

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



26202843

Kandidatka:

Mateja Zalokar

Trirazsežno modeliranje zgradb iz lidarskih podatkov na primeru mesta Domžale

Diplomska naloga št.: 857

Mentor:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Somentor:

Luka Šolar

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **MATEJA ZALOKAR** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»TRIRAZSEŽNO MODELIRANJE ZGRADB IZ LIDARSKIH PODATKOV NA
PRIMERU MESTA DOMŽALE«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 21.2.2011

Mateja Zalokar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 528.7/.8(043.2)

Avtor: Mateja Zalokar

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

Somentor: Luka Šolar, univ. dipl. inž. geod.

Naslov: Trirazsežno modeliranje zgradb iz lidarskih podatkov na primeru mesta Domžale

Obseg in oprema: 50 str., 3 pregl., 4 graf., 38 sl., 4 en.

Ključne besede: zračno lasersko skeniranje, modeliranje, lidar, zgradbe, TerraScan

Izvleček

V diplomski nalogi je obravnavan postopek izdelave 3D modelov zgradb na osnovi lidarskih podatkov. Cilj je čim bolj enostavno in učinkovito predstaviti dejansko stanje zgradb na terenu in preveriti uporabnost avtomatske vektorizacije zgradb iz lidarskih podatkov s programskim paketom TerraSolid. Predstavljen je celoten postopek od zajema podatkov do končnega izdelka. V teoretičnem delu so opisane osnove zračnega laserskega skeniranja (ZLS) in obdelave podatkov, pridobljenih s tehnologijo ZLS. Praktični del naloge je izdelan na primeru mesta Domžale. V praktičnem delu je predstavljena merska oprema, uporabljena za izvedbo zračne misije, potek snemanja, obdelava podatkov ter predstavitev in uporaba programskega paketa TerraSolid za potrebe modeliranja zgradb. Ob izvedbi naloge smo ugotovili, da je avtomatsko modeliranje, na podlagi lidarskih podatkov, s programskim paketom TerraSolid sicer precej enostavno, vendar je za natančno definiranje oblike zgradb potrebno še veliko ročnega dela. Izdelani modeli so uporabni predvsem za primerjavo z nepremičninskimi evidencami, za potrebe prostorskega načrtovanja, predstavitve mesta in turizma.

BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION

- UDK:** 528.7/.8(043.2)
- Author:** Mateja Zalokar
- Supervisor:** Assist. Prof. Dr. Mojca Kosmatin Fras, Univ. Grad. In Geod. Eng.
- Cosupevisor:** Luka Šolar, Univ. Grad. In Geod. Eng.
- Title:** Three-dimensional building modeling from lidar data based on the case of the town Domžale
- Notes:** 50 p., 3 tab., 4 graph., 38 fig., 4 eq.
- Key words:** airborne laser scanning, modeling, lidar, buildings, TerraSolid

Abstract

In the diploma thesis the procedure of creating a 3D model of buildings from lidar data is treated. The goal is to present in a simple and efficient way the actual state of buildings on a field and check the usability of automatic vectorisation of buildings from lidar data with program package TerraSolid. Entire procedure, from data acquisition to final product is presented. In theoretical part the basics of airborne laser scanning (ALS) and processing of data, acquired with ALS technology, are described. Practical part was made on the case of the town Domžale. Within this part the measuring equipment, used for realization of air mission, recording of data, data processing and use of the program package TerraSolid for the 3D building modeling are presented. We found out that automatic building modeling, based on lidar data, with TerraSolid is quite simple, but for defining the accurate shape of the roofs, a lot of manual work was still needed. 3D models are mostly used for comparison with real-estate records, in the spatial planning, town presentation and tourism.

ZAHVALA

Hvala mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras za usmerjanje in pomoč ne samo pri diplomski nalogi, ampak tekom celotnega študija.

Hvala celotnemu kolektivu podjetja Flycom d.o.o, še posebej somentorju Luku Šolarju.

Hvala staršem, sošolcem, prijateljem za prijetno preživljanje študijskih let in Tilnu za vzpodbudo in nasvete pri pisanju.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | UVOD | 1 |
| 2 | LIDARSKI SNEMALNI SISTEM | 3 |
| 2.1 | Osnovni princip | 3 |
| 2.2 | Sistem laserskih skenerjev | 4 |
| 2.3 | Princip merjenja razdalje | 5 |
| 2.4 | Elektrooptični sistem | 7 |
| 2.4.1 | Zaznavanje odbojev laserskega žarka | 8 |
| 2.5 | Sistem za pozicioniranje in orientacijo | 9 |
| 2.6 | Enota za kontroliranje in shranjevanje podatkov | 11 |
| 2.7 | Združitev sistemov DGPS in INS | 11 |
| 2.8 | Tipični parametri ZLS | 12 |
| 2.9 | Natančnost trirazsežnih koordinat laserskih točk. | 14 |
| 3 | OBDELAVA PODATKOV | 16 |
| 3.1 | Sinhronizacija POS in LS..... | 16 |
| 3.2 | Georeferenciranje in kalibracija | 16 |
| 3.3 | Filtriranje in klasifikacija | 19 |
| 3.4 | Modeliranje | 20 |
| 3.5 | Uporaba ZLS | 22 |
| 4 | MODELIRANJE ZGRADB IZ LIDARSKIH PODATKOV NA PRIMERU MESTA DOMŽALE | 25 |
| 4.1 | Merska oprema | 25 |
| 4.2 | Potek zračne misije | 27 |
| 4.2.1 | Priprava leta..... | 27 |
| 4.2.2 | Pridobljeni podatki..... | 29 |
| 4.3 | Referenčni podatki..... | 29 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.4 | Obdelava zajetih podatkov | 31 |
| 4.5 | Natančnost snemanja..... | 32 |
| 4.6 | TerraSolid..... | 35 |
| 4.6.1 | Ujemanje oblakov laserskih točk..... | 35 |
| 4.6.2 | Avtomatska klasifikacija laserskih točk | 37 |
| 4.6.3 | Transformacija točk | 39 |
| 4.6.4 | Modeliranje zgradb | 40 |
| 4.6.5 | Nivo detajla (ang. Level Of Detail, LOD) | 44 |
| 4.7 | Problemi in posebnosti | 45 |
| 5 | ZAKLJUČEK..... | 49 |
| VIRI | | 51 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 1: Tipični parametri pri ZLS..... | 13 |
| Preglednica 2: Parametri leta..... | 27 |
| Preglednica 3: Razlaga parametrov za vektorizacijo zgradb..... | 41 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Zračno lasersko skeniranje (ALS, www.optech.ca)..... | 3 |
| Slika 2: Sistem LiDAR (povzeto po Shan, Toth 2009)..... | 5 |
| Slika 3: Princip merjenja razdalje: pulzni in valovni laserski skener (po Shan, Toth 2009)..... | 6 |
| Slika 4: Primer optičnih skenerjev (povzeto po Shan, Toth 2009)..... | 7 |
| Slika 5: Vzorec skeniranja pri skenerju z optičnimi vlakni (povzeto po Shan, Toth 2009)..... | 8 |
| Slika 6 : Koti INS: A -nagib, B-naklon, C-zasuk (Triglav Čekada, 2009)..... | 11 |
| Slika 7: Potek obdelave lidarskih podatkov | 16 |
| Slika 8: Georeferenciranje (povzeto po Shan, Toth 2009) | 17 |
| Slika 9: Ročice med sistemi | 18 |
| Slika 10: Združevanje enostavnih oblik v kompleksne modele. | 20 |
| Slika 11: Enostaven in kompleksen topološki graf | 21 |
| Slika 12: 3D modeli zgradb | 23 |
| Slika 13: Klasifikacij elektrovodov (žice in stebri) (Flycom d.o.o.) | 23 |
| Slika 14: Eurocopter EC 120B (Flycom d.o.o) | 25 |
| Slika 15: Komponente lidarskega sistema LITteMapper..... | 26 |
| Slika 16: Načrtovan potek linij snemanja (Flycom d.o.o.)..... | 28 |
| Slika 17: Dejanska pot leta (Flycom d.o.o.) | 29 |
| Slika 18: Primeri kontrolnih točk (Flycom d.o.o.) | 30 |
| Slika 19: Pregledna karta referenčnih točk (Flycom d.o.o.)..... | 30 |
| Slika 20: Potek procesa obdelave podatkov | 32 |
| Slika 21: Neujemanje oblaka laserskih točk, prej in potem (www.terrasolid.fi)..... | 36 |
| Slika 22: a) Originalni podatki, b) Podatki popravljeni za nagib, c) Podatki popravljeni za dz (www.terrasolid.fi) | 36 |
| Slika 23: Parametri za klasifikacijo tal in zgradb | 37 |
| Slika 24: Napake pri klasifikaciji zgradb | 38 |
| Slika 25: a) Dodajanje točk, b) Obod zgradbe na tleh..... | 39 |
| Slika 26: Parametri transformacije | 40 |
| Slika 27: Nastavitev parametrov za vektorizacijo zgradb | 41 |
| Slika 28: Primer pravilne avtomatske vektorizacija enostavne strehe. | 42 |
| Slika 29: Orodje za vektorizacijo zgradb | 42 |
| Slika 30: Orodje poišče presek dveh ravnin | 43 |
| Slika 31: Kombinacija vseh orodij | 43 |
| Slika 32: Orodje za razdelitev dveh ravnin. | 43 |
| Slika 33: Nesovpadanje laserskih točk s posnetkom zaradi 'zvrnjene' visoke zgradbe | 44 |
| Slika 34: Nivoji detajla zgradb | 45 |
| Slika 35: Problematični dimniki | 45 |
| Slika 36: Blokovsko naselje, nepopravljeno | 46 |
| Slika 37: Popravljeno blokovsko naselje..... | 47 |
| Slika 38: Banka..... | 47 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|---|----|
| Grafikon 1: Odstopanja kodnih opazovanj (Flycom d.o.o)..... | 33 |
| Grafikon 2: Odstopanja faznih opazovanj (Flycom d.o.o)..... | 33 |
| Grafikon 3: Razlika natančnosti GPS naprej in nazaj (Flycom d.o.o.) | 34 |
| Grafikon 4: Razlika natančnosti GPS naprej in nazaj (Flycom d.o.o.) | 34 |

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

| | |
|-------|---|
| 3D | ang. three dimensional – trirazsežno |
| ALS | ang. airborne laser scanning – zračno lasersko skeniranje |
| DGPS | ang. differential global positioning system – diferencialni globalni sistem za določanje položaja |
| DMP | digitalni model površja |
| DMR | digitalni model reliefa |
| DMV | digitalni model višin |
| GNSS | ang. global navigation satellite system – globalni navigacijski satelitski sistem |
| GPS | ang. global positioning system – globalni sistem za določanje položaja |
| IMU | ang. inertial measurement unit – inercialna merska enota |
| INS | ang. inertial navigation system – inercialni navigacijski sistem |
| LIDAR | ang. light detection and ranging – svetlobna detekcija in merjenje razdalje |
| LOD | ang. level of detail – nivo detajla |
| LS | ang. laser scanner – laserski skener |
| POS | ang. position and orientation system – sistem za pozicioniranje in orientacijo |

1 UVOD

Zračno lasersko skeniranje (ZLS) oziroma lidar se v zadnjih letih zelo hitro razvija. Strokovnjaki iščejo nove, hitreje metode obdelovanja in pridobivanja rezultatov za različne uporabnike. Uporaba podatkov ZLS je zelo široka, zato se zaradi razvoja tehnologije krog uporabnikov iz leta v leto širi na zelo različna področja. Iz prvotne uporabe za snemanja profilov, se danes ZLS uporablja za kartiranje infrastrukturnih koridorjev, upravljanje gozdov, rekonstrukcijo in iskanje arheoloških najdišč, evidentiranje kulturne dediščine, meritve obalnih območij, meritve na dnevnih kopih in deponijah, prostorsko planiranje in načrtovanje naselij idr.. Ena izmed novejših tehnik uporabe lidarskih podatkov je izdelava 3D modelov mest. Najpomembnejši oziroma najbolj pogost rezultat obdelave lidarskih podatkov je digitalni model reliefa (DMR). Poleg digitalnega modela reliefa pa je vse bolj aktualno modeliranje zgradb, kar omogoča boljšo trirazsežno vizualizacijo prostora.

Light Detection And Ranging ali krajše lidar, je tehnologija, ki na podlagi časa potovanja svetlobnega pulza, smeri in izhodiščnega položaja, ki ga določata GNSS (ang. Global Navigation Satellite System) in IMU (ang. Inertial Measurement Unit), določi podatke o koordinatah objekta. Podatki so trirazsežni (x , y in z). Velika prednost lidarja je možnost zajema točk z veliko gostoto v zelo kratkem času. Poleg tega laserska svetloba ni občutljiva na delce v zraku (npr. oblaki, megla, smog). Določena količina žarkov najde prosto pot tudi skozi krošnje dreves, zato lahko dobimo odboj od tal tudi na z drevjem poraščenih območjih. Čeprav ta tehnologija prinaša veliko pozitivnih lastnosti, je potrebno vedeti, da velika količina podatkov še ne zagotavlja dobrih rezultatov, prej težave z njihovo obdelavo. Pred vsakim snemanjem je potrebno dobro pretehtati, kakšna gostota točk še omogoča zadovoljivo natančnost in želene rezultate ter ne povzroča dodatnih težav pri interpretaciji rezultatov.

Osnovni namen naloge je modeliranje zgradb določenega območja na osnovi lidarskih podatkov. Cilj naloge je čim bolj enostavno in učinkovito predstaviti dejansko stanje zgradb na terenu preko virtualiziranega modela in preveriti uporabnost avtomatske vektorizacije zgradb iz lidarskih točk s programskim paketom TerraSolid.

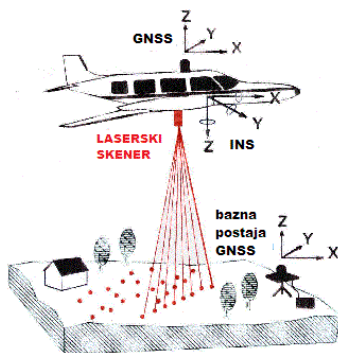
Praktični del naloge sem opravila v podjetju Flycom d.o.o iz Žirovnice, ki mi je priskrbelo potrebne podatke in omogočilo uporabo strojne ter programske opreme. Sodelovala sem pri izdelavi digitalnega modela reliefa, nato pa sem se posvetila spoznavanju orodij za modeliranje zgradb v TerraScan in izdelavi 3D modelov zgradb.

Diplomska naloga je sestavljena iz teoretičnega in praktičnega dela. Teoretični del obsega poglavji 2 in 3. V 2. poglavju je opisana tehnologija zračnega laserskega skeniranja, v 3. poglavju pa je predstavljen potek obdelave lidarskih podatkov. Praktični del naloge je predstavljen v 4. poglavju, kjer je opisan praktični postopek izdelave modelov zgradb na območju mesta Domžale, vse od zajema podatkov do modeliranja zgradb. Rezultati in končne ugotovitve so povzete v 5. poglavju.

2 LIDARSKI SNEMALNI SISTEM

2.1 Osnovni princip

Svetlobno zaznavanje in merjenje razdalje oziroma Light Detection And Ranging je tehnologija, ki se hitro razvija in se čedalje bolj uporablja na različnih področjih. Te so geodezija, gozdarstvo, arheologija, izmera tras daljnovodov, idr. Trirazsežni podatki se izračunajo na podlagi izhodiščnega položaja, smeri in merjenja časa potovanja svetlobe od izvora do sprejema po odboju od objekta. Za zajem s helikopterjem, letalom oziroma drugim zračnim plovilom se uporablja laserski skener, ki je običajno pritrjen na dno oziroma ob strani plovila (slika 1). Svetlobni vir predstavlja laserska svetloba. Lastnosti laserske svetlobe so: velika intenziteta, enakomerna porazdelitev intenzitete po preseku žarka, koherentnost, majhna divergenca in značilna valovna dolžina. Svetloba je usmerjena proti napravi za odklon žarkov. Žarek se pod določenim kotom usmeri proti tlam, se od terena odbije in pripotuje nazaj, kjer detektor v laserskem skenerju zabeleži čas potovanja žarka. Na podlagi časa se posredno meri dvojno razdaljo od tarče do senzorja. Hkrati pa se zabeleži še kot odklona žarka na skenerju. Različni skenerji (naprava za odklon žarka) odklanjajo žarke v različnih smereh, kar pomeni drugačen vzorec skeniranja prečno na smer leta.



Slika 1: Zračno lasersko skeniranje (ALS, www.optech.ca)

Položaj in orientacija sta določeni s sistemoma GNSS (ang. Global Navigation Satellite System) in INS (ang. Inercial Navigation System). Za potrebe obdelave podatkov je pomembno, da so sistemi sinhronizirani in da se beleži časovna informacija, na podlagi katere kasneje združimo podatke za pridobitev trirazsežnih koordinat laserskih točk. Položaji točk se

ne računajo v realnem času, ampak po naknadni obdelavi. Za izračun potrebujemo merjene razdalje laserskega skenerja, izhodiščni položaj žarka in vse tri kote zasuka plovila oziroma orientacijo (INS).

2.2 Sistem laserskih skenerjev

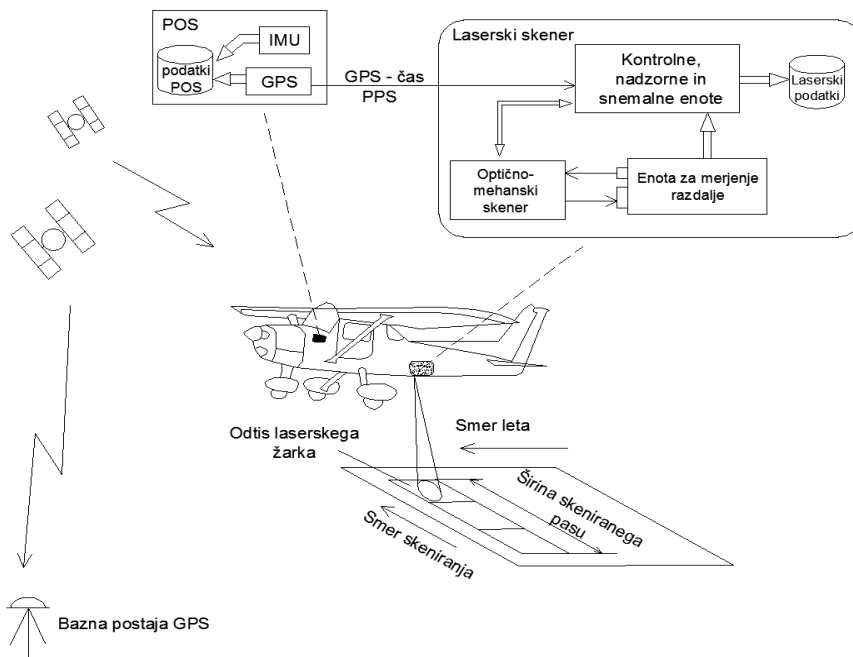
Laserski skenerji pripadajo družini aktivnih senzorjev, saj imajo svoj vir svetlobe, tarča je osvetljena od samega senzorja. Meritve so zato neodvisne od zunanje osvetlitve. Za pridobitev korektnih rezultatov sam lidar ni dovolj. Sistem vsebuje zračno in zemeljsko enoto (slika 2). Zračno enoto sestavljajo:

- zračna platforma,
- lidar (optično mehanski skener, razdaljemer, enota za shranjevanje in kontroliranje podatkov),
- sistem za določanje položaja in orientacije (POS – ang. Position and Orientation System).

Zemeljsko enoto sestavljajo:

- GPS referenčna postaja,
- procesna, strojna in programska oprema za sinhronizacijo in registracijo.

Med letom lidar zapisuje podatke v svojem lokalnem sistemu. Bazna referenčna postaja GPS na tleh pa s kombinacijo GPS meritev na plovilu omogoča kasnejšo obdelavo in izračun položaja platforme z diferencialnim GPS (DGPS). LiDAR in POS merita neodvisno. Pozicija in orientacija sta shranjeni kot funkciji GPS časa. Podatki laserskega skenerja so prav tako zabeleženi s časovnimi odčitki (ang. Time stamp), generiranimi iz sprejemnika GPS. To omogoča sinhronizacijo skenerja in POS. Po sinhronizaciji lahko vektor vsake laserske točke transformiramo v želeni koordinatni sistem (Shan, Toth 2009).



Slika 2: Sistem LiDAR (povzeto po Shan, Toth 2009)

2.3 Princip merjenja razdalje

Pri laserskem skenerju elektromagnetno valovanje v optičnem spektru omogoča laser (ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), kar pomeni ojačitev svetlobe s spodbujanjem sevanjem valovanja. Merjenje razdalje z laserskim razdaljmerom je posredno preko časa, ki ga potrebuje žarek za potovanje od oddajnika do detajla na tleh in nazaj do sprejemnika. Čas je merjen direktno. Laserski razdaljmer mora zato poleg laserja in oddajno – sprejemne optike vsebovati tudi števec časovnih intervalov. Oddajna in sprejemna enota sta postavljeni tako blizu skupaj, da je pot oddanega in sprejetega žarka enaka optični poti.

Ker žarek prepotuje dvakratno razdaljo, je enačba za izračun razdalje med senzorjem in točko na površju, na podlagi merjenega časa, sledeča:

$$R = \frac{c}{2} \cdot t_L , \quad (1)$$

kjer je:

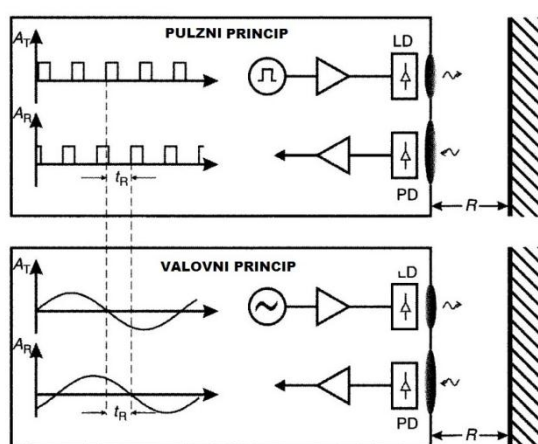
c....hitrost svetlobe,

t_Lčas potovanja svetlobnega pulza.

Obstajata dva tipa laserskih skenerjev in s tem tudi dve vrsti posrednega načina določitve razdalje. Prvi je pulzni oziroma diskretni, drugi pa je valovni oziroma zvezni laserski skener. Principa uporabljata različni fizikalni količini, vendar dejansko oba sistema merita čas potovanja svetlobnega pulza med oddajo in sprejemom (slika 3).

Pulzni laser razdaljo določa z merjenjem pretečenega časa od trenutka oddaje do trenutka sprejema odbitega signala. Sistem oddaja kratke pulze elektromagnetnega valovanja in meri njihove odboje. Odbojev je lahko več. S pulznim laserjem lahko zagotovimo visoko prostorsko ločljivost in možnost povečanja gostote meritev. Ker so taki sistemi zelo razširjeni, je snemanje relativno poceni. Slabost sistema pa so zahtevni algoritmi obdelave velike količine podatkov (Švab Lenarčič, 2009).

Valovni laser pa določa razdaljo z določitvijo faznih razlik med oddanim in sprejetim, od tal odbitim signalom. Amplituda signala je sinusno modelirana, zato lahko na sinusoidi določimo čas začetka in konca meritev. Sistem signal oddaja neprekinjeno, kar omogoča beleženje vertikalnega profila predmetov, pri katerih je prišlo do odboja. Podatki so za shranjevanje in obdelavo preprostejši, prostorska ločljivost pa je v primerjavi s pulzni laserjem slabša (Švab Lenarčič, 2009).



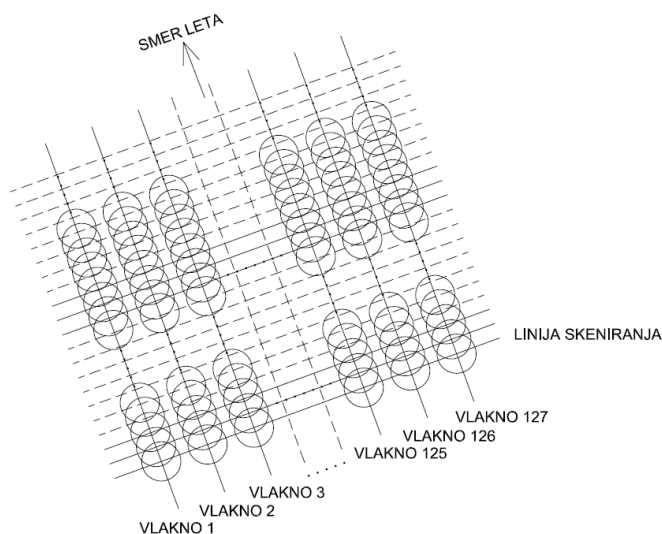
Slika 3: Princip merjenja razdalje: pulzni in valovni laserski skener (po Shan, Toth 2009)

2.4 Elektrooptični sistem

Tako kot se razlikujejo laserski skenerji po principu merjenja razdalje, se razlikujejo tudi po napravi za odklon laserskih žarkov (ang. scanner). Naprava usmeri laserski žarek pravokotno na smer leta nosilca in meri njegov odklon. S tem poskrbi za dvodimenzionalni zajem površja, saj z merjenjem razdalj dobimo le točkovne podatke v smeri leta nosilca. Odklon laserskega žarka (ang. scan angle) definira rotacijo med laserskim žarkom in lasersko napravo. Izmerjen je neposredno iz frekvence pulzov (Triglav, 2004). Razlike med skenerji so precej velike. Glavna lastnost po kateri se razlikujejo je vzorec, ki ga laserski skener oriše na tleh. Vzorci so odvisni tudi od topografije terena, hitrosti in smeri leta (slika 4). Najpogosteje uporabljene elektrooptične komponente so skener z nihajočim zrcalom (ang. oscilating mirror), skener z vrtečo prizmo (ang. poligon mirror), Palmerjev skener in skener z optičnimi vlakni (ang. fiber scanner)(slika 5).

| VRSTA | PRINCIP | VZOREC SKENIRANJA |
|----------------------------|---------|-------------------|
| SKENER Z NIHAJOČIM ZRCALOM | | |
| SKENER Z ROTIRAJOČO PRIZMO | | |
| PALMERJEV SKENER | | |

Slika 4: Primer optičnih skenerjev (povzeto po Shan, Toth 2009)



Slika 5: Vzorec skeniranja pri skenerju z optičnimi vlakni (povzeto po Shan, Toth 2009)

Vsi skenerji so oblikovani tako, da je izguba oddane in sprejete laserske energije ob odboju minimalna in je smer odklonjenega žarka znana z ustrezno natančnostjo, ki zadostuje končni položajni natančnosti laserskih točk na površju.

Žarek se ob udaru ob tarčo lahko odbije disperzno, zrcalno ali pa odboja sploh ni. Kakšen je prečni prerez odboja laserskega žarka je odvisno od koeficienta odbojnosti tarče, razmerja med sprejeto in odbito energijo na tarči.

2.4.1 Zaznavanje odbojev laserskega žarka

Laser oddaja elektromagnetno valovanje, valovne dolžine med 0,1 μm do 3mm, odvisno od proizvajalca. Ob interakciji s površjem ima laserski žarek tri možnosti. Lahko se absorbira, lahko gre 'skozi' površje (transmisija-prepust) ali se odbije. Za nas je najbolj zanimiva zadnja možnost, saj prvi dve ne omogočata merjenja razdalje. Najpogosteje pa se zgodi mešanica vseh treh možnosti. Koliko valovanja se bo odbilo, koliko se ga bo absorbiralo ali transmitiralo, je odvisno od valovne dolžine energije ter vrste in stanja predmeta, ki interagira z valovanjem. Žarek se lahko odbije na dva načina:

- zrcalni odboj,
- razpršeni (disperzni) odboj.

Zrcalni odboj se zgodi v primeru, ko je površina objekta gladka. Pri tem je valovna dolžina večja od značilne razdalje na površju in se vsa energija odbije po odbojnem zakonu, pri katerem je odbojni kot enak vpadnemu. Pri zrcalnem odboju laserski žarek načeloma ne pride nazaj do sprejemnika. Lahko pa se zgodi, da ta usmerjeni žarek na poti zadene ob kakšen drug objekt (ang. multi path), se od njega difuzno odbije in ga sprejemnik zazna. V takem primeru je razdalja predolga in se obravnava kot groba napaka.

Do razpršenega odboja pride ob interakciji žarka z grobo površino. Valovna dolžina je približno enaka značilni razdalji na površju. Svetloba se odbije v vseh smereh zaradi mikroskopskih nepravilnosti na mejni ploskvi. Ta pojav je prisoten na vseh nesvetlečih objektih, ki niso črni (Wikipedija). Valovna dolžina laserja je izbrana tako, da se v večini primerov v naravi valovanje odbije razpršeno. V tem primeru se del valovanja odbije nazaj v sprejemnik in omogoča merjenje razdalje. Moč odbitega valovanja je odvisna od koeficienta odbojnosti tarče. Koeficient odbojnosti je razmerje med odbito in sprejeto energijo na tarči. Njegova vrednost se spreminja glede na uporabljeno svetlobo in lastnosti materiala tarče.

Kot smo že omenili, absorpcija in transmisija za nas nista zanimivi, ker ne omogočata merjenja razdalje. To pa ne pomeni, da sta nepomembni. Omogočata lažjo interpretacijo površja in neposredno vplivata na intenziteto odbitega signala.

Laserski skenerji lahko zaznajo en ali več odbojev. Najpogosteje se meri prvi in zadnji odboj. Nekateri laserski skenerji pa lahko registrirajo tudi pet ali več odbojev. Spet drugi pa omogočajo zajem skoraj neomejenega števila obojev, kar pomeni dovolj podatkov za izris vertikalnega profila objekta, skozi katerega potuje laserski žarek.

2.5 Sistem za pozicioniranje in orientacijo

Kot je navedeno v podpoglavju 2.1, je za izračun tridimenzionalnih koordinat točk na površju potrebno poznati položaj in orientacijo lidarja v izbranem koordinatnem sistemu za vsak časovni trenutek. Za ta namen se uporablja POS (ang. Position and Orientation System), ki je sestavljen iz DGPS (zahtevana referenčna postaja na tleh), s katerim se določa položaj laserskega senzorja in INS, ki določa smer laserskega žarka.

GPS za izračun položaja pri laserskem skeniranju uporablja kinematično metodo. Antena GPS je pritrjena na plovilo, na tleh pa postavljena referenčna postaja z znanimi koordinatami v državnem koordinatnem sistemu. Za zagotovitev ustrezne natančnosti naj referenčna postaja ne bi bila oddaljena več kot 25 km od plovila. Za večjo natančnost se izračun položaja računa po opravljeni letalski misiji in sicer z diferencialnim GPS. S temi meritvami lahko popravimo opazovanja za vpliv ionosfere in troposfere. Za določitev točnega položaja sensorja moramo zadostiti določenim zahtevam (Bitenc, 2007):

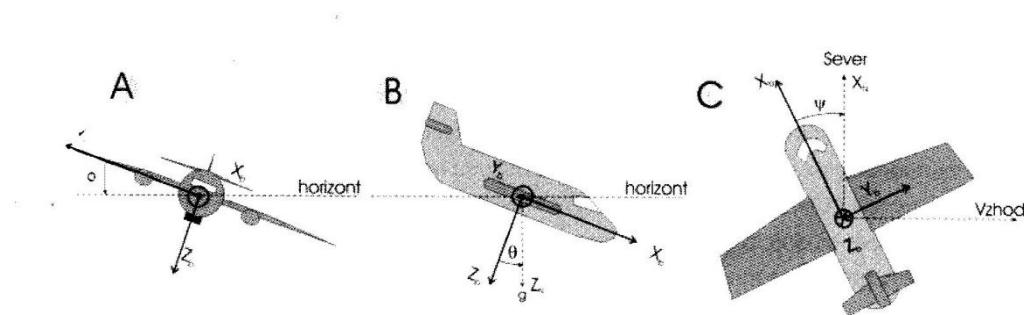
- imeti moramo dvofrekvenčni sprejemnik in izvajati moramo kodna in fazna opazovanja,
- geometrijska razporeditev satelitov v času snemanja mora biti čim bolj enakomerna,
- vidnost vsaj štirih satelitov, ne sme biti nobenih motenj satelitskih signalov.

Inercialni navigacijski sistem služi za navigacijo nosilca laserskega sistema. Deluje po načelu inercije, ki je po prvem Newtonovem zakonu gibanja vztrajanje telesa v mirovanju oziroma v konstantni vzdolžni in kotni hitrosti, razen če nanje ne vplivajo druge sile ali navori. Inercialno referenčni sestav je koordinatni sistem, kjer veljajo Newtonovi zakoni gibanja. (Grewal idr., 2001).

Senzorji gibanja v sistemu se imenujejo tudi inercialne merilne enote, IMU (ang. Inertial Measurment Unit). Inercialni senzorji merijo vrednosti zasukov in pospeške. Zasuke beležijo žiroskopi, pospeške pa merijo pospeškometri. Tipična IMU enota vsebuje tri žiroskope in tri merilce pospeškov. Inercialna merska enota je pritrjena čim bližje skenerju z namenom, da le ta beleži orientacijo in vibracije na dejanski lokaciji lidarja. Orientacijo sestavljajo trije koti: nagib (ang. roll), naklon (ang. pitch) in zasuk (ang. heading), ki so prikazani na sliki 6.

Žiroskopi predstavljajo referenčni koordinatni sistem za orientacijo pospeškometrov. Merilci pospeškov merijo spremembe pospeška v vsaki izmed treh osnih smeri. Računalnik opravi dve ločeni integraciji podatkov, ki jih prejme iz senzorjev. Rezultat prve integracije meritev pospeška je hitrost enote, ki je vhodni podatek za drugo integracijo, ki daje podatek o trenutnem položaju enote (Kozmus, 2000).

Inercialna navigacija uporablja podatke meritev žiroskopov in pospeškometrov za določitev položaja, hitrosti in smeri nosilca INS, ki je lahko letalo, helikopter, vesoljsko plovilo, kopno vozilo... (Grewal, 2001).



Slika 6 : Koti INS: A -nagib, B-naklon, C-zasuk (Triglav Čekada, 2009)

2.6 Enota za kontroliranje in shranjevanje podatkov

Enota za kontroliranje, nadziranje in shranjevanje podatkov je v lidarskem sistemu ključna. Usklajuje napravo za merjenje razdalje s skenerjem, tako da sproža laserske pulze sinhrono s hodom skenerja. Nadalje ta enota na trdi disk shranjuje podatke o merjenih razdaljah, kotih skeniranja, intenziteto, številu odbojev in visoko natančne časovne odčitke. Enota je sestavljena iz zmogljivih naprav za upravljanje s podatki, ker so količine podatkov, ki se shranjujejo na disk, ogromne. Moderni laserski skenerji, ki generirajo do 300 000 laserskih pulzov na sekundo, proizvedejo okrog 20 Gb podatkov na uro, medtem ko GPS in IMU skupaj le okrog 0.1 Gb/h. Upravljanje s podatki pri polnovalovnih laserjih je še bolj zahtevno, saj se digitalizira celotna slika odboja in ne samo nekateri odboji.

2.7 Združitev sistemov DGPS in INS

Tehnologiji DGPS in INS se dobro dopolnjujeta in omogočata natančno in neposredno določitev zunanje orientacije senzorja. DGPS zagotavlja položaj in hitrost, medtem ko INS

beleži informacijo o njegovem obnašanju, oziroma orientaciji. INS se uporablja tudi za zaznavo in odpravo izpada signala na anteni GPS in omogoča navigacijo tudi, ko GPS izgubi signal. Inercialne merske enote delujejo neodvisno od zunanjih razmer. Slabost inercialnih senzorjev je predvsem časovna nestabilnost, ki zmanjšuje natančnost, medtem ko je natančnost DGPS konstantna in neodvisna od časa. Pomanjkljivost instrumentov GPS je osveževanje podatka o položaju nosilca. Novejši instrumenti omogočajo osveževanje s frekvenco do 20 Hz, kar pa je še vedno mnogo manj od inercialnih senzorjev, ki zmorejo osveževanje tudi do frekvence 100 Hz (Kozmus, 2009). Združeni tehnologiji omogočata natančno določitev položaja in orientacije, konstantno navigacijo, tudi v primeru izpada signala. Možnih je več načinov povezave GPS in INS podatkov. Najpreprosteje je uporabiti GPS opazovanja za določitev položaja in INS opazovanja orientacije za izračun nagiba senzorja na osnovi istega referenčnega časa (Bruman, 2000).

Najpogosteje uporabljena metoda integracije GPS in INS opazovanj je Kalmanov filter. Kalmanov filter obdela vsa opazovanja, ne glede na njihovo natančnost, za pridobitev ocene trenutne vrednosti neznank v procesu z uporabo znanja o dinamiki sistema in lastnostih merilnih instrumentov, statičnega opisa šumov sistema, pogreškov opazovanj in nezanesljivosti dinamičnih modelov ter vseh razpoložljivih informacij o začetnih pogojih neznank v sistemu (Kozmus, 2002).

2.8 Tipični parametri ZLS

Tehnika ZLS se uporablja za različne uporabnike. Skupno vsem je največkrat želja po doseženi visoki natančnosti. Da je tehnika ZLS lahko tako uporabna, mora biti prilagodljiva. Za uspešen končni rezultat je potrebno upoštevati različne tehnične parametre. Nekateri so spremenljivi, drugi fiksni in se jih lahko izbere glede na operativne omejitve (moč laserja, kapaciteta spomina, itd). Tipični parametri in njihove tipične vrednosti v komercialnih sistemih ALS so po Briese, 2007, predstavljeni v preglednici 1:

Preglednica 1: Tipični parametri pri ZLS

| SPECIFIKACIJA | TIPIČNE VREDNOSTI |
|-------------------------------|--|
| Valovna dolžina | 0.6-1.5 μm |
| Dolžina pulza | 5-15 ns |
| Divergenca žarka | 0.2-1 mrad |
| Frekvenca pulzov | 300-200 kHz |
| Kot snemanja | 14°-75° |
| Frekvenca skeniranja | 25-650 Hz |
| Vzorec skeniranja | Cik-cak, paralelni, eliptični, sinusni |
| Velikost odtisa | 0.2-2 m |
| Število registriranih odbojev | 2-8 ali celotni odboj (ang. full-waveform) |
| Merjenje intenzitete | Da |
| Višina snemanja | 200-3000 m |
| Frekvenca GPS | 1-2 Hz |
| Frekvenca IMU | 128-1000 Hz |
| Višinska natančnost | 0.05-0-2 m |
| Položajna natančnost | 0.1-1 m |

Pri valovni dolžini laserja moramo upoštevati način odboja laserskega žarka od površine objekta, ki ga želimo meriti. Največkrat je izbrana tako, da je odbojnost rastlinstva največja, škodljivost za oči pa najmanjša (800 – 1100 nm). Manjše valovne dolžine so povezane z večjo energijo pulza, ta pa omogoča merjenje večjih razdalj, vendar je zaskrbljujoča varnost oči. Večje valovne dolžine na primer niso primerne za skeniranje snega in ledu, ker je odboj prešibak. Frekvenca pulzov je manjša z večanjem razdalje in skupaj s kotom skeniranja ter višino in hitrostjo leta določa gostoto pulzov. Frekvenca skenerja se manjša s povečanjem kota skeniranja. Maksimalno višino leta in s tem širino snemalnega pasu določa moč laserja. Prostorska ločljivost zabeleženih podatkov je odvisna od odtisa laserskega žarka na tleh oziroma od višine leta.

Natančnost je poleg višine leta, uporabljenih frekvenc itd. v največji meri odvisna od uporabljenega sistema POS, kako so izpolnjene zahteve merjenja DGPS in kakšen je postopek integracije DGPS in INS.

2.9 Natančnost trirazsežnih koordinat laserskih točk.

Trirazsežni položaj laserskih točk se določi iz podatkov o položaju žarka, smeri žarka in razdalji med senzorjem in tarčo. Glavne skupine faktorjev, ki vplivajo na natančnost so po Ahokas (2003):

1. Vplivi na natančnost sistema ZLS:

- Natančnost položaja senzorja, ki je odvisna od GPS strojne opreme, razporeditve satelitov v času merjenja, števila uporabljenih referenčnih postaj in kakovosti naknadne obdelave DGPS.
- Natančnost merjene razdalje.
- Natančnost določitve smeri laserskega žarka, ki je odvisna od kakovosti meritev INS, metode naknadne obdelave in integracije z GPS podatki.
- Natančnost časovne sinhronizacije, ki je odvisna od uskladitve sistemov za pozicioniranje in orientacijo z laserskim skenerjem. Če obstaja časovni zamik med temi sistemi in ga ne poznamo, lahko pride do napak.

2. Napake zaradi parametrov zajema

V to skupino štejemo napake lokacije tarče, ki so posledica parametrov zajema (gostota točk, višina snemanja, kot skeniranja, divergenca laserskega žarka,...).

Višina in smer snemanja ter divergenca laserskega žarka skupaj določajo velikost in obliko laserskega odtisa na tleh. Na območju enega odtisa na tleh se lahko nahaja več tarč z različnim trirazsežnim položajem. Položaj tarče je določen na osnovi merjenja razdalje od senzorja do tarče na osnovni smeri žarka. Tako imajo vse tarče znotraj enega odtisa tak trirazsežni položaj, kot da bi ležale na osnovni smeri žarka.

3. Napake zaradi obdelave podatkov

Na kakovost koordinat v veliki meri vpliva obdelava podatkov za izračun položaja senzorja in natančnost transformacije koordinat iz WGS84 v izbran lokalni koordinatni sistem. Višinska natančnost je odvisna od popravkov geoidne ondulacije. Prvi koraki obdelave so zelo pomembni, saj vse naknadne obdelave, kot so interpolacija, segmentacija, filtriranje, temeljijo na teh koordinatah in vplivajo na kakovost končnih rezultatov.

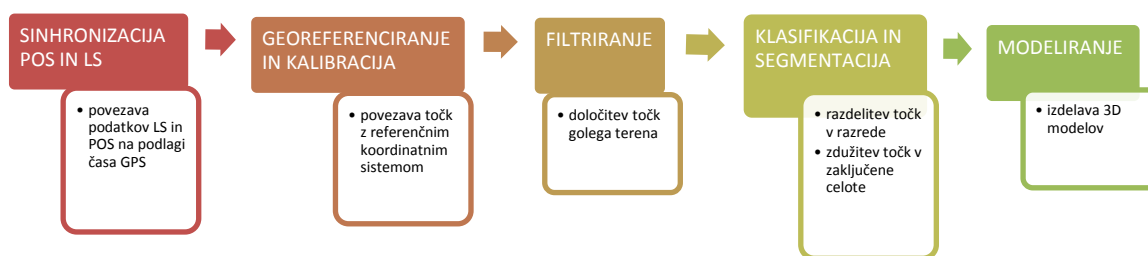
4. Napake zaradi značilnosti tarče

Na kakovost lokacije tarče vplivajo tudi naklon terena, gostota rastlinskega pokrova, vrsta materiala tarče in usmerjenost tarče glede na smer žarka (Kukko, 2007).

Na rezultate meritev in izračunane koordinate točk različne napake različno vplivajo. Končna napaka koordinat pa je kvadratni koren vsote kvadratov napak posameznih vplivov. Če želimo odpraviti oziroma zmanjšati vpliv motečih faktorjev, ki kvarijo kakovost merite, jih moramo poznati in se jih zavedati.

3 OBDELAVA PODATKOV

Po opravljeni zračni misiji sledi obdelava pridobljenih podatkov. Potek obdelave je predstavljen na sliki 7.



Slika 7: Potek obdelave lidarskih podatkov

3.1 Sinhronizacija POS in LS

V splošnem sta lidar in POS dve neodvisni enoti različnih proizvajalcev. Meritve laserskega skenerja so kontrolirane in shranjene preko kontrolne enote lidarja (ang. Lidar Control Unit, LCU), podatki GPS in INS pa preko računalniškega sistema POS (ang. Pos Computer System, PCS). Enoti delujeta vsaka v svojem časovnem sistemu, PCS je vezan na čas GPS, medtem ko je čas LCU definiran s svojo notranjo računalniško uro. Glavni cilj je uskladiti ti dve enoti na podlagi enakih časovnih odčitkov. O postopkih sinhronizacije komercialnih sistemov je objavljenega zelo malo. Očitno to ostaja proizvajalčeva skrivnost.

3.2 Georeferenciranje in kalibracija

Georeferenciranje ali neposredna orientacija laserskih meritev je postopek, pri katerem se polarne koordinate merjenih laserskih točk (razdalja in trenutni kot skeniranja) povežejo z referenčnim koordinatnim sistemom. Navigacijski podatki združenih sistemov DGPS in INS so podani v geocentričnem koordinatnem sistemu (npr. WGS84). Z natančno časovno sinhronizacijo sistemov DGPS, INS in LS pa neposredno pridobimo parametre zunanje

orientacije. Pomembno je, da za vsako meritev poznamo točen čas oziroma časovno razliko med sensorji, da lahko popravimo časovni zamik med njimi.

Na natančnost georeferenciranih podatkov najbolj vplivata kalibraciji lidarja in POS sensorjev. Z izboljšanjem natančnosti lidarskih podatkov v zadnjih letih, je tudi kalibracija pridobila na pomembnosti. Kalibracija je namreč glavni proces za odpravljanje sistematičnih pogreškov.

Direktno georeferenciranje (slika 8) lahko razložimo vektorsko in sicer:

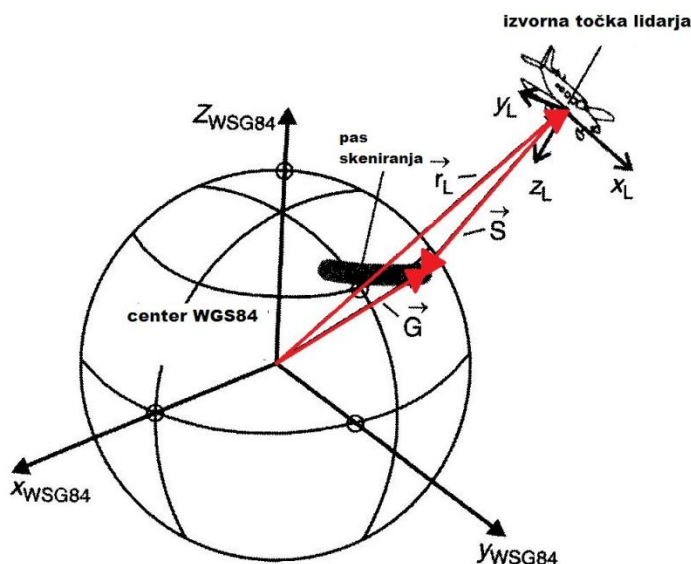
$$\vec{G} = \vec{r}_L + \vec{s}, \quad (2)$$

kjer je:

\vec{G}vektor od središča zemlje do točke na zemeljskem površju,

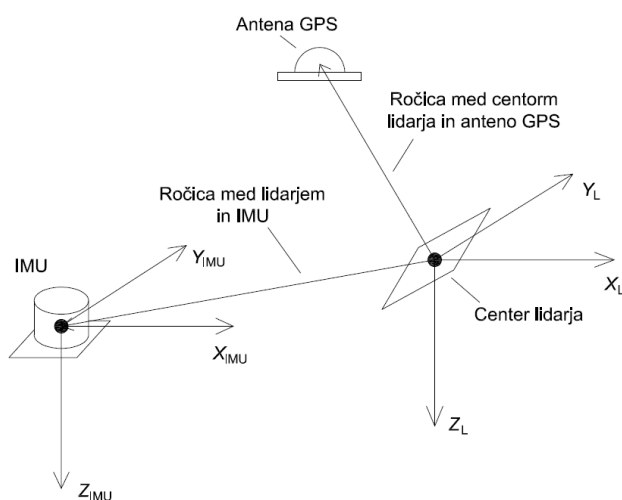
\vec{r}_Lvektor od središča zemlje do izhodiščne točke koordinatnega sistema lidarja,

\vec{s}poševna usmerjena razdalja med koordinatnem središčem lidarja in merjeno točko.



Slika 8: Georeferenciranje (povzeto po Shan, Toth 2009)

Izvorna točka lidarja je fiksna točka v 3D prostoru, ki predstavlja mesto izvora laserskega žarka. Dejanski položaj te točke je odvisen od laserskega skenerja. Tudi POS podatki morajo biti transformirani v koordinatni sistem s središčem v izvorni točki lidarja. Za potrebe te transformacije je potrebno pri procesiranju POS podatkov vnesti parametre ročic (ang. lever arms) oziroma dva 3D vektorja. Oba vektorja izhajata iz izvorne točke lidarja. Prvi se konča v centru IMU, drugi v faznem centru GPS antene (slika 9). Izvorna točka lidarja predstavlja izhodišče lidarskega koordinatnega sistema, kjer je x_L usmerjena v smer leta, y_L desno od smeri leta in z_L navzdol, pravokotno na ravnino, ki jo oklepata x_L in y_L .



Slika 9: Ročice med sistemi

Vektor \vec{r}_L je merjen in opisan na WGS84. Ker je vektor \vec{s} prav tako merjen v koordinatnem sistemu L, mora biti transformiran s transformacijsko matriko v WGS84. Sledi (Shan, Toth 2009):

$$G^{WGS84} = r_L^{WGS84} + (\Lambda_0, \Phi_0)_H^{WGS84} * (\omega, \varphi, \chi)_{IMU}^H * (\delta\omega, \delta\varphi, \delta\chi)_L^{IMU} * s_L \quad (3)$$

Transformacijska matrika $(\Lambda_0, \Phi_0)_H^{WGS84}$ vsebuje orientacijo med horizontalnim sistemom H in WGS84. Orientacija je definirana z geografsko širino in dolžino. Produkt matrik $(\omega, \varphi, \chi)_{IMU}^H$ in $(\delta\omega, \delta\varphi, \delta\chi)_L^{IMU}$ opisuje orientacijo koordinatnega sistema L s horizontalnim koordinatnim sistemom H. Ob predvidevanjih, da je položaj lidarja popolnoma skladen z IMU, imata koordinatna sistema L in IMU enako orientacijo. Iz tega sledi, da je matrika

$(\delta\omega, \delta\varphi, \delta\chi)_L^{IMU}$ enotska, kar pa ne velja vedno. Zasuk med koordinatnimi osmi L in IMU (ang. misalignment) podajajo koti $\delta\omega, \delta\varphi, \delta\chi$. Ti zasuki so določeni s kalibracijo, zato jih imenujemo tudi parametri kalibracije. Parametri so določeni s preletom referenčnega horizontalnega površja (stavbe, športna igrišča...) v različnih smereh. Kalibracijo izvedemo pred ali med snemanjem. Poleg kalibracije je za zmanjšanje sistemskih napak pomembna tudi oblika senzorskega sistema. Priporočljivo je, da sta IMU in LS čim bolj skupaj in antena GPS čim bližje ostalih senzorjev, da je zamik med sistemi čim manjši (Shan, Toth 2009).

3.3 Filtriranje in klasifikacija

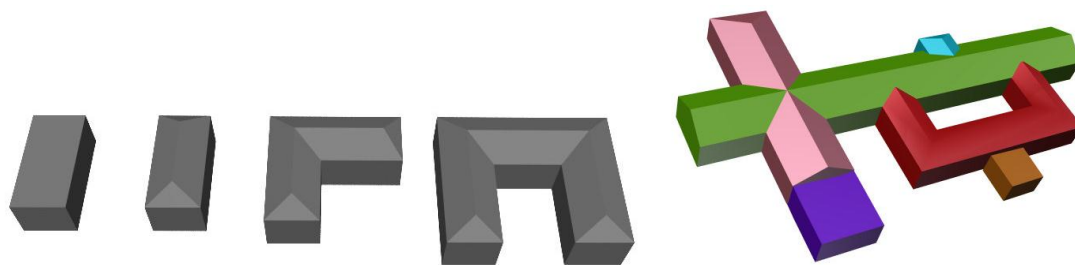
Oblak točk, posnet na urbanih območjih, vsebuje točke umetnih površin, kot so zgradbe, avtomobili, mostovi ter naravnih površin npr. gola tla, drevesa itn. Filtriranje podatkov je v splošnem postopek ločevanja zelenih podatkov od neželenih in se izvaja na oblaku točk, ki je očiščen grobih napak. Poleg tega pa je filtriranje tudi postopek, pri katerem se točke različno odbojnih površin razdelijo na točke, ki pripadajo ali ne pripadajo tlom.

Klasifikacija je postopek, kjer točke, na podlagi skupnih lastnosti, razdelimo v izbrane razrede. Število razredov je poljubno, odvisno od zahtev. Poznamo več metod klasifikacije laserskih točk. Najbolj enostavna klasifikacija je razdelitev točk po višini in se pogosto uporablja za razvrstitev točk vegetacije, od nizke do visoke. Ena od metod za klasifikacijo zgradb in vegetacije je primerjava med vrstami odbojev. Za točke na strehah se predvideva, da pripadajo pulzom z enim samim odbojem. Pulzi, ki zadenejo vegetacijo, pa imajo več odbojev. Pri polnovalovnem lidarju, kjer dobimo celotno obliko vrnjenega pulza, so metode nekoliko bolj komplicirane. Dober indikator za ločitev zgradb in vegetacije je širina pulza, ki je pri umetnih površinah ozek, pri vegetaciji pa širok.

3.4 Modeliranje

Zaznavanje stavb se začne na osnovi točk, ki po prvem koraku ne pripadajo tlom. Za iskanje stavb v oblaku točk, je bilo razvito veliko metod. Nekatere temeljijo samo na lidarskih podatkih, druge pa na kombinaciji podatkov lidarja s posnetki, zemljevidi, multispektralnimi podobami, IR posnetki... Različni avtorji so uporabljali metode, ki so na kratko povzete po Shan in Toth (2009). Haala in Brenner (1999) sta predstavila pristop za izdelavo 3D geometrije zgradb z uporabo digitalnega modela površja, pridobljenega iz podatkov zračnega laserskega skeniranja, 2D načrtov zgradb in terestričnih fotografij. Za določitev oboda stavbe je bil uporabljen načrt, medtem ko so za konstruiranje 3D pogledov bili uporabljeni lidarski podatki. Vosselman in Dijkman (2001) sta uporabila 3D Houghovo transformacijo za zaznavanje ravnih površin v oblaku točk. Slemenca streh so bila določena s preseki ravnin. Schenk in Csathó (2002) sta obod strehe pridobila iz pankromatskih podob glede na nestalnost teksture in tako izboljšala rezultate pridobljene iz lidarskih podatkov.

V nadaljevanju bom opisala metodo modeliranja zgradb iz lidarskih podatkov, ki temelji na združevanju preprostih oblik v zahtevne strukture streh. Primer je prikazan na spodnji sliki. Model kompleksne zgradbe je rezultat združitve enostavnih parametričnih oblik (slika 10).

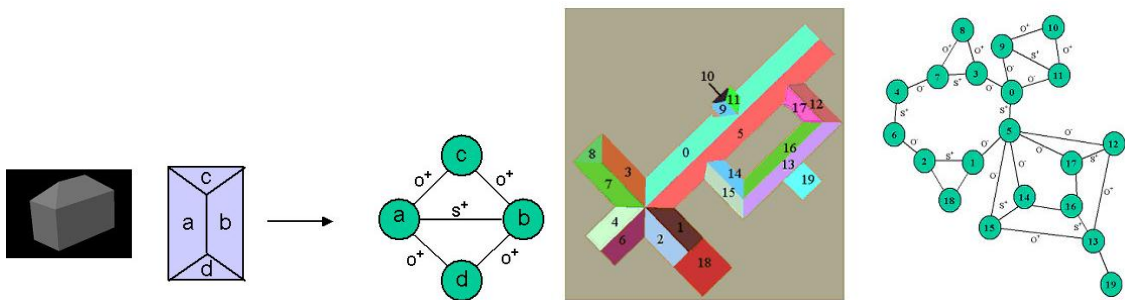


Slika 10: Zdrževanje enostavnih oblik v kompleksne modele.

Pomanjkljivost lidarskih senzorjev je, da dosežejo samo strehe zgradb, zato geometrije stranic zgradbe ne dobimo. Stranice zgradb se skonstruirajo tako, da se robovi streh vertikalno povežejo s tlemi. Prednost povezovanja preprostih oblik je v tem, da za opis vsake zgradbe potrebujemo malo parametrov. Na primer dvokapnica je lahko opisana s petimi parametri in sicer dolžino, širino, višino in dvema naklonoma. Prednost predstavitve zgradb s

parametričnimi oblikami pred množico poligonov je tudi enostavnejše popravljjanje. Algoritem je sestavljen iz štirih glavnih komponent: segmentacije¹ točk na strehi, sklepanja o obliki in topologiji strehe, iskanja ustrezne parametrične oblike ter glajenja terena, ki je predstavljeno s trikotniško mrežo, ustvarjeno z Dealuney-jevo triangulacijo.

Segmentacija poteka v dveh korakih. Prvi je odstranjevanje točk, ki ne pripadajo ravnini, drugi pa je identifikacija streh in tal. Za točke, katerih lokalni sosedje ne definirajo ravnine, se predvideva, da ne pripadajo ravnini. Običajno so te točke del ograj, drogov oziroma pripadajo vegetaciji. Za ustvarjanje topologije se uporablja topološki graf, pri katerem je vsaka ravna površina označena s točko. Točke so povezane, če in samo če imajo te ravne površine skupni rob. Oznake povezav so odvisne od položaja normal ravnin (slika 11). Ko je topološki graf zgrajen, se začne faza iskanja enostavnih parametričnih oblik. To poteka tako, da algoritem v kompleksnem topološkem grafu poišče manjše grafe, ki pripadajo enostavnim parametričnim strukturam.



Slika 11: Enostaven in kompleksen topološki graf

Predstavljen algoritem omogoča hitro in učinkovito avtomatsko modeliranje in dobro deluje tudi pri strehah, ki so deloma prekrite z vegetacijo. Veliko kompleksnih zgradb je možno modelirati kot kombinacijo enostavnih modelov, vendar to velja za bolj tipične zgradbe, saj pri zaobljenih, okroglih oblikah (kupole, stolpi) postopek ne deluje (Verma, Kumar, Hsu 2006).

¹ Segmentacija je postopek razvrščanje podatkov po določenih sorodnih karakteristikah.

3.5 Uporaba ZLS

Zajemanje večjih območij z laserskim skeniranjem, je v primerjavi z drugimi tehnikami hitro in ima veliko prednost pred drugimi, saj laserski žarek lahko prodira skozi krošnje dreves. Ta lastnost je privedla do tega, da je bila prvotno načrtovana uporaba ZLS za kartiranje območij, poraslih z drevjem. Dandanes pa se vse bolj uporablja tudi na področjih, na katerih to prvotno ni bilo načrtovano. ZLS lahko nastopa kot samostojni vir podatkov, velikokrat pa za določeno uporabo predstavlja dopolnjujočo metodo ostalim obstoječim tehnikam zajema. Za gozdarstvo in obalno inženirstvo pa ZLS še vedno ponuja prednosti, ki niso dosegljive z nobeno drugo tehniko. Razvoj ZLS tehnike je usmerjen v združevanje z drugimi senzorji kot so digitalni, stereo in termo fotoaparati. ZLS se v največji meri uporablja za:

- Izdelavo DMR

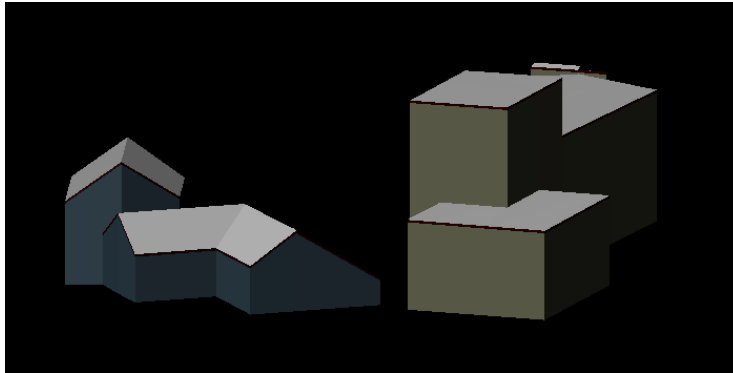
ZLS omogoča hiter zajem velikega števila topografskih podatkov. Prednost pred ostalimi metodami je natančen podatek o višinah točk in velika gostota teh točk. DMR nastane s filtracijo ne-terenskih točk in interpolacijo ostalih, na terenu ležečih, točk.

- Obalno inženirstvo

Za potrebe obalnega inženirstva ima pred drugimi tehnikami ZLS veliko prednost, saj omogoča hitro skeniranje priobalnega območja in njegovo posodabljanje. Uporablja se tudi za nadzorovanje pasu plimovanja.

- Modeliranje

Iz oblaka točk dobimo natančne višine objektov. Zaradi te lastnosti se ZLS uporablja za izdelavo 3D modelov zgradb (slika 12), parkov, 3D digitalnih modelov mest, ki se uporabljajo za namen planiranja infrastrukture, novih gradenj, telekomunikacijskega omrežja in omogočajo simulacijo odtekanja odpadne vode ter primerjavo s katastrom. Skupaj z digitalno sliko se 3D modeli uporabljajo za prikaz mesta za potrebe turizma in virtualne sprehode skozi mesto.



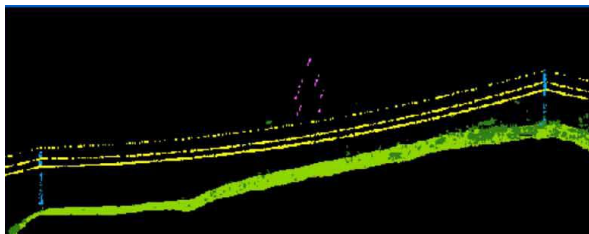
Slika 12: 3D modeli zgradb

- **Gozdarstvo**

Pri poraščenem terenu, se laser po večini odbije od listov in vej, kljub temu pa določena količina žarkov najde prosto pot skozi krošnje, pri čemer dobimo odboj od tal. ZLS za potrebe gozdarstva omogoča modeliranje krošenj, ki so pridobljene kor razlika med DMP² in DMR³. Pridobijo se informacije o tleh pod drevesi ter višinah in gostoti dreves, ki so za gozdarsko industrijo pomembne.

- **Kartiranje infrastrukture**

ZLS se vse bolj uporablja tudi za preglede in nadziranje infrastrukture, kot so daljnovodi, plinovodi, avtoceste itn. Pri pregledu daljnovodov kombinacija ZLS, navadne digitalne in IR kamere zagotavlja hitro in natančno ugotavljanje in odpravo napak (manjkajoči izolatorji, poškodovani stebri, zaraščanje trase, pregrevanje) (Flycom d.o.o). Določajo se natančni 3D položaji stebrov, daljnovodnih žic in njihova povešenost (slika 13). Z ZLS se pregledujejo tudi plinovodi in sicer za namenom zaznavanja sprememb nad vodom in v varnostnem koridorju (nedovoljeni izkopi, novogradnje).



Slika 13: Klasifikacij elektrovodov (žice in stebri) (Flycom d.o.o.)

² Digitalni model površja se izračuna z interpolacijo vseh registriranih laserskih točk.

³ Digitalni model reliefa se izračuna z interpolacijo laserskih točk golega terena.

- Arheologija

Za potrebe arheologije je pomembno, da tehnika zajema omogoča prepoznavanje majhnih višinskih razlik in struktur, kar pa ZLS s povečanjem gostote točk omogoča.

- Študija poplavnih območij

Za študijo poplavnih območij se uporabljata visoko natančna DMR in DMV, ki sta osnova za simulacijo poplav ob pričakovani porasti vode.

- Zaščita naravne dediščine

ZLS se za zaščito naravne dediščine uporablja predvsem na težko dostopnih mestih, kot so na primer mokrišča, barje, na katerih se pregleduje obstoječe stanje in spremlja spreminjanje krajine.

4 MODELIRANJE ZGRADB IZ LIDARSKIH PODATKOV NA PRIMERU MESTA DOMŽALE

Domžale so ena večjih občin v Sloveniji in združujejo 51 vasi. Občina šteje 33.912 prebivalcev (statistični urad RS 2.9.2009) in pokriva 72 km² površine. V občini veliko raziskav in sredstev namenijo novim tehnologijam pridobivanja podatkov za potrebe prostorskega planiranja in skrbi za okolje, saj intenzivno kmetijstvo, cestni in tovorni železniški promet, industrija in gosta individualne pozidave potencialno ogrožajo okolje. V ta namen je bil izdelan tudi projekt izvedbe digitalnega modela višin za potrebe izdelave študije poplavnosti. Celoten projekt, od zračnega laserskega skeniranja do izdelave digitalnega modela reliefa, je izdelalo podjetje Flycom d.o.o. Ti podatki so bili nato uporabljeni tudi za namen te diplomske naloge. Zračno lasersko skeniranje je bilo izvedeno 7. in 8. aprila 2010.

4.1 Merska oprema

Za izvedbo zračne misije je bil uporabljen helikopter Eurocopter EC120B (slika 14), v katerega je vgrajen merski sistem LiteMapper (LM) 5600.



Slika 14: Eurocopter EC 120B (Flycom d.o.o)

Sistem LM5600 omogoča popolno analizo vrnjenega odziva in zazna neomejeno število odbojev od tarče, kar nam omogoča zelo natančen pogled na vertikalno strukturo vegetacije in

drugih ovir na poti žarka do površja. Mehanizem skenerja temelji na vrteči se prizmi, ki zagotavlja paralelni vzorec skeniranja. Neprestano vrteč se skener, ki odklanja laserski žarek, je odporen na spremembo temperature in na pospeševanje. To sta dva vpliva, ki sta pri zračnih laserskih misijah pogosto prisotna. Sistem LM5600 je sestavljen iz komponent, ki so predstavljene na sliki 15. Uporabljen je bil skener Riegl LMS Q560, digitalna kamera Hasselblad H39, GPS sprejemnik Novatel OEV/OEM4 internal, INS AEROcontrol 256 Hz in navigacijski sistem CCNS4.



Slika 15: Komponente lidarskega sistema LiteMapper

4.2 Potek zračne misije

4.2.1 Priprava leta

Domžale so le 15 km oddaljene od letališča Brnik, zato je bilo potrebno skrbno načrtovanje letalske misije, da le ta ne bi motila letalskega prometa. Pri pripravi leta so pomembne nekatere lastnosti in parametri laserskega skenerja in karakteristike digitalnega snemalnega sistema, ki so podane v preglednici 2.

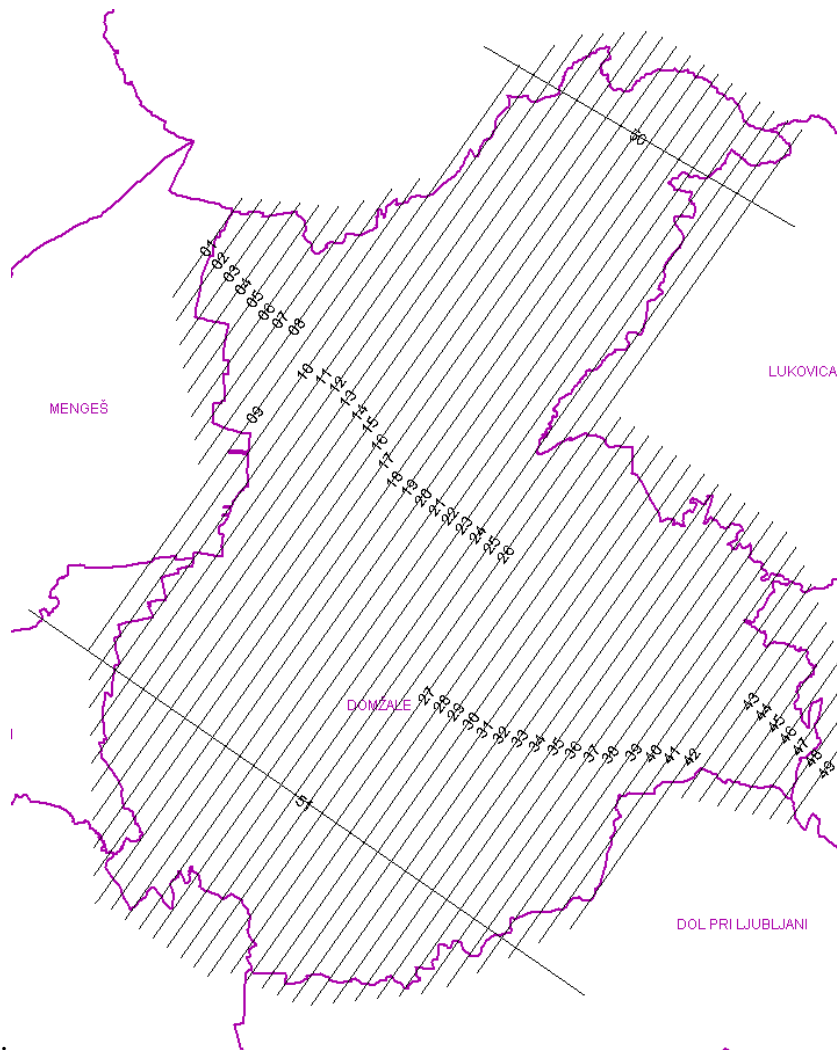
Preglednica 2: Parametri leta

| PARAMETER | VREDNOST |
|-----------------------------|-----------------|
| Hitrost | 60 kts |
| Višina snemanja nad terenom | 900 m |
| Frekvenca laserja | 120 kHz |
| Kot skeniranja | 60° |
| Divergenca žarka | 0.5 mrad |
| Objektiv | 100 mm |
| Orientacija objektiva | prečno (across) |
| Interval med slikama | 3.7 s |

Glede na višino leta in kot skeniranja, se lahko po enačbi 4 izračuna širina skeniranega pasu:

$$SW = 2 * h * \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

kjer je h višina leta in α kot skeniranja. Širina skeniranega pasu tako znaša 1039m. Ker je bil načrtovan štirikratni preklop skeniranja, razdalja med dvema vzporednima linijama meri 260 m. Pri letenju na višini 900 m je gostota laserskih točk na 2,5 točki/m². Pri štirikratnem preklopu to pomeni 10 točk/m². Kamera je ozkokotna s 100 milimetrskim objektivom. Preklop med slikami je v vzdolžni smeri 60% in v prečni smeri 50%. Kamera na tleh pokrije površino 145 590 m².

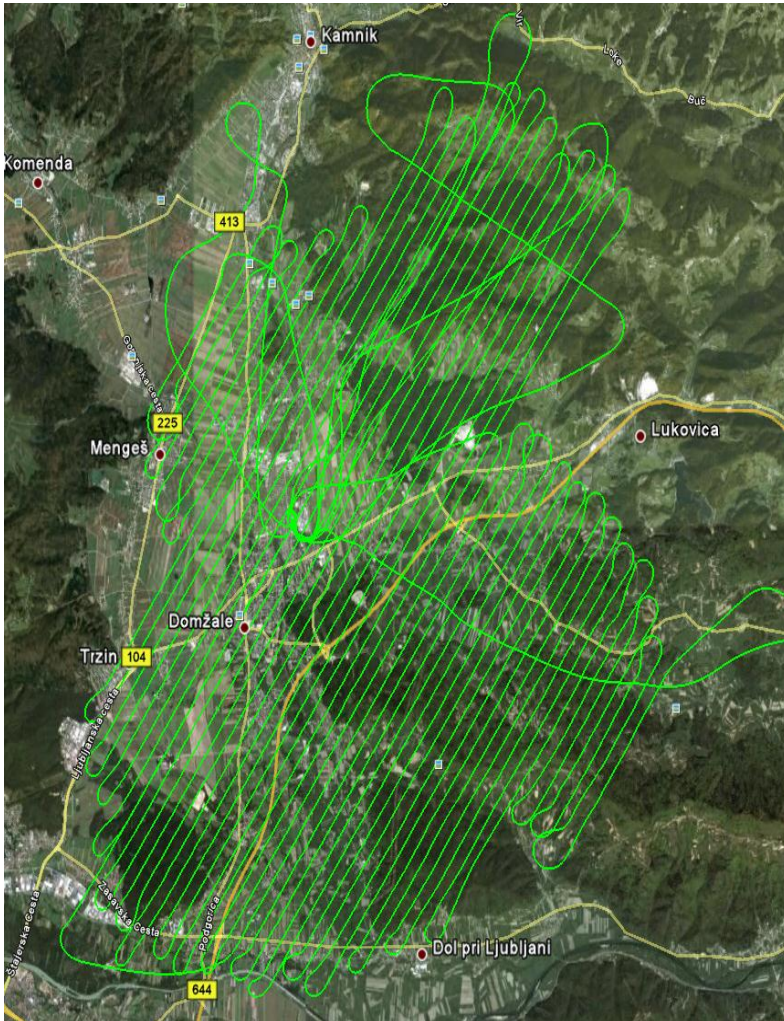


Slika 16: Načrtovan potek linij snemanja (Flycom d.o.o.)

Vseh skupaj je bilo predvidenih 51 linij in sicer 49 vzporednih ter dve prečni za potrebe ujemanja linij skeniranja (ang. matching), kar znaša skupno 399 km leta (slika 16). Smer leta je bila izbrana pravokotno na smer linije letal, ki so namenjena na/iz letališča Brnik Pri izbiri linij je upoštevana tudi konfiguracija terena.

4.2.2 Pridobljeni podatki

Obravnavano območje, na katerem je bilo posnetih 3275 fotografij in 8453 termičnih posnetkov, obsega 72 km². Oblak laserskih točk skupno vsebuje 832 634 899 točk. Dosežena je gostota 11,6 točk/m². Dejanska pot leta je prikazana na sliki 17.



Slika 17: Dejanska pot leta (Flycom d.o.o.)

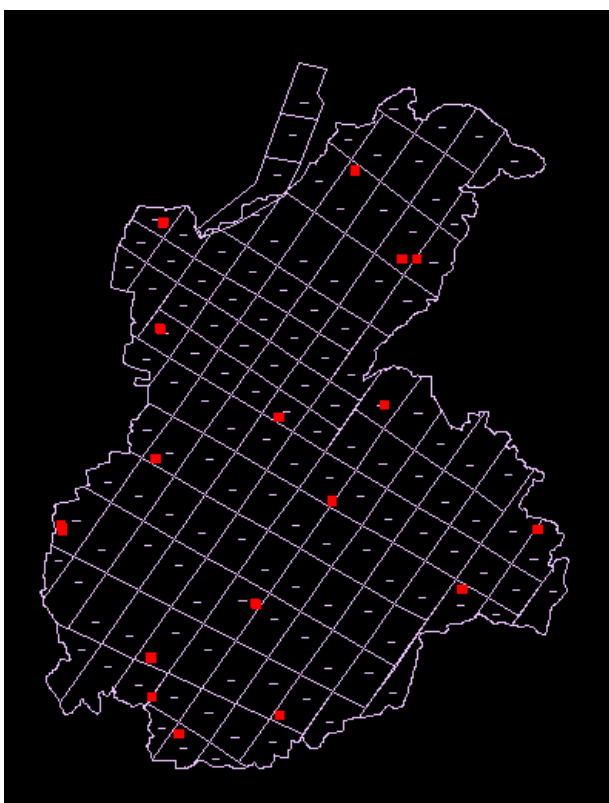
4.3 Referenčni podatki

Oslonilne točke, ki so izmerjene v referenčnem koordinatnem sistemu, sližijo za usklajevanje pasov snemanja, hkrati pa jih lahko uporabimo tudi v postopku izdelave ortofota. Kontrolne

točke pa služijo za potrebe položajne (planimetrične in višinske) natančnosti končnih izdelkov. Točke so bile izmerjene s terestričnim GPS sprejemnikom Trimble R8. Izbrane so bile tiste točke, ki so na aeroposnetkih dobro vidne, ležijo na tleh in imajo odprto obzorje (sliki 18 in 19).



Slika 18: Primeri kontrolnih točk (Flycom d.o.o.)



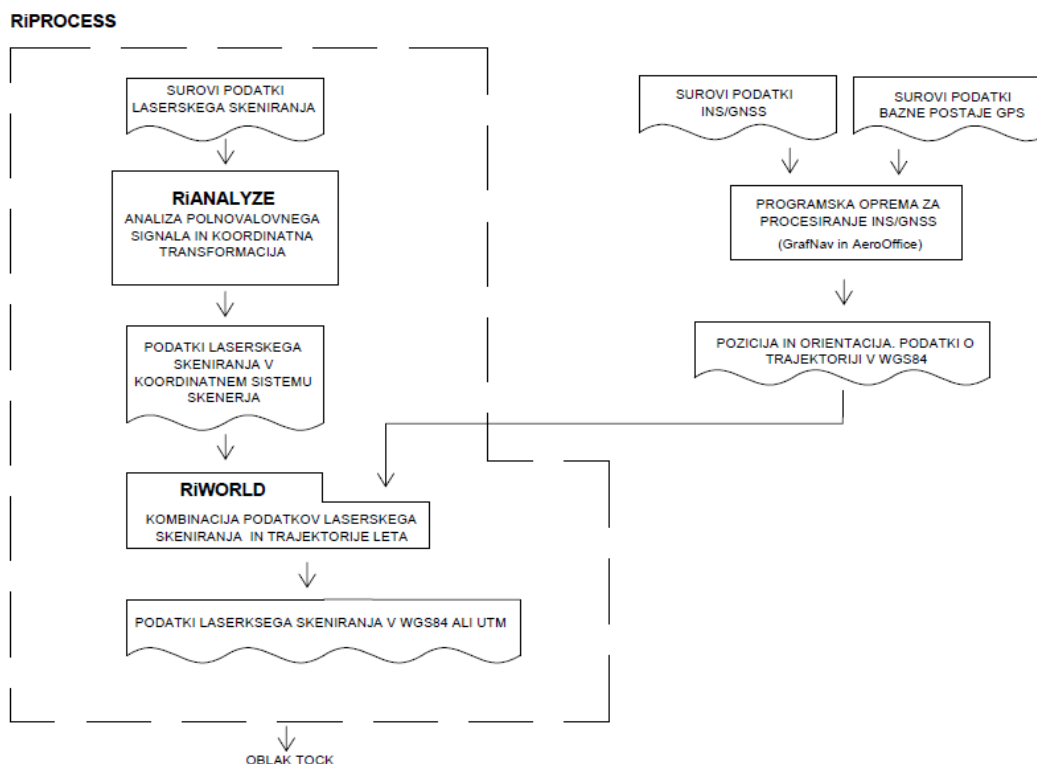
Slika 19: Pregledna karta referenčnih točk (Flycom d.o.o.)

4.4 Obdelava zajetih podatkov

Obdelava podatkov GPS je bila izvedena s programoma Waypoint GrafNav in Aerooffice. Waypoint GrafNav je paket za procesiranje surovih GPS podatkov. Združuje podatke iz sprejemnika GPS na letalu in podatke bazne postaje na tleh. Uporabljen je predvsem za zračne aplikacije oziroma za rekonstrukcijo trajektorije leta. GPS položaj je določen za 0,5 sekundni interval. Pri prvem procesiranju so se uporabili prednastavljeni parametri za zračni GNSS. Pridobljeni sta bili natančnosti surovih kodnih in faznih opazovanj (ang. RMS CA code in RMS carrier phase). Parametri so se nato popravili in izvedlo se je drugo procesiranje. Po končanem postopku je bila ocenjena položajna natančnost, ki smo jo primerjali z vrednostjo dopustnega odstopanja (± 3 cm Combine Forward/Reverse procesing). Rezultat je GPS trajektorija (ASCII format).

Nadaljnja obdelava je sledila v programu AeroOffice, kjer smo GPS podatke združili s podatki IMU. Razlike položajev GPS/IMU na linijah snemanja so prikazane na grafikonu 4. Rezultat je trajektorija leta, pridobljena na osnovi izvedenja podatkov GPS in IMU opazovanj, s središčem v enoti IMU.

Obdelava lidarskih podatkov je potekala s programoma podjetja Riegl, RiANALYZE in RiWORLD (slika 20). Vhodni podatki so bili surovi laserski podatki, zapis katerih je tovarniško zakodiran. RiANALYZE pretvori podatke iz surovega zapisa v numerično analogni zapis. Dobili smo podatke o odboju pulza, dolžino do tarče, intenziteto odboja, kot odklona skenerja in čas pulzov. Te podatke smo nato glede na čas združili v programu RiWORLD. Na osnovi jakosti odboja, širine odboja in naklona tarče smo izvedli tudi preliminarna klasifikacija točk. Kot rezultat smo za vsako lasersko točko dobili sledeče podatke: čas snemanja, koordinate v WGS84 (Φ , λ , h – elipsoidna višina), kot odklona skenerja, pod katerim je bila točka posneta, intenziteto, število odboja in pripadajoč razred po preliminarni klasifikaciji. Ti podatki so služili kot vhodni podatki za nadaljnjo obdelavo in transformacijo v programskem okolju TerraSolid.

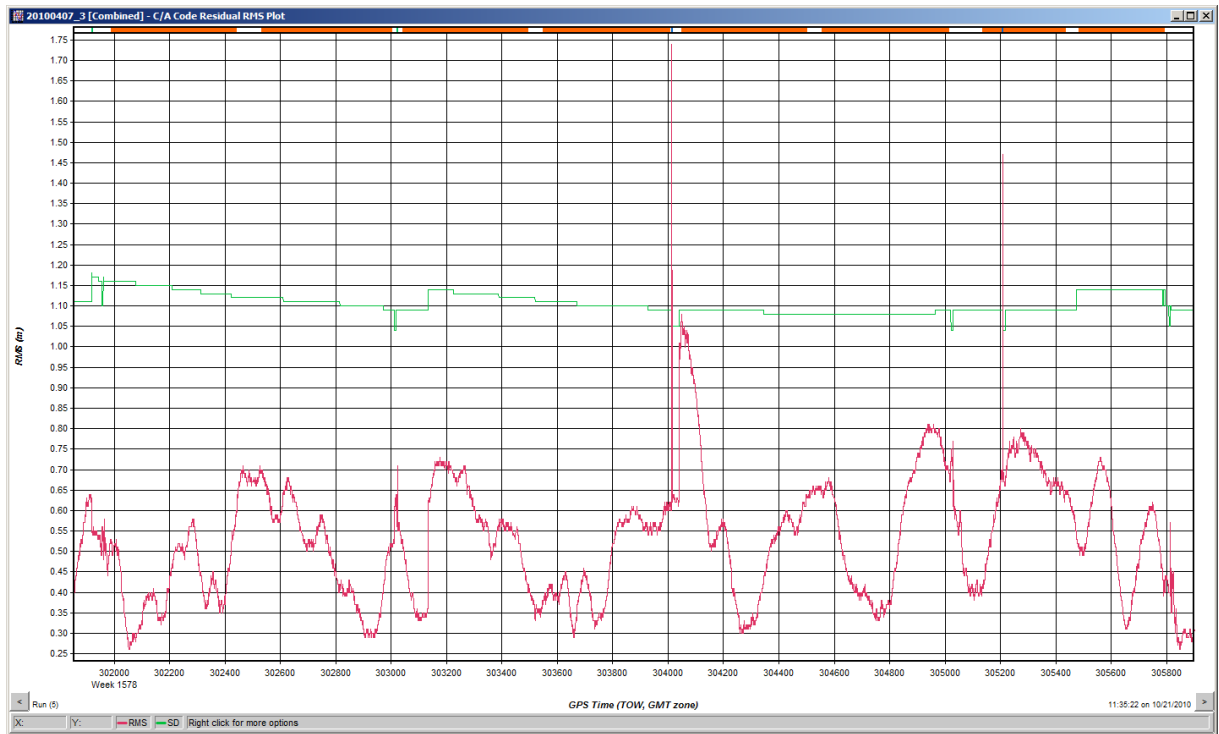


Slika 20: Potek procesa obdelave podatkov

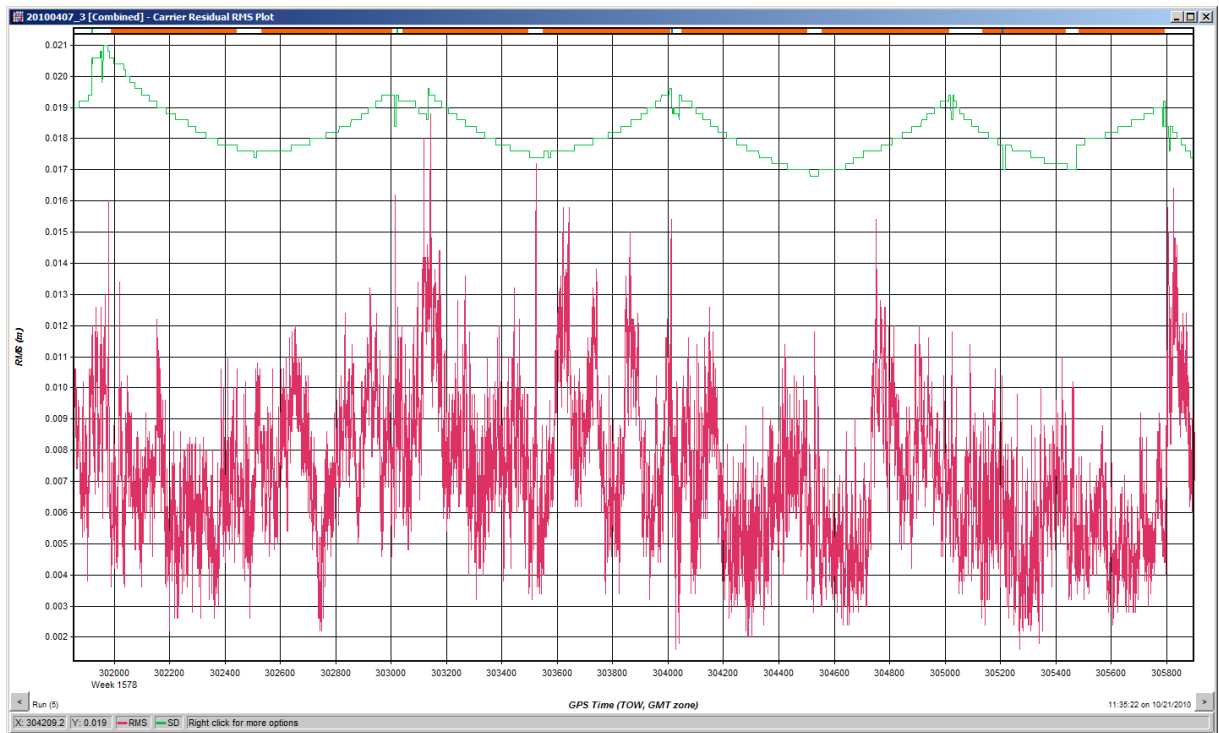
4.5 Natančnost snemanja

V postopku naknadne obdelave DGPS, je bila na osnovi podatkov GPS in podatkov baznih postaj omrežja SIGNAL, izračunana natančna trajektorija leta, hkrati pa tudi natančnost določitve položaja helikopterja za vsak trenutek pol sekundnega intervala. Podatki baznih postaj so bili interpolirani.

Natančnosti kodnih in faznih opazovanj surovih GPS podatkov so predstavljene na grafikonih 1 in 2. Grafikon 3 prikazuje razliko natančnosti določitve položaja (x, y, z) merjeno naprej in nazaj. Največje odstopanje je po pričakovanjih na zavojih. Pri postprocesiranju v programu AeroOffice, kjer smo združili podatke GPS in IMU, smo dobili graf razlik določitve koordinat x, y, z med GPS in IMU. Položaj se je določil na vsake pol sekunde, kar je razvidno tudi iz grafikona 4.



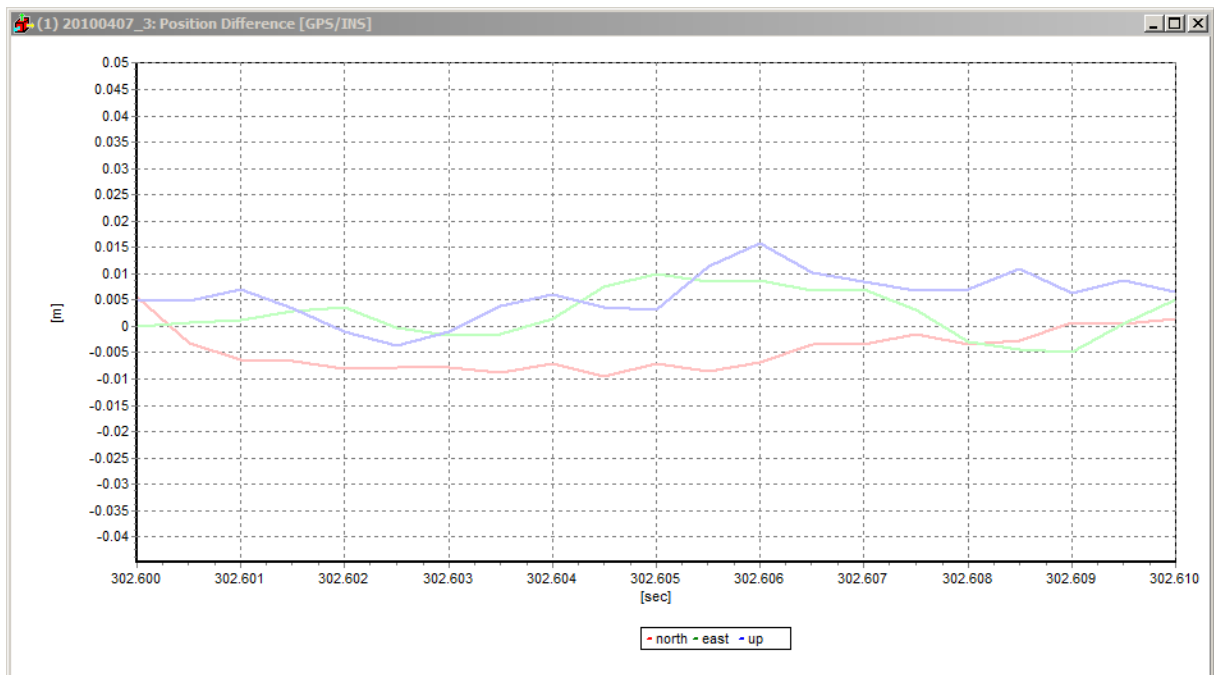
Grafikon 1: Odstopanja kodnih opazovanj (Flycom d.o.o.)



Grafikon 2: Odstopanja faznih opazovanj (Flycom d.o.o.)



Grafikon 3: Razlika natančnosti GPS naprej in nazaj (Flycom d.o.o.)



Grafikon 4: Razlika natančnosti določitve koordinat med GPS in IMU (Flycom d.o.o.)

4.6 TerraSolid

TerraSolid je programski paket za procesiranje zračnih laserskih podatkov in slik. Deluje pod programom MicroStation CAD V8. TerraSolid je sestavljen iz različnih modulov in sicer:

- TerraScan – za branje laserskih točk in klasificiranje oziroma preklasificiranje točk v različne razrede,
- TerraMatch – za usklajevanje linij snemanj, usklajevanje parametrov (roll, pitch, heading in z),
- TerraModeler – za kreiranje modela površja iz laserskih točk,
- TerraPhoto – za procesiranje in rektifikacijo slik za izdelavo ortofota,
- TerraSlave – za izvajanje operacij TerraScan izven MicroStationa, preko LAN.

Obstajajo tudi bolj specifični moduli, kot sta TerraPark, prilagojen za modeliranje parkov in TerraPipe za modeliranje vodnih in kanalizacijskih cevi. Prvi korak v programu TerraScan je uvoz trajektorij ter uvoz preliminarnega oblaka točk. Sledi eden najpomembnejših korakov, kontrola ujemanja oblakov laserskih točk med posameznimi linijami snemanja (ang. matching). To se izvaja z modulom TerraMatch.

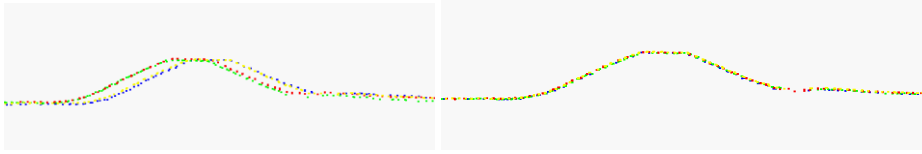
4.6.1 Ujemanje oblakov laserskih točk

Napake, prisotne pri laserskih podatkih so (TerraMatch, www.terrasolid.fi):

- napake pri merjenju razdalje z laserjem,
- napake skenerja, zrcala,
- napake položaja plovila (GPS),
- napake orientacije plovila (INS).

TerraMatch odpravi sistematične napake položaja, orientacije in napake vrtenja zrcala (ang. mirror scale). Naloga je razrešiti kalibracijske parametre laserskega skenerja: neporavnost med skenerjem in IMU (ang. misalignment) (zasuk koordinatnih osi med komponentama) in

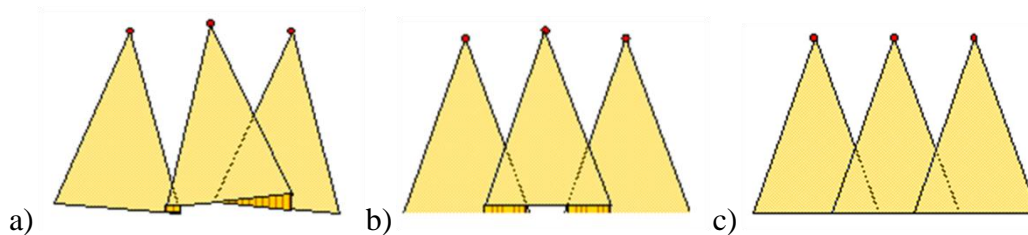
odpraviti neujemanja med koti orientacije (nagib, naklon, zasuk) za cel set podatkov in neujemanja za vsako linijo leta posebej (slika 21).



Slika 21: Neujemanje oblaka laserskih točk, prej in potem (www.terrasolid.fi)

Za uspešnost postopkov, ki jih omogoča TerraMatch, morajo biti izpolnjene določene zahteve. Prva in najpomembnejša zahteva je prekrivanje med pasovi več linj snemanja. Za vsako linijo mora biti podana informacija o trajektoriji s podatki o času. Na to trajektorijo morajo biti pripete laserske točke in številka linije se mora ujemati s številko trajektorije.

Vhodni podatki za algoritem so torej: trajektorija, laserske točke (pripete na trajektorije), klasificirane točke na tleh (razred tla - »ground«) in znane točke na tleh (kontrolne točke). Algoritem zgradi trikotniški model reliefa za vsako linijo leta in primerja prekrivajoče laserske točke in znane točke s temi modeli reliefa. Drugi način ugotavljanja medsebojne usklajenosti linij je tudi s tako imenovanimi karakterističnimi linijami, ki nadomeščajo ploskovno usklajevanje. Možno je ugotavljanje usklajenosti na popolnoma ravnih območjih, slemenih streh, robovih streh in na zidovih objektov. Ugotovljene razlike se pretvorijo v nagib, naklon in zasuk. Kako se odpravijo razlike v parametrih nagib (ang. roll) in razliki višine (dz) je predstavljeno na sliki 22.

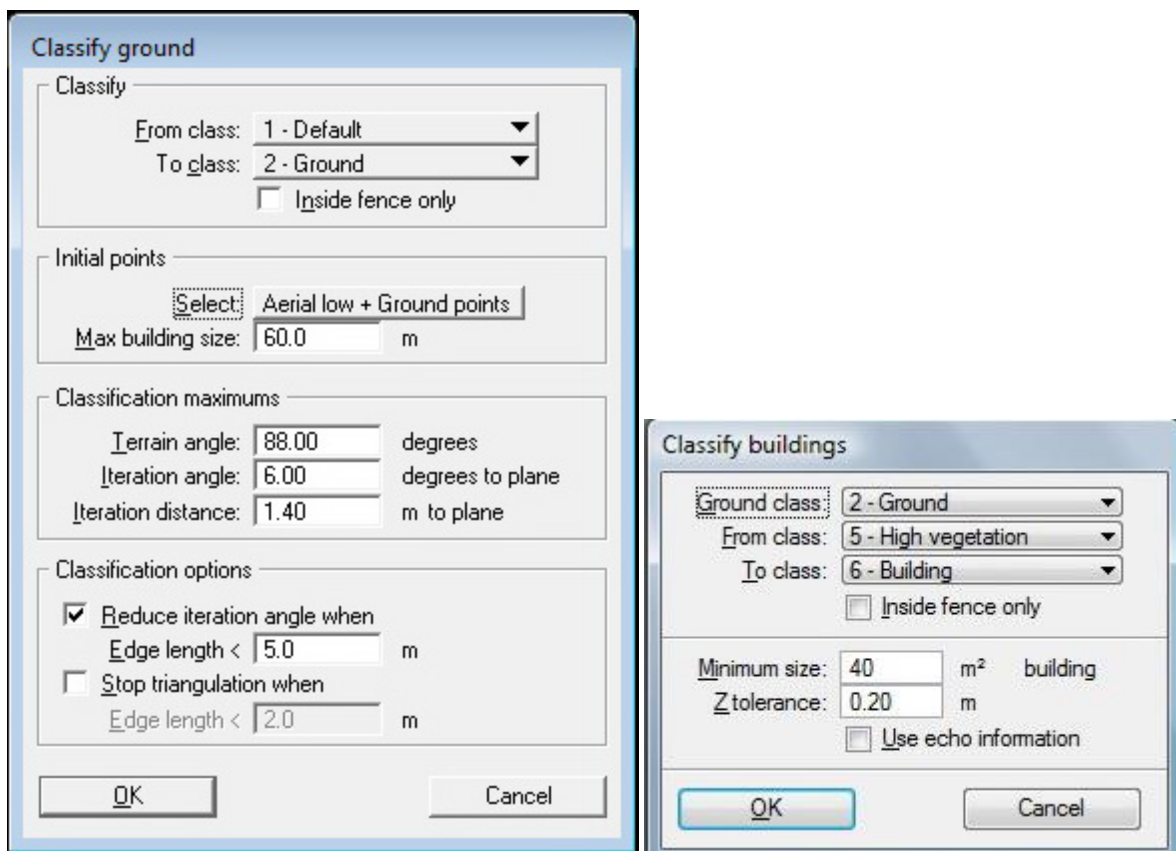


Slika 22: a) Originalni podatki, b) Podatki popravljeni za nagib, c) Podatki popravljeni za dz
(www.terrasolid.fi)

Nagib in popravek višine sta lažje določljiva parametra, saj je za njuno določitev dovolj, da izvedemo poravnavo v horizontalni smeri, medtem ko je za določitev parametrov naklon (ang. pitch) in zasuk (ang. heading) potrebna razgibanost terena v smeri leta.

4.6.2 Avtomatska klasifikacija laserskih točk

Klasifikacija laserskih točk v različne razrede se izvaja z modulom TerraScan. Laserske točke lahko razdelimo v poljubno število razredov, odvisno od naloge. Moja naloga je bila modeliranje zgradb, zato je bil razred zgradb (ang. buildings) obvezen (slika 23). Laserske točke smo razdelili v pet osnovnih razredov in sicer: tla, nizka vegetacija, srednja vegetacija, visoka vegetacija in zgradbe.

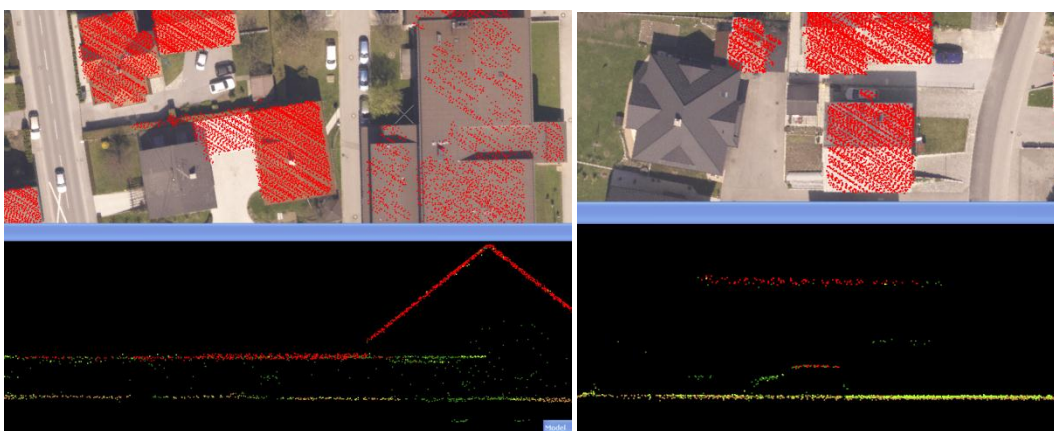


Slika 23: Parametri za klasifikacijo tal in zgradb

Pred klasifikacijo tal smo eliminirali točke pod tlemi (low points), ki so posledica steklenih površin oziroma drugih svetlečih objektov, ki povzročajo probleme pri klasifikaciji tal. Klasifikacija tal se začne s triangulacijo terena glede na parametre, ki smo jih podali. Algoritem gre čez vse laserske točke in določi, katere pripadajo tlom. Kjer so zgradbe oziroma večji objekti, ostane praznina. Nastavitev, ki to kontrolira, je maksimalna velikost zgradb (Max building size). Če je ta vrednost premajhna, se lahko zgodi, da kakšni veliki objekti ostanejo v tleh, zato je pomembno, da si pred nastavitvijo parametrov ogledamo, s

kakšnim terenom imamo opravka, pri tem si pomagamo s posnetki (Salolahti, 2010). Po klasifikaciji tal smo nadaljevali s klasifikacijo vegetacije, ki smo jo določili glede na višino od tal. Kot nizko vegetacijo smo opredelili višine od 0 do 25 cm od tal, srednjo vegetacijo od 25 cm do 2 m, vse kar je višje od 2 m, pa smo uvrstili pod visoko vegetacijo. Algoritem za iskanje zgradb pa deluje tako, da išče ravnine, ki se najbolj prilegajo laserskim točkam, upoštevajoč nastavljene parametre.

Dobra klasifikacija je predpogoj za dobro in hitrejše napredovanje naloge. V našem primeru je bilo zelo pomembno, da je bila klasifikacija zgradb dobra, saj vsi nadaljnji koraki modeliranja temeljijo na klasificiranih točkah zgradbe. Kako doseči tak rezultat, da bodo dejansko v razredu zgradbe samo strehe zgradb, pa je bila kar težka naloga, saj je pri današnji gradnji težko najti dve zgradbi podobnih oblik. Strehe so bile različnih oblik, naklonov, prekrivala jih je vegetacija itn. Vse to so razlogi, ki otežujejo nastavitev enotnih parametrov za celotno obravnavano območje. Največ težav so nam povzročale visoke žive meje oziroma objekti ob zgradbah, v višini streh ter vegetacija, ki je prekrivala strehe (slika 24).

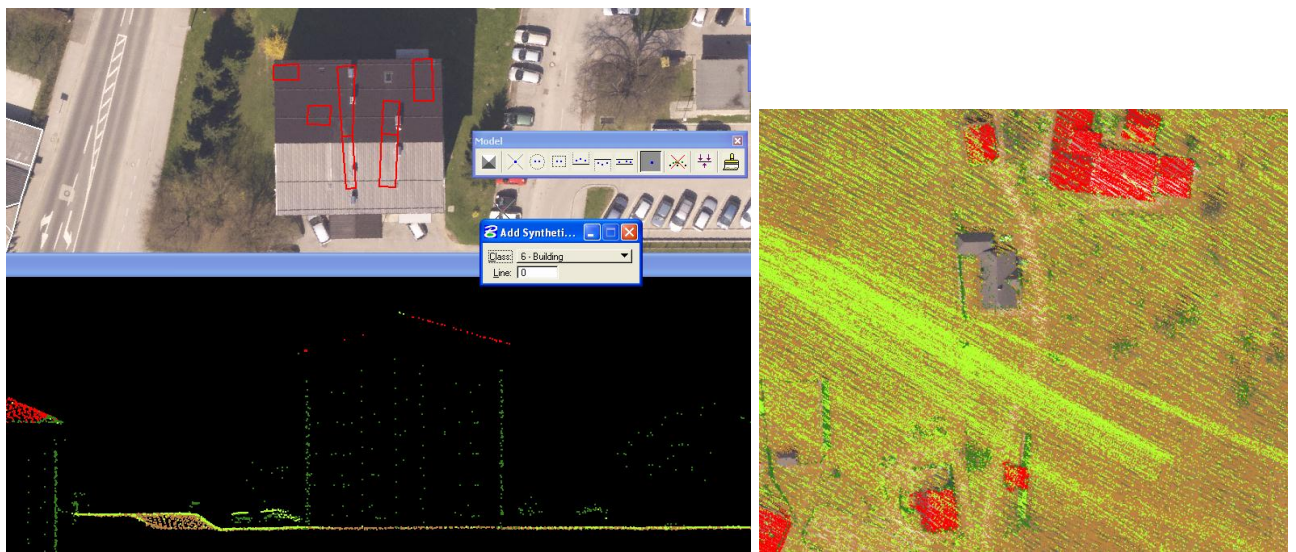


Slika 24: Napake pri klasifikaciji zgradb

Probleme smo imeli tudi s črnimi strehami oziroma strehami iz materialov, od katerih nismo dobili odboja. Takšnih streh je bilo precej. Te primere smo reševali z dodajanjem točk, vendar je ta rešitev prišla v poštev le kadar smo imeli vsaj kakšno točko, saj smo točke vnašali ročno. V primeru, da smo imeli nekaj točk na slemenu in nekaj na kapi strehe, smo vmes nanizali točke pa čim bolj ravni črti (slika 25a). Kadar nismo imeli nobene točke smo si pomagali z obodom stavbe (slika 25b). Gostota točk je bila tako velika, da smo lahko dobili obod strehe na tleh, višina pa je v tem primeru ostala neznanka. Tretja možnost je bila kombiniranje

laserskih točk s katastrom stavb, s katerim smo dobili podatke o višinah etaž, kapi in slemen. Problem kombiniranja laserskih podatkov s katastrom stavb je predvsem položajno neujemanje teh dveh vrst podatkov.

Najboljša rešitev pri pomanjkanju podatkov o zgradbah bi bila kombinacija zračnega in terestričnega laserskega skeniranja. Podatki bi bili lahko združljivi, informacij o obliki zgradbe pa bi bilo več kot dovolj.



a)

b)

Slika 25: a) Dodajanje točk, b) Obod zgradbe na tleh

Kot sem že zgoraj omenila avtomatski klasifikaciji ne gre strogo zaupati, zato smo po avtomatski klasifikaciji naredili še ročno kontrolo in korekcijo. Največ pozornosti smo namenili razredoma tla in zgradbe. Tla so pomembna za izdelavo digitalnega modela reliefa, zgradbe pa za izdelavo 3D modelov objektov oziroma vektorizacijo njihove oblike.

4.6.3 Transformacija točk

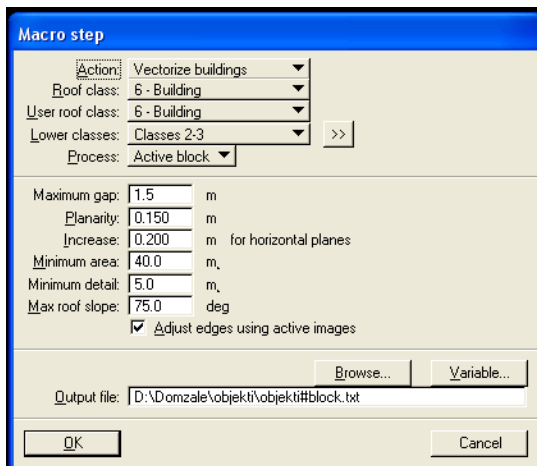
Koordinate laserskih točk so bile v postopku obdelave združenih sistemov DGPS, POS in laserskega skenerja določene na globalnem elipsoidu WGS84. Za potrebe naročnika, smo točke transformirali v državni koordinatni sistem D48 na Besselov elipsoid. Posebej smo izvedli položajno 7 parametrično transformacijo, s parametri, pridobljenimi na Geodetski

upravi RS za osrednjo Slovenijo, prikazanimi na sliki 26. Za višinsko transformacijo, smo uporabili model geoida, prav tako pridobljenem na Geodetski upravi RS.

Slika 26: Parametri transformacije

4.6.4 Modeliranje zgradb

Modeliranje je eden zadnjih korakov obdelave podatkov, ki smo jo izvedli s programom TerraScan. Pogoj za dobro modeliranje je natančna klasifikacija točk, ki pripadajo zgradbam. Orodje za modeliranje najprej na podlagi nastavljenih parametrov (slika 27) poišče ravnine in vektorizira robne linije. Tako omejene ravnine predstavljajo ploskve v ploskovnem modelu. Ker informacij o stenah zgradb nismo imeli, so se robovi streh vertikalno povezali s tlemi in tako smo dobili stene zgradb. Slemena streh so se določila kot preseki posameznih ravnin strehe. Vektorizacija ja potekala tako, da smo najprej izbrali razred, na katerem se bo naloga izvajala (pri nas je bil to razred »buildings«), nato pa nastavili parametre, ki jih program upošteva pri iskanju ravnin. Parametri so razloženi v preglednici 3.



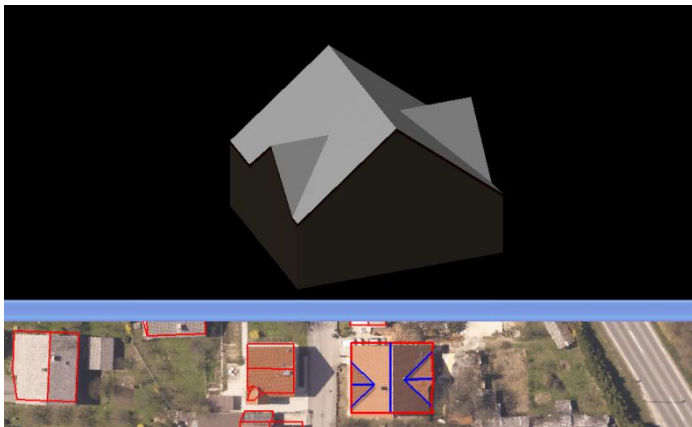
Slika 27: Nastavitev parametrov za vektorizacijo zgradb

Preglednica 3: Razlaga parametrov za vektorizacijo zgradb

| PARAMETER | UČINEK |
|---------------------------------|--|
| Roof class | Razred, ki vsebuje točke streh zgradb. |
| User roof class | Razred, ki vsebuje točke streh zgradb, vendar so le te v procesu vektorizacije neupoštevane. |
| Lower classes | Razredi, ki vsebujejo točke pod strehami zgradb. |
| Process | Območje procesiranja <ul style="list-style-type: none"> • Vse točke • Točke na aktivnem bloku • Točke znotraj izbranega območja |
| Maximum gap | Maksimalna razdalja med deli zgradbe, ki še pripadajo istemu modelu. |
| Planarity tolerance | Toleranca ujemanja točke z enačbo ravnine, da še pripada isti ravnini. |
| Minimum area | minimalna velikost odtisa zgradbe |
| Minimum detail | minimalna velikost odtisa dela zgradbe |
| Max roof slope | maksimalni kot naklona strehe |
| Adjust edgee using active image | Če je aktiviran, so robovi streh prilagojeni glede na posnetke, naložene v TerraPhoto |

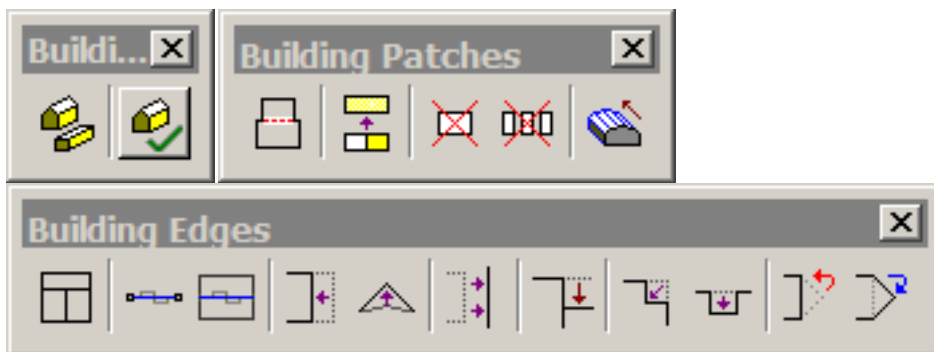
Vektorizacija se začne pri velikih zgradbah, zato je nastanek prvega modela trajal precej časa. Pred nastavitvijo parametrov smo si ogledali letalske fotografije za pridobitev informacije o oblikah streh. Tako kot pri klasifikaciji tudi v tem postopku enotna nastavitev parametrov skoraj ni bila mogoča, zato smo delali po podobmočjih. Izbrali smo si podobmočja na katerem so imele strehe zgradb po našem mnenju podobne lastnosti in izvedli vektorizacijo samo na tistem delu. Na žalost so bile z avtomatskimi nastavitvami pravilno vektorizirane samo bolj

enostavne zgradbe (slika 28). Pri zapletenih strehah, katerih je bilo zelo veliko, pa smo imeli še veliko ročnega dela. Natančnost vektoriziranih modelov zgradb je v največji meri odvisna od gostote točk na kvadratni meter. Več točk imamo, bolj natančen je lahko model. Optimalna gostota točk za izdelavo modelov zgradb je med 10 in 15 točk/m².



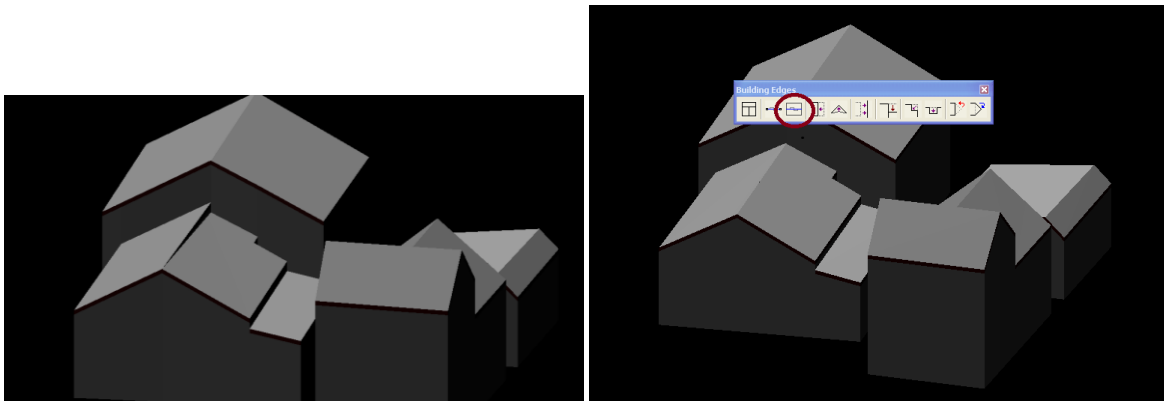
Slika 28: Primer pravilne avtomatske vektorizacija enostavne strehe.

Za ročno popravljanje avtomatske vektorizacije ima TerraScan prav za to prilagojeno orodno vrstico (slika 29).



Slika 29: Orodje za vektorizacijo zgradb

S pomočjo zgornjih orodij, smo popravili vektorje v taki meri, da je končni model čim bolj natančno predstavljal dejansko obliko zgradbe in je bila stopnja generalizacije čim manjša. Na slikah 30, 31, 32 je nekaj primerov uporabe orodij.



Slika 30: Orodje poišče presek dveh ravnin

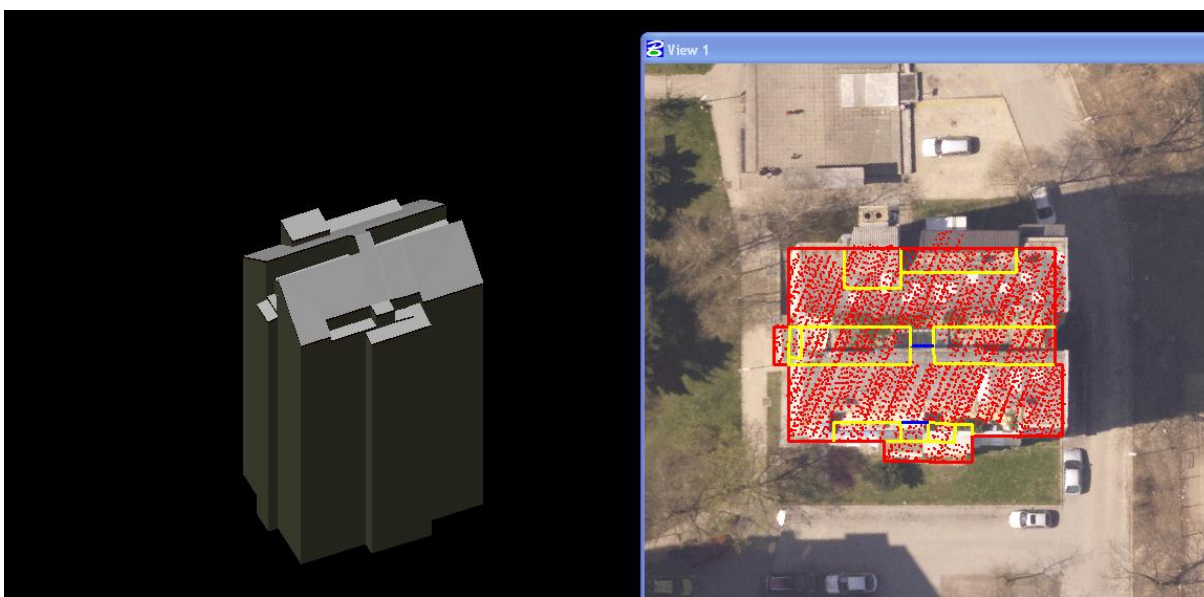


Slika 31: Kombinacija vseh orodij



Slika 32: Orodje za razdelitev dveh ravnin.

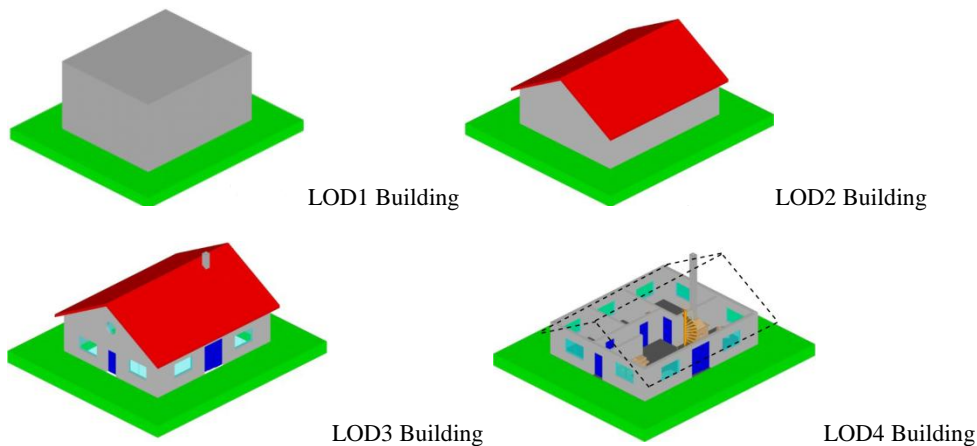
Kot podlago smo poleg laserskih točk uporabili tudi aero posnetke, z namenom, da bi si čim bolj predstavljali kako in kje se sekajo ravnine. Pri uporabi areo posnetkov je bilo potrebno paziti na visoke stavbe, da bi nas položaj streh le-teh ne zavedel, saj so visoki objekti, razen tistih v centru posnetka, zvrnjeni. Bolj so oddaljeni od centra, bolj so zvrnjeni, zato smo vedno vektorizirali po laserskih točkah. Na sliki 33 je primer visoke zgradbe, kjer lahko opazimo zamik strehe glede na laserske točke.



Slika 33: Nesovpadanje laserskih točk s posnetkom zaradi 'zvrnjene' visoke zgradbe.

4.6.5 Nivo detajla (ang. Level Of Detail, LOD)

Modele zgradb določa standard OpenGis CityGML. CityGML je skupen, semantičen, informacijski model za predstavitev 3D urbanega območja in omogoča združitev modelov v različnih aplikacijah. Modeli zgradb, njihovih delov in inštalacij so razdeljeni na štiri nivoje detajla, LOD1 do LOD4. Kot je razvidno iz slike 34, bi naše modele na prvi pogled uvrstili pod LOD2, vendar imajo eno pomembno pomanjkljivost. Modeli, ki smo jih modelirali iz lidarskih podatkov, predstavljajo bruto prostornino zgradbe, nimajo kapi, ampak se konec strehe nadaljuje v steno. Ker za LOD2 velja, da imajo modeli streho in kap, bi torej potemtakem našim modelom morali odšteti širino sten.



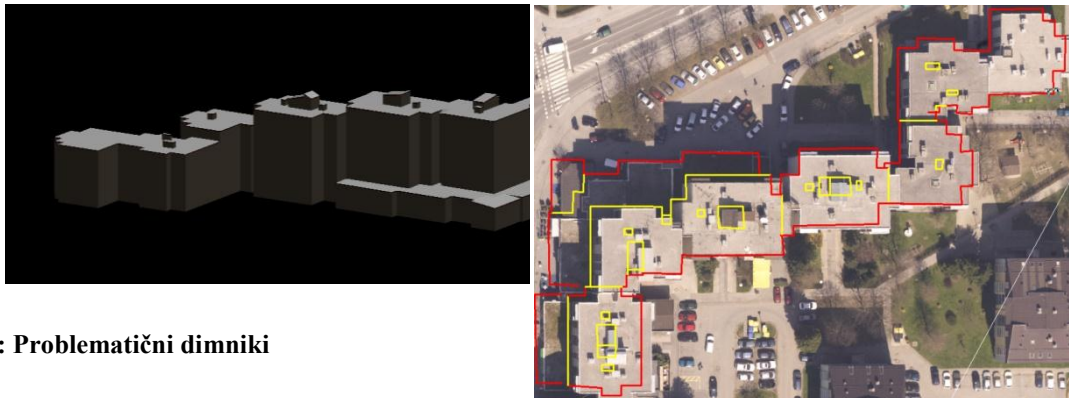
Slika 34: Nivoji detajla zgradb

4.7 Problemi in posebnosti

Med pregledovanjem modelov smo naleteli na kar nekaj zanimivih in za vektoriziranje precej zahtevnih zgradb. Med njimi so bile največkrat cerkve, bloki in razne tovarne, kompleksi, za katere je bilo kljub vsem razpoložljivim podatkom težko določiti potek strehe.

- Dimniki

Veliko težav so nam povzročali dimniki, ki jih nismo obravnavali kot del zgradb, so bili pa zaradi svoje velikosti velikokrat obravnavani kot lastne ploskve. Problem smo reševali tako, da smo zmanjšali minimalno površino, ki še predstavlja ravnino (slika 35).



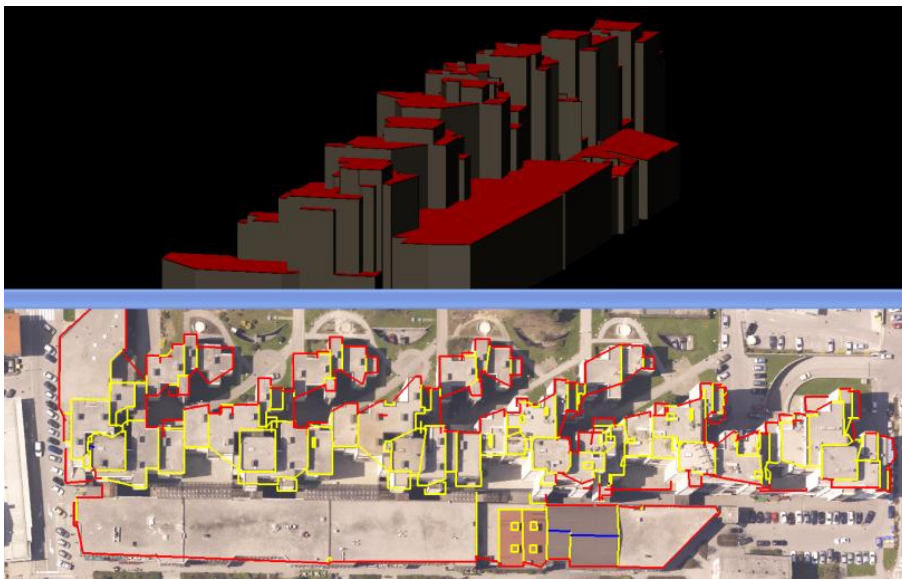
Slika 35: Problematični dimniki

- Cerkev

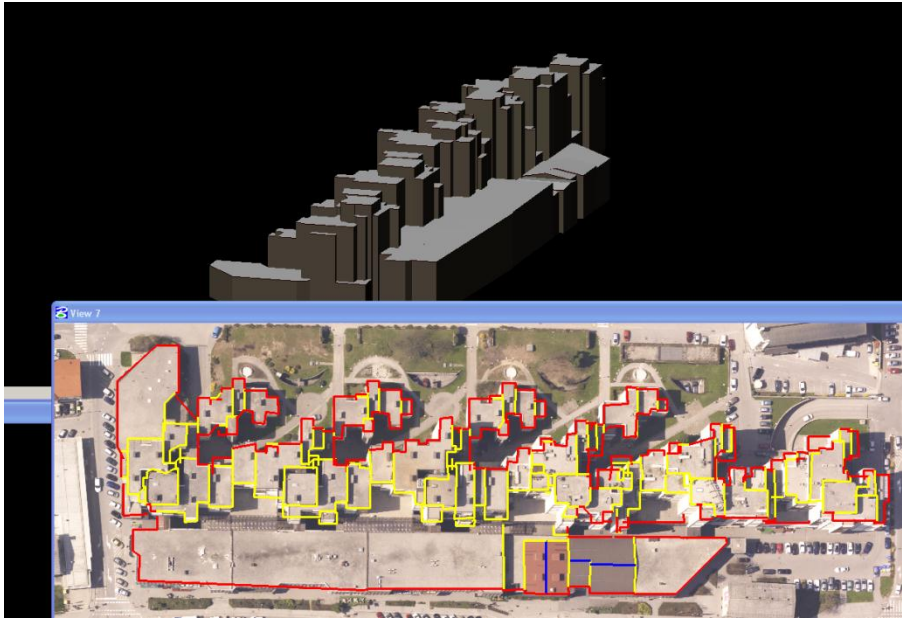
Največ težav nam je povzročal zvonik, pri katerem je problem, da ima le ta, v primerjavi z ostalo streho, zelo velik naklon, zato je bilo potrebno veliko različnih kombinacij nastavitve parametrov, da smo dobili rezultat, ki je vsaj približno predstavljal dejansko obliko strehe.

- Kompleksne zgradbe

Med kompleksne zgradbe spadajo blokovske in industrijske zgradbe ter kmečka poslopja. Skupno vsem tem zgradbam je, da so zelo razgibane, imajo več nivojev streh in so netipičnih oblik (slike 36, 37, 38). V takih primerih spreminjanje in iskanje najboljših parametrov ni prišlo v poštev. Veliko je bilo ročnega dela in subjektivnega pogleda na zgradbo. Rešitev bi bila uporaba katastra stavb, s katerim bi dobili vsaj obris zgradbe.



Slika 36: Blokovsko naselje, nepopravljeno



Slika 37: Popravljeno blokovsko naselje



Slika 38: Banka

- Črne strehe

Največji problem so nam povzročale črne strehe, oziroma strehe iz takih materialov od katerih nismo dobili odboja. Na žalost je bilo takih primerov zelo veliko. V primerih, kjer smo imeli na strehah vsaj kakšno točko, smo smiselno dodali točke in ravnine

dorisali ročno. Strehe, od katerih pa nismo dobili nobenega odboja, pa ostajajo predmet nadaljnje obravnave. Za rešitev takih primerov je možna kombinacija s katastrom stavb ali združitvev podatkov s podatki terestričnega laserskega skeniranja.

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je predstavljen postopek izdelave modelov zgradb iz lidarskih podatkov od samega snemanja do končnega rezultata. O zračnem laserskem skeniranju so napisane zgolj osnove, saj ta tema ostaja predmet raziskovanja in vse vseskozi razvija.

S programskim okoljem TerraSolid sem se seznanila in se ga naučila uporabljati v podjetju Flycom d.o.o. Zdi se mi uporabniku prijazen, saj ima logične in enostavne funkcije in ponuja veliko možnosti za obdelavo oblaka točk.

Z uporabo programskega okolja TerraSolid se je izkazalo, da tako avtomatski klasifikaciji, kot tudi avtomatski vektorizaciji ne gre slepo zaupati. Naj omenim, da je bilo pri modeliranju zgradb ogromno ročnega dela. Pri delu smo preizkusili veliko variant nastavitve parametrov, kako priti do boljšega modela, ampak vedno smo prišli do zaključka, da je na koncu potrebno človeško oko in zmožnost presoje. Na poseljenih območjih z enostavnimi objekti je avtomatska vektorizacija uspešna za 80-90% zgradb. V območjih z zahtevnimi objekti, kot so na primer stara mesta jedra, strnjena blokovsko naselja, pa je ta odstotek nižji. Naj poudarim, smo imeli kot osnovni vir podatkov samo točke zračnega laserskega skeniranja in letalske fotografije. Ob kombinaciji teh podatkov z npr. posnetki IR ali kakšnimi drugimi posnetki, bi bila detekcija zgradb lahko boljša. Natančnost modelov je težko določljiva, saj je odvisna od številnih dejavnikov. Največ vpliva na natančnost ima sistem POS, postopki kalibracije in georeferenciranja ter gostota lidarskih točk na kvadratni meter. Za izboljšanje natančnosti bi morali veliko več časa posvetiti prvim fazam obdelave, sinhronizaciji in georeferenciranju.

Končni rezultat so modeli zgradb, ki predstavljajo bruto površino tlorisa strehe. Če bi modelom odšteli širino sten, bi dobili neto tlorisno površino oz. modele, ki pa standardu CityGML glede na nivo detajla pripadajo drugemu nivoju (LOD2). Uporaba takih modelov je aktualna za primerjavo z nepremičninskimi evidencami, kjer se lahko na zelo enostaven način ugotovi, ali se površine ujemajo. Modeli urbanih območij so uporabni tudi za prostorsko načrtovanje novogradenj, npr. za opredelitev primernih lokacij za novogradnje, ter za analizo razvoja naselij. Modeli so vse bolj aktualni tudi za potrebe turizma in se uporabljajo za predstavitev kraja, za označevanje pomembnih objektov, predstavitev kulturnih poti ipd.

Kot sem že omenila, samo podatki laserskega skeniranja v večini primerov niso dovolj za pravilno interpretacijo oblike zgradb. Rešitev bi bila kombinacija različnih virov podatkov. V prihodnje bi lahko primerjali modele zgradb iz terestričnega in zračnega laserskega skeniranja, modele, rekonstruirane iz katastra stavb, modele, zaznane iz IR posnetkov,... ter kombinirali te različne vrste podatkov za doseg enotnega, čim bolj realističnega modela.

Zaključimo lahko, da kljub nenehnemu razvijanju postopkov zaznavanja in modeliranja zgradb, le ti še nekaj časa ne bodo popolnoma avtomatizirani in bo za končni rezultat potrebna ocena izvajalca. Z našega stališča je ta ugotovitev dobra, saj to pomeni, da nas čaka še veliko raziskovanja in s tem veliko dela.

VIRI

Ahokas, E., Kaartinen, H., in Hyypä, J. 2003. A quality assesment of airborne laser scanner data.

http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Ahokas_ALSDD2003.pdf (20.09.2010).

Bitenc, M. 2007. Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusiedler See. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 123 str.

Briese, C., Mandlbürger, G., Pfeifer, N. 2007. Airborne laser scanning-High quality digital terrain model.

http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1950.pdf (25.7.2010).

Flycom d.o.o.

<http://www.flycom.si/> (15.8.2010).

Grewal, M. S., Weil, L. R., Andrews, A. P., 2001. Global positioning, Inertial Navigation, and Integration. A John Wiley & Sons Inc. Publication: 392 str.

IGI-LiteMapper.

<http://www.igi.eu/litemapper.html> (14.9.2010).

Kosmatin Fras, M., Attwenger, M., Bitenc, M. 2007. Klasifikacija rabe površin iz intenzitete odbitega laserskega žarka. Geodetski vestnik 51,3: 519-535.

Kozmus Trajkovski, K. 2009. Združeni sistemi GNSS/INS za neprekinjeno navigacijo. Geodetski vestnik 53,2: 239-251.

Kukko, A., Hyypä, J. 2007. Laser scanner simulator for system analysis and algorithm development: a case with forest measurements.

http://foto.hut.fi/ls2007/presentations/Kukko_ls2007_presentation.pdf (23.9.2010).

Občina Domžale.

<http://www.domzale.si/> (3.10.2010).

Riegl USA.

<http://www.rieglusa.com/> (14.9.2010).

Saolahti, M. 2010. Advanced use of lidar data-Automatic building vectorization and contour production.

http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs04h/fs04h_salolahti_4689.pdf (15.8.2010).

Shan, J., Toth, C. K. 2009. Topographic laser ranging and scanning. New York, Taylor & Francis Group: 590 str.

Švab Lenarčič, A. 2009. Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, 135 str.

TerraScan user guide.

http://www.terrasolid.fi/system/files/tscan_1.pdf (3.5.2010).

TerraSolid.

<http://www.terrasolid.fi/> (3.5.2010).

Triglav Čekada, M. 2010. Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence. Geodetski vestnik 54,2: 181-194.

Triglav Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin Fras, M. 2010. Teoretična gostota lidarskih točk za topografsko kartiranje v največjih merilih. Geodetski vestnik, 54,3: 389-400.

Verma, V., Kumar, R., Hsu, S. 2006. 3D Building Detection and Modeling from Aerial LIDAR data. Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

http://www.ceng.metu.edu.tr/~e120353/building_lidar.pdf (3.12.2010).

Vosselman, G., Mass, H. G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Scotland, UK, Whittles Publishing: 318 str.