 km/h (11 – 25 m/s)
Domet radijske povezave	< 3 km
Največja pokritost terena (v enem preletu)	12 km ² (na višini 974)
Največji dovoljen veter	Do 45 km/h (12 m/s)
Prostorska ločljivost (GSD)	Do 1,5 cm na piksel
Relativna natančnost ortomozaika/3D modela	1-3x GSD
Absolutna horizontalna/vertikalna natančnost (z oslonilnimi točkami (GCP))	do 3 cm / 5cm
Absolutna horizontalna/vertikalna natančnost (brez oslonilnih točk)	1 – 5 m
Možnost sočasne misije z več letalniki	da (vključuje sistem za izogibanje trkom)
Avtomatsko 3D načrtovanje letov	da
Natančnost pristajanja (linearna)	Približno 5 m

Prikazane podatke v Preglednica 5 navaja proizvajalec, do teh navedb moramo biti kritični in previdni. Kritično moramo presoditi največjo pokritost terena v enem preletu, ki nam jo proizvajalec oglašuje. Čeprav zakonsko področje še ni urejeno, trenutno velja pravilo (v modelarstvu), da se ne leti več kot 300 metrov nad terenom (AGL). 300 metrov nad terenom se začne zračni prostor, kjer se odvija zračni promet in z uporabo letalnikov v tem prostoru lahko ogrozimo zračni promet. Drug pomislek je najdaljši čas letenja, ki je teoretično 50 minut, vendar zaradi varnosti vedno načrtujemo misije tako, da je čas leta manjši od 40 minut, da imamo v primeru težav še vedno nekaj rezerve. Tretji pomislek, ki tudi vpliva na čas letenja, so nastavitve preklopov, ki precej vplivajo na velikost območja, ki ga lahko posnamemo v enem preletu. Prav tako ta ocena velja ob pogoju, da imamo brezvetrje. Torej za nas sta zanimivi predvsem dve višini in sicer 300 metrov nad terenom kot najvišja dovoljena, ter višina 100

metrov nad terenom saj se je ta izkazala za izredno priljubljeno v praksi, saj omogoča prostorsko ločljivost okoli treh centimetrov (Preglednica 6).

Preglednica 6: Možnosti največje pokritosti terena na višinah 300 m in 100 m nad terenom

Višina letenja nad terenom	300 m	100 m
Prostorska ločljivost (GSD)	9,2 cm	3,1 cm
Čas letenja	40 min	40 min
Prečni preklop	60 %	60 %
Vzdolžni preklop	75 %	75 %
Pokritost terena	3 km ²	1 km ²

3.3 Možni senzorji na letalniku eBee

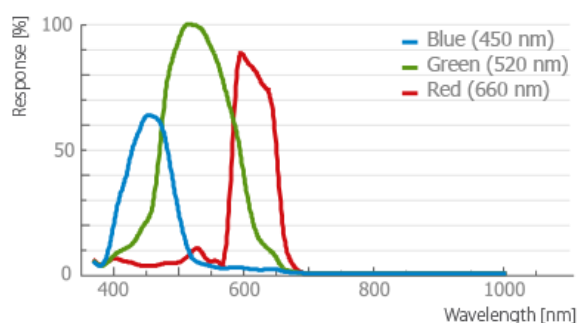
Brepilotni letalnik eBee lahko opremimo z različnimi senzorji, odvisno od operacij za katere ga uporabljamo. Proizvajalec senseFly ponuja izbor med naslednjimi senzorji (senseFly, 2015):

S110 RGB

Fotoaparatus za zajem slik v vidnem spektru svetlobe, z možnostjo nastavljanja ekspozicije (Preglednica 7, Slika 6).

Preglednica 7: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 RGB

ločljivost	12 MP
Prostorska ločljivost na 100 m	3,5 cm
Velikost senzorja	7,44 mm x 5,58 mm
Format	JPEG / RAW



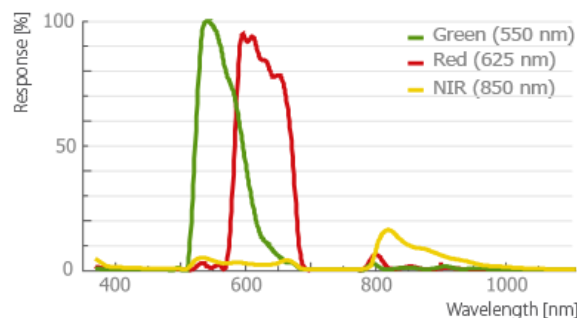
Slika 6: Spektralni razpon fotoaparata S110 RGB

S110 NIR

S100 NIR je fotoaparati, ki zajema fotografije v bližnjem infra rdečem, rdečem in zelenem spektru (Preglednica 8, Slika 7). Fotografije so uporabne za izračun normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), na primer v kmetijstvu.

Preglednica 8: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 NIR

Ločljivost	12 MP
Prostorska ločljivost na višini 100 m	3,5 cm
Velikost senzorja	7,44 x 5,58 mm
Format	JPEG / RAW



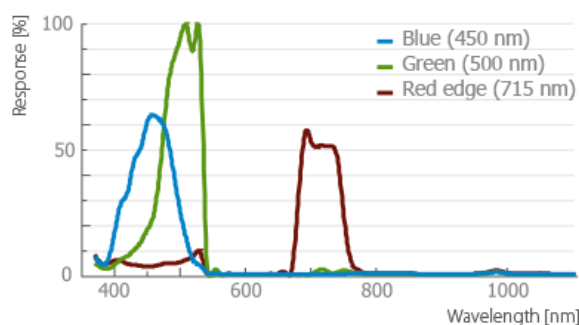
Slika 7: Spektralni razpon fotoaparata S110 NIR

S110 RE

Fotoaparati S100 RE zajema podatke v modrem, zelenem in robno rdečem spektru, kar omogoča izračun vegetacijskega indeksa (Preglednica 9, Slika 8). Robni rdeč spekter se lahko uporabi za ugotavljanje stanja vegetacije, koncentracijo klorofila na podlagi premika iz visoke v nizko spektralno reflektivnost.

Preglednica 9: Tehnične specifikacije fotoaparata S110 RE

Ločljivost	12 MP
Prostorska ločljivost na 100 m	3,5 cm
Velikost senzorja	7,44 x 5,58 mm
Format	JPEG / RAW
Senzor osvetljenosti	Ne



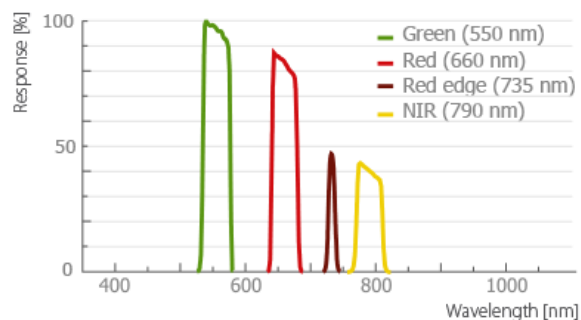
Slika 8: Spektralni razpon fotoaparata S110 RE

multiSPEC 4C

Fotoaparati multiSPEC 4C omogoča zajem v štirih visoko natančnih spektralnih kanalih in sicer v zelenem, rdečem, robno rdečem in bližnje infrardečem (Preglednica 10, Slika 9). Dodatno ima tudi navzgor obrnjen senzor, ki meri količino vpadne svetlobe.

Preglednica 10: Tehnične specifikacije fotoaparata multiSPEC 4C

Ločljivost	4 senzorji z 1.2 MP
Prostorska ločljivost na 100 m	10 cm
Velikost senzorjev	4,8 x 3,6 mm
Format	RAW
Senzor osvetljenosti	Ja



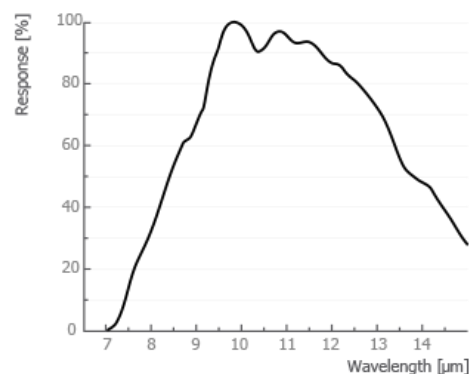
Slika 9: Spektralni razpon fotoaparata multiSPEC 4C

thermoMAP

Fotoaparati thermoMAP omogoča zajem termalnega video posnetka ali fotografij (Preglednica 11, Slika 10), za namene izdelave termalnih kart, razporeditve vod v namakalnih sistemih.

Preglednica 11: Tehnične specifikacije fotoaparata thermoMAP

Velikost podobe	640 x 512 pikselov
Prostorska ločljivost na 75 m	14 cm/piksel
Temperaturni razpon	-40 °C do 160°C
Temperaturna ločljivost	0,1°C
Format	TIFF + mp4 video
Teža	134 g
Delovna višina	75 – 150 m



Slika 10: Spektralni razpon fotoaparata thermoMAP

Dodatno sta na voljo še Canon fotoaparata IXUS ELPH, ki ga imajo v podjetju Geavis d.o.o., ter Sony WX.

3.4 Kontrolna postaja – eMotion

Pri brezpilotnem sistemu eBee je kontrolna postaja v obliki programske opreme, ki si jo lahko naložimo na prenosnik ali tablico. Namenjena je za načrtovanje, simuliranje, in nadzor preleta. Brezpilotni sistem eBee je povsem avtonomni letalnik, daljinskega upravljalnika ne potrebujemo in zato tudi operater ne potrebuje nobenih izkušenj z daljinskim vodenjem letalnikov (senseFly, 2015). Na prenosniku (Preglednica 12), ki nam služi kot kontrolna postaja, je dobro imeti nameščen tudi program za obdelavo PostFlight Terra 3D, da lahko pridobljene podatke hitro pregledamo še na terenu in če je potrebno, izvedemo dodaten prelet.

Preglednica 12: Priporočene specifikacije terenskega računalnika glede na cenovno/zmogljivostno razmerje (Pix4D, 2015)

Operacijski sistem	Windows 7 ali 8
Procesor	Intel i7
Pomnilnik	16 – 24 GB
Grafična kartica	Večinoma je integrirana kartica dovolj
Disk	SSD ali 7200RPM HDD vsaj 512 GB

Primeri prenosnikov (Pix4D, 2015):

- Lenovo W540, 16RAM: 1400€ ,
- Lenovo W540 (i7-4700QM, 24GB RAM, 512GB SSD), 2x8GB RAM, 512GB SSD: 1700€,
- HP envy (i7 4700QM, 16GB RAM, 512 HDD): 1000€.

3.5 Program za obdelavo fotografij PostFlight Terra 3D

Z brezpilotnega letalnika eBee dobimo aerofotografije, vendar te, dokler jih ne obdelamo, nimajo velike dodane vrednosti, zato vsak brezpilotni sistem za zajem prostorskih podatkov tudi vsebuje program za obdelavo le-teh. V primeru eBee-a sistem vključuje program PostFlight Terra 3D, ki je različica programa Pix4Dmapper, Švicarskega podjetja Pix4D. Program PostFlight Terra 3D ima vse funkcionalnosti programa Pix4Dmapper z razliko, da je izključno omejen na obdelavo fotografij, pridobljenih s senzorji v ponudbi podjetja senseFly. Program PostFlight Terra 3D je zelo dobro orodje.

Omogoča nam, da opravimo v večini vse potrebne postopke, za izdelavo kakovostnih prostorskih podatkov pridobljenih z brezpilotnimi sistemi.

3.5.1 Vhodni podatki

Uvozimo lahko različne vrste podatkov, osnovni so vsekakor aeroposnetki (RGB, NIR, multi spektralni). Uvozimo lahko oslonilne točke. Podpira globalne in lokalne koordinatne sisteme. Dodatno lahko uvozimo tudi položaj in orientacijo posnetkov (parametre zunanje orientacije) v primeru, da smo zunanjo orientacijo pridobili na drug način. Program omogoča tudi uvoz oblaka točk iz drugih virov, na primer lidarja, ki ga lahko uporabimo za izdelavo DMR-ja za ortofoto (senseFly, 2015).

3.5.2 Obdelava

Sama obdelava je za računalnik zahtevna operacija, zato za optimalno delo potrebujemo delovno postajo (Preglednica 13). Program omogoča hitri pregled, hitri izračun NDVI in izdelavo hitrega poročila kakovosti (fotografij, bloka fotografij, preklopa, notranje orientacije, veznih točk, georeferenciranja). S pomočjo prenosnika, ki nam služi kot kontrolna postaja že na terenu pregledamo podatke. Znotraj same obdelave se izvedejo naslednji postopki: samo-kalibracija fotoaparata, avtomatska aerotriangulacija, izravnava bloka posnetkov, avtomatska zgostitev oblaka točk, avtomatska klasifikacija oblaka točk (v trenutni verziji je postopek še v poskusni fazi) izdelava digitalnega modela terena, filtriranje in glajenje oblaka točk, avtomatska poprava svetlosti in barv, izdelava poročila. Rezultat obdelave so oblak točk, digitalni model površja in ortomozaik. Dodatno program tudi omogoča združevanje projektov, določevanje samo določenega območja obdelave in delitev projektov. PostFlightTerra 3D podpira tudi procesiranje z grafično kartico - GPU (senseFly, 2015).

Preglednica 13: Delovne postaje primerne za PostFlight Terra 3D (Pix4D, 2015)

	Delovna postaja		
	Priporočena	Dobra	Zelo dobra
Procesor	Intel i7 (4-6 jeder)	Intel i7 5820K (6 jeder, 12 niti)	Intel i7 5960X (8 jeder, 16 niti)
Pomnilnik	DDR4-2400 16-32GB	DDR4-2400 32GB	DDR4-2400 64GB
Disk	SSD 256-512 GB	Crucial MX100 256GB	Crucial MX100 512GB
Grafična kartica	Nvidia Geforce 2-4GB	Nvidia GTX 660, GTX 760	Geforce: GTX 780ti, GTX 970 STRIX, GTX 980, TITAN BLACK.

3.5.3 Urejevalniki

Znotraj programa imamo na voljo tri urejevalnike in sicer urejevalnik rayCloud, urejevalnik Mosaic in računalno Index. Urejevalnik rayCloud je namenjen pregledovanju projekta, ročnemu določevanju veznih točk, optimizaciji projekta, urejanju oblaka točk. Omogoča izdelavo ploskev in poligonov, izračun volumnov (razsut tovor). Ima dodano tudi orodje za digitalizacijo in vektorizacijo ter izdelavo animacij preleta. Z urejevalnikom Mosaic lahko urejamo šive ortomozaika, izbiramo katere slike se uporabljajo za izdelavo ortomozaika ter popravljamo barve, kontraste in svetlost posameznih slik. Računalno Index je namenjeno za avtomatsko računanje različnih indeksov, na primer NDVI, radiometrično prilagajanje, izdelavo karte odbojnosti. Dodatno lahko tudi sami urejamo enačbe za izračun indeksov ter izvedemo segmentacijo na podlagi indeksov (senseFly, 2015).

3.5.4 Izvoz

PostFlight Terra 3D omogoča, da rezultate izvozimo v številnih oblikah in v številne formate (senseFly, 2015).

Izdelki 2D in formati izvoza:

- georeferenciran ortomozaik (GeoTIFF),
- ortomozaik Google tiles (KML in HTML),
- ortomozaik Mapbox tiles (MB),
- karte indeksov (GeoTIFF in SHP).

Izdelki 3D in formati izvoza:

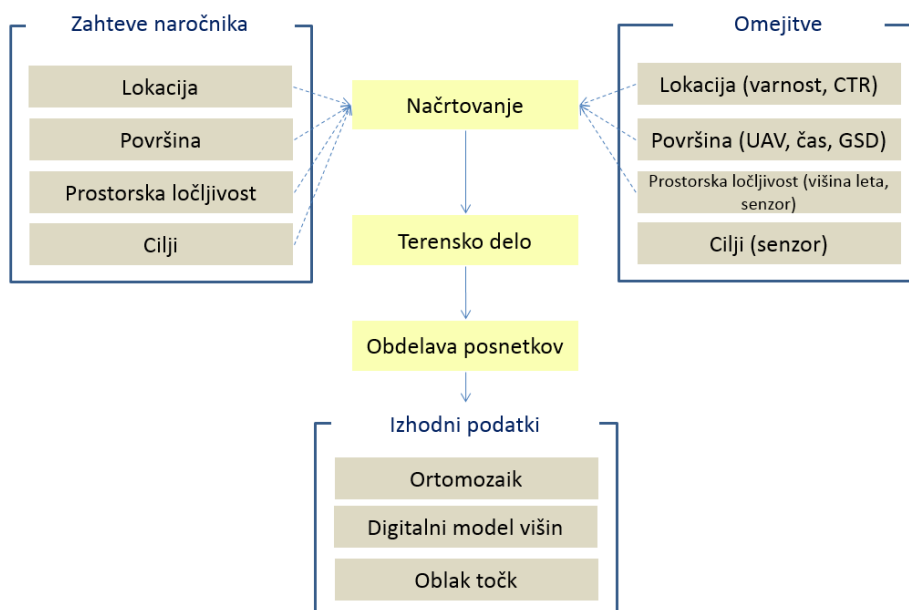
- georeferenciran DMP in DMR (GeoTIFF),
- 3D teksturiran model (OBJ, PLY, 3D PDF),
- oblak točk (LAS, LAZ, XYZ in PLY),
- izohipse (SHP, DXF in PDF),
- vektorizirani objekti (DXF, SHP, DGN in KML).

Ostali izdelki:

- animacija preleta (MP4 in AVI),
- slike z odpravljeno distorzijo (TIFF),
- parametri zunanje in notranje orientacije (INPHO, Leica LPS, DAT / EM Summit Evolution).

4 OPIS DELOVNEGA POSTOPKA PRI SNEMANJU Z BREZPILOTNIMI SISTEMI

V tem poglavju opredelimo delovni postopek pri uporabi brezpilotnih sistemov za zajem prostorskih podatkov. Delovni postopek bomo razčlenili na primeru uporabe brezpilotnega sistema senseFly eBee. Delovni postopek lahko razdelimo na tri dele (Slika 11): načrtovanje, terensko delo in obdelavo posnetkov.



Slika 11: Delovni postopek

4.1 Načrtovanje

Načrtovanje je ključnega pomena v delovnem postopku, ki ga moramo skrbno izvesti. Pri načrtovanju imamo dve skupini dejavnikov: zunanje in notranje. Obe skupini vplivata na to ali projekt sploh lahko izvedemo oziroma ves projekt načrtujemo na podlagi teh dejavnikov. Zunanji dejavniki pridejo s strani naročnika, notranji pa predstavljajo omejitve s strani razpoložljive opreme, zakonodaje in varnosti operacij. Ločimo lahko štiri dejavnike znotraj obeh skupin in sicer lokacijo, površino območja, prostorsko ločljivost in cilj projekta.

4.1.1 Lokacija snemanja

Lokacijo nam poda naročnik. Preveriti je potrebno, če za dano lokacijo obstajajo kakšne omejitve s strani Kontrole zračnega prometa Slovenije, oziroma ali lahko v skladu z razdelitvijo zračnega prostora RS na dani lokaciji meritve sploh izvedemo (glej poglavje 2.5 Zračni prostor v RS). Preveriti je tudi potrebno ali bomo na lokaciji imeli dovolj dober signal GNSS za potrebe navigacije

brezpilotnega sistema. Problematične so lahko ozke alpske doline. Prav tako je zaželeno, da se izogibamo letenju nad množičnimi prireditvami.

4.1.2 Površina območja snemanja

Od površine območja je odvisno koliko preletov bomo potrebovali, da posnamemo celotno območje. Višje kot letimo manj časa nam vzame enako veliko območje, vendar z večanjem višine se sorazmerno manjša prostorska ločljivost. V primeru da gre za zares velika območja, je potrebno sprejeti kompromis med višino letenja (posledično prostorsko ločljivostjo) in številom preletov, ki jih bomo potrebovali za zajem.

4.1.3 Prostorska ločljivost fotografij

Prostorska ločljivost je odvisna od višine letenja in velikosti sensorja, ki ga uporabljamo. S sensorjem smo večinoma omejeni, saj moramo izhajati iz tega, kar imamo. Lahko pa spreminjamo višino letenja. Pri višini letenja moramo upoštevati, da ne smemo leteti nad 300 metrov nad terenom, hkrati pa izbira višine vpliva na čas letenja, kjer moremo paziti na površino območja, ki ga moramo posneti.

4.1.4 Cilji projekta

Pomembno je, da točno vemo katerega izmed izdelkov si naročnik želi, saj lahko tako optimiziramo sam zajem in obdelavo. Na primer, če ga ortofoto ne zanima, lahko izvedemo zajem v delno oblačnem vremenu, kjer se na posnetkih in ortofotu lahko pojavi ogromno senčnih lis. Vizualno izgleda vzorec moteč, za sam algoritem in izdelavo oblaka točk pa ni moteče. Prav tako je od cilja odvisno, katere senzorce bomo uporabili (NDVI – NIR, RGB, termična karta – termični senzor).

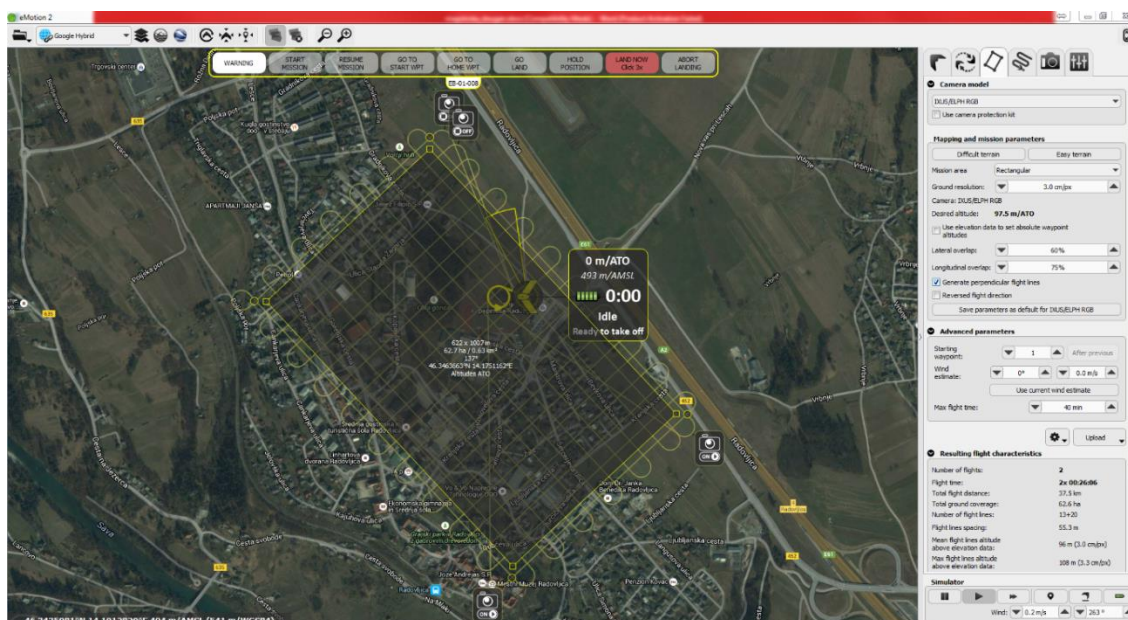
Dobro načrtovanje je tudi ključno za varno in uspešno izvedbo projekta.

Načrt leta nato izdelamo v za to namenjenem programu. Po navadi je ta program hkrati tudi kontrolna postaja. V primeru eBee-ja se to izvede v programu eMotion 2. Obstajajo pa tudi odprto kodne rešitve, na primer program Mission Planner.

4.1.5 Primer načrtovanja v programu eMotion 2

Načrtovanje v programu eMotion 2 je preprosto. Glavno okno prikazuje podlago z Google Zemlje, oziroma lahko izbiramo med različnimi viri. V glavnem oknu nato preprosto narišemo poligon območja, ki nas zanima. Program omogoča, da območje tudi uvozimo v formatu KML. V primeru, da nam naročnik posreduje območje ga lahko enostavno uvozimo. V meniju izberemo parametre. Najprej izberemo senzor, ki ga bomo uporabili. Nato določimo prostorsko ločljivost. Program izračuna višino,

na kateri bo potrebno leteti za izpolnitev vhodnih parametrov. Program omogoča načrtovanje leta z upoštevanjem digitalnega modela reliefa (SRTM, lasten DMR ali DMP). Ob uporabi podatkov o višini terena posamezne linije leta sledijo terenu, in tako dobimo enakomerno prostorsko ločljivost na celotnem območju. Ročno lahko spreminjamo tudi vzdolžni in prečni preklop. Dodatno lahko tudi ocenimo moč vetra in njegovo smer. Podatki se uporabijo pri izračunu trajanja leta. V desnem spodnjem oknu program poda karakteristike leta (Slika 12). V trenutku, ko vklopimo brezpilotni letalnik eBee, ta začne postopek kalibracije senzorjev in se inicializira. Točka na kateri se je inicializiral predstavlja domačo točko in predstavlja višinsko izhodišče za trenutni projekt. V primeru, da pri načrtovanju leta ne upoštevamo modela reliefa, je potrebno biti še posebej pozoren na višinsko izhodišče, saj lahko posledično zaradi dvigovanja, spuščanja terena izvedemo prelet prenizko oziroma previsoko, kar vpliva na načrtovan preklop in prostorsko ločljivost.



Slika 12: Načrtovanje leta v programu eMotion 2

4.2 Terensko delo

Preden gremo na teren, preverimo vremenske razmere. V dežju ne moremo leteti, zelo pozorni moramo biti tudi na veter. Zavedati se je potrebno, da je običajno veter na višini 100 metrov nad tlemi precej močnejši kot pri tleh. Pred vsakim poletom je priporočljivo preveriti na strani kontrole zračnega prometa ali so objavljena posebna obvestila.

Na terenu najprej signaliziramo in izmerimo oslonilne točke. Zaželeno je, da je oslonilnih točk čim več (vsaj 6 do 9) in da so čim bolj enakomerno razporejene po območju snemanja. Število oslonilnih točk in razporeditve le teh po terenu ima na končne rezultate velik vpliv (Dougan et al., 2014).

Signalizacija točk je lahko različna, uporabimo lahko horizontalno prometno signalizacijo, tarče (okrogle, v obliki križa) ali kako drugače signaliziramo točke. Pomembno je, da tako signalizirane točke dobro vidimo na fotografijah in da so natančno izmerjene.

V naslednji fazi je potrebno izbrati primerno lokacijo za vzlet in kontrolo preleta. Primerna lokacija za vzlet je odvisna od sistema, ki ga uporabljamo. Več-rotorski sistemi potrebujejo minimalno prostora za vzlet, med tem ko letalski sistemi potrebujejo bistveno več prostora za vzlet in pristanek. Pomembno pri izbiri lokacije je, da imamo pregled nad celotnim območjem, ki ga snemamo. Brezpilotni letalnik naj bi tekom celotnega preleta imeli v vidnem polju (angl. line of sight). Ta pogoj je tudi zelo pomemben za radijsko povezavo med letalnikom in kontrolno postajo. Povezava poteka po radijski vezi, kar pomeni da vse fizične ovire na poti med oddajnikom in sprejemnikom ovirajo oziroma onemogočajo povezavo. Pri kontrolni postaji je pomembno poskrbeti, da imamo vir napajanja oziroma dovolj baterije, da vzdrži celoten prelet. Kontrolno postajo in brezpilotni letalnik povežemo z radijsko povezavo. V kontrolni postaji vidimo informacije o letalniku. V primeru napak v letalniku nas ta opozori. Pripravljeno misijo nato preko radijske povezave prenesemo iz kontrolne postaje v brezpilotni letalnik. V postaji je potrebno nastaviti še točko pristanka. Pred poletom še enkrat preverimo v kontrolni postaji ali je letalnik pripravljen na polet. Med samim letom misijo vizualno in preko kontrolne postaje spremljamo in poskrbimo, da poteka po načrtih. Po končani misiji z letalnika prenesemo podatke in jih na terenskem računalniku preverimo, da se prepričamo ali je vse v redu.

4.3 Obdelava posnetkov

Obdelava posnetkov je ključna v procesu pridobivanja prostorskih podatkov s pomočjo brezpilotnih sistemov. Na osnovi obdelave se iz zračnih fotografij izdelava oblak točk, digitalni model površja in sestavi ortomozaik. Ker gre v večini primerov za komercialne programe, nimamo veliko vpogleda v dogajanje v ozadju. Natančnosti izdelkov se tudi lahko nekoliko razlikujejo glede na uporabljen programski paket (Dougan et al., 2014) (Turner et al., 2014).

Primer obdelave v programu PostFlight Terra 3D:

Obdelava poteka v treh korakih in preden jo zaženemo, je potrebno izbrati ustrezne nastavitve za vsak korak. V program najprej uvozimo vse zajete fotografije ter jih približno georeferenciramo na podlagi datoteke s trajektorijo leta. V naslednjem koraku izberemo koordinati sistem. Izbiramo lahko med globalnimi, regionalnimi, državnimi in lokalnimi koordinatnimi sistemi. Uvozimo oslonilne točke v željenem koordinatnem sistemu. Nato je potrebno na vseh slikah ročno označiti vse oslonilne točke. Ker so slike že približno georeferencirane, program prikazuje samo tiste slike, na katerih se najverjetneje nahajajo oslonilne točke. Z obdelavo lahko začnemo, ko imamo označene vse oslonilne točke in nastavljene parametre.

5 TEORIJA OBDELAVE POSNETKOV IN SPLOŠNE ZNAČILNOSTI IZDELKOV

V tem poglavju naredimo pregled teorije in tehnik, ki so potrebne za uspešno obdelavo slik z brezpilotnih sistemov in generiranje končnih izdelkov – gostega oblaka točk, digitalnega modela površja/reliefa in ortomozaika.

Posnetki z brezpilotnega letalnika sami po sebi nimajo velike dodane vrednosti, zato jih je potrebno obdelati in iz njih pridobiti rezultate, ki jih lahko prodamo. Pri postopkih obdelav se križajo znanja in tehnike s področij fotogrametrije in računalniškega vida (Colomina in Molina, 2014). V večini primerov imamo opravka z maloformatnimi digitalnimi fotoaparati, ki niso predhodno kalibrirani in konstrukcijsko niso zelo robustni in stabilni. Podrobni opisi algoritmov, ki tečejo v ozadju komercialnih programov večjih proizvajalcev, so večinoma nepoznani javnosti. O algoritmih v ozadju lahko sklepamo iz strokovne literature in odprto kodnih rešitev. Samo področje je dokaj razdrobljeno in slabo dokumentirano, zato smo poskušali v poglavju kar se da pregledno strniti osnovne postopke, ki so potrebni za izdelavo končnih rezultatov. V določenih korakih tudi navajamo specifične rešitve, za katere vemo, da so implementirane ali v plačljivih ali odprto kodnih programih.

Na težave naletimo že pri sami delitvi postopkov. Cramer (2013) deli obdelavo posnetkov na dva sklopa in sicer georeferenciranje posnetkov (določitev veznih točk, notranje in zunanje orientacije) in izdelavo fotogrametričnih izdelkov (oblak točk, ortomozaik, digitalni model višin). V magistrskem delu uvajamo delitev na tri sklope:

- orientacija posnetkov,
- zgoščevanje oblaka točk,
- izdelava fotogrametričnih izdelkov.

Vse tri sklope obravnavamo ločeno, predhodno opišemo še osnovne pojme: centralno projekcijo posnetka ter notranjo in zunanjo orientacijo posnetka.

5.1 Osnovni pojmi

V poglavju podamo osnovne pojme kot so centralna projekcija, notranja orientacija in zunanja orientacija.

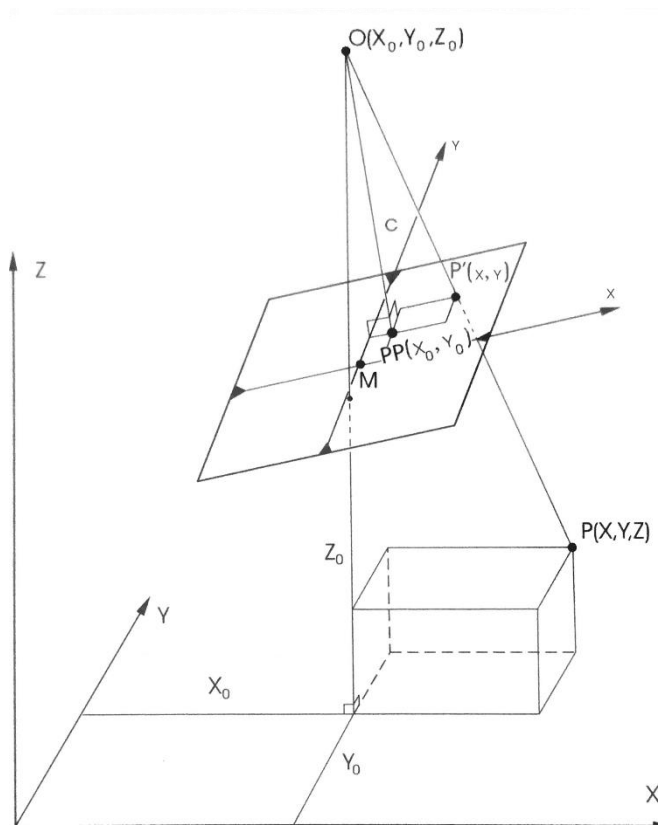
5.1.1 Centralna projekcija posnetka

Kadar želimo rekonstruirati položaj in obliko objekta iz fotografij oziroma posnetkov, moramo poznati geometrijo sistema (fotoaparata, fotogrametrične kamere), ki je sliko posnel. Fotogrametrične kamere (strokovni termin za fotogrametrične fotoaparate), uporabljene v klasični fotogrametriji, so večinoma merske kamere, kalibrirane v laboratoriju in z znanimi parametri notranje orientacije. V bližnjelikovnih aplikacijah in v primeru uporabe brezpilotnih sistemov pa običajno uporabimo

nemerske fotoaparate, katerim moramo šele določiti parametre notranje orientacije. Najprej definirajmo spremenljivke, ki jih bomo uporabljali (Kraus, 2007):

- $O(X_o, Y_o, Z_o)$... položaj projekcijskega centra
- $PP(x_o, y_o)$... glavna točka, pravokotna projekcija projekcijskega centra v slikovno ravnino
- c ... goriščna razdalja
- M ... izhodiščna točka (preseka diagonal robnih markic / sredina senzorja)
- $P(X, Y, Z)$... točka objekta v objektnem koordinatnem sistemu
- $P'(x, y)$... točka objekta v slikovnem koordinatnem sistemu

Povezava med slikovnimi in objektnimi koordinatami je prikazana na Slika 13 in je podana z matematičnima enačbama 1 in 2.



Slika 13: Centralna projekcija (Kraus, 2007)

$$x = x_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (1)$$

$$y = y_o - c \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (2)$$

Kjer so r_{ij} elementi rotacijske matrike R , ki definira zasuk slikovnega koordinatnega sistema v odvisnosti od referenčnega oziroma objektnega koordinatnega sistema (Kraus, 2007).

5.1.2 Notranja orientacija

Notranja orientacija je definirana s tremi matematičnimi parametri:

$x_o y_o$... slikovne koordinate glavne točke PP
 c ... goriščna razdalja

in parametri optične distorzije objektiva, ki so fizikalno določeni parametri.

5.1.3 Zunanja orientacija

Zunanja orientacija podaja informacijo o položaju projekcijskega centra v objektnem koordinatnem sistemu, ter rotacijo senzorja (slikovni koordinatni sistem) glede na objektni koordinatni sistem. Podajamo jo s šestimi parametri ali elementi:

$T(X_o, Y_o, Z_o)$... koordinate projekcijskega centra v objektnem koordinatnem sistemu
 $R(\omega, \varphi, \kappa)$... tri rotacije okoli treh koordinatnih osi

5.2 Orientacija posnetkov

Z brezpilotnim sistemom z zraka zajamemo slike, ki se med seboj prekrivajo. Naš cilj je iz teh slik pridobiti notranjo in zunanjo orientacijo vseh posnetkov ter čim večje število veznih točk v objektnem koordinatnem sistemu. Kot je že bilo omenjeno, programi za obdelavo posnetkov z brezpilotnih sistemov večinoma izhajajo iz področja računalniškega vida. Osnovni koncepti in terminologija se v primerjavi s fotogrametrično razlikujejo, vendar pa je cilj obdelave običajno isti.

V postopku hkrati računamo objektne koordinate veznih točk (angl. structure) in parametre zunanje orientacije (angl. motion). Iz tega tudi izhaja angleško ime tega postopka Structure from Motion (SFM). V sklopu algoritma izvedemo tudi izravnavo, v okviru katere se izvede tudi samo-kalibracija fotoaparata (Furukawa and Ponce, 2009) (Cramer, 2013) (Vergauwen and Gool, 2006).

Georeferenciranje oblaka točk je lahko izvedeno tekom postopka SFM ali pa naknadno celoten model, ki je relativno orientiran, umestimo v prostor. V primeru, da določimo oslonilne točke že pred postopkom SFM (na primer PostFlight Terra 3d), imamo poznane slikovne in objektne koordinate teh točk. Te lahko uporabimo kot začetne točke v postopku SFM in tako izračunamo celoten oblak točk, ki je že georeferenciran.

Postopki so natančno matematično opisani in izpeljani v predavanju Prof. Dr. Daniel Cremers s TU München (Cremers, 2013) in v knjigi, ki sta jo napisala (Hartley and Zisserman, 2003). To področje se v računalniškem vidu imenuje tudi Multiple View Geometry, Multi-View Stereovision.

Primer delovanja teh algoritmov si bomo pogledali na primeru osem točkovnega algoritma, in zaradi poenostavitve bomo delali na dveh fotografijah. Fotografiji predstavljata vhodna podatka v izračun (Slika 14).

i ... število vseh fotografij

j ... število veznih točk med dve fotografijama

Neznanke:

T^i ... relativna translacija med dvema slikama

R^i ... relativna rotacija med dvema slikama

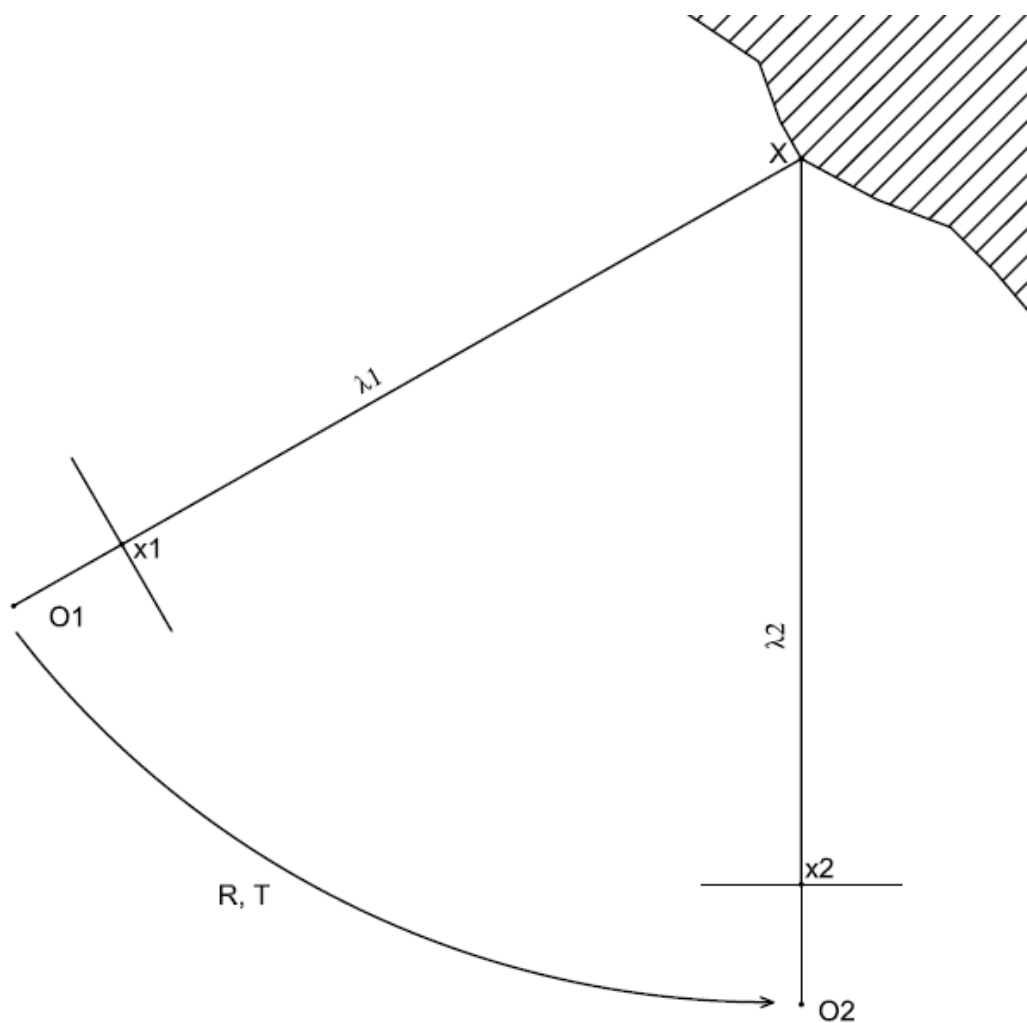
K^i ... matrika s parametri notranje orientacije

x^j ... slikovne koordinate veznih točk

X^j ... objektne koordinate veznih točk

Vhodne podatke predstavljajo slike, neznanke pa v procesu postopno izračunamo. Okvirni potek (angl. pipeline) postopkov za rekonstrukcijo:

- iskanje in povezava veznih točk na slikah (dobimo x^j),
- približni izračun zunanje orientacije (dobimo T^i in R^i),
- približni izračun objektnih koordinat veznih točk (dobimo X^j),
- izravnava bloka posnetkov s samo-kalibracijo (dobimo prave vrednosti T^i , R^i , X^j in R^i).



Slika 14: Presek žarkov s fotografij s projekcijskima centroma (O_1 , O_2) v vezni točki (X), kjer je R relativna rotacija in T relativna translacija med projekcijskima centrom O_1 in O_2 .

Računsko je rešitev težko izraziti, saj gre za problem, kjer večina podatkov manjka. V primeru da bi poznali objektne koordinate, bi bil problem računsko enostaven, prav tako obratno, če poznamo rotacijo in translacijo (zunanjo orientacijo), je računsko enostavno izraziti objektne koordinate. V realnosti pa teh podatkov nimamo zato poskušamo rešiti oboje naenkrat. V literaturi se pojavljajo različne metode, ki pa so si v večini podobne. Algoritem, ki ga bomo opisali, je podan v članku (Longuet Higgins, 1981). Imenuje se tudi osem točkovni algoritem, saj potrebujemo najmanj osem točk za enolično določitev sistema. Predpostavimo, da imamo slikovne koordinate vezne točke poznane (določene so lahko ročno ali avtomatsko).

$$\lambda_1 x_1 = X \quad (3)$$

$$\lambda_2 x_2 = R X + T \quad (4)$$

Enačba 3 opisuje relacijo med slikovnimi in objektnimi koordinatami prve fotografije, enačba 4 opisuje iste objektne koordinate pridobljene z druge fotografije ob upoštevanju rotacije in translacije projekcijskega centra druge fotografije. Pri tem parametra λ_1 in λ_2 predstavljata globino oziroma poljubno merilo. V enačbi imamo hkrati neznanke objektnih koordinat in zunanje orientacije. Iz enačb želimo odstraniti eno izmed teh dveh skupin neznank.

$$\lambda_2 x_2 = R (\lambda_1 x_1) + T \quad (5)$$

$$\lambda_2 \hat{T} x_2 = \lambda_1 \hat{T} R x_1 \quad (6)$$

V enačbo 4 smo vstavili enačbo 3 in tako dobimo enačbo 5. S tem smo iz enačbe odstranili objektne koordinate, vendar se relacija do objektnih koordinat še vedno izraža skozi λ_1 in λ_2 . Uvedemo mešan produkt (angl. cross product) \hat{T}^1 in dobimo enačbo 6. Iz enačbe 6 lahko nato izpeljemo enačbo 7 in dobimo epipolarni pogoj (angl. epipolar constraint).

$$x_2^T \hat{T} R x_1 = 0 \quad (7)$$

$$\text{prostornina} = x_2^T (T \times R x_1) = 0 \quad (8)$$

Prostornina telesa (Enačba 8), ki ga tvorita oba projekcijska centra in oba žarka skozi projekcijski center in vezno točko v slikovni ravnini, mora biti enak nič. To pomeni, da vse točke ležijo v isti ravnini in nekje obstaja presek žarkov (presek žarkov predstavlja točko v objektnem koordinatnem sistemu). Vidimo, da ni potrebno poznati objektnih koordinat veznih točk da lahko izračunamo relativno rotacijo ter translacijo med obema projekcijskima centroma fotografij. Dovolj je le predpostavka, da nekje obstaja presek žarkov in posledično ta točka. Rotacijo in translacijo

¹ $\hat{T} v \equiv T \times v$

izračunamo po enačbi 9. Dobimo dve možni rešitvi. V enačbi 10 SVD predstavlja singularni razcep (angl. singular value decomposition).

$$R = U R_z^T \left(\pm \frac{\pi}{2} \right) V^T \quad T = U R_z \left(\pm \frac{\pi}{2} \right) \Sigma U^T \quad (9)$$

$$\text{Kjer je: } E = \hat{T} R \quad SVD(E) = U \Sigma V^T \quad R_z \dots \text{rotacija okoli } z \text{ osi} \quad (10)$$

V naslednjem koraku želimo pridobiti objektne koordinate. Nastavimo si vektor 11 in matriko 12. Kjer v matriki 11 γ merilo. S fotografij ne moremo dobiti informacije o merilu. Zato potrebujemo oslonilne točke, da lahko izračunamo merilo.

$$\vec{\lambda} = (\lambda_1^1, \lambda_1^2, \dots, \lambda_1^j, \gamma)^T \quad (11)$$

$$M = \begin{bmatrix} \hat{x}_2^1 R x_1^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{x}_2^1 T \\ 0 & \hat{x}_2^2 R x_1^2 & 0 & 0 & 0 & \hat{x}_2^2 T \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \hat{x}_2^{j-1} R x_1^{j-1} & 0 & \hat{x}_2^{j-1} T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{x}_2^j R x_1^j & \hat{x}_2^j T \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M \vec{\lambda} = 0 \quad (13)$$

V teoriji bi produkt v enačbi 13 moral biti enak nič. V realnem svetu pa to ni res saj imamo v sistemu šum in pogreške, zato vrednost ni nikoli nič. Težimo k temu, da najdemo takšno vrednost $\vec{\lambda}$, da bo produkt čim bližje nič.

$$\min_{\vec{\lambda}} \|M \vec{\lambda}\|^2 = \min_{\vec{\lambda}} \lambda^T M^T M \lambda \quad (14)$$

Da najdemo najmanjšo vrednost, uporabimo lastno vrednost in lastni vektor. Zaradi različnih predznakov (enačba 9) dobimo štiri možne rešitve. Ugotoviti moramo, katera izmed štirih rešitev je prava. To naredimo enostavno tako, da pogledamo vrednost vektorja λ in izberemo tistega, kjer so vrednosti vseh komponent vektorja pozitivne. λ predstavlja razdaljo med projekcijskim centrom in koordinato v objektnem koordinatnem sistemu, razdalja ne more biti negativna vrednost. Sledi izravnava bloka posnetkov (Enačba 15).

$$\Phi(x_1, R, T, \lambda) = \sum_{j=1}^n \|\tilde{x}_1^j - x_1^j\|^2 + \|\tilde{x}_2^j - \Pi(R \lambda_1^j x_1^j + T)\|^2 \quad (15)$$

V večini primerov pri obdelavi slik z brezpilotnimi letalniki nimamo merskih fotoaparatorov in ne poznamo točnih vrednosti notranje orientacije. Zato izračunamo te znotraj izravnave bloka posnetkov. Prednost samo-kalibracije je v tem, da z dodanimi parametri v izravnavi bloka posnetkov ne upoštevamo samo optične distorzije objektiva ampak tudi druge sistematične pogreške celotnega fotogrametričnega sistema. Tako ima samo-kalibracija veliko prednost pred laboratorijsko kalibracijo, saj je kalibracija izvedena v istih atmosferskih razmerah kot sam projekt (temperatura, pritisk, itd.) (Kraus, 1997).

Izravnava bloka posnetkov s samo-kalibracijo ima matematične korenine v analitični aerotriangulaciji, najprej se je začela uporabljati v bližnjelikovni fotogrametriji in kasneje doživela širšo uporabnost z razvojem izravnave bloka posnetkov z dodatnimi parametri (samo-kalibracija) za precizno aerotriangulacijo. Samo-kalibracija ima dva namena, določiti notranje parametre orientacije ter odpraviti razne sistematske napake v slikovnem prostoru, ki nastanejo iz različnih razlogov v procesu nastanka slike (McGlone et al., 2004). Metode izravnave bloka posnetkov so opisane v delih Browna (Brown, 1971), ki je metode prvi razvil, in v delih Triggsa (Triggs et al., 2000).

Ena izmed metod izravnave bloka posnetkov s samo-kalibracijo je razširjen model kolinearnosti (McGlone et al., 2004):

$$x - x_0 + \Delta x = -c \frac{R_1}{R_2} \quad (16)$$

$$y - y_0 + \Delta y = -c \frac{R_2}{R_3} \quad (17)$$

Kjer je:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X - X^0 \\ Y - Y^0 \\ Z - Z^0 \end{bmatrix}$$

Enačbi 16 in 17 opisujeta centralno projekcijo, ki povezuje objektne koordinate točke X, Y, Z in slikovne koordinate x, y . Zunanjo orientacijo podajajo koordinate projekcijskega centra X^0, Y^0, Z^0 in koti rotacij, zapisani v rotacijski matriki R . Kalibracijske vrednosti so sestavljene iz glavne točke x_0, y_0 in gorišče razdalje c (parametri notranje orientacije) in distorzije $\Delta x, \Delta y$. Sistem enačb 18 in 19 podajata linearizirano obliko razširjenih enačb kolinearnosti. Predstavljata enačbe opazovanj v izravnavi bloka posnetkov.

$$A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + w = v \quad (18)$$

$$H_i x_i + w_h = 0 \quad (19)$$

Kjer x_1 predstavlja parametre zunanje orientacije sensorja, x_2 objektne koordinate točke in x_3 dodatne parametre (notranja orientacija). Matrike A_i so konfiguracijske matrike, ter v je vektor popravkov opazovanj in w vektor odstopanj slikovnih koordinat.

Zanima nas vektor x_3 dodatnih parametrov. Približne vrednosti vektorja x_3 so določene kot rešitev izravnave bloka posnetkov s samo-kalibracijo. Dobimo jo iz normalne enačbe 20. Kjer je P matrika uteži.

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 & A_1^T P A_3 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 & A_2^T P A_3 \\ A_3^T P A_1 & A_3^T P A_2 & A_3^T P A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P w \\ A_2^T P w \\ A_3^T P w \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

Dodatni parametri izhajajo iz optične in ostalih distorzij. Pri digitalnih fotoaparatih se običajno osredotočimo le na optično distorzijo, ki jo ločimo na radialno distorzijo (Δx_r Δy_r) in tangencialno distorzijo (Δx_d Δy_d) (enačbi 21 in 22).

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d \quad (21)$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d \quad (22)$$

Če vstavimo vse štiri funkcije, ki opisujejo posamezne distorzije v enačbi 21 in 22, dobimo enačbi 23 in 24

$$\Delta x = -x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 + (2 \bar{x}^2 + r^2) P_1 + 2 P_2 \bar{x} \bar{y} \quad (23)$$

$$\Delta y = -y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 + 2 P_1 \bar{x} \bar{y} + (2 \bar{y}^2 + r^2) P_2 \quad (24)$$

Za opazovano točko na sliki lahko člen $A_3 x_3$ razširimo :

$$A_3 x_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -\frac{\bar{x}}{c} & \bar{x} r^2 & \bar{x} r^4 & \bar{x} r^6 & (2 \bar{x}^2 + r^2) & 2 \bar{x} \bar{y} \\ 0 & -1 & -\frac{\bar{y}}{c} & \bar{y} r^2 & \bar{y} r^4 & \bar{y} r^6 & 2 \bar{x} \bar{y} & 2 \bar{y}^2 + r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \Delta c \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Kjer je:

x_0, y_0	...	koordinate glavne točke
Δc	...	popravek goriščne razdalje
K_1, K_2, K_3	...	koeficienti radialne distorzije
P_1, P_2	...	koeficienta tangencialne distorzije

Samo-kalibracija nam tako poda vrednosti za vsako fotografijo posebej in posledično izboljša celoten fotogrametrični sistem.

Do sedaj smo predpostavljali, da imamo vezne točke dane. Sedaj pa si bomo pogledali kako jih lahko določimo. Določimo jih lahko ročno, pol-avtomatsko ali povsem avtomatsko. V aplikacijah za obdelavo fotografij z brezpilotnih sistemov se uporablja izključno avtomatska določitev veznih točk, saj potrebujemo ogromno veznih točk in bi bilo ročno določanje preveč zamudno.

Vezna točka je točka, ki se pojavi na vsaj dveh fotografijah in jo lahko razpoznamo. V primeru avtomatskega iskanja veznih točk more imeti unikatne karakteristike, da jo lahko prepoznamo na vseh fotografijah na katerih se pojavi. Točko moremo prepoznati z različnih kotov, ob različnih svetlobnih pogojih in posledično drugačnih barvnih odtenkih.

Obstaja več metod oziroma algoritmov za povezovanje parov veznih točk:

- Scale-invariant feature transform – SIFT (Lowe, 2004),
- Speeded up robust features – SURF (Bay et al., 2006),
- Gradient Localation and Orientation Histogram – GLOH,
- Histogram of oriented gradients – HOG (Dalal and Bill, 2005).

Vsem algoritmom je skupno, da poiščejo točke in jim določijo enolične deskriptorje. V večini literature povezane z brezpilotnimi sistemi se omenja uporaba algoritma SIFT (Cramer, 2013)(Tsay and Lee, 2012)(A. Fritz et al., 2013). Ta algoritem za določitev veznih točk uporablja tudi program Pix4Dmapper (Kung et al., 2011). Prednost algoritma SIFT je predvsem enoličnost določitve posameznih veznih točk in uspešnost povezave le teh med slikami. Vsako vezno točko enolično opisuje deskriptor, ki je izračun iz več-dimenzionalnega vektorja gradientov fotografije. Algoritem je zelo robusten in uspe povezati vezne točke kljub rotaciji slike, spremembi merila, spremembi v svetlobnih pogojih, spremembi kota (afina distorzija) in ob dodatnem šumu. Algoritem je tudi zelo učinkovit, več tisoč veznih točk se lahko izračuna v realnem času na povprečnem računalniku (Lowe, 2004).

Za odkrivanje grobih pogrškov pri določanju veznih točk, lahko uporabimo algoritem RANSAC (Furukawa and Ponce, 2009). Random Sample Consensus (RANSAC) je iterativna metoda s katero ocenimo katera opazovanja (vezne točke) ustrezajo matematičnemu modelu in katera so grobo pogršena (Fischer and Bolles, 1981).

Zbirka povezav do odprtokodnih rešitev in drugih metod za izdelavo oblakov točk iz fotografij je dostopna na spletu (Wikipedia, 2015).

5.2.1 Direktna določitev zunanje orientacije.

Avtopiloti brezpilotnih letalnikov so večinoma opremljeni z nizko cenovnimi navigacijskimi sistemi GNSS/INS. Nizko cenovni senzorji ne dosegajo dovolj velikih natančnosti, da bi jih lahko uporabili za direktno določitev parametrov zunanje orientacije (Colomina and Molina, 2014). Nekateri proizvajalci so že začeli ponujati tudi brezpilotne sisteme, ki omogočajo direktno georeferenciranje (senseFly eBee RTK, c-astral Bramor rTK). Prednost direktnega georeferenciranja je predvsem v dejstvu, da nam ni potrebno vzpostaviti oslonilnih točk na terenu, kar v primeru velikega območja lahko bistveno skrajša naše delo. Ob uporabi dvofrekvenčnega sprejemnika GNSS naj bi dosegali tudi primerljive natančnosti (Turner et al., 2014). Pri manjših območjih vzpostavitve oslonilnih točk ni problematična in je cenejša alternativa direktnemu georeferenciranju. Prednost uporabe oslonilnih točk je tudi, da so sistemi, ki ne omogočajo direktnega georeferenciranja lažji in posledično jih lahko opremimo z boljšo kamero oziroma imajo daljši čas letenja (Colomina and Molina, 2014), prav tako naj bi dosegali večje natančnosti.

Določitev zunanjih parametrov orientacije pri direktnem georeferenciranju je rezultat meritev GNSS in INS, integriranimi na platformi. Ob upoštevanju položajev GNSS-ja in INS-ja v letalniku, lahko slikovnim koordinatam izračunamo objektne koordinate po enačbi 26 (Eisenbeiss, 2009). Kjer X_0 , Y_0 , Z_0 predstavljajo objektne koordinate izhodišča INS, Δ_{cam} je vektor med INS in projekcijskim centrom fotoaparata, Δ_{GNSS} vektor med faznim centrom antene GNSS in INS, R_{INS}^{Ob} rotacija med sistemom INS in objektnim koordinatnim sistemom in R_P^{INS} rotacija med INS koordinatnim sistemom in slikovnim koordinatnim sistemom P .

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{INS}^{Ob} + \left(\lambda R_P^{INS} \begin{pmatrix} (x - x_0) \\ (y - y_0) \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_{GNSS} \\ \Delta Y_{GNSS} \\ \Delta Z_{GNSS} \end{pmatrix} \right) \quad (26)$$

Brezpilotni sistemi, ki niso opremljeni z dovolj natančnimi GNSS in INS sistemi za direktno georeferenciranje, vseeno vsebujejo te sisteme za lastno navigacijo. Čeprav niso dovolj natančni za direktno georeferenciranje lahko podatke uporabimo kot približne vrednosti v izravnavi. Hkrati jih lahko tudi upoštevamo pri iskanju veznih točk (ne iščemo na vseh slikah ampak samo na tistih na katerih je možnost da obstaja preklap) in tako pospešimo delovanje algoritma.

5.3 Zgoščevanje oblaka točk

Gost oblak točk je prvi in najpomembnejši izdelek obdelave posnetkov brezpilotnih letalnikov, saj ga potrebujemo za vse nadaljnje izdelke, hkrati je sam po sebi ogromen vir prostorskih informacij. Kako

programi zgostijo oblak točk smo povzeli po članku (Kung et al., 2011), ki sta ga napisala ustanovitelja Pix4D-ja, kjer opisujeta kako je delovala takratna verzija programa. To je najbližje, kar smo uspeli razbrati, kako sam program deluje. Obstaja pa možnost, da so se postopki med razvojem nekoliko spremenili in dopolnili.

Redek oblak točk je že izdelan v sklopu orientacije (SfM in izravnava). Sestavljen je iz veznih točk, ki so bile uspešno povezane na več slikah. Potencialno pa obstaja še veliko več povezav, ki jih je potrebno preveriti, da dobimo veliko gostejši oblak točk. V članku ustanoviteljev Pix4D-ja so uporabili tehniko, ki jo predlagajo Kung in sodelavci (2011). Sestavljena je iz slikovnih gruč (CMVS, angl. clustering views for multi-view stereo), ki ji sledi algoritem za gosto povezovanje (angl. dense matching) (PMVS, angl. patch-based multi-view stereo). Algoritem za zgoščevanje oblaka iterativno izvaja naslednje tri korake:

- poveži: robne strukture iz slik so povezane vzdolž epipolarne geometrije in tvorijo potencialne kandidate,
- razširi: širjenje začetne povezave do sosednjih pikslov in pridobitev gostega niza,
- filtriraj: na podlagi vidljivosti in gladkosti odstrani povezave.

Veliko algoritmom za rekonstrukcijo in zgoščevanje oblaka točk predstavlja težavo večja količina slik, saj lahko tudi na sodobnih računalnik zmanjka procesne moči in delovnega spomina. Algoritem CMVS kot vhodne podatke jemlje rezultate rekonstrukcije SfM. Slike nato razdeli v gruče, ki so dovolj majhne da niso procesno in spominsko prezahtevne in nato vzporedno računa več gruč hkrati. CMVS in PMVS sta odprto kodna in objavljena pod licenco splošno javno licenco (angl. general public license –GPL) (Furukawa, 2015).

5.4 Klasifikacija

Oblak točk vsebuje točke terena, objektov, vegetacije ter druge elemente, ki so v naravi. Za številne aplikacije je pomemben le en sklop teh točk. Na primer pri izdelavi DMR-ja potrebujemo le točke terena. Ker imamo opravka z velikimi količinami podatkov, želimo točke avtomatsko razdeliti v razrede. Določanje kateremu razredu pripada posamezna točka imenujemo klasifikacija. Oblake točk klasificiramo v standardne razrede (Preglednica 14). V magistrskem delu si bomo ogledali metode klasifikacij točk v razrede teren ter stavbe in vegetacija.

Preglednica 14: ASPRS standardna klasifikacija točk (LAS specification, 2013)

Klasifikacijska	Pomen
0	Nikoli klasificirane
1	Ne-klasificirane
2	Teren
3	Nizka vegetacija

4	Srednja vegetacija
5	Visoka vegetacija
6	Stavbe
7	Nizke točke (šum)
8	Modelirane točke (Model Key-point)
9	Voda
10	<i>Rezervirano za definicijo ASPRS</i>
11	Točke s preklopom
12	<i>Rezervirano za definicijo ASPRS</i>
13-31	<i>Rezervirano za definicijo ASPRS</i>

Večina algoritmov, raziskav in predlaganih metod je bila narejena za aerolaserske oblake točk. Večinoma metode delujejo tudi na oblakih točk druge izvora, na primer terestrični laserski skener, več snopni globinomer (angl. multibeam echosounder) in fotogrametrični oblak točk. Vendar moremo biti pozorni saj imajo oblaki točk na podlagi drugih izvorov drugačne lastnosti (Vosselman and Maas, 2010).

5.5 Lastnosti fotogrametričnega oblaka točk

Fotogrametrični oblaki točk je pridobljen s fotografij na podlagi rekonstrukcije snopa žarkov. Oblaki točk, pridobljeni na podlagi fotografij, nimajo podatka o številu odbojev in ne vsebujejo točk pod vegetacijo. Te informacije nekateri algoritmi izkoriščajo pri klasifikaciji oblaka točk. V osnovi imajo fotogrametrični oblaki večinoma več šuma, grobih pogreškov in velikokrat vsebujejo luknje in območja z manjšo gostoto točk.

Vzroki težav pri klasifikaciji z algoritmi, prilagojenimi za aerolasersko skeniranje (Vetrivel et al., 2015):

- območja z malo teksture dajo redke oblake točke z luknjami,
- šum in grobi pogreški,
- luknje območij s slabo vidljivostjo,
- točke, ki pripadajo ukrivljeni površini, bodo ravninske metode zgrešile,
- ni podatka o številu odbojev,
- ni točk pod vegetacijo,
- ni podatka o intenziteti (večina algoritmov za klasifikacijo ne uporablja tega podatka).

Fotogrametrični oblak točk je narejen iz digitalnih fotografij, posledično poznamo za vsako točko njeno radiometrično vrednost v rdečem, zelenem in modrem spektru. V sklopu izdelave oblaka točk izdelamo tudi ortomozaik področja. Ortomozaik lahko uporabimo za segmentacijo in objektno

orientirano klasifikacijo, ter tako dodatno izboljšamo delovanje algoritmov, ki uporabljajo le geometrične lastnosti oblaka točk.

5.6 Pregled algoritmov za klasifikacijo aerolaserskega oblaka točk

Aerolaserski oblaki točk so lepo strukturirani in enakomerni, prodrejo tudi skozi vegetacijo. Imamo podatek o številu odbojev in intenziteti odboja. Najpomembnejši korak v klasifikaciji je razdelitev točk na točke terena in ne-terenske točke. Za vse nadaljnje klasifikacije izhajamo iz ne-terenskih točk, zato v primeru da imamo slabo narejeno klasifikacijo terena tudi ne dobimo dobrih rezultatov.

5.6.1 Metode klasifikacije terena

Za klasifikacijo terena je bilo predlaganih veliko različnih algoritmov. V grobem lahko ločimo algoritme, ki rasterizirajo oblak točk in tiste, ki delajo neposredno z oblakom točk. Algoritmi, ki rasterizirajo oblake točk, so enostavnejši in računsko hitrejši. Uporabljajo se metode razvite za obdelavo digitalnih fotografij, vendar na ta račun izgubimo natančnost. Nadalje lahko ločimo algoritme za klasifikacijo v štiri skupine (Vosselman and Maas, 2010).

- Morfološka klasifikacija. Ta skupina algoritmov temelji na konceptih matematične morfologije. Gre za obdelavo slik na podlagi morfoloških operacij in strukturnega elementa. Morfološke metode so v grobem bolj robustne, vendar ima velik vpliv na rezultat oblika in velikost strukturnega elementa.
- Progresivno zgoščevanje. Metoda predhodno klasificira manjši vzorec terenskih točk in nato iterativno povečuje število točk dokler ne obdelata celotne populacije točk. Ena izmed variant je, da iz začetnih terenskih točk aproksimira grobo ploskev (mreža nepravilnih trikotnikov), nato na podlagi odstopanj dodaja točke v razred teren. V vsakem koraku nato uporabi tudi nove točke pri aproksimiranju ploskev.
- Ploskovno klasificiranje. Metoda podobna progresivnemu zgoščevanju. Prav tako aproksimirajo ploskev in na podlagi nje klasificirajo točke. Od progresivne metode se razlikuje v začetni strategiji. Progresivna metoda iterativno dodaja točke v razred teren, med tem ko ploskovno klasificiranje začne s predpostavko da vse točke pripadajo terenu in jih nato na podlagi kriterijev izloča.
- Segmentno filtriranje. Za razliko od vseh prej naštetih metod, kjer vedno klasificiramo točko po točko, tukaj klasificiramo segmente sosednjih točk s podobnimi lastnostmi. Različni uporabljeni kriteriji so lahko višina točk, normalni vektor, naklon itd... Metode lahko tudi združujejo segmentacijo v rastrskem prostoru in nato klasifikacijo na podlagi različnih parametrov točk.

Praktični preizkus delovanja algoritmov za klasificiranje aerolaserskih oblakov točk je bil izveden s strani Mednarodnega združenja za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje (ISPRS). Večina algoritmov je na enostavnih terenih delovala dobro. V primeru zahtevnejšega terena so se za najboljše izkazale metode progresivnega zgoščevanja in ploskovnega klasificiranja (Vosselman and Maas, 2010). Obsežno testiranje algoritmov na fotogrametričnih oblakih točk še ni bilo narejeno.

5.6.2 Klasifikacija stavb in vegetacije

Skupna lastnost stavb in vegetacije je, da se nahajajo nad terenom. Za klasifikacijo v te razrede moramo torej predhodno že poznati teren. Ena izmed možnosti, je da najprej izdelamo DMR in DMP, nato od DMP-ja odštejmo DMR in dobimo normaliziran DMP. Normaliziran DMP nam predstavlja relativne višine nad terenom. Na podlagi morfoloških operacij lahko nato odstranimo manjše objekte (drevesa). Še vedno pa predstavlja problem razlikovanje med stavbami in velikimi drevesi ali skupinami dreves. Če imamo na voljo večspektralne podatke, si lahko pomagamo z NDVI-jem in tako ločimo med stavbami in vegetacijo. Ker pa v večini primerov teh podatkov nimamo na voljo, si pri laserskih oblakih lahko pomagamo s številom odbojev na določenem območju. Kjer imamo vegetacijo imamo veliko odbojev z več povratki, med tem ko jih imamo pri stavbah samo na vogalih in robovih (Vosselman and Maas, 2010).

Trenutno še vedno predstavlja največji problem ločevanje med vegetacijo in stavbami. V primeru fotogrametričnih oblakov točk nimamo na voljo podatka o številu odbojev, zato s tega stališča to še dodatno oteži ločevanje. Imamo pa radiometrične podatke v rdečem, zelen in modrem spektru. Nekateri sistemi imajo tudi senzorje z bližnje infrardečimi senzorji, kateri nam omogočajo izračun NDVI-ja, kar lahko zelo izboljša klasifikacijo.

5.7 Program gLIDAR

Na Univerzi v Mariboru, Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko so v laboratoriju za Geometrično modeliranje in multimedijske algoritme, razvili nov algoritem za klasifikacijo terena, stavb in vegetacije (Mongus et al., 2015). Algoritem je implementiran v program gLIDAR. Program je še posebej aktualen, saj je z njim Geodetski inštitut Slovenije klasificiral lidarski zajem celotne Slovenije. Prav tako algoritem dosega zelo dobre rezultate na testu organizacije ISPRS (ISPRS, 2015). V okviru magistrske naloge smo preizkusili algoritem tudi na fotogrametričnem oblaku točk.

Algoritem deluje v dveh korakih. V prvem koraku se talne točke določijo s filtriranjem objektov iz oblaka točk na podlagi izdelanih digitalnih morfoloških profilov. V drugem koraku se na podlagi geometričnih lastnosti ne-talnih točk določijo stavbe in vegetacija.

5.8 Klasifikacija fotogrametričnih oblakov točk

Pri fotogrametričnem oblaku točk nimamo informacije o številu odbojev in jakosti le teh. Imamo pa zato na voljo radiometrično informacijo RGB za vsako točko. Vsaka točka posebej ima komponente RGB, ki jih lahko uporabimo neposredno, ali pa uporabimo 2D podobo (ortomozaik) za izdelavo segmentacije. Na področju segmentacije slik z uporabo kombinacije 2D radiometričnih podatkov in 3D geometričnih podatkov je bilo narejeno že precej študij (Vetrivel et al., 2015). Sicer se nobena izmed teh ni ukvarjala neposredno s prostorskimi podatki. Vprašljivo je tudi ali je dodatna uporaba komponentne RGB sploh smiselna pri klasifikaciji terenskih točk. Saj je variacija barv lahko zelo velika (travniki, cesta, skale, pesek, igrišče itd.). Področje, kjer bi lahko največ pridobili s pomočjo radiometričnih informacij, je klasifikacija stavb in vegetacije. Prav tako predstavlja velik problem pri oblakih točk definiranje ostrih robov. V primeru, da si pomagamo s samo 2D podobo, pa lahko pridemo na podlagi segmentacije te podobe do zelo ostrih robov.

Metodo za segmentacijo stavb iz fotogrametričnih 3D oblakov točk predlaga Vetrivel (Vetrivel et al., 2015). Predlagana metoda:

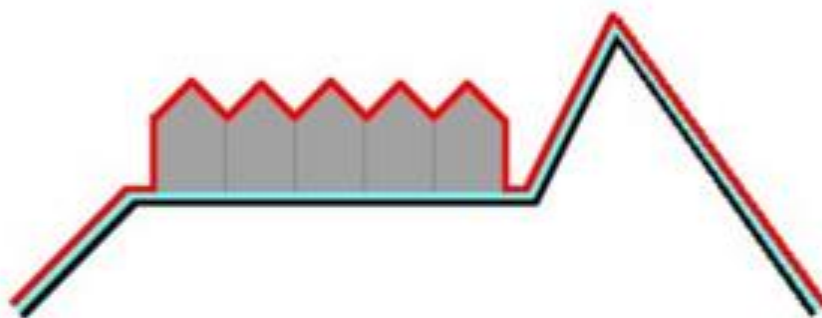
- groba 3D segmentacija posameznih stavb,
- izrez posamezne stavbe iz celotnega oblaka (roof-based approach),
- izbira stavbe in izbira pripadajoče fotografije,
- poišče vse vidne 3D točke na stavbi,
- vsakemu pikslu, ki pripada gruči pikslov na stavbi, se na podlagi 3D točk pripišejo geometrične lastnosti,
- pikslom, ki v prejšnjem koraku niso dobili geometričnih lastnosti, jim jo določimo na podlagi sosednjih pikslov,
- slikovna segmentacija z uporabo radiometričnih in geometričnih vrednosti gruči pikslov.

5.9 Fotogrametrični izdelki

V poglavju opišemo fotogrametrična izdelka: digitalni model reliefa in ortomozaik.

5.9.1 Digitalni model reliefa

Iz pridobljenega oblaka točk lahko najprej izdelamo digitalni model površja (DMP). V primeru, da ploskev interpoliramo med vsemi točkami v oblaku točk, dobimo digitalni model površja, če pa uporabimo le točke na terenu pa dobimo digitalni model reliefa (DMR) (Slika 15).



Slika 15: Razlika; digitalni model površja (rdeče), digitalni model reliefa (cian) (wikipedia, 2015)

Opisujemo eno izmed možnih metod izdelave DMR-ja. Začetna faza izdelave DMR-ja iz oblaka točk je prikazana na Slika 16 kot posamezni profil. V prvem koraku določimo krivuljo, ki se najboljšje prilega vsem točkam (Slika 16). Z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov dobimo na posameznih točkah odstopanja v_i (Slika 16). Za robustno določitev DMR-ja iz oblaka točk vpeljemo utež v drugo iteracijo izravnave najmanjših kvadratov. Funkcija upošteva naslednje napake točk:

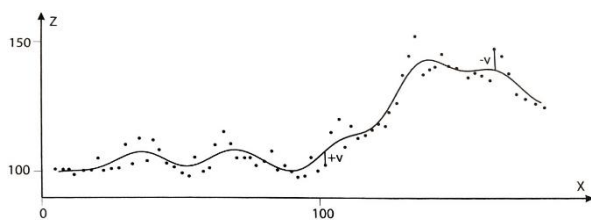
- Točke s pozitivnim odstopanjem v so verjetno talne točke, zato dobijo večjo utež kot točke z negativnim odstopanjem v (Slika 16).
- Teren verjetno leži pod krivuljo oziroma ploskvijo iz prve iteracije tako da je primeren zamik izhodišča utežne funkcije (Slika 17).

Utežna funkcija (27), ki upošteva te zahteve:

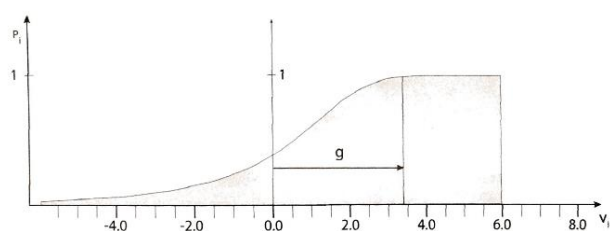
$$v_i \leq g \quad p_i = \frac{1}{1 + (a|v_i - g|)^b} \quad a, b > 0 \quad (27)$$

$$v_i > g \quad p_i = 1$$

- v_i ... Odstopanja iz prve iteracije izravnave
- a, b ... Parametra, ki kontrolirata hitrost spuščanja utežne funkcije od leve proti desni
- g ... Premik datuma zmanjša vpliv točk z malimi odstopanji v naslednji iteraciji

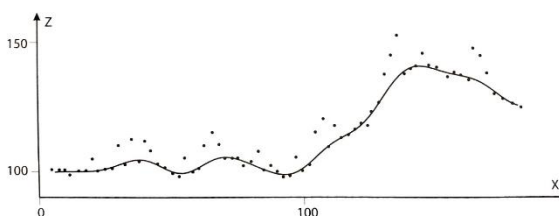


Slika 16: Krivulja skozi točke DMR (Kraus, 2007)



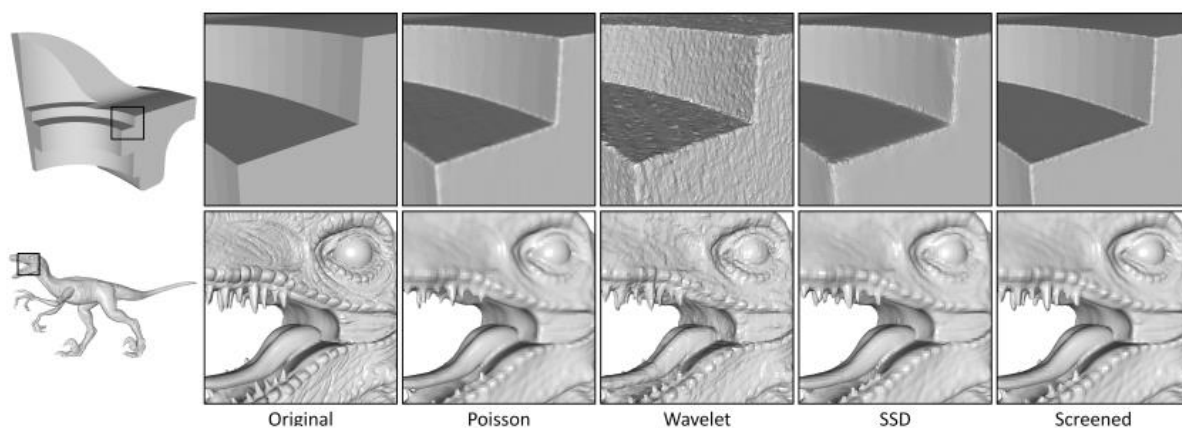
Slika 17: Funkcija uteži (Kraus, 2007)

Na Slika 18 je prikazan rezultat po drugi iteraciji ob upoštevanju funkcije uteži. Krivulja DMR-ja poteka skozi spodnje točke oblaka točk. Metoda hkrati ploskev interpolira in filtrira. Točke nad površjem imajo majhen vpliv. V praksi je potrebno nekaj iteracij da dobimo končne rezultate (Kraus, 2007).



Slika 18: Rezultati izdelave DMRja (Kraus, 2007)

Med uporabljenimi knjižnicami v programu Pix4D je zapisana tudi odprto kodna knjižnica PoissonRecon, ki je knjižnica za rekonstrukcijo površin. Verjetno jo program Postflight Terra 3D uporablja za izdelavo DMP-ja in možno da tudi za DMR. Poisson Surface Reconstruction je ena izmed najbolj znanih tehnik iz področja računalniškega vida za izdelavo površin (»waterlight«) iz oblaka točk. Tehnika je odporna na šum v podatkih in grobe pogoške (Slika 19). Trenutno se uporablja dodelana verzije tehnike istih avtorjev Screened Poisson Surface Reconstruction (Kazhdan in Hoppe, 2013).

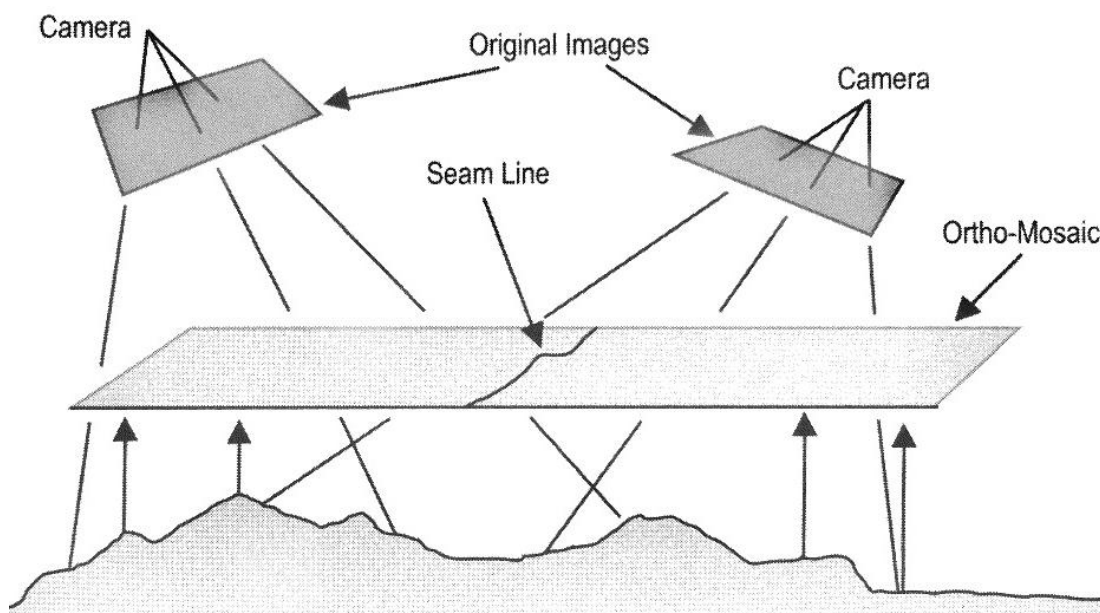


Slika 19: Primerjava različnih algoritmov rekonstrukcije površin (Kazhdan in Hoppe, 2013)

5.9.2 Ortomozaik

Za izdelavo ortomozaika moramo slike, zajete z brezpilotnim letalnikom, prevzorčiti. Ortomozaik je tako sestavljen iz vsaj dveh slik oziroma vseh zajetih slik. Prevzorčenje navadno poteka v dveh korakih:

- geometrično prevzorčenje, vzpostavimo povezavo med koordinatnim sistemom slike in koordinatnim sistemom ortomozaika, ter upoštevamo teren (DMR) (objektni koordinatni sistem, kartografska projekcija),
- radiometrično prevzorčenje, slike so lahko nastale v različnih svetlobnih pogojih, zato jih z funkcijo odvisnosti prevzorčimo tako da so razlike minimalne.



Slika 20: Izdelava ortomozaika (McGlone et al., 2004)

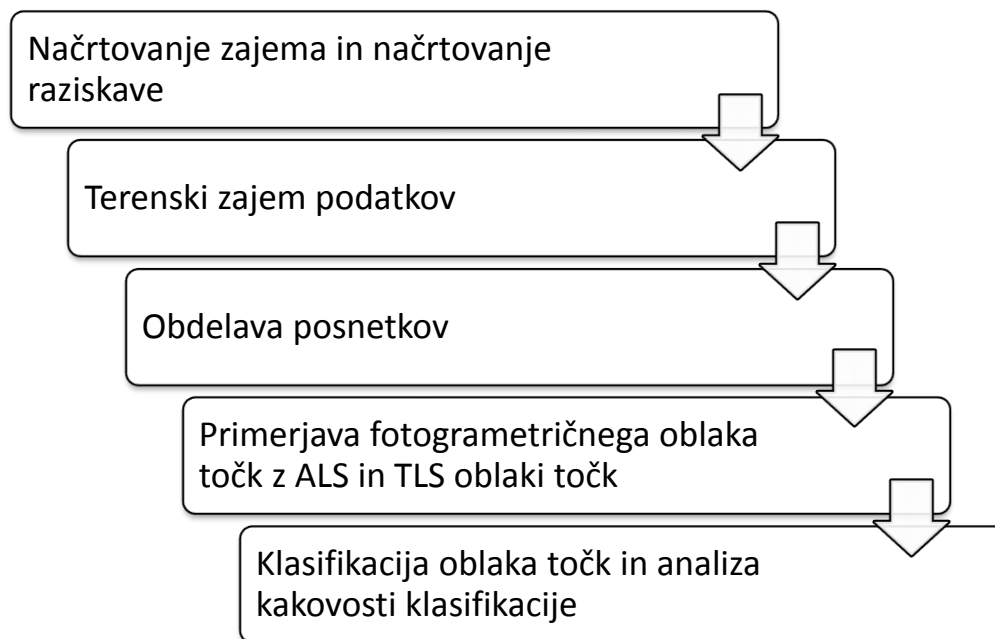
Poznamo navadni ortomozaik in popolni ortomozaik. Pri navadnem ortomozaiku smo za prevzorčenje uporabili digitalni model reliefa, kjer nimamo informacij o objektih. Posledično visoki objekti niso na pravih mestih. Popolni ortomozaik vsebuje tudi informacije o stavbah, tako imamo strehe prevzorčene na prave lokacije (McGlone et al., 2004).

Pri fotogrametričnem oblaku točk imamo ogromno podatkov o stavbah. Če ta oblak točk klasificiramo in določimo stavbe, lahko popolni ortomozaik izdelamo povsem avtomatsko. Za kakovosten popolni ortomozaik bi potrebovali tudi vektorske podatke oboda stavb. Saj pri izdelavi samo iz oblaka točk nastanejo nazobčani robovi streh, pojavi pa se lahko tudi dvojno kartiranje.

6 PRAKTIČNE RAZISKAVE

Za praktično raziskavo smo si zadali cilj, da z brezpilotnim sistemom eBee zajamemo posnetke, jih obdelamo in preverimo, kako različni algoritmi uspešno klasificirajo izdelan oblak točk. Prav tako smo naredili primerjavo fotogrametričnega oblaka točk z oblakoma, ki sta bila izdelana z metodami aerolaserskega skeniranja (ALS) in terestičnega laserskega skeniranja (TLS).

Delo smo razdelili na pet ločenih vsebinskih sklopov (Slika 21).



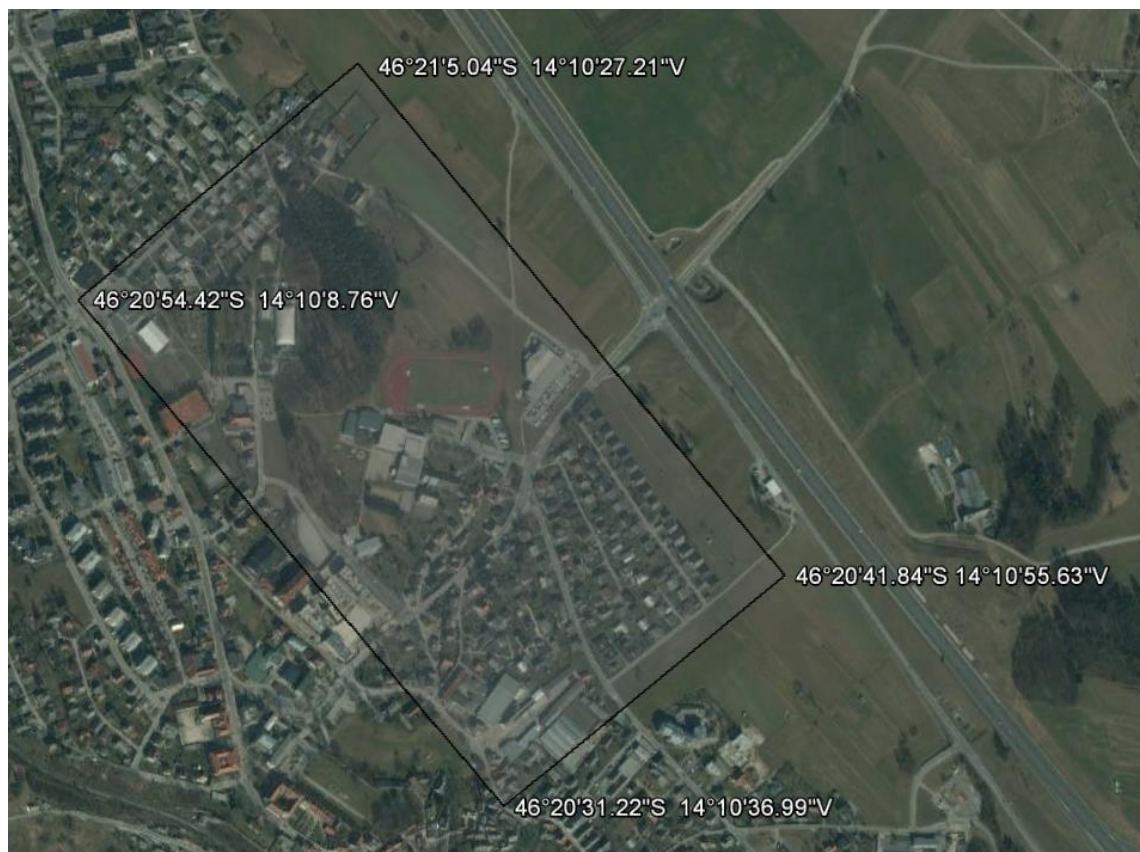
Slika 21: Metodologija dela

6.1 Načrtovanje zajema in raziskave

V prvi fazi smo morali izbrati ustrezno lokacijo za izvedbo našega preizkusa. Lokacija mora izpolnjevati naslednje pogoje:

- delno urbano okolje,
- vsaj en večji objekt,
- del območja poraščen z drevjem,
- velikost območja približno 100 ha (kar ustreza enemu preletu z brezpilotnim letalnikom eBee).

Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo že potekajo določene raziskave na območju mesta Radovljica. Za dano lokacijo so že na voljo podatki ALS in podatki TLS. Na celotnem območju je tudi vzpostavljena geodetska mreža, ki jo lahko uporabimo za določitev oslonilnih točk. Po pregledu območja smo ugotovili, da ustreza tudi ostalim našim zahtevam (Slika 22), ter se odločili, da bomo to lokacijo uporabili za naše testno območje.



Slika 22: Območje raziskav v mestu Radovljica

Obstoječi podatki:

- geodetska mreža na območju mesta Radovljica,
- oblak točk aerolaserskega skeniranja,
- oblak točk terestičnega laserskega skeniranja.

Inštrumentarij:

- brezpilotni sistem eBee,
- GNNS RTK rover,
- delovna postaja HP z820 (2x Intel xeon e5-2609 2.4 GHz, 64GB RAM).

Programsko orodje:

- eMotion 2,
- PostFlight Terra 3D,
- Python 2.7,
- Matlab,
- Global Mapper,
- gLIDAR,
- LAStools.

6.2 Terensko delo

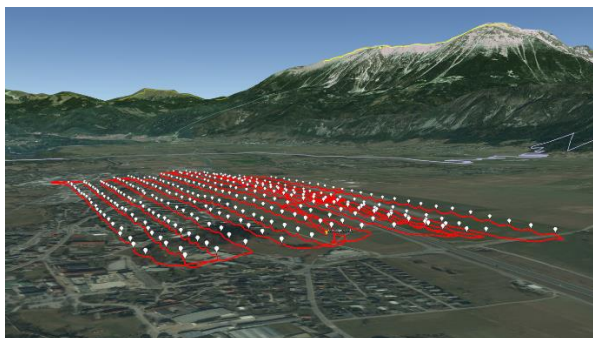
Izmero smo izvedli v sodelovanju s podjetjem Geavis d.o.o.. Uporabili smo brezpilotni sistem senseFly eBee. Načrt leta smo naredili s programom eMotion 2 (Slika 23). Parametri dveh načrtovanih preletov so zapisani v Preglednica 15. Slika 24 prikazuje trajektorijo preleta 1 in lokacije proženja fotoaparata. Za izvedbo projekta bi zadoščal že en prelet, vendar smo se odločili da bomo izvedli še dodatni prelet s projektiranimi linijami pravokotno na prvotne. S tem pridobimo večjo možnost zgoščevanja točk na območju gozda, zmanjšanje števila zakritih območij zaradi visokih objektov in dodatno stabilnost celotnega modela zaradi nadštevilnosti.



Slika 23: Načrta preleta 1

Preglednica 15: Parametri zajema

Datum izmere	16.9.2014
Fotoaparar	Canon IXUS 127 HS
Višina leta	100 m
Prostorska ločljivost	3,11 cm
Velikost območja	cca 100 ha
Prečni preklop	60 %
Vzdolžni preklop	75 %
Število preletov	2
Čas enega preleta	cca 30 min
Koordinatni sistem	D96/TM
Število slik	796



Slika 24: Trajektorija preleta 1 in lokacije proženja

Za potrebe raziskav na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo je bila na območju mesta Radovljica vzpostavljena geodetska mreža v lokalnem koordinatnem sistemu. Tvori jo 31 točk, ki so trajno stabilizirane s klini v asfaltu. Uporabil se je inštrument Leica TS30 s katerim so se opazovale horizontalne smeri, zenitne razdalje in poševne dolžine med točkami mreže. Hkrati je bila vzpostavljena tudi višinska mreža z metodo geometričnega nivelmana. Izravnane koordinate mreže so transformirane v državni koordinatni sistem D96/TM. Položajna točnost koordinat znaša 0,8 mm, višinska 0,9 mm (Ozmec, 2015). Za oslonilne točke smo uporabili 8 točk geodetske mreže, ki so bile najbolj enakomerno razporejene na območju preleta (Slika 25). Točke smo signalizirali s križi (Slika 26). Odstopanja med danimi koordinatami oslonilnih točk in izračunanimi koordinatami teh točk znotraj obdelave v programu PostFlight Terra 3D so znotraj pričakovanj (Preglednica 16).

Preglednica 16: Odstopanja koordinat med danimi oslonilnimi točkami in izračunanimi

Oslonilna točka	X[m]	Y[m]	Z[m]
1	-0.008	0.002	-0.002
2	0.002	-0.007	0.003
11	0.008	-0.003	0.002
17	0.002	-0.001	-0.005
21	-0.000	0.006	-0.000
22	-0.000	-0.006	0.002
26	-0.002	-0.005	-0.001
27	-0.001	0.014	0.001
Standardni odklon	0.004	0.007	0.002



Slika 25: Območje preleta in lokacije oslonilnih točk



Slika 26: Prikaz oslonilnih točk na izsekih posnetkov

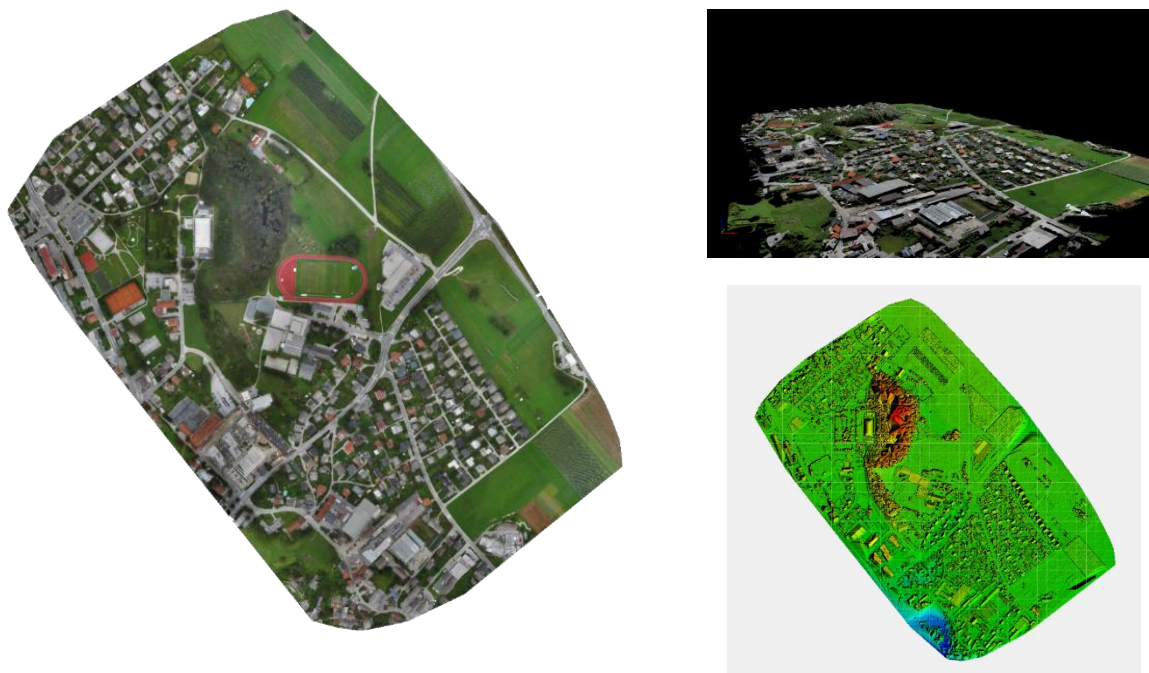
6.3 Obdelava posnetkov v programu PostFlight Terra 3D

Po zaključenem terenskem delu je potrebno pridobljene fotografije obdelati. Obdelavo fotografij smo izvedli na delovni postaji v prostorih podjetja Geavis d.o.o. . Z brezpilotnega letalnika eBee smo prenesli datoteke z dnevniki posameznih preletov. V dnevniku so zapisani splošni podatki o preletu, vsebuje tudi podatke o trajektoriji preleta, lokacijah in nagibu letalnika v trenutkih proženja fotoaparata. S programom PostFlight Terra 3D združimo posamezne fotografije s podatki o lokaciji in nagibu fotoaparata. Tako imamo že približne vrednosti zunanje orientacije. V naslednjem koraku je potrebno izbrati koordinatni sistem, v katerem želimo izvoziti končne rezultate, ter naložiti datoteko s koordinatami oslonilnih točk. Vse oslonilne točke na vsaki fotografiji je potrebno nato ročno zajeti. Ker imajo slike že približno zunanjo orientacijo, nam program sam razvrsti slike, na katerih se verjetno nahaja izbrana oslonilna točka. V našem primeru smo imeli 8 oslonilnih točk, ki so se pojavile vsega skupaj na 146 fotografijah.

Obdelava nato poteka v treh korakih in sicer začetna obdelava, zgoščevanje oblaka točk in generiranje DMR-ja ter ortomozaika. Za vsak korak imamo posebej možnost nastavitvev, ki jih moramo urediti preden zaženemo obdelavo. V sklopu začetne obdelave lahko izbiramo ali imamo samo zračne fotografije ali tudi terestrične, velikost slike za iskanje veznih točk (izvorna velikost slike, polovična ali četrtinska), ter ali želimo uporabiti samo-kalibracijo. Dodatno lahko tudi izberemo, da nam program izvoz fotografije z odpravljenimi optično distorzijo. V sklopu zgoščevanja oblaka točk imamo na voljo izbiro velikosti fotografije, ki se uporabi. Privzeto je, da se uporabi polovična velikost originalne fotografije. Izberemo lahko tudi kako gost oblak želimo (redko, optimalen ali gost) ter na koliko fotografijah more biti posamezna vezna točka prepoznana (privzeto na treh), da se izračuna 3D točka v oblaku. Izberemo lahko tudi filtriranje oblaka točk, klasifikacijo oblaka točk in izdelavo trikotniškega modela površja. Dodatno lahko izbiramo formate izvoza oblaka točk in trikotniškega teksturiranega modela. V koraku izdelave DMR-ja in ortomozaika večinoma izbiramo samo v kakšnih formatih želimo, da nam program izvozi izdelke in v kolikor želimo uporabiti filtre za odpravljanje šuma ter glajenje površin. V našem primeru smo pustili vse vrednosti na privzetih nastavitvah in zagnali obdelavo.

6.3.1 Rezultati obdelave posnetkov

Začetna obdelava je trajala 1 uro in 30 minut. Zgoščevanje oblaka in generiranje DMR-ja in ortomozaika pa še 1 dan 7 ur in 22 minut. Rezultati so oblak točk, filtriran oblak točk, DMP in ortomozaik (Slika 27). Gost oblak točk vsebuje 225.830.445 točk, filtriran oblak 93.926.550. Povprečna gostota na območju je 354,4 točke na kvadratni meter. Povprečna prostorska ločljivost ortomozaika je 3,11 cm. Poročilo o obdelavi je v prilogi (priloga A).



Slika 27: Rezultati obdelave (levo: ortomozaik, desno zgoraj: oblak točk, desno spodaj: DMP)

6.3.2 Kontrola georeferenciranja

V končnem poročilu je podana ocena natančnosti georeferenciranja celotnega projekta, ki je ocenjena na podlagi oslonilnih točk. Natančnost georeferenciranja smo preverili še neodvisno. V ta namen smo vzpostavili na terenu še dodanih 12 kontrolnih točk (Slika 28). Koordinate kontrolnih točk smo določili z GNSS RTK izmero. Izmero smo naredili pred preleti in nato ponovno po končanem snemanju. Koordinate kontrolnih točk smo zajeli iz izdelanega ortofota in jih nato primerjali s kontrolnimi koordinatami (Preglednica 17).

Preglednica 17: Odstopanja kontrolnih točk na ortofotu in izračunan koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE)

ID točke	Odstopanje koordinat na ortofotu	
	x [m]	y [m]
1	-0,013	0,010
2	-0,003	-0,007
3	0,004	-0,043
5	-0,020	-0,029
6	-0,005	-0,019
8	0,000	-0,010
9	-0,025	0,032

10	-0,005	-0,006
11	-0,001	0,002
12	-0,003	-0,010
RMSE	0,011	0,020
RMSEr	0,023	
RMSE PostFlight Terra	0,004	0,007



a)

b)

Slika 28: a) lokacije kontrolnih točk (rdeči križi), b) primer kontrolne točke

Vidimo, da je ocena natančnosti, ki jo je naredil PostFlight Terra 3D precej optimistična (pod 1 cm). Skupna položajna točnost (RMSEr) izračunana za kontrolne točke, je 2,3 cm, kar je manjše od prostorske ločljivosti ortofota, ki znaša 3,11 cm. Sklepamo, da je bilo georeferenciranje posnetkov dobro narejeno.

6.4 Primerjava fotogrametričnega oblaka z oblakom aerolaserskega skeniranja

Fotogrametrični oblak točk in laserski oblak točk sta narejena na podlagi dveh povsem različnih tehnologij, vendar na koncu dobimo zelo podobne rezultate, zato nas zanima, kakšne so prednosti in slabosti posameznih oblakov. Za raziskavo imamo na voljo oblake točk iz treh virov in sicer fotogrametrični oblak točk (FOT), oblak aerolaserskega skeniranja (ALS) in oblak terestričnega laserskega skeniranja (TLS). Oblak FOT smo v okviru naše naloge izdelali sami, oblaka ALS in TLS pa smo pridobili iz drugih raziskav. V naši raziskavi smo najprej pregledali lastnosti vseh oblakov točk. V nadaljevanju pa smo se osredotočili predvsem na primerjavo ALS in FOT. Primerjavo med ALS in FOT je zanimiva, saj gre za zajem iz zraka, kjer pričakujemo zelo podobne rezultate. Zanima nas ali obstajajo aplikacije, za katere je bolj primerna ena oziroma druga tehnologija in zakaj.

TLS oblak točk smo uporabili kot referenčni oblak. TLS oblak točk je bil georeferencirani na podlagi iste geodetske mreže kot fotogrametrični oblak. Srednje položajno odstopanje georeferenciranja je 7,4 mm. TLS oblak točk ima tako posledično bistveno večjo položajno točnost v primerjavi z ALS in FOT. Podatke ALS in FOT smo tako obrezali na območje, kjer imamo tudi podatke TLS (Slika 29).



Slika 29: Območje primerjave oblakov točk

Pri TLS in ALS gre za laserske meritve z aktivnim senzorjem. Pri fotogrametričnem oblaku pa gre za pasivni zajem fotografij, kjer z naknadno obdelavo pridobimo 3D oblak točk. Ker se fotogrametrična in lidarska tehnologija med seboj razlikujeta, pride med posameznimi oblaki do nekaterih razlik tudi iz tega razloga (Preglednica 18).

Preglednica 18: Primerjava različnih tipov oblakov točk

	Laserski oblaki točk		Fotogrametrični oblaki točk
	TLS	ALS	
Intenziteta	DA		NE
Barva (RGB)	NE (pogojno ob uporabi dodatnega senzorja)		DA
Podatek o odboju	NE	DA	NE
Gostota	Zelo visoka a neenakomerna	Srednja (odvisna od senzorja, višine leta, hitrosti)	Visoka (odvisna od višine)
Točke pod vegetacijo	DA	DA	NE

V raziskavi smo uporabili štiri oblake točk (Preglednica 19) in sicer dva oblaka fotogrametričnega izvora. Oba fotogrametrična oblaka sta narejena iz istih podatkov in sta rezultat iste obdelave posnetkov. Program PostFlight Terra 3D nam omogoča izvoz dveh oblakov točk in sicer filtriranega in gostega. Izdelali smo oba. Zanimajo nas razlike med njima. TLS in ALS oblaka točk sta bila zajeta v sklopu drugih raziskav na UL Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo.

Preglednica 19: Uporabljeni oblaki točk v raziskavi

Tip oblaka točk	Okrajšava	Okvirna ocena natančnosti	Inštrument	Datum zajema	Višina preleta
Fotogrametrični oblak točk (filtriran)	FOT1	< 10 cm	senseFly eBee	16.9.2014	100 m
Fotogrametrični oblak točk (gost)	FOT2	< 10 cm	senseFly eBee	16.9.2014	100 m
Oblak točk aerolaserskega skeniranja	ALS	< 10 cm	Riegl LMS-Q780	11.8.2014	400 m
Oblak točk terestičnega laserskega skeniranja	TLS	< 2 cm	Riegl VZ-400	12.5.2014	/

V sklopu magistrske naloge smo proučili tri vidike oblakov in sicer smo primerjali gostoto točk oblakov, izdelane digitalne modele višin ter kakovost zajema karakterističnih točk iz oblakov točk.

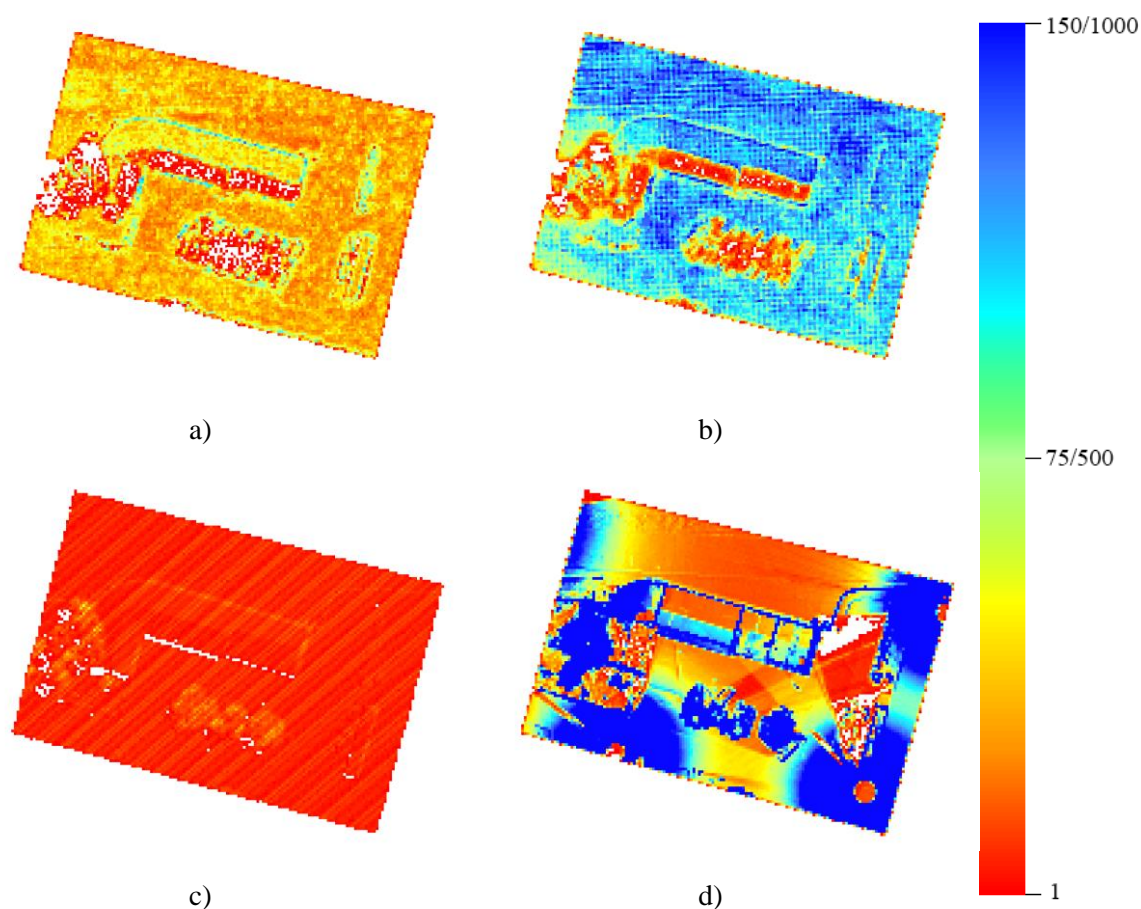
6.4.1 Gostota oblaka točk

Gostota oblaka točk se med tremi tipi zajema zelo razlikuje (Preglednica 20). Predvsem TLS odstopa po številu točk na m² (Slika 30). Aplikacije, v katerih se TLS uporablja, so orientirane predvsem v zelo natančne posnetke mikro lokacij. Z brezpilotnimi sistemi bi lahko tudi dosegli še večje število točk kot jih imamo v testnih podatkih FOT1 in FOT2, vendar bi morali izbrati nekoliko drugačno metodologijo dela ter uporabiti drugačne parametre pri sami obdelavi. Zanimiva bi bila primerjava TLS in fotogrametričnega oblaka, kjer bi natančno obdelali mikro lokacijo. Gostota fotogrametričnega oblaka točk je predvsem odvisna od prostorske ločljivosti posnetkov. Iz posnetkov z visoko prostorsko ločljivostjo bi zato dobili tudi zelo gost oblak točk (na primer <http://www.dsgsflyeye.com/projects/hajdrihova>).

Preglednica 20: Primerjava gostot FOT, ALS, TLS

Oblak	Število točk	Število točk na m ²	Povprečni razmik [m]
FOT1	439.436	126	0,09
FOT2	1.234.370	352	0,05
ALS	54.305	17	0,24
TLS	14.050.607	4009,88	0,02

Na Slika 30 je prikazana gostota točk posameznih oblakov z barvno lestvico. Zaradi zelo velike gostote oblaka TLS smo prikaz TLS naredili z drugo barvno lestvico (1-1000 točk na 0,5 m²). Vidimo lahko, da ima najbolj enakomerno gostoto točk ALS. Pri oblaku TLS je gostota točk zelo neenakomerna in se spreminja z razdaljo od stojišča. Prav tako vidimo, da je kljub štirim stojiščem ostalo nekaj območij brez točk (v območjih senc). FOT ima načeloma tudi dokaj enakomerno porazdelitev točk, predvsem pa je veliko gostejši od ALS. Fotogrametrične metode pa imajo težave predvsem z območji z mehko teksturo, na primer sneg, voda, steklo, pločevina, presvetljena območja itd. Vidimo lahko, da je na južnem delu strehe gostota bistveno manjša. Na Slika 29 lahko vidimo, da dejansko južni del strehe povsem brez teksture.

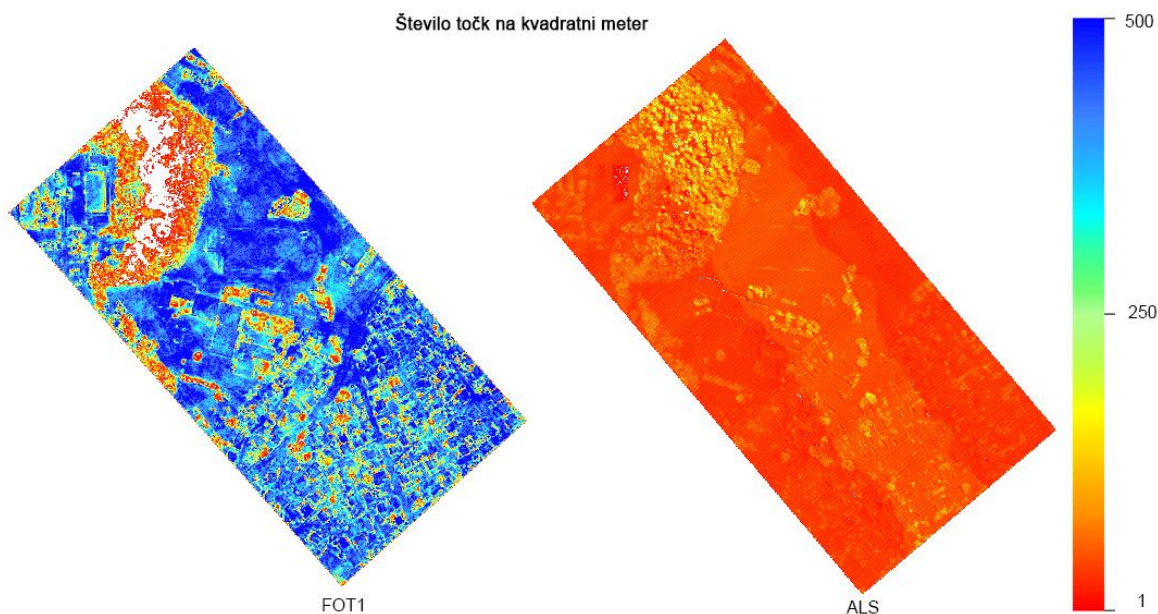


Slika 30: Gostota točk na 0,5 m²: a) FOT1 b) FOT2 c) ALS d) TLS; a) b) in c) barvna lestvica 1-150, d) 1-1000

Naslednja omejitev fotogrametričnih metod izhaja iz dejstva, da lahko rekonstruiramo točke samo za objekte, vidne na fotografiji. Točk pod vegetacijo tako posledično ne moremo rekonstruirati (Slika 31). Na sliki se vidi, kako pri fotogrametričnem oblaku točk na območju gozda točk praktično nimamo, če pa jih imamo, pa so te na vrhovih dreves. Tukaj ima prednost ALS, saj dobimo točke pod vegetacijo. Za veliko aplikacij pa so točke terena ključnega pomena, na primer pri izdelavi DMR-ja.

Prednost brezpilotnih sistemov za zajem je predvsem večja gostota oblaka točk in cenovna ugodnost takšnih sistemov v primerjavi z ALS. Brezpilotni sistemi so finančno ugodnejša izbira pri manjših projektih. Nad določeno površino pa postane snemanje z brezpilotnimi sistemi že težko izvedljivo, ALS pa konkurenčen. Površina, nad katero snemanje postane zahtevno, je odvisna od samega brezpilotnega sistema. Teoretično bi z brezpilotnim sistemom eBee lahko v enem dnevu naredili okrog 10 preletov, kar bi ob optimalnem delu predstavljalo 6 ur. Pozorni moramo biti na spreminjanje kota sonca in posledično spreminjanje in večanje senc. Z letenjem na višini 100 metrov bi tako pokrili približno 1000 ha in posneli okoli 3500 fotografij. Količina fotografij bi že povzročala težave pri obdelavi. Obdelovati bi morali vsak prelet posebej in nato projekte združevati. Za vsak prelet lahko

rečemo, da vzame še en dan obdelave. Kar nanese še dodanih 10 dni dela (odvisno od delovne postaje). Območje velikosti 1000 ha je že na meji izvedljivega z brezpilotnim sistemom eBee. Kje točno pa je meja rentabilnosti brezpilotnih sistemom in kje postanejo ugodnejši letalski sistemi z posadko pa presega obseg te naloge.

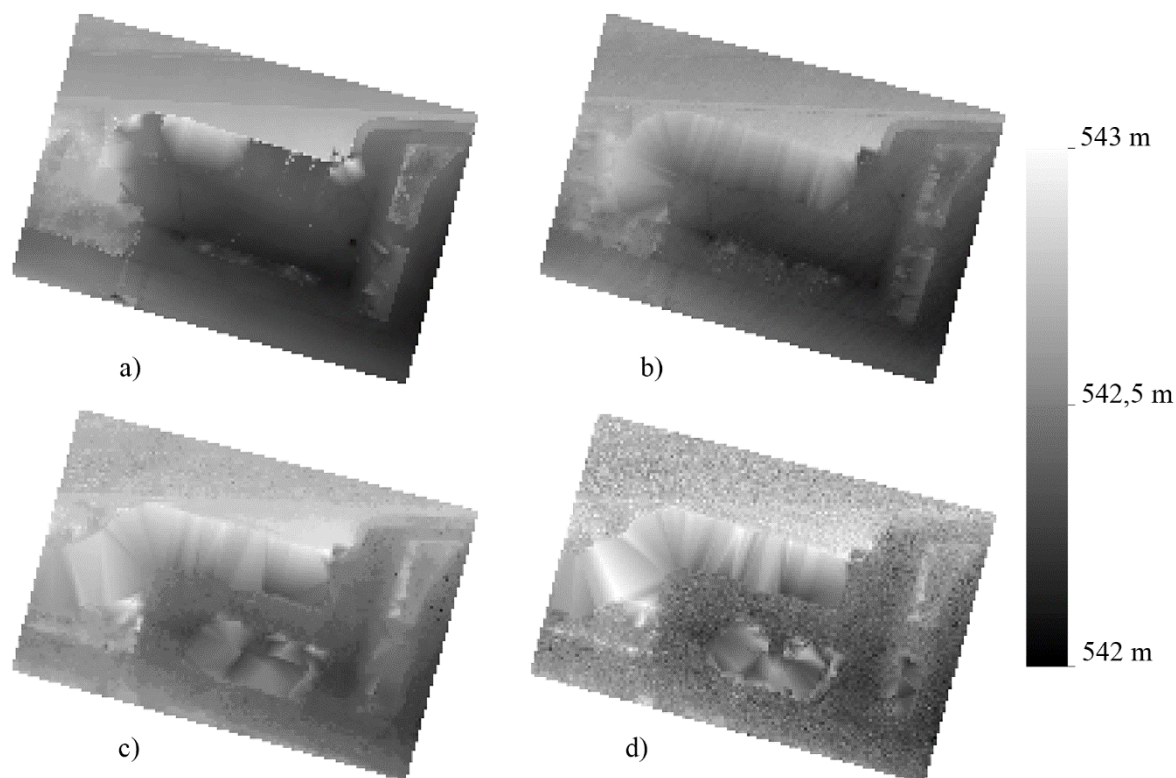


Slika 31: Gostota točk na kvadratni meter (FOT1 – ALS)

6.4.2 Primerjava različnih vrst modelov višin

Za razne aplikacije je potrebno izdelati različne modele višin, lahko gre za digitalne modele reliefa ali pa digitalne modele površja. Kadar uporabljamo fotogrametrično metodo gre večinoma za digitalne modele površja, ki jih teksturiramo. Kadar nimamo veliko vegetacije pa lahko izdelamo tudi DMR. Zanima nas, kakšne so razlike med modeli, narejenimi iz različnih oblakov točk. Referenčni model smo izdelali iz oblaka točk TLS, ker ima oblak največjo gostoto točk in hkrati največjo natančnost. Odločili smo se, da bomo za primerjavo izdelali DMR. Glavni razlog je bil v tem, da so bile vse tri meritve izvedene v različnih terminih, kar posledično pomeni, da se je lahko nekoliko spremenila vegetacija, poleg tega je del območja parkirišče, na katerem so vsakič drugi avtomobili. Za numerično primerjavo smo nato še odstranili območje pod objektom in pod vegetacijo, saj so podatki tam interpolirani in ne odražajo dejanskega stanja.

Za izdelavo modelov smo najprej vsem štirim oblakom določili terenske točke z orodjem *lasground.exe* iz paketa *LAStools*. Vsak oblak smo še dodatno ročno pregledali in odpravili napačno klasificirane točke. Iz terenskih točk smo nato z orodjem *las2dem.exe* izdelali DMR z velikostjo celice 0,5 metra (Slika 32). Prikazana je nadmorska višina.

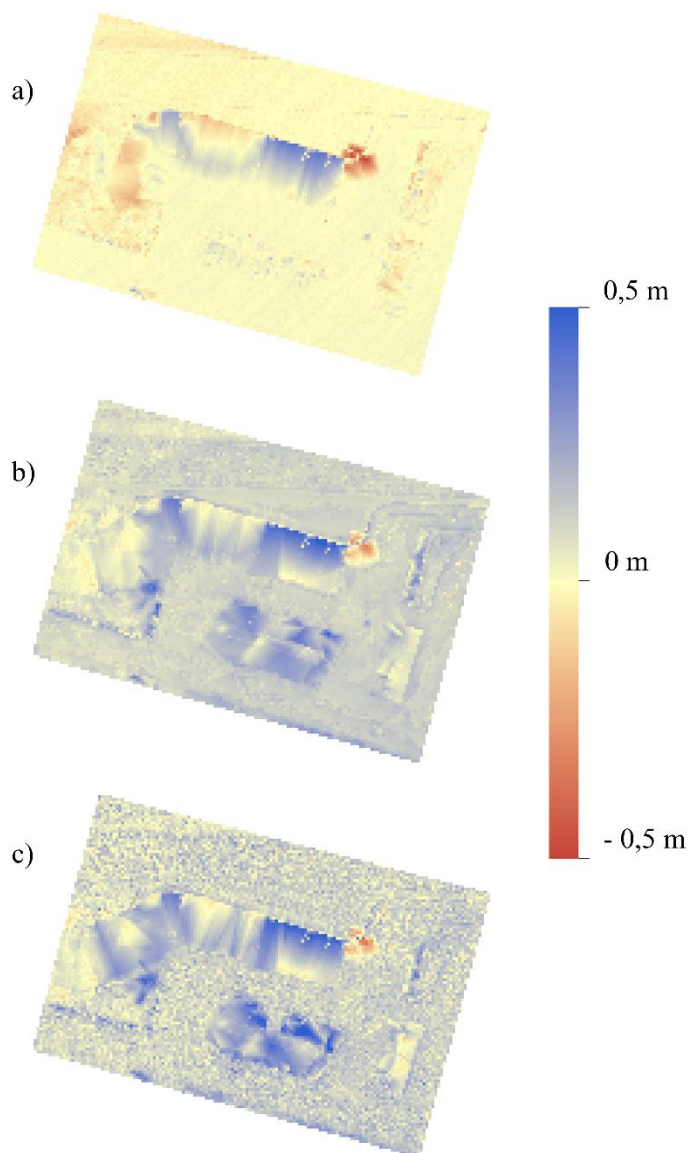


Slika 32: DMR iz oblakov točk: a) TLS, b) ALS, c) FOT1, d) FOT2

DMR na podlagi TLS je narejen tudi pod streho stavbe, saj so merjene točke tudi pod streho objekta. Nekaj težav je povzročalo edino dejstvo, da imamo v oblaku TLS nekaj senc. Za numerično primerjavo smo izločili območje, ki vsebuje grob pogrešek. Pri fotogrametričnih oblakih točk lahko opazimo, da imamo precej šuma. Predvsem v FOT2 (Slika 32 d) je veliko šuma. Prav tako vidimo s slik, da so v FOT1 in FOT2 robovi (pločnik) slabše definirani. Kot že omenjeno, točk pod vegetacijo na podlagi fotogrametričnih oblakov točk ne moremo dobiti, razen če bi imeli poševne posnetke, torej bi bil model na teh območjih lahko določen le z interpolacijo. Za numerično primerjavo smo zato tudi ta območja izločili.

Zanima nas koliko in na katerih mestih odstopajo modeli ALS in FOT od referenčnega modela na podlagi TLS oblaka točk. V ta namen smo izdelali raste z višinskim odstopanjem DMR-jev (Slika 33), tako da smo od posameznih DMR-jev odšteli DMR, narejen iz podatkov TLS. Ponovno lahko opazimo, da je predvsem DMR na podlagi gostega fotogrametričnega oblaka točk FOT2 zelo obremenjen s šumom. Velike razlike vidimo na območjih objekta, kjer so bili podatki interpolirani, v referenčnih podatkih pa imamo točke pod streho objekta.

Kot že omenjeno, smo pri numerični primerjavi problematična območja izločili. Numerični rezultati so prikazani v Preglednica 21. Največja odstopanja so velika tudi do 0,5 metra, gre predvsem za šum in pa grobe pogreške. V povprečju je DMR FOT višji za približno 0,1 metra. ALS pa je povprečno na pravi višini. Standardni odkloni odstopanj pa so v vseh primerih okoli 1 centimeter.



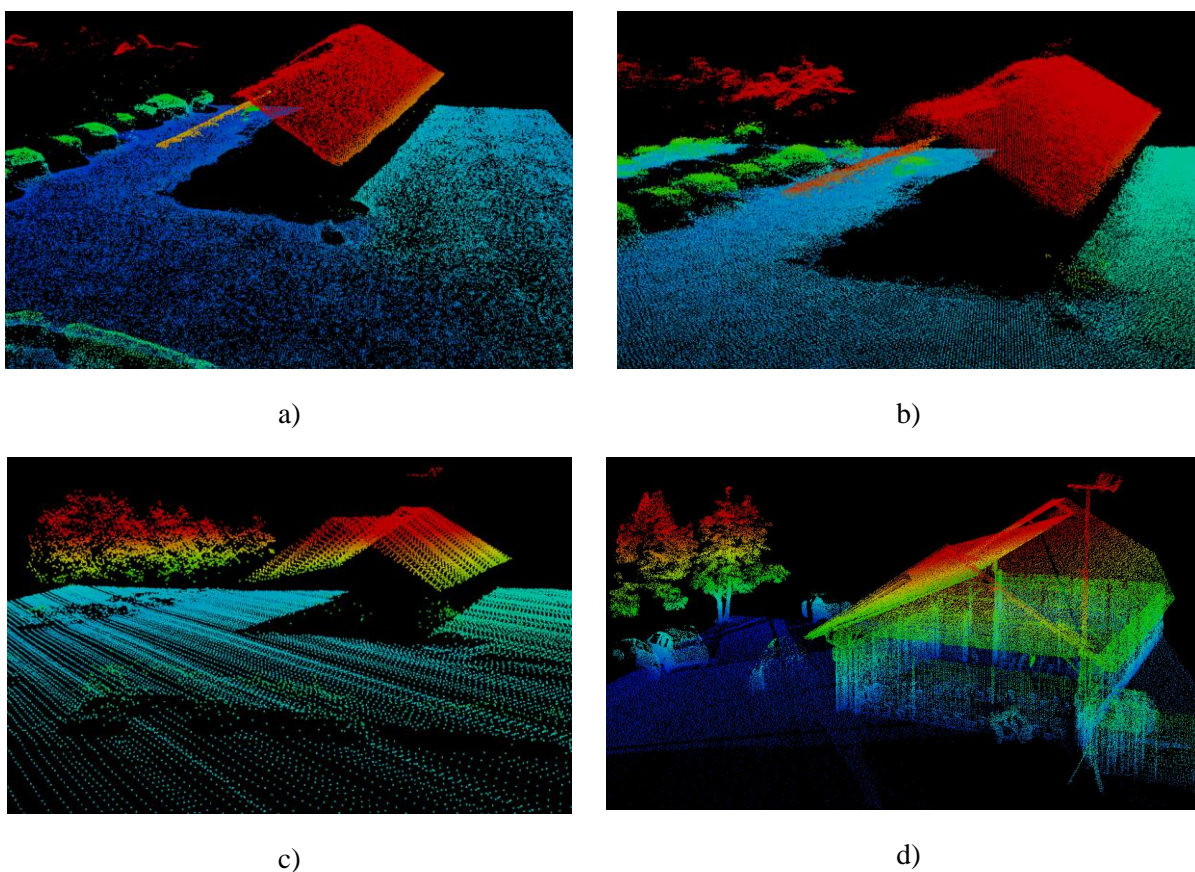
Slika 33: Odstopanje DMR-ja od TLS DMR-ja: a) ALS b) FOT1 c) FOT2

Preglednica 21: Numerična primerjava odstopanj modelov višin

	Največje pozitivno odstopanje [m]	Največje negativno odstopanje [m]	Povprečno odstopanje [m]	Standardni odklon [m]
FOT1	0,364	-0,267	0,117	0,010
FOT2	0,471	-0,412	0,115	0,010
ALS	0,220	-0,456	-0,003	0,013

6.4.3 Zajem karakterističnih točk

Položajno točnost posameznih točk je z oblaka točk problematično določati. V tem podpoglavju ne določamo položajne točnosti posameznih točk, ampak ocenjujemo kakovost zajema karakterističnih točk iz posameznih oblakov točk. Iz oblakov točk smo zajeli karakteristične točke na objektih in ocenili, koliko odstopajo od pravih vrednosti. Za karakteristične točke smo izbrali vogale in lomne točke streh objektov. Kot referenčne podatke smo ponovno uporabili oblak točk TLS. Zajemali smo vedno dejanske točke v oblaku točk in ne subjektivno interpoliranih vogalov. Zaradi tega so rezultati nekoliko slabši kot bi bili drugače, ampak posledično opozarjajo na problematiko oblakov točk. Pri oblakih točk imamo probleme z robovi. Ti niso dobro definirani, oziroma večjo kot imamo gosto točk, boljše so definirani (Slika 34).



Slika 34: Oblak točk objekta a) FOT1 b) FOT2 c) ALS d) TLS

V vsakem oblaku smo zajeli po osem karakterističnih točk (Slika 35). Koordinate točk smo nato izvozili in jih primerjali med seboj (Preglednica 22). Najslabše rezultate smo dobili na podlagi filtriranega oblaka točk FOT1, saj ima zelo slabo definirane robove. Filter v sklopu PostFlight Terra 3D je dodatno zgladil robove. Prav tako smo že omenili, da gostejši kot je oblak, boljše so robovi definirani. Oblaka FOT2 in ALS imata primerljiva odstopanja. Ker imamo vzorec točk precej majhen in so razlike v odstopanjih minimalne, ne moremo govoriti, da je katera izmed metod boljša. S

pridobljenih rezultatov ne moremo sklepati o sami prostorski natančnosti oblakov točk, ampak z njih lahko le sklepamo, kako dobro lahko iz posameznega oblaka točk zajamemo karakteristične točke. Prikazano odstopanje je poleg same prostorske natančnosti obremenjeno še z dejstvom, da so robovi in predvsem vogali v oblakih točk slabo definirani. Z rekonstrukcijo ravnin na podlagi točk in presekov ravnin bi lahko prišli do boljše ocene vogalov streh objektov.



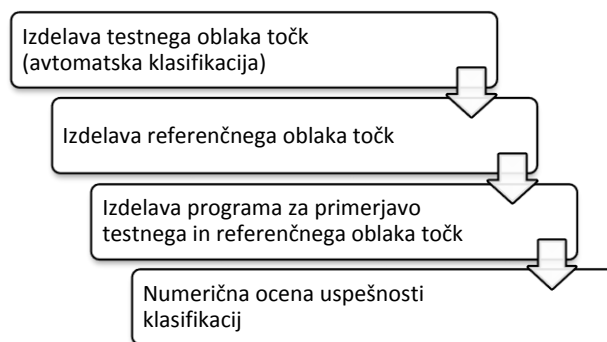
Slika 35: Prikaz zajetih karakterističnih točk iz različnih oblakov na ortofotu

Preglednica 22: RMSE karakterističnih točk

Oblak	RMSE		
	X [m]	Y[m]	Z[m]
FOT1	0,30	0,28	0,22
FOT2	0,12	0,09	0,17
ALS	0,12	0,13	0,09

6.5 Uspešnost klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk

Večina algoritmov oziroma programov za klasifikacijo oblakov točk je prilagojenih za delo z oblaki točk laserskega izvora. Z vse večjo popularnostjo brezpilotnih sistemov in posledično vse več fotogrametričnimi oblaki točk, se večja potreba tudi po algoritmih, prilagojenih za klasifikacijo fotogrametričnih oblakov točk. V sklopu magistrske naloge smo preizkusili izbrane obstoječe programe za klasifikacijo in preverili ali so primerni tudi za fotogrametrične oblake točk. Numerično smo ocenili, kako dobro posamezni programi klasificirajo oblak točk. Zanima nas torej ali delujejo na fotogrametričnih oblakih točk in kako dobro. Metodologija dela je prikazana na Slika 36.



Slika 36: Metodologija dela za določitev uspešnosti klasifikacije

Avtomatska klasifikacija je bila izvedena s programi:

- PostFlight Terra 3D,
- RapidLasso LAStools,
- gLIDAR (Mongus et al., 2015),
- Global Mapper.

Točke smo klasificirali v 3 razrede:

- teren (ASPRS razred 2),
- vegetacija (ASPRS razred 5),
- stavbe (ASPRS razred 6).

Za vrednotenje rezultatov smo izdelali lasten program, ki prebere referenčni in testni oblak točk ter ju med seboj primerja ter preverja, za kakšne napake v klasifikaciji gre.

V strokovni literaturi in standardih je področje ocene kakovosti klasifikacije še dokaj nedodelano. Različni viri zagovarjajo različne metode. Primerjava lahko temelji na posameznih pikslih ali pa jo izvajamo v rastrskem prostoru. Različne metode ocene (Rutzinger et al., 2009) :

- primerjava individualnih točk,
- primerjava celotnih objektov,
- primerjava oblike odtisa.

Metode so lahko izvedene z vizualnim pregledom ali avtomatsko. Z vizualnim pregledom zadeva postane še bolj subjektivna. Prav tako sta metodi primerjave celotnih objektov in primerjava oblike odtisov bolj primerni za oceno uspešne klasifikacije stavb in vegetacije, možna je tudi uporaba za teren. Pri zadnjih dveh metodah je lahko težava tudi v tem, kdaj govoriti o pravilni določitvi in kdaj ne. Postaviti je potrebno določen prag (Rutzinger et al., 2009).

V magistrskem delu želimo oceniti uspešnost za vse razrede in hkrati želimo to oceno izvesti čim bolj objektivno. Odločili smo se, da bomo naredili oceno uspešnosti na podlagi primerjave individualnih točk.

6.5.1 Testni oblak točk

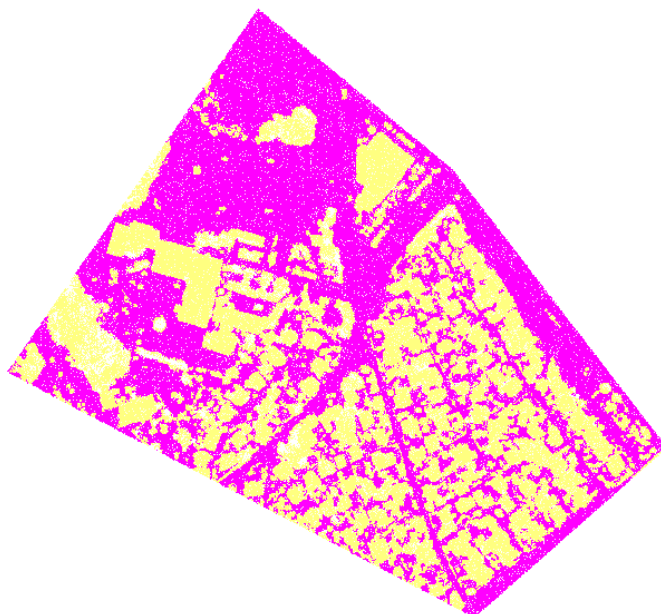
Testni oblak točk smo izdelali iz filtriranega fotogrametričnega oblaka točk. Zaradi gostote točk, je količina podatkov predstavljala pri nekaterih programih manjšo oviro. Pri nekaterih programih smo tudi razrezali območje na manjše dele in klasificirali vsak del posebej in jih nato ponovno združili. Testne oblake točk smo klasificirali s štirimi programi, od tega je en prilagojen za fotogrametrične oblake točk (PostFlight Terra 3D), ostali trije pa so namenjeni za klasifikacijo lidarskih oblakov točk. Skupno sem izdelal 17 klasificiranih testnih oblakov.

6.5.1.1. PostFlight Terra 3D

Program za obdelavo posnetkov PostFlight Terra 3D omogoča tudi klasifikacijo točk. Zaenkrat gre za poskusno verzijo te funkcionalnosti. Program je narejene za obdelavo posnetkov, zato je upravičeno sklepati, da je tudi klasifikacija prilagojena fotogrametričnim oblakom točk. V primeru izvajanja klasifikacije program izvozi sliko z narejeno segmentacijo (Slika 37). Pomanjkljivost programa je, da klasificira točke samo v razred teren. Ne klasificira pa stavb in vegetacije (Slika 38).



Slika 37: Segmentacija PostFlight Terra 3D za celotno območje



Slika 38: Klasifikacija PostFlight Terra 3D

6.5.1.2. Rapidlasso LAStools

LAStools je zbirka učinkovitih skriptnih, komandnih orodij za obdelavo lidarskih podatkov (rapidlasso GmbH, 2015). Vsebuje orodja za klasifikacijo, pretvorbo različnih formatov zapisa oblakov točk, izdelavo rastrov, izdelavo DMR-jev in DMP-jev, obrezovanje ter še mnoga druga orodja za obdelavo oblakov točk.

Za izdelavo klasifikacije smo izdelali zagonsko datoteko (Slika 39), ki uporablja dve orodji znotraj paketa LAStools in sicer:

- *lasground*
- *lasclassify*

```
:settings 2
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -city -coarse -compute_height -odix "c" -olaz
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *c.laz -olaz -odir "set2"
del *c.laz
```

Slika 39: Primer zagonske datoteke LAStools

V prvem koraku uporabimo orodje *lasground*. Orodje točke razdeli v dva razreda in sicer teren (razred 2) in ne-klasificirane točke (razred 1), dodatno lahko še nastavimo, da izračuna višino nad terenom za vsako točko razreda 1. Višino nad terenom potrebujemo v naslednjem koraku. V sklopu orodja *lasground* imamo možnost izbirati vrsto terena:

- divjina (gosto zaraščen teren),
- narava,
- vas ali ravnine,
- mesto ali skladišča,
- metropolis oziroma velemesta.

Izbira vrste terena vpliva na parametre velikosti koraka, oddaljenost osamelcev od terenske ploskve, odmik in standardni odklon. Orodje nam dopušča možnost, da tudi sami spreminjamo te parametre. Vplivi posameznih parametrov na rezultate so razloženi v navodilih za uporabo orodja. Dodatno program omogoča, da izberemo kako intenzivno bo algoritem iskal začetne točke terena:

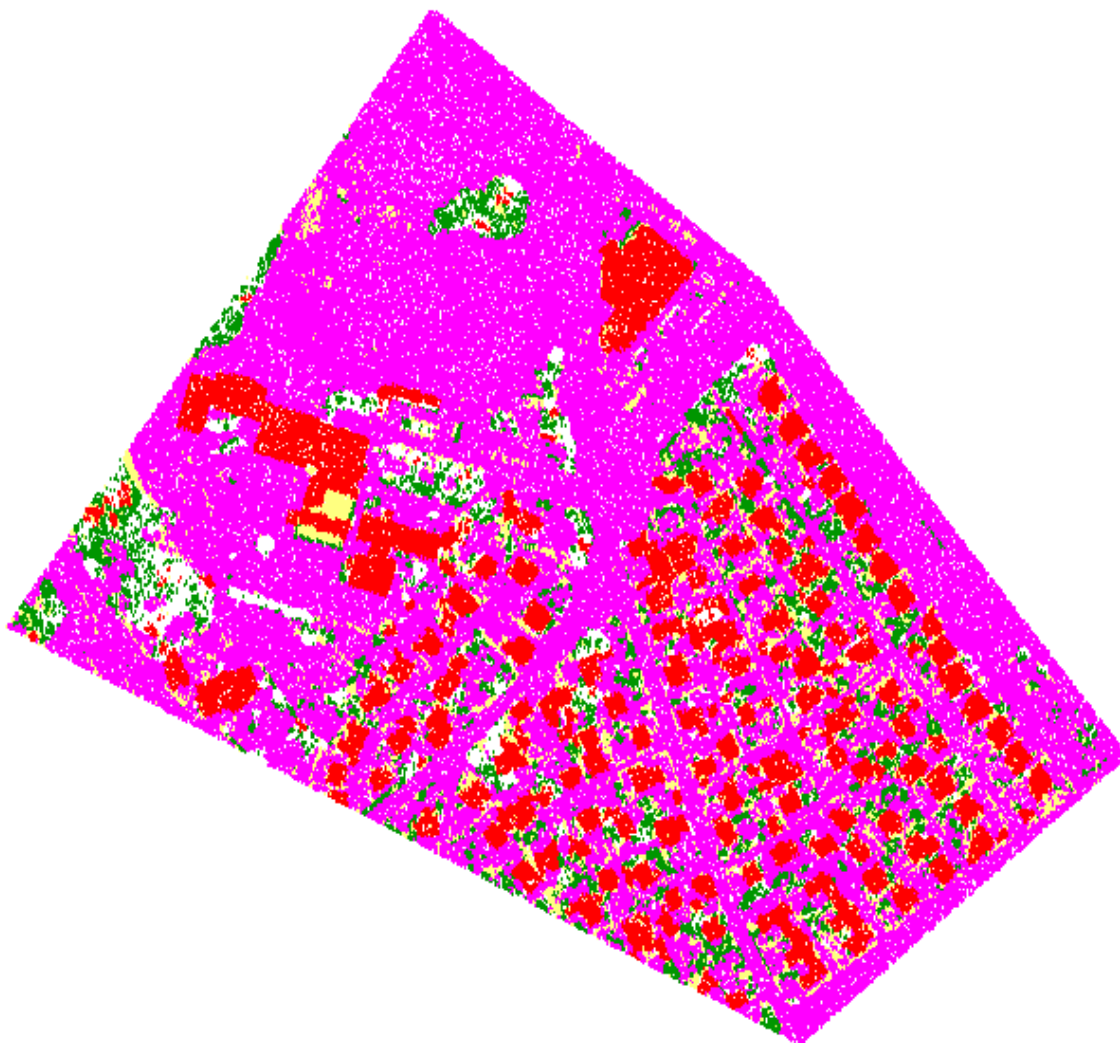
- zelo precizno (uporabimo na zelo strmih terenih),
- precizno,
- grobo,
- zelo grobo (uporabimo na zelo ravnih terenih).

V drugem koraku uporabimo orodje *lasclassify*. Vhodni podatki v to orodje so rezultati prvega koraka. Potrebujemo torej oblak točk, ki ima razred s terenskimi točkami in razred ne-klasificiranih točk, ter izračunane višine točk nad terenom. V sklopu orodja *lasclassify* lahko izbiramo med naslednjimi parametri:

- velikost iskalnega območja,
- ravnost (parameter pomemben za iskanje stavb),
- valovitost (parameter pomemben za iskanje dreves),
- odmik od terena.

Vpliv posameznega parametra na končne rezultate je razložen v navodilih za uporabo na spletni strani <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/LAStools/>.

Klasifikacije smo izvedli z različnimi parametri. Izvedli smo enajst različnih klasifikaciji z orodjem LAStools, parametri vseh klasifikacij so navedeni v prilogi B. Vse rezultate smo najprej vizualno pregledali (Slika 40).

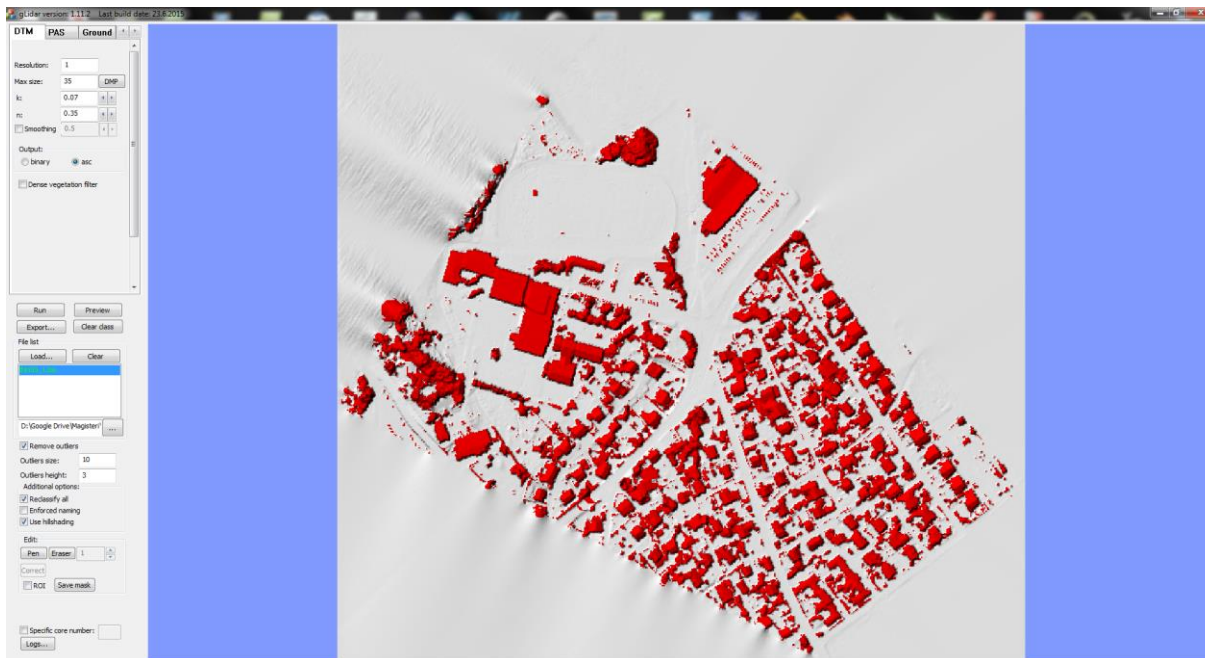


Slika 40: Najboljša klasifikacija z orodjem LAStools

6.5.1.3. gLIDAR

Program gLIDAR je namenjen izdelavi digitalnega modela reliefa in klasifikaciji oblaka točk (teren, vegetacija, stavbe). Velika prednost programa s stališča uporabe je grafični vmesnik (Slika 41), ki sprti prikazuje stanje klasifikacije. Za nekatere parametre v oknu prikaže, kako bodo vplivali (Slika 41, območja rdeče barve) na klasifikacijo. S spreminjanem le teh lahko v realnem času vidimo, kako vplivajo. To je zelo uporabno, saj je postopek klasifikacije dolgotrajen proces in s takšnim

predogledom lahko hitro preverimo rezultat. Prav tako nas je pozitivno presenetila hitrost klasificiranja.

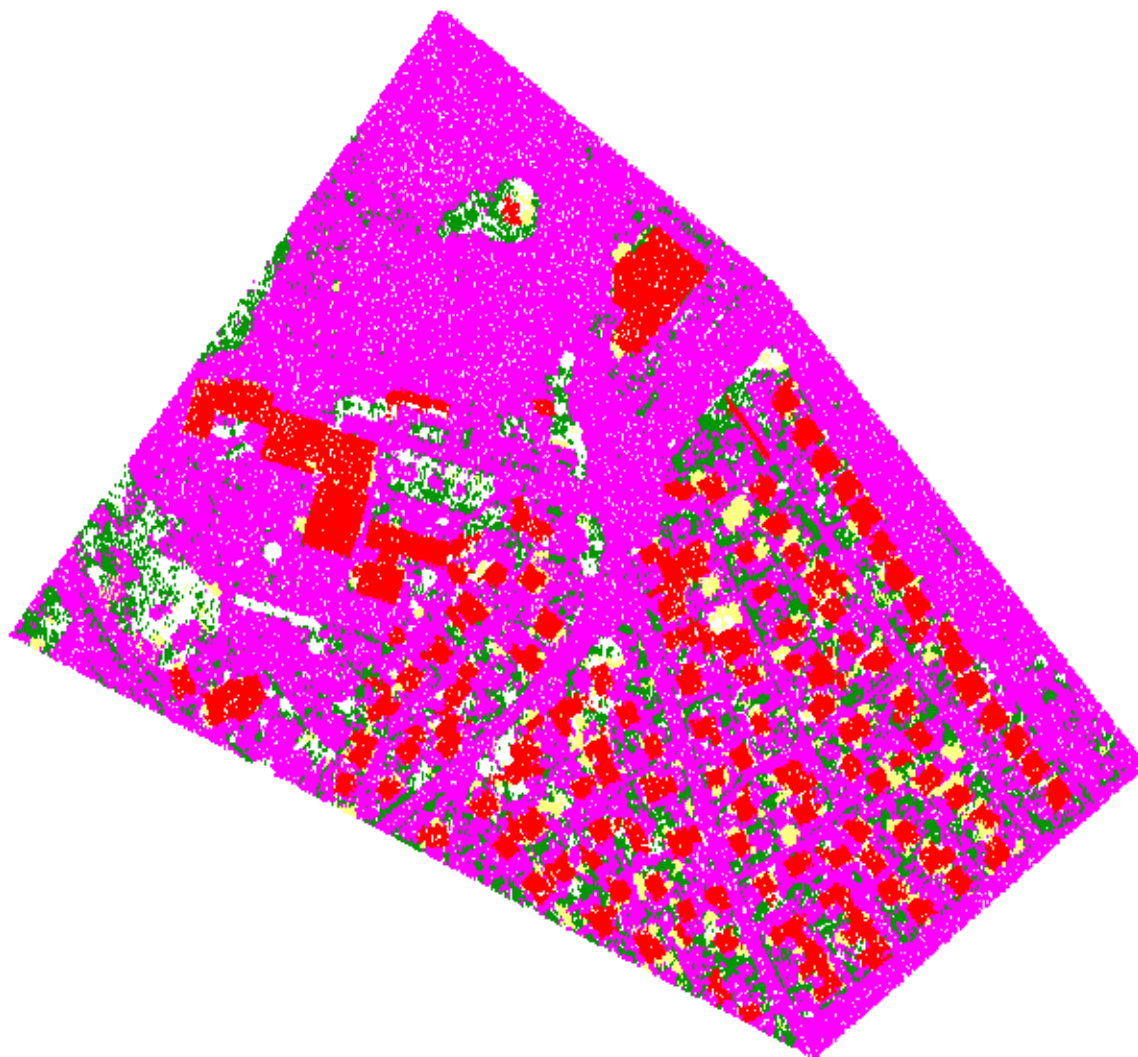


Slika 41: Grafični vmesnik programa gLIDAR

Klasificiranje poteka v štirih korakih:

- izdelava DMR-ja,
- klasifikacija terenskih točk,
- klasifikacija stavb,
- klasifikacija vegetacije.

Za vsak korak si izdelamo predogled okvirnih območij, ki bodo klasificirana v določen razred (Slika 41). Izdelali smo štiri klasifikacije na podlagi različnih parametrov (Priloga B). Vse klasifikacije smo vizualno pregledali (Slika 42).



Slika 42: Najboljša klasifikacija z programom gLIDAR

6.5.1.4. Global Mapper v16.2

Global Mapper v16.2 je nizkocenovno GIS orodje. Program vsebuje tudi modul za obdelavo lidarskih podatkov »LiDAR Module«, ki vsebuje enostavna orodja za delo z oblaki točk, med drugim tudi preprosto orodje za avtomatsko klasifikacijo točk. S programom Global Mapper smo izvedli eno klasifikacijo s privzetimi parametri klasifikacije (Slika 43).



Slika 43: Klasifikacija Global Mapper v16.2

6.5.2 Referenčni oblak točk

Referenčni oblak točk (angl. ground truth) predstavlja dejansko stanje v naravi. Pri referenčnem oblaku točk je visoka verjetnost, da se točke ujemajo s stanjem v naravi, kar lahko zagotovimo le z ročno klasifikacijo. Če želimo z visoko gotovostjo trditi za vse točke, da so pravilno klasificirane, se bomo na račun tega morali odpovedati primerjavi s celotno populacijo točk. Idealno bi bilo, če bi bila lahko referenčni oblak in testni oblak enako velika, tako bi zajeli celotno populacijo. Ker pa imamo v oblaku točk okoli 31 milijonov točk, je nemogoče ročno klasificirati te točke in hkrati z gotovostjo trditi, da so vse pravilne. V sklopu naloge smo preizkusili ali bi bilo možno, da bi uporabili celotno populacijo, oblak najprej klasificirali avtomatsko nato pa ga ročno le popravili. Izkazalo se je, da gre za pristransko oceno uspešnosti klasifikacije. To je še dodatno potrdilo predvidevanje, da moramo referenčni oblak točk opredeliti z vzorcem točk iz celotnega oblaka.

Ker delamo z vzorcem, je potrebno določiti velikost le tega, da bomo lahko z dovolj velikim zaupanjem sklepali o lastnostih celotne populacije.

V danem primeru imamo za vsak razred posebej opravka z dvema spremenljivkama ref^r in $test^r$ in preverjamo uspehe, kdaj je ref^r enak $test^r$. Spremenljivki sta binomsko razporejeni.

Če nam slučajna spremenljivka Y predstavlja število uspehov v n ponovitvah Bernoullijevega poskusa pravimo, da je porazdeljena binomsko. Zaloga vrednosti te slučajne spremenljivke so vsa cela števila od 0 do n (Turk, 2011). V našem primeru nam spremenljivka Y predstavlja število uspešnih klasifikacij znotraj enega razreda velikosti n . Samo vzorčenje je potekalo povsem naključno. Velikost potrebnega vzorca smo izračunali po naslednji enačbi (28).

$$n = \left(\frac{erf^{-1}(c)}{\sqrt{2} M} \right)^2 \quad (28)$$

Kjer je:

- n velikost vzorca
- c stopnja zaupanja
- M interval zaupanja
- erf^{-1} inverzna zbirna funkcija verjetnosti (angl. inverse error function) (Andrews, 1998)

Ker vzorčimo naključno, bomo iz vsakega razreda pridobili različno število točk. Posledično to pomeni, da bomo za vsak razred imeli drugačen interval zaupanja. Poiskali smo takšno velikost vzorca, da imamo kar se da majhen interval zaupanja, hkrati pa je vzorec še obvladljivo velik in ga bo možno ročno celotnega pregledati. Iz oblaka točk smo naključno izbrali 2000 točk. Število točk v posameznem razredu je prikazano v Preglednica 23.

Preglednica 23: Število vzorčnih točk po razredih in interval zaupanja s stopnjo zaupanja $c=0,95$

Razred	Število točk n	Interval zaupanja M	Interval zaupanja M [%]
Teran	1229	0,028	+ - 1,4 %
Vegetacija	301	0,056	+ - 2,8 %
Stavbe	431	0,047	+ - 2,4 %
Ne-klasificirane	38	/	/

Ker imamo opravka z bistveno manjšim številom točk, kot če bi klasificirali celotno populacijo, lahko ročno pregledamo vse točke in z visoko gotovostjo trdimo, da pripadajo pravemu razredu. Z oblaka točk smo tako naključno izbrali 2000 točk. Te smo nato ročno klasificirali v programskem orodju Global Mapper. Za določitev razredov smo si pomagali z ortomozaikom in s prečnimi prerezi (Slika 44).



Slika 44: Referenčen vzročen oblak točk

6.5.3 Ocene kakovosti klasifikacije

Za oceno kakovosti klasifikacije smo izdelali lastni program v programskem jeziku Python 2.7, za branje in zapisovanje datotek v formatu .las smo uporabili knjižnico laspy (Brown, 2012).

Ustvarili smo si vzorec referenčnih podatkov in vzorec testnih podatkov ter primerjali vsako točko z vsako in šteli napačno pozitivno (ang. False Positive) določene točke in napačno negativno (ang. False Negative) določene točke. Vse točke v posameznem razredu referenčnega oblaka točk predstavljajo pravilno pozitivno (ang. True Positive) določene točke (Rutzinger et al., 2009).

Pri napačno pozitivnih določitvah klasifikacije točk gre za napako I. vrste, to so točke, ki jih je algoritem uvrstil v dani razred, čeprav temu ne pripadajo.

Pri napačno negativnih določitvah klasifikacije točke gre za napako II. vrste, to so točke, ki jih algoritem ni uvrstil v dani razred, čeprav mu pripadajo.

Za vrednotenje kakovosti klasifikacij smo uporabili štiri različne parametre in sicer absolutni delež napak (29), uspešnostni indeks (30), pravilnost (ang. Correctness) (31), popolnost (angl. Completeness) (32) in kakovost (33).

$$absNapak = \frac{\sum_{i=1}^r nNapak_r}{n} \quad (29)$$

$$uspešnost_r = \frac{PP_r - (NP_r + NN_r)}{PP_r} \quad (30)$$

$$pravilnost_r = \frac{PP_r}{PP_r + NP_r} \quad (31)$$

$$popolnost_r = \frac{PP_r}{PP_r + NN_r} \quad (32)$$

$$kakovost_r = \frac{PP_r}{PP_r + NP_r + NN_r} \quad (33)$$

Kjer je:

PP_r	pravilno pozitivne
NP_r	neppravilno pozitivne
NN_r	neppravilno negativne

6.5.4 Rezultati analize kakovosti klasifikacije

Prikazan je le del rezultatov, ki smo jih pridobili med obdelavami v okviru magistrske naloge. Rezultati kakovosti vseh izvedenih klasifikacij so v prilogi C. Različni programi omogočajo uporabo številnih različnih parametrov (Priloga B). Rezultati znotraj enega programa se tako tudi med seboj razlikujejo na podlagi vhodnih parametrov. Izdelali smo več različnih klasifikacij na podlagi različnih vhodnih parametrov, zato obstaja tudi možnost, da se da rezultate iz posameznih programov še izboljšati ob nastavitvi še primernejših parametrov. Pri prikazu rezultatov smo izbrali le najboljše dobljene rezultate za posamezni program. Rezultati vseh klasifikacij so prikazani v prilogi C ter nastavitve posameznih programov za klasifikacijo v prilogi B. Rezultate bomo obravnavi za vsak razred posebej.

Absolutni delež prikazuje, koliko je bilo vseh napak po vseh razredih skupaj glede na število vseh točk v oblaku. Absolutnega deleža nismo izračunali za PostFlight Terra 3D, saj nimamo razredov stavb in vegetacije. Najnižji delež napak ima program gLIDAR. Najslabše rezultate pa smo dobili z

programom Global Mapper. Absolutni delež napak pri različnih algoritmih je prikazan v (Preglednica 24).

Preglednica 24: Absolutni delež napak

Program	Delež
LAStools	12,1 %
gLIDAR	10,6 %
Global Mapper	33,9 %

6.5.4.1. Teren

V razredu teren imamo v referenčnih podatkih 1229 vzorčnih točk. O lastnostih razreda teren lahko govorimo s stopnjo zaupanja 95% in so znotraj intervala zaupanja +- 1,4 %. Najboljše rezultate smo dobili s programom PostFlight Terra 3D (Preglednica 25) s kakovostjo klasifikacije 98,56 %. Med rezultati s programoma LAStools in gLIDAR ni statistično dovolj velike razlike, da bi lahko trdili, kateri bolje določi točke terena. Sta pa oba zelo dobra. V numeričnem smislu smo najslabše rezultate dobili s programom Global Mapper, ki pa ima po drugi strani dobro lastnost, da klasificira zelo »previdno« (izpusti točke terena, kar se izkaže v nizki popolnosti in s tem slabšo splošno kakovostjo). Tudi vizualno klasifikacija izstopa (Slika 43).

Preglednica 25: Uspešnost klasifikacije - razred teren

Mera	Program			
	LAStools	gLIDAR	PostFlight Terra 3D	Global Mapper
Uspešnost	95,0 %	94,6 %	98,5 %	73,9 %
Popolnost	97,9 %	98,4 %	99,0 %	79,4 %
Pravilnost	97,2 %	96,4 %	99,5 %	99,8 %
Kakovost	95,2 %	94,9 %	98,6 %	79,3 %

Za programe LAStools, gLIDAR in PostFlight Terra 3D lahko sprejmemo hipotezo:

»Z avtomatsko klasifikacijo lahko z več kot 90 % stopnjo kakovosti določimo točke razreda teren, s fotogrametrično pridobljenega oblaka točk.«

Za program Global Mapper jo zavrnamo.

Dodatno smo naredili tudi primerjavo za točke, ki so bile napačno klasificirane (Preglednica 26). V preglednicah so rezultati izraženi kot delež napak glede na število točk v obravnavanem razredu. Primerjava je narejena za gLIDAR in LAStools. Za PostFlightTerra 3D žal te primerjave nismo mogli narediti, ker program ne klasificira v razrede vegetacija in stavbe. Za Global Mapper pa so bili rezultati preslabi. Oba testirana programa sta dela podobne napake (Preglednica 26). Napačno pozitivne so točke, ki jih je program klasificiral v točke terena, čeprav temu ne pripadajo. Oba algoritma sta imela največ težav s tem, da sta točke vegetacije klasificirala v teren. Napačno negativne točke so točke, ki bi morale biti v razredu teren, vendar jih je program klasificiral v drug razred. Rezultati so dokaj podobni med obema programa, s tem da je LAStools imel nekoliko več težav z ločevanjem ne-klasificiranih točk medtem ko gLIDAR z vegetacijo. Oba algoritma sta zelo dobro ločevala stavbe od terena. To gre tudi pripisati dejstvu, da gre za dokaj enostavno območje. V bolj hribovitem območju bi verjetno imela program več težav.

Preglednica 26: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred teren

	gLIDAR		
Vrsta napake	ne-klasificirano	stavbe	vegetacija
Napačno pozitivne	0,6 %	0,1 %	3 %
Napačno negativne	0,7 %	0 %	1 %
	LAStools		
Napačno pozitivne	0,6 %	0 %	2,2 %
Napačno negativne	1,9 %	0,1 %	0,2 %

6.5.4.2. Stavbe

V razredu stavbe imamo v referenčnih podatkih 431 vzorčnih točk. O lastnostih razreda teren lahko govorimo s stopnjo zaupanja 95% in so znotraj intervala zaupanja $\pm 2,4$ %. Stavbe sta oba programa uspela klasificirati s kakovostjo večjo od 80% (Preglednica 27). Pri izbiri parametrov smo imeli največ težav pri tem, kako doseči večjo popolnost. To pomeni, da programi niso preveč optimistično klasificirali točk, na kar kaže relativno visoka pravilnost. Ponovno se je za najslabšega izkazal Global Mapper, kjer smo dosegli le 66% kakovost klasifikacije.

Preglednica 27: Uspešnost klasifikacije - razred stavbe

Mera	Program		
	LAStools	gLIDAR	Global Mapper
Uspešnost	84,9 %	78,4 %	49,2 %
Popolnost	91,5 %	88,0 %	86,9 %
Pravilnost	94,5 %	92,7 %	73,7 %
Kakovost	86,9 %	82,3 %	66,3 %

Za stavbe ne moremo sprejeti hipoteze:

»Z avtomatsko klasifikacijo lahko z več kot 90 % stopnjo kakovosti določimo točke razreda stavbe, v fotogrametrično pridobljenem oblaku točk.«

Kljub temu, da smo hipotezo zavrnili, smo dobili zelo dobre rezultate. Ponovno sta programa gLIDAR in LAStools delala dokaj podobne napake (Preglednica 28). Največ je bilo napak, da sta klasificirala točke v razred stavbe, ko je šlo za točke vegetacije. Največ pa je ostalo točk v razredu neklasificirano, čeprav pripadajo razredu stavbe. Kot smo že ugotovili pri pregledu rezultatov o terenu, večjih težav programa z ločevanjem stavb in terena nimata.

Preglednica 28: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred stavbe

Stavbe				
Vrsta napake	gLIDAR			
	ne-klasificirano	teren	vegetacija	
Napačno pozitivne	0,5 %	0,0 %	7,5 %	
Napačno negativne	10,9 %	0,2 %	2,6 %	
Vrsta napake	LAStools			
	Napačno pozitivne	0,0 %	0,2 %	5,6 %
	Napačno negativne	7,7 %	0,0 %	1,6 %

6.5.4.3. Vegetacija

V razredu vegetacija imamo v referenčnih podatkih 301 vzorčnih točk. O lastnostih razreda teren lahko govorimo s stopnjo zaupanja 95% in so znotraj intervala zaupanja +- 2,8 %. Najslabše rezultate

smo dobili za razred vegetacija (Preglednica 29). Tukaj so imeli težave vsi algoritmi. Najboljše rezultate je dal gLIDAR, nato LAStools. Global Mapper je vegetacijo klasificiral zelo slabo. Vrednost uspešnosti je negativna, saj je seštevek napačno pozitivnih in napačno negativno določenih točk večji od vseh točk razreda v referenčnem oblaku. Pravilnost je ponovno dokaj dobra. Večjo težavo je povzročalo dejstvo, da je veliko točk vegetacije ostalo ne-klasificiranih oziroma v drugih razredih (vpliv na mero popolnosti).

Preglednica 29: Uspešnost klasifikacije - razred vegetacija

Mera	Program		
	LAStools	gLIDAR	Global Mapper
Uspešnost	41,2 %	51,8 %	-4,0 %
Popolnost	65,2 %	75,8 %	51,6 %
Pravilnost	95,0 %	86,0 %	90,7 %
Kakovost	63,0 %	67,5 %	49,0 %

Za vse testirane algoritme za avtomatsko klasifikacijo lahko zavrnemo hipotezo:

»Z avtomatsko klasifikacijo lahko z več kot 90 % stopnjo kvalitete določimo točke razreda vegetacija, v fotogrametrično pridobljenem oblaku točk.«

Pregled napak nakazuje na to, da je vegetacijo težko ločiti od vseh razredov (Preglednica 30). Posebno izstopa delež napačno negativnih napak pri programu LAStools z razredom ne-klasificirano, kjer vidimo, da je veliko točk ostalo ne-klasificiranih. To se tudi odraža v slabi stopnji popolnosti (Preglednica 29). Prav tako je veliko točk ostalo v drugih dveh razredih. So pa večinoma točke, ki so bile klasificirane v razred vegetacije, bile pravilno klasificirane. Program gLIDAR je imel tu nekoliko bolj enakomerno razporejene napake med vsemi razredi. Največ točk pa je ostalo v razredih teren in stavbe.

Preglednica 30: Vrsta napak pri klasifikaciji v razred vegetacija

Vrsta napake	gLIDAR		
	ne-klasificirano	teren	stavbe
Napačno pozitivne	8,6 %	4,0 %	3,7 %
Napačno negativne	9,0 %	12,3 %	10,6 %

	LAStools		
Napačno pozitivne	2,0 %	1,0 %	2,3 %
Napačno negativne	36,5 %	9,0 %	8,0 %

6.5.5 Analiza kakovosti klasifikacije

Pregled metod je pokazal, da se z algoritmi za klasifikacijo aerolaserskih oblakov točk da klasificirati tudi fotogrametrične oblake točk. Vendar je prilagojen program za fotogrametrične oblake točk (PostFlight Terra 3D) dal še boljši rezultat. Rezultati s programi LAStools, gLIDAR in PostFlight Terra 3D so zadovoljivi. Potrebno je poudariti, da je območje, na katerem smo programe preizkušali, razmero ravninsko. Na teh območjih tudi algoritmi delujejo najboljše. V primeru bolj razgibanega terena bi verjetno dobili slabše rezultate. Fotogrametričnim oblakom tudi predstavljajo oviro velike površine dreves, saj tam ne dobimo terenskih točk.

Vsi programi so zelo dobro klasificirali točke terena. Prav tako se je pokazalo, da algoritmi nimajo velikih težav pri ločevanju med stavbami in terenom. Največ težav pa predstavlja ločevanje med točkami terena in vegetacije. Predvsem pri vegetaciji je veliko točk ostalo v razredu ne-klasificirano.

S programom gLIDAR in LAStools smo dobili primerljive rezultate. Klasifikacija je narejena dovolj dobro, da je ročno popravljanje klasifikacije še izvedljivo. Teren je najboljše klasificiral PostFlight Terra 3D, ki pa žal še ne omogoča klasifikacij stavb in vegetacije, verjetno pa to funkcionalnost lahko pričakujemo v prihodnosti. Najslabše se je odrezal program Global Mapper, kar smo tudi pričakovali. Gre za nov modul v nizkocenovnem GIS programu, ki ni profesionalno orodje za delo z oblaki točk.

Če gledamo rezultate testiranja klasifikacij na ISPRS-ovem (ISPRS, 2015) testu, vidimo, da so na podlagi aerolaserskih oblakov točk uspešnosti klasifikacije točke stavb in vegetacije boljše. Prednost ALS oblakov točk sta informacija o številu odbojev in zmožnost prodiranja skozi vegetacijo. Na podlagi teh informacij lahko dobro razločujemo med stavbami in vegetacijo ter ostalimi objekti. Predvsem pri ločevanju med stavbami in vegetacijo bi si pri FOT lahko pomagali z radiometrično informacijo, ki jo imamo na voljo. Za zelo dobro ločevanje bi bila tudi smiselna uporaba bližnje infrardečega kanala ter izračuna NDVI-ja. Na podlagi vrednosti NDVI lahko dobro ločimo med grajenimi objekti in vegetacijo.

V prihodnje bi bilo smiselno poskusiti izdelati postopek za klasifikacijo stavb in vegetacij s pomočjo objektno usmerjene klasifikacije na primer s programom eCognition.

7 ZAKLJUČKI

V magistrskem delu smo obravnavali področje brezpilotnih sistemov in njihovo uporaba v geodeziji in geoinformatiki. Brezpilotni sistemi so odlično orodje za zajem prostorskih podatkov. Omogočajo cenovno ugoden, uporabnikom prijazen in enostaven način zajema. Vendar, če jih želimo uporabljati strokovno in dosežati želene natančnosti izdelkov, je potrebno tudi nekoliko globlje poznavanje teorije. Ker gre v večini primerov za zaprte programske pakete, ki samodejno izdelajo želene izdelke, se večinoma ne zavedamo, kaj vse vpliva na kakovostne rezultate. Brezpilotni sistemi so uporabni v številnih področjih geodezije. Del možnih aplikacij posega v domeno velikih letalskih sistemov za aerofotografiranje in aerolasersko skeniranje. V praktičnem delu magistrskega dela smo se posvetili predvsem fotogrametričnemu oblaku točk kot enemu izmed izdelkov uporabe brezpilotnih sistemov. Pregledali smo njegove lastnosti ter ga primerjali z aerolaserkim oblakom točk. Oblak točk ima bistveno večjo uporabno vrednost, če je klasificiran. Zato smo izvedli številne klasifikacije fotogrametričnega oblaka točk in izvedli analizo kakovosti teh klasifikacij.

Oblaka točk ALS in FOT sta primerljiva, vsak izmed njiju pa ima določene prednosti in slabosti. Tako je glavna prednost FOT oblaka točk, da imajo vse točke RGB vrednosti, kar omogoča izdelavo atraktivnih animacij kot tudi omogoča potencialno pomoč pri avtomatski klasifikaciji. Gostota oblaka točk je zelo velika, a odvisna od višine preleta, senzorja ter uporabljenega programa. Največja omejitev FOT je nezmožnost rekonstrukcije točk pod vegetacijo. Dodatna prednost, ki jo imajo ALS oblaki točk, je podatek o številu odbojev, tega pri FOT nimamo. Fotogrametrični oblaki so tudi bolj obremenjeni s šumom. Pokazali smo, da lahko z ALS in FOT oblaka točk zajemamo karakteristične točke s primerljivo natančnostjo in da ima model terena pridobljen z obeh oblakov podoben standardni odklon.

Pomemben del delovnega proces predstavlja klasifikacija oblakov točk. Ugotovili smo, da trenutno obstaja večino algoritmov za klasifikacijo z domene aerolaserskega skeniranja, zato so tudi ti algoritmi prilagojeni lastnostim ALS oblakom točk. Kljub dejstvu, da gre za algoritme prilagojene za ALS, pa smo dobili zadovoljive rezultate tudi pri klasifikaciji fotogrametričnega oblaka točk. Predvsem zelo dobre rezultate je dosegel razred teren, ki je tudi eden izmed pomembnejših razredov. Programi LAStools, gLIDAR in PostFlight Terra 3D so točke terena klasificirali z več kot 94 % kakovostjo. Točke terena potrebujemo za klasifikacijo v nadaljnje razrede ter izdelavo drugih izdelkov. Ker vsi algoritmi ne izkoriščajo vseh prednosti FOT, je na tem področju še ogromno prostora za napredek. Pokazali smo, da program, ki je prilagojen za fotogrametrični oblak točk, izvede boljšo klasifikacijo.

Brezpilotni sistemi za zajem prostorskih podatkov tako predstavljajo odlično novo orodje za zajem prostorskih podatkov. Vendar kot z vsako novo tehnologijo je potrebno biti previden. Do ažurnih zračnih posnetkov lahko pridemo trenutno s tako malo truda, da se nam zdijo že povsem samoumevni. Sama obdelava teh posnetkov je z razvojem specializiranih programov za obdelavo posnetkov z brezpilotni sistemov postala povsem enostavna.

Dejstvo, da je področje uporabniku zelo prijazno in enostavno, pa ima tudi temnejšo plat. Ozadje delovanje teh sistemov ostaja črna skrinjica, težko je vedeti, kaj se v ozadju programa dejansko dogaja. Posledično se z izdelavo oblaka točk, ortomozaika in DMR-ja ukvarja vse več ljudi, ki niso strokovnjaki na tem področju in ne vedo, kaj vpliva na kakovost rezultatov. Popularizacija področja ima določene prednosti, saj za množicami pride tudi industrija, ki ponuja nove, boljše in cenejše produkte. Dejstvo, da lahko zelo hitro z malo znanja in truda pridemo do zelo lepih in kompleksnih izdelkov, pa zna še dodatno razvrednoti izdelek strokovnjaka s tega področja. Ne več naročnik na prvi pogled ne more videti razlike med izdelkom narejenim s strani strokovnjaka ali laika. Posledično ne more razumeti, zakaj je tudi v ceni izdelka razlika.

Problematično je tudi dejstvo, da nekateri potencialni naročniki ne znajo uporabiti 3D podatkov, ki jim jih dostavimo. V podatkih se skriva ogromen potencial, ki pa mislim, da ga še nismo uspeli povsem izkoristiti. Zaenkrat smo v obdobju, ko te podatke množično produciramo, ker jih lahko, je enostavno in lepo izgledajo. Kot geodeti pa se ne bi smeli zadovoljiti, da kot naš končni izdelek damo od sebe samo oblak točk, ortomozaik in DMR. Naloga je, da poskusimo najti načine, kako v čim večji meri izkoristiti te podatke in s tem ustvariti v njih dodano vrednost. Kot smo videli, te podatke lahko izdelava nekdo, ki ni strokovnjak.

Klasifikacija oblaka točk je ena izmed vej, ki lahko doda dodano vrednost samemu oblaku. Omogoča, da avtomatsko izluščimo informacije iz oblaka, ki nas zanimajo. Na tem področju je še ogromno potenciala za razvoj raznih postopkov, zato upam, da bomo znotraj geodezije kot stroke imeli voljo za nadaljnji razvoj tudi na tem področju. Sicer bodo sčasoma tudi to področje prevzeli računalničarji in drugi sorodni poklici.

Področje obdelave aeroposnetkov, pridobljenimi z brezpilotnimi sistemi, je v veliki meri prešlo iz rok fotogrametrije v roke računalničarjev in specialistov na področju računalniškega vida. Na splošno nas v celotni stroki geodezije na vseh področjih preHITEVajo strokovnjaki s sorodnih vej. Ena izmed osnovnih nalog geodezije je določevanje položaja točk in zajem ter upravljanje s prostorskimi podatki. Ker pa je danes postalo zajeti prostorske podatke zelo enostavno, moremo razmišljati kako prenesti naša strokovna znanja tudi na čim več drugih področjih. Ne smemo se zadovoljiti s ciljem, da prostorske podatke samo ustvarjamo in posredujemo naprej. Potrebno jim je dodati dodano vrednost.

Brepilotni sistemi so odlično orodje za zajem prostorskih podatkov in njihov potencial smo šele začeli izkoriščati. Znotraj geodezije in geoinformatike so uporabno orodje za izdelavo ažurnih ortomozaikov, digitalnih modelov površja in reliefa, oblakov točk, izračunov volumnov, nadzorovanja kamnolomov, deponij, gradbišč, zalog razsutega tovara, izdelavo modelov rečnih strug, maket za 3D tisk, precizno kmetijstvo, kot podlaga geodetskim načrtom, atraktivnih 3D vizualizaciji in še bi lahko naštevali. Menim, da bo brezpilotni sistem za zajem prostorskih podatkov v prihodnje postal nepogrešljiv inštrumentarij geodeta.

LITERATURA

- Andrews, L.C., 1998. Special functions of mathematics for engineers. Oxford university press, Washington, ZDA.
- Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L.V., 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision, Austria 2006.
- Brown, D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. Photogrammy Eng.: 855–866.
- Brown, G., 2012. laspy.
<https://github.com/grantbrown/laspy> (Pridobljeno 2.3.2015)
- Čaleta, D., Prelesnik, M., Bobnar, T., Podbregar, I., Knez, S., Magister, T., Krapež, A., 2015. Dileme in izzivi uporabe brezpilotnih letalnikov ter njihova normativna ureditev.
<http://www.ds-rs.si/?q=novice/dileme-izzivi-uporabe-brezpilotnih-letalnikov-ter-potreba-normativne-ureditve-uporabe> (Pridobljeno 7.7.2015)
- Colomina, I., Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. p: 79–97.
- Cramer, M., 2013. The UAV LGL BW project—a NMCA case study. 54th Photogrammetric Week. Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart: 165–179.
- Cremers, D., 2013. Multiple View Geometry - Lecture 7, 8, 9.
<https://www.youtube.com/watch?v=9fvopDHdrFg> (Pridobljeno 2.7.2015)
- Dalal, N., Bill, T., 2005. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, ZDA: 886 - 893.
- Dougan, J.N., Šašo, A., Tržan, U., Vidmar, B., 2014. Po kreativni poti do praktičnega znanja testiranje brezpilotnega letalnika za zajem prostorskih podatkov.
<http://www.dsgsflyeye.com/projects/hofer> (Pridobljeno 5.5.2015)
- Eisenbeiss, H., 2009. UAV Photogrammetry. Doktorska dizertacija. Zurich. ETH Zurich, Švica.
- Everaerts, J., 2009. NEWPLATFORMS - Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing, Technical report 56. European Spatial Data Research (EuroSDR)

- Fischer, M., Bolles, R., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*: 381 - 395
- Fritz, A., Kattenborn, T., Koch, B., 2013. UAV-based photogrammetric point clouds - tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*. 6.
- Furukawa, Y., 2015. Clustering Views for Multi-view Stereo (CMVS). <http://www.di.ens.fr/cmvs/> (Pridobljeno 17.8.2015).
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2009. Accurate Camera Calibration from Multi-View Stereo and Bundle Adjustment. *International Journal of Computer Vision*: 257–268.
- Hartley, R., Zisserman, A., 2003. *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge University Press, New York.
- ISPRS, W.I., 2015. ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction: Results. <http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/results.html> (Pridobljeno 25.8.2015)
- Kazhdan, M., Hoppe, H., 2013. Screened Poisson surface reconstruction. *ACM Trans. Graph. TOG* 32.
- Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2015. VFR letalska navigacijska karta Republike Slovenije. <http://www.sloveniacontrol.si/informacije/vfr-karta-2015> (Pridobljeno 5.6.2015)
- Kontrola zračnega prometa Slovenije, 2014. VFR pomočnik. http://www.sloveniacontrol.si/informacije/vfr-pomocnik_2 (Pridobljeno 5.6.2015)
- Kraus, K., 2007. *Photogrammetry : geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter Berlin New York, Nemčija.
- Kraus, K., 1997. *Photogrammetry VOLUME 2 Advanced Methods and Applications*, 4th ed. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn, Nemčija.
- Kung, O., Strecha, C., Fua, P., Gurdan, D., Achtelik, M., Doth, K.-M., Stumpf, J., 2011. Simplified building models extraction from ultra-light uav imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, Zurich, Švica.

LAS specification, 2013. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf (Pridobljeno 7. 7. 2015)

Longuet Higgins, H.C., 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections.
Nature: 133–135.

Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International. Journal of Computer. Vision.

McGlone, J.C., Mikhail, E.M., Mullen, R., 2004. Manual of Photogrammetry, 5th ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, cop. 2004.

Mongus, D., Lukač, N., Žalik, B., 2015. Ground and building extraction from LiDAR data based on differential morphological profiles and locally fitted surfaces. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing: 145–156.

Nex, F., Remondino, F., 2013. UAV for 3D mapping applications: a review. Societa Italiana di Fotogrammeria e Topografia.

Ozmeč, T., 2015. Vzpostavitev geodetske mreže za potrebe ocenjevanja kakovosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Ozmeč, T.): 48 f.

Pix4D, 2015. Pix4D. <https://support.pix4d.com> (Pridobljeno 10.7.15).

rapidlasso GmbH, 2015. LAStools. <http://rapidlasso.com/LAStools/> (Pridobljeno 3.4.2015)

Rutzinger, M., Rottensteiner, F., Pfeifer, N., 2009. A Comparison of Evaluation Techniques for Building Extraction From Airborne Laser Scanning. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing.

senseFly, 2015. senseFly.
<https://www.sensefly.com/> (Pridobljeno 9.7.2015).

senseFly, 2014. senseFly eBee The professional mapping drone
https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/documents/brochures/eBee_en.pdf
(Pridobljeno 9.7.2015)

senseFly, 2013. eBee User Manual eBee and eBee NIR, Revision 7. senseFly Ltd, Švica

Triggs, B., Mclauchlan, P.F., Hartley, R.I., Fitzgibbon, A.W., 2000. Bundle Adjustment —A Modern Synthesis. *Vision Algorithms*: 298–372.

Tsay, J.-R., Lee, M.-S., 2012. SIFT for dense point cloud matching and aero triangulation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia*.

Turk, G., 2011. Verjetnostni račun in statistika. Skripta za predavanja UL FGG, Ljubljana.

Turner, D., Lucier, A., Wallace, L., 2014. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*: 52.

Vergauwen, M., Gool, L.V., 2006. Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision and Applications*: 441–426.

Vetrivel, A., Gerke, M., Vosselman, G., 2015. Segmentation of UAV-based images incorporating 3D point cloud information. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: 261–268.

Vosselman, G., Maas, H.-G., 2010. Airborne and tereesttial laser scanning. Whittles Publishing, Škotska, Velika Britanija.

Wikipedia, 2015. Structure from motion. https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion (Pridobljeno 14.7.15).

SEZNAM PRILOG

**PRILOGA A: DELI POROČILA KAKOVOSTI OBDELAVE FOTOGRAMETRIČNEGA
PROJEKTA RADOVLJICA**

**PRILOGA B: UPORABLJENI PARAMETRI ZA KLASIFIKACIJO S PROGRAMOMA
GLIDAR IN LASTOOLS**

PRILOGA C: NUMERIČNI REZULTATI VSEH IZVEDENIH KLASIFIKACIJ

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA A: DELI POROČILA KAKOVOSTI OBDELAVE FOTOGRAMETRIČNEGA PROJEKTA RADOVLJICA



Generated with version 3.2.96

Quality Report

! Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the feature

💡 For additional tips to analyze the Quality Report, click [here](#).

Summary i

Project	radovljica_vse
Processed	2015-Jan-16 11:39:31
Camera Model Name	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(1)
Camera Model Name	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(2)
Camera Model Name	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(3)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.11 cm / 1.22 in
Area Covered	0.9342 km ² / 93.4167 ha / 0.3609 sq. mi. / 230.957 acres
Image Coordinate System	WGS84
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	Slovenia 1996 / Slovene National Grid (+45m)
Output Coordinate System	Slovenia 1996 / Slovene National Grid (+45m)
Processing Type	full aerial nadir
Feature Extraction Image Scale	1
Camera Model Parameter Optimization	optimize externals and all internals
Time for Initial Processing (without report)	01h:28m:24s

Quality Check i

? Images	median of 21818 keypoints per image	✔
? Dataset	796 out of 796 images calibrated (100%), all images enabled	✔
? Camera Optimization	0.14% relative difference between initial and final focal length	✔
? Matching	median of 2360 matches per calibrated image	✔
? Georeferencing	8 GCPs (8 3D), mean error = 0.004 m	✔

? Preview

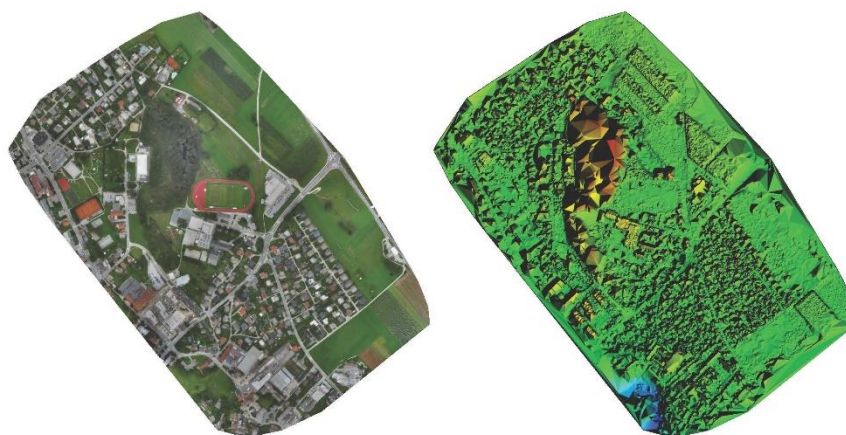


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	796 out of 796
Number of Geolocated Images	796 out of 796

Initial Image Positions

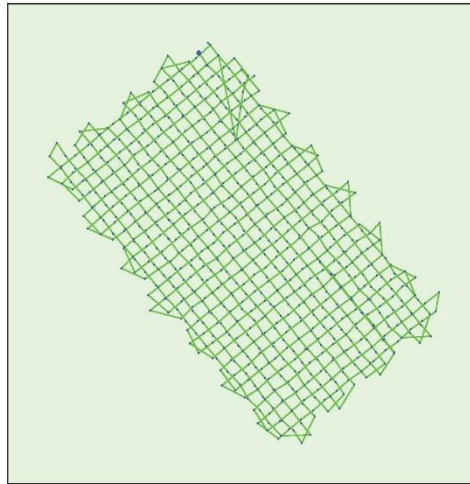


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

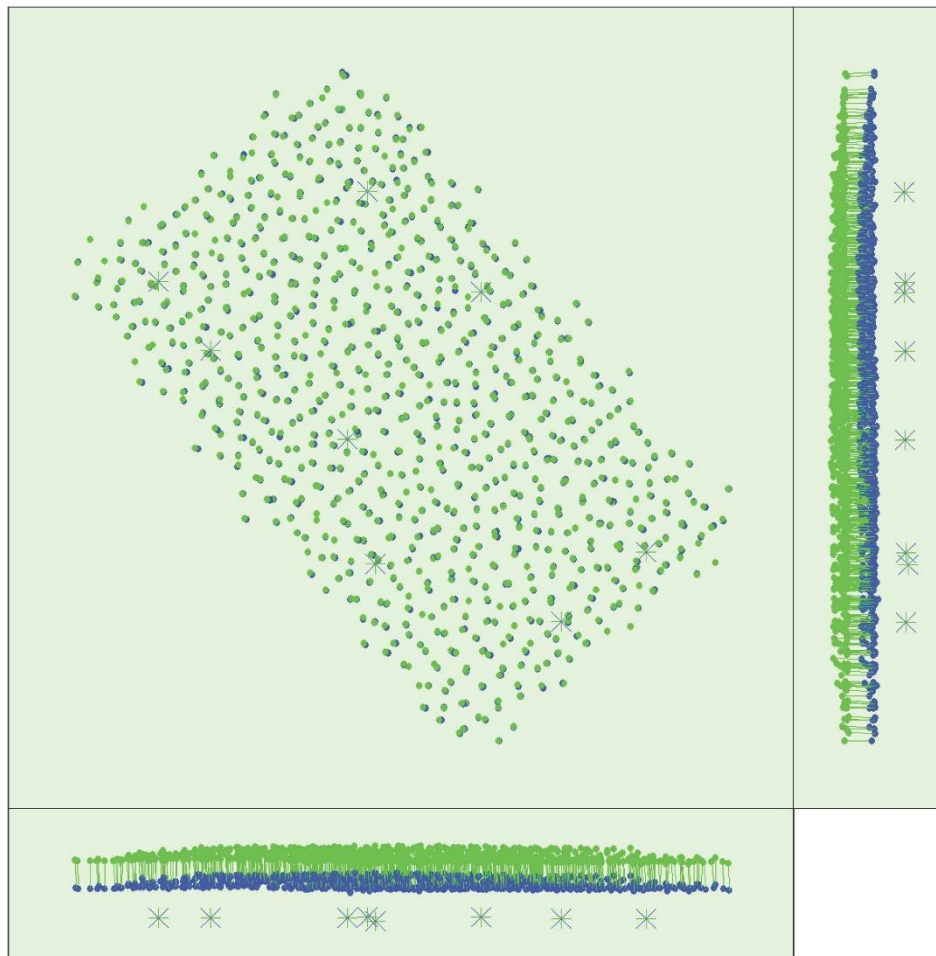


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane).

🔍 Overlap

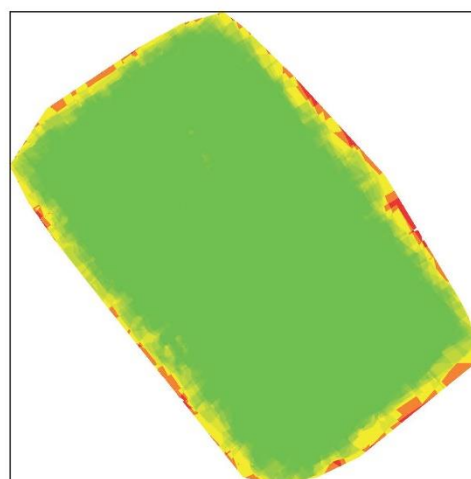




Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1976269
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	737583
Mean Reprojection Error [pixels]	0.125781

Internal Camera Parameters

CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(1). Sensor Dimensions: 6.17 [mm] x 4.63 [mm]

EXIF ID: CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3267.091 [pixel] 4.375 [mm]	2370.080 [pixel] 3.173 [mm]	1737.069 [pixel] 2.326 [mm]	-0.040	0.039	-0.020	0.000	0.005
Optimized Values	3272.193 [pixel] 4.381 [mm]	2377.829 [pixel] 3.184 [mm]	1738.774 [pixel] 2.328 [mm]	-0.041	0.042	-0.022	-0.000	0.006

Internal Camera Parameters

CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(2). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.628 [mm]

EXIF ID: CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3267.091 [pixel] 4.375 [mm]	2370.080 [pixel] 3.173 [mm]	1737.069 [pixel] 2.326 [mm]	-0.040	0.039	-0.020	0.000	0.005
Optimized Values	3269.715 [pixel] 4.378 [mm]	2376.110 [pixel] 3.182 [mm]	1741.591 [pixel] 2.332 [mm]	-0.041	0.042	-0.023	0.000	0.006

Internal Camera Parameters

CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(3). Sensor Dimensions: 6.170 [mm] x 4.628 [mm]

EXIF ID: CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3267.091 [pixel] 4.375 [mm]	2370.080 [pixel] 3.173 [mm]	1737.069 [pixel] 2.326 [mm]	-0.040	0.039	-0.020	0.000	0.005
Optimized Values	3273.244 [pixel] 4.383 [mm]	2374.786 [pixel] 3.180 [mm]	1738.438 [pixel] 2.328 [mm]	-0.040	0.040	-0.021	-0.000	0.006

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	21818	2360
Min	7246	229
Max	71558	12401
Mean	24118	2483

2D Keypoints Table for Camera CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(1)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
--	----------------------------------	--

Median	21557	2436
Min	7246	254
Max	63458	12401
Mean	23256	2531

2D Keypoints Table for Camera CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(2)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	22282	2336
Min	9487	772
Max	60852	6406
Mean	26002	2502

2D Keypoints Table for Camera CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(3)

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	22008	2321
Min	7299	229
Max	71558	10742
Mean	24357	2435

Median / 75% / Maximal Number of Matches Between Camera Models

	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(1)	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(2)	CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(3)
CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(1)	29 / 125 / 1322	28 / 109 / 5047	28 / 116 / 10050
CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(2)		43 / 148 / 3052	31 / 116 / 3329
CanonIXUS127HS_4.3_4608x3456 (RGB)(3)			29 / 123 / 1846

3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	524965
In 3 Images	109214
In 4 Images	43170
In 5 Images	21679
In 6 Images	12459
In 7 Images	7921
In 8 Images	5321
In 9 Images	3811
In 10 Images	2634
In 11 Images	1947
In 12 Images	1323
In 13 Images	1002
In 14 Images	710
In 15 Images	480
In 16 Images	329
In 17 Images	208
In 18 Images	156
In 19 Images	98
In 20 Images	73
In 21 Images	36
In 22 Images	24
In 23 Images	14
In 24 Images	6
In 25 Images	3

3D Points from 2D Keypoint Matches

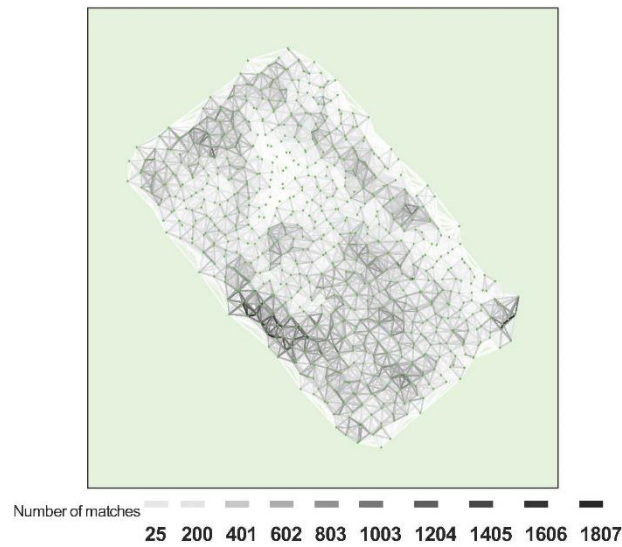


Figure 5: Top view of the image computed positions with a link between matching images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images.

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1 (3D)	0.020/0.020	-0.008	0.002	-0.002	0.598	19 / 19
2 (3D)	0.020/0.020	0.002	-0.007	0.003	0.381	19 / 19
11 (3D)	0.020/0.020	0.008	-0.003	0.002	0.385	20 / 20
17 (3D)	0.020/0.020	0.002	-0.001	-0.005	0.451	21 / 21
21 (3D)	0.020/0.020	-0.000	0.006	-0.000	0.374	18 / 18
22 (3D)	0.020/0.020	-0.000	-0.006	0.002	0.489	16 / 16
26 (3D)	0.020/0.020	-0.002	-0.005	-0.001	0.363	19 / 19
27 (3D)	0.020/0.020	-0.001	0.014	0.001	0.464	14 / 14
Mean		-0.000019	0.000072	0.000023		
Sigma		0.004362	0.006603	0.002334		
RMS Error		0.004362	0.006603	0.002334		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-11.37	0.00	0.00	100.00
-11.37	-9.10	0.00	0.00	0.00
-9.10	-6.82	0.00	0.25	0.00
-6.82	-4.55	0.00	0.13	0.00
-4.55	-2.27	0.25	5.03	0.00
-2.27	0.00	15.83	66.21	0.00
0.00	2.27	66.08	26.51	0.00
2.27	4.55	16.96	1.76	0.00
4.55	6.82	0.88	0.13	0.00
6.82	9.10	0.00	0.00	0.00
9.10	11.37	0.00	0.00	0.00

11.37	-	0.00	0.00	0.00
Mean		1.065236	-0.596165	-43.550128
Signa		1.353326	1.302906	1.565848
RMS Error		1.722271	1.432821	43.578269

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolag Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	4.059392
Phi	4.309644
Kappa	4.956792

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

**PRILOGA B: UPORABLJENI PARAMETRI ZA KLASIFIKACIJO S PROGRAMOMA
GLIDAR IN LASTOOLS**

NASTAVITVE GLIDAR - OBMOČJE RADOVLJICA

Korak	Parameter	thin05_1.las	v1	v2	v3	v4
D T M	Resolution	1	1	1	1	1
	Max size	35	40	35	37	35
	k	0.05	0.13	0.07	0.11	0.07
	n	0.41	0.14	0.35	0.21	0.35
	smoothing	NO	NO	NO	0.5	NO
	outliers size	10	10	10	10	10
	outliers height	3	3	3	3	3
G R O U N D	k	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	n	0.3	0.1	0.6	0.4	0.5
	use cone	NO	NO	NO	Y	NO
	outliers size	10	10	10	10	10
	outliers height	3	3	3	3	3
B U I L D I N G	Ground dist	2	1	1	1	1
	Error treshhold	0.1	0.13	0.15	0.14	0.13
	Roof normal	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7
	Minimum points	2000	70000	70000	70000	75000
	Fitting window	1	1	1	1	1
	outliers size	10	10	10	10	10
	outliers height	3	3	3	3	3
V E G E T A T I O N	Error treshhold	0.05	0.1	0.05	0.07	0.07
	Fitting window	1	2	1	1	2
	Grass level	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Remove wires	YES	YES	YES	Y	Y
	Min wire height	5	5	5	5	5
	OTR	NO	NO	NO	y	NO
	Single class	YES	YES	YES	Y	y
	Low veg	1	1.5	1	1	1
	Mid veg	5	5	5	5	5
	High veg	50	50	50	50	50
	outliers size	10	10	10	10	
outliers height	3	3	3	3		

NASTAVITVE LASTOOLS

:settings 1

```
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -city -ultra_fine -compute_height -odix "c" -olaz  
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.4 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set1"  
del *.laz
```

:settings 2

```
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -city -coarse -compute_height -odix "c" -olaz  
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.4 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set2"  
del *.laz
```

:settings 3

```
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -town -ultra_fine -compute_height -odix "c" -olaz  
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.4 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set3"  
del *.laz
```

:settings 4

```
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -metro -ultra_fine -compute_height -odix "c" -olaz  
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.4 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set4"  
del *.laz
```

:settings 5

```
D:\lastools\bin\lasground.exe -i *.laz -city -ultra_fine -compute_height -odix "c" -olaz  
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.2 -rugged 0.4 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set5"
```

:settings 6

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.5 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set6"
```

:settings 7

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.3 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set7"
```

:settings 8

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.1 -rugged 0.3 -ground_offset 2 -step 1 -olaz -odir "set8"
```

:settings 9

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.2 -rugged 0.5 -ground_offset 2 -step 2 -olaz -odir "set9"
```

:settings 10

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.2 -rugged 0.5 -ground_offset 1 -step 2 -olaz -odir "set10"
```

:settings 11

```
D:\lastools\bin\lasclassify.exe -i *.laz -planar 0.2 -rugged 0.2 -ground_offset 1 -step 2 -olaz -odir "set11"
```

pause

PRILOGA C: NUMERIČNI REZULTATI VSEH IZVEDENIH KLASIFIKACIJ

