

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:

Kumar, S., 2013. Vzpostavitev in kalibracija mobilnega laserskega sistema. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin Fras, M., somentor Ranfl, U.): 104 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Kumar, S., 2013. Vzpostavitev in kalibracija mobilnega laserskega sistema. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin Fras, M., co-supervisor Ranfl, U.): 104 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GEODEZIJE  
SMER GEODEZIJA

Kandidat:

**SAMO KUMAR**

**VZPOSTAVITEV IN KALIBRACIJA MOBILNEGA  
LASERSKEGA SISTEMA**

Diplomska naloga št.: 930/G

**REALIZATION AND CALIBRATION OF A MOBILE  
LASER SYSTEM**

Graduation thesis No.: 930/G

**Mentorica:**

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

**Somentor:**

mag. Uroš Ranfl, univ.dipl.inž.geod.

**Član komisije:**

doc. dr. Dušan Petrovič

Ljubljana, 27. 06. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

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

**»VZPOSTAVITEV IN KALIBRACIJA MOBILNEGA LASERSKEGA SISTEMA«.**

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, junij 2013

.....  
(podpis)

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>UDK:</b>             | 519.61/.64:528.7.001(043.2)   |
| <b>Avtor:</b>           | Samo Kumar  |
| <b>Mentor:</b>          | doc. dr. Mojca Kosmatin Fras  |
| <b>Somentor:</b>        | mag. Uroš Ranfl   |
| <b>Naslov:</b>          | Vzpostavitev in kalibracija mobilnega laserskega sistema  |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | Diplomska naloga – univerzitetni študij   |
| <b>Obseg in oprema:</b> | 104 str., 27. preg., 80 sl., 37 en.   |
| <b>Ključne besede:</b>  | Mobilni laserski sistem, kalibracija, kotna nepravnanost, inercialni navigacijski sistem, RiPROCESS |

### **Izvelek**

Diplomsko delo obsega vzpostavitev in kalibracijo lastnega mobilnega laserskega sistema kot ekvivalent komercialno dostopnim, vendar precej dražjim sistemom. Posebnost je implementacija terestričnega laserskega skenerja v 2D linijskem načinu, ki v splošnem ni namenjen mobilni uporabi. Ključni element naloge predstavlja kalibracija senzorskih sistemov in določitev kalibracijskih parametrov, še posebej kotnih vrednosti med koordinatnimi sistemi senzorjev (angl. boresight alignment). Celotna obdelava laserskih podatkov se izvaja v programskem okolju RiPROCESS. Skozi kalibracijske postopke ugotovimo končno relativno in absolutno natančnost testnega mobilnega laserskega sistema ter nakažemo njegove omejitve in možnost uporabe. Opisana so določena teoretična izhodišča in metode za najustreznejši kalibracijski postopek, kar je podprto tudi s praktičnimi preizkusi. Testni sistem se že v tej fazi izkaže kot uporaben, vendar pušča veliko možnosti za nadaljnji razvoj. Poleg povsem teoretičnega vidika se v diplomski nalogi dotaknemo tudi tehnične izvedbe snovanja konstrukcije platforme, ob koncu pa ocenimo tudi ekonomski vidik nakupa in uporabe tovrstnih mobilnih laserskih sistemov.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>UDC:</b>           | 519.61/.64:528.7.001(043.2)  |
| <b>Author:</b>        | Samo Kumar   |
| <b>Supervisor:</b>    | Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.   |
| <b>Co-supervisor:</b> | M.Sc. Uroš Ranfl   |
| <b>Title:</b>         | Realization and calibration of a mobile laser system   |
| <b>Document Type:</b> | Graduation thesis – university studies   |
| <b>Notes:</b>         | 104 p., 27. tab., 80 fig., 37 eq.  |
| <b>Key words:</b>     | Mobile laser system, calibration, boresight alignment, inertial navigation system, RiPROCESS |

**Abstract:**

The graduation thesis discusses the work on realization and calibration of an in-house developed mobile laser system as an equivalent to commercially available and much more expensive systems. A specialty of a tested mobile laser system is its integration of a terrestrial laser scanner in 2D line mode, which is primary not intended for mobile applications. The main emphasis is given to the calibration procedures of a combined group of connected sensors, especially the angular misalignment between the inertial measurement unit and laser scanners coordinate axes, known as the boresight alignment. All the data processing is conducted in a powerful software tool from RIEGL called RiPROCESS. Through the calibration procedures we can evaluate the overall relative and absolute accuracy of a tested mobile laser system and highlight its limitations as well as its utility. Some theoretical backgrounds on the calibration procedures are presented and are practically tested as well. Already at this stage the tested mobile laser system is an accurate and useful tool for data capturing however there is plenty of room for progress and improvement. In addition to purely theoretical aspect we examine the technical approach of designing a light/rigid platform and at the end we evaluate the economic aspect of the acquisition and use of such mobile laser system.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras za vso pomoč, napotke in nasvete pri izdelavi diplomskega dela ter somentorju mag. Urošu Ranflu za obilo ustvarjalne energije v ideološkem, tehničnem in strokovnem aspektu mojega raziskovanja.

Zahvaljujem se tudi podjetjema DFG CONSULTING, d.o.o in RIEGL Laser Measurement Systems. Prvemu za možnost sodelovanja, uporabe njegove opreme, testnih podatkov, vrsto strokovnih usmeritev in pogledov pri izvedbi diplomskega dela ter izrednem delovnem vzdušju. Podjetju RIEGL Laser Measurement Systems pa za možnost brezplačne uporabe njegove zmogljive programske opreme, referenčnih podatkov in uporabniške pomoči tekom praktičnega dela. Veseli me, da so podjetja še vedno pripravljena sodelovati in pomagati pri akademskih delih.

Nenazadnje hvala staršema in vsem bližnjim, ki so me vodili na moji vzgojno-izobraževalni poti.

In Mojca, »Great ideas need landing gear as well as wings« (C. D. Jackson)

## **ACKNOWLEDGEMENT**

The diploma thesis is the result of a colaboration with company RIEGL Laser Measurement Systems and I would like to express my thanks here. I am truly grateful that I had a chance to use RIEGL's processing software for mobile laser applications RiPROCESS under a free of charge student license. I am also grateful for the reference data and all the help from RIEGL's customer support personnel during my practical work. Without this kind support from RIEGL I would not be able to accomplish this diploma thesis in the present scope.

**KAZALO VSEBINE**

|  |           |
|--|-----------|
| Izjave   | II        |
| Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček                            | III       |
| Bibliographic-documentalistic information and abstract                     | IV        |
| Zahvala  | V         |
| <b>1 UVOD</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Motivacija in ideja</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Opredelitev ciljev</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1.3 Organiziranost naloge</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2 TEORETIČNA IZHODIŠČA</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2.1 Lasersko skeniranje</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1.1 Mobilno lasersko skeniranje (MLS)                                    | 5         |
| <b>2.2 Komponente MLS</b>  | <b>7</b>  |
| 2.2.1 Laserski skener  | 7         |
| 2.2.2 Inercialni merski sistem (INS)                                       | 11        |
| 2.2.3 Odometer   | 16        |
| 2.2.4 GNSS (GPS)   | 17        |
| 2.2.5 Kombinacija GPS – INS meritev  | 21        |
| <b>2.3 Osnove koordinatnih sistemov</b>                                    | <b>26</b> |
| 2.3.1 Transformacije med koordinatnimi sistemi                             | 28        |
| <b>2.4 Kotna nepravnanost</b>  | <b>30</b> |
| 2.4.1 Kotna nepravnanost v aerolaserskem skeniranju                        | 32        |
| 2.4.2 Določitev kotne nepravnanosti v mobilnem laserskem sistemu           | 36        |
| <b>2.5 Pričakovana natančnost MLS sistema</b>                              | <b>40</b> |
| 2.5.1 Vplivi IMU   | 41        |
| 2.5.2 Vpliv kotne nepravnanosti  | 41        |
| 2.5.3 Vplivi laserskega skenerja   | 42        |
| 2.5.4 Vpliv translacijskih vrednosti med senzorji (»lever-arm offsets«)    | 43        |
| 2.5.5 Vplivi na senzorje za določitev položaja (GPS)                       | 44        |
| <b>3 ZAJEM PODATKOV, UPORABLJENA PROGRAMSKA OPREMA IN<br/>METODOLOGIJA</b> | <b>46</b> |
| <b>3.1 Zajem podatkov</b>  | <b>46</b> |
| 3.1.1 Testno območje   | 46        |
| 3.1.2 Konfiguracija sistema  | 48        |



|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.1.3      | Metodologija zajema                                  | 50         |
| 3.1.4      | Referenčni podatki                                   | 53         |
| <b>3.2</b> | <b>Programska oprema</b>                             | <b>54</b>  |
| 3.2.1      | Inertial explorer                                    | 54         |
| 3.2.2      | Uporabljeni programski paketi podjetja RIEGL         | 59         |
| <b>3.3</b> | <b>Metodologija kalibracije v RiPROCESS</b>          | <b>62</b>  |
| 3.3.1      | Relativna izravnava                                  | 67         |
| 3.3.2      | »Absolutna« izravnava                                | 73         |
| <b>4</b>   | <b>OBDELAVA PODATKOV MLS, REZULTATI IN DISKUSIJA</b> | <b>76</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>Obdelava podatkov</b>                             | <b>76</b>  |
| 4.1.1      | Pregled podatkov uvožene trajektorije                | 76         |
| 4.1.2      | Identične ravnine in oslonilne točke                 | 78         |
| 4.1.3      | Izravnava  | 80         |
| <b>4.2</b> | <b>Rezultati</b>                                     | <b>81</b>  |
| 4.2.1      | Vzorčenje, sistematični in slučajni vplivi           | 90         |
| 4.2.2      | Omejitve sistema                                     | 98         |
| 4.2.3      | Uporaba  | 99         |
| <b>5</b>   | <b>ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO</b>                   | <b>102</b> |
|            | <b>VIRI</b>  | <b>104</b> |

**KAZALO PREGLEDNIC**

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Preglednica 1:  | Osnovne tehnične specifikacije LS Riegl VZ-400. (Vir: RIEGL datasheet VZ-400, 2013 )        | 8  |
| Preglednica 2:  | Tehnične specifikacije IMU iMAR-FSAS (Ranfl, 2009).   | 16 |
| Preglednica 3:  | Primerjava lastnosti GPS sprejemnikov in inercialnih senzorjev (Ranfl, 2009).               | 21 |
| Preglednica 4:  | Izmerjene translacijske vrednosti med IMU in GPS oz LS                                      | 48 |
| Preglednica 5:  | Geografske koordinate bazne postaje v Hornu.  | 53 |
| Preglednica 6:  | Izbira metode izravnave in ostalih parametrov.  | 81 |
| Preglednica 7:  | Izravnani prosti parametri in njihove statistične natančnosti.                              | 82 |
| Preglednica 8:  | Skupni/generalni rezultat izračuna.   | 82 |
| Preglednica 9:  | Standardna deviacija po posameznih pasovih oblakov točk.                                    | 82 |
| Preglednica 10: | Parametri druge iteracije izravnave.  | 84 |
| Preglednica 11: | Izravnani prosti parametri druge iteracije.   | 84 |
| Preglednica 12: | Rezultati izravnave skupno in po posameznih laserskih pasovih.                              | 84 |
| Preglednica 13: | Razlike vrednosti prostih parametrov med prvo in drugo iteracijo.                           | 85 |
| Preglednica 14: | Parametri tretje iteracije izravnave.   | 85 |
| Preglednica 15: | Premiki laserskih pasov med seboj, v odvisnosti od oslonilnih točk.                         | 86 |
| Preglednica 16: | Rezultati tretje in zadnje iteracije izravnave/kalibracije.                                 | 86 |
| Preglednica 17: | Parametri prve vzorčne izravnave in njen končni rezultat.                                   | 91 |
| Preglednica 18: | Kalibrirani elementi BA in globalni premiki.  | 91 |
| Preglednica 19: | Relativni premiki laserskih pasov med seboj in natančnosti po posameznem pasu.              | 92 |
| Preglednica 20: | Parametri druge vzorčne izravnave in njen končni rezultat                                   | 92 |
| Preglednica 21: | Kalibrirani elementi BA in globalni premiki drugega vzorca.                                 | 93 |
| Preglednica 22: | Relativni premiki laserskih pasov med seboj v drugem vzorcu.                                | 93 |
| Preglednica 23: | Parametri tretje vzorčne izravnave in njen končni rezultat                                  | 93 |
| Preglednica 24: | Kalibrirani elementi BA in globalni premiki tretjega vzorca.                                | 94 |
| Preglednica 25: | Relativni premiki laserskih pasov med seboj v tretjem vzorcu.                               | 94 |
| Preglednica 26: | Primerjava parametrov pri različnih vhodnih podatkih kalibracije.                           | 94 |
| Preglednica 27: | Ocena relativne in predvsem absolutne natančnosti MLS sistema z obzirom do oslonilnih točk. | 95 |

## KAZALO SLIK

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 1:  | Princip delovanja terestričnega laserskega skenerja. (Vir: Lichti, 2000)  | 4  |
| Slika 2:  | Impulzni in fazni način delovanja laserskega skenerja (Kumar, 2012).  | 5  |
| Slika 3:  | Nabor komercialnih mobilnih laserskih sistemov (RIEGL, Dynascan, StreetMapper), predstavljenih v Salzburgu na konferenci ELMF 2012. | 6  |
| Slika 4:  | Tehnologija MLS s tremi ključnimi senzori; LS, GPS/GNSS in IMU. (Rieger et al, 2010 )   | 7  |
| Slika 5:  | Laserski skener RIEGL VZ-400. (Rieger et al, 2010 )   | 8  |
| Slika 6:  | Zorno polje laserskega skenerja. Zenitna razdalja je element intervala $[30^\circ, 130^\circ]$ .                                    | 9  |
| Slika 7:  | 3D upodobitev zornega polja, ki ga med rotiranjem pokrije laserski žarek skenerja.  | 9  |
| Slika 8:  | Maksimalni doseg LS VZ-400 v odvisnosti od reflektivnosti materiala in atmosferskih pogojev.  | 10 |
| Slika 9:  | Žiroskopsko stabiliziran inercialni sistem v modelnem in osnem pogledu. (Access Science, 2013)                                      | 11 |
| Slika 10: | Inercialni sistem s fiksnimi »strapdown« senzori v modelnem in osnem pogledu.   | 12 |
| Slika 11: | Fazni optični žiroskop in princip njegovega delovanja. (Free EBooks, 2013)  | 13 |
| Slika 12: | Konstrukcija krožnega laserskega žiroskopa. (Free EBooks, 2013)   | 14 |
| Slika 13: | IMU iMAR-FSAS s tehničnimi specifikacijami  | 15 |
| Slika 14: | Induktivni senzor (Machinedesign, 2013).  | 17 |
| Slika 15: | Novatel GNSS sprejemnik ProPak – V3, vgrajen v sistem WideoCar.   | 19 |
| Slika 16: | Shematska primerjava frekvenčnega območja delovanja posameznih senzorjev.   | 20 |
| Slika 17: | Delovanje Kalmanovega filtra pri združevanju različnih navigacijskih senzorjev (Ranfl, 2009).                                       | 25 |
| Slika 18: | Vzvratno glajenje, algoritem široko uporabljen v procesiranju podatkov MLS sistemov. (Ranfl, 2009)                                  | 26 |
| Slika 19: | Transformacije med koordinatnimi sistemi, ki jih je potrebno upoštevati pri MLS.  | 28 |
| Slika 20: | Pomen vrednosti Roll ( <i>nagib</i> ), Pitch (naklon) in Yaw/heading (zasuk) v praktičnem smislu.                                   | 30 |
| Slika 21: | Obe najbolj uporabljeni konfiguraciji IMU enote na platformo. (Vir: RiWORLD datasheet)  | 31 |
| Slika 22: | Praktične posledice kotov BA, <i>nagib</i> (a), <i>naklon</i> (b) in <i>zasuk</i> (c). (Skaloud, 2006 )                             | 34 |
| Slika 23: | Tipična konfiguracija LS na mobilno platformo. Rotacijska os zrcala je vzporedna skeniranim objektom. (Rieger, et al., 2010)        | 36 |
| Slika 24: | Različne konfiguracije LS v obeh smereh vožnje. (Vir: Rieger et al., 2010)  | 37 |
| Slika 25: | Posledica ne-poravnosti oblakov točk, ki opisujeta identično površino, v odvisnosti od zasuka (angl. Roll) (Rieger, et al., 2010 )  | 38 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 26: | Prikaz ravnin z njihovo velikostjo, lokacijo in projekcijo razdalje na normalni vektor.   | 38 |
| Slika 27: | Grafična predstavitev odnosov med koordinatnimi sistemi posameznih senzorjev MLS.   | 39 |
| Slika 28: | Relativna distribucija energije oddanega laserskega pulza z Terrapoint ALTM LIDAR System.   | 43 |
| Slika 29: | Horizontalen in vertikalni vpliv MLS sistema v odvisnosti od natančnosti določitve položaja med senzorji. (Craig, 2004)                 | 44 |
| Slika 30: | Odstotkovna razporeditev končne absolutne natančnosti po posameznih vplivih pri MLS sistemu.  | 45 |
| Slika 31: | Ulica Prager Strasse v centru mesta Horn. (Bing maps, 2013)   | 47 |
| Slika 32: | Obdelana trajektorija v Inertial explorerju (a) in uvoz le te v Google Zemljo (b).  | 47 |
| Slika 33: | Celotna platforma MLS sistema, konfigurirana na avtomobilu.   | 48 |
| Slika 34: | Koordinatni ENU sistem platforme.   | 49 |
| Slika 35: | Shematski prikaz orientacij LS med zajemom podatkov.  | 50 |
| Slika 36: | Grafična predstavitev vzorca točk na ravni površini vzdolž smeri vožnje in skeniranja.  | 51 |
| Slika 37: | Grafikon na sliki prikazuje število točk na m <sup>2</sup> ob različnih hitrostih in razdaljah med LS in objektom.                      | 52 |
| Slika 38: | Zajem podatkov na terenu a) in rezultat kot oblak točk b).  | 52 |
| Slika 39: | Trajektorija interesnega območja v programu Inertial Explorer.  | 55 |
| Slika 40: | Diagram poteka obdelave podatkov GPS/IMU v programu Inertial explorer.  | 55 |
| Slika 41: | Levi del slike predstavlja konstelacijo satelitov v času meritev, desni pa vrednosti PDOP (rdeča), HDOP(zelena) in VDOP (modra).        | 56 |
| Slika 42: | Levo je prikaz števila s satelita oddanih signalov, desno pa prikaz sprejema signala z manjšimi prekinitvami in »cycle-slipi«.          | 57 |
| Slika 43: | Združena separacija oz. glajenje med trajektorijo po poti naprej in nazaj za koordinate IMU sistema; E (rdeča), N (Zelena), UP (modra). | 58 |
| Slika 44: | Standardna deviacija določitve položaja na podlagi močno sklopljene in glajene rešitve.   | 58 |
| Slika 45: | Generalni potek dela (angl. »workflow«) v programskem paketu RiPROCESS.   | 60 |
| Slika 46: | Razlika med zajetimi podatki profila ceste pred in po kalibraciji.  | 63 |
| Slika 47: | Dialog za iskanje identičnih ravnin v programskem okolju RiPROCESS.   | 64 |
| Slika 48: | Dialog za izravnavo v programskem okolju RiPROCESS.   | 66 |
| Slika 49: | Izbira metode izravnave in tolerance med naslednjo iteracijo v programskem okolju RiPROCESS.  | 68 |
| Slika 50: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave.  | 69 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Slika 51: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (2).                                      | 70  |
| Slika 52: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (3).                                      | 71  |
| Slika 53: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (4).                                      | 72  |
| Slika 54: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (5).                                      | 72  |
| Slika 55: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz.<br>absolutne izravnave (1).                         | 74  |
| Slika 56: | Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz.<br>absolutne izravnave (2).                         | 75  |
| Slika 57: | Koordinatna analiza celotne trajektorije v programu RiPROCESS.  | 76  |
| Slika 58: | Analiza delne trajektorije v vožnji »naprej«.   | 77  |
| Slika 59: | Analiza delne trajektorije za vožnjo »nazaj«.   | 78  |
| Slika 60: | Identične točke in ravnine na fasadi objekta med dvema oknom.   | 78  |
| Slika 61: | Prostorska razporeditev oslonilnih točk po celotnem testnem območju.  | 79  |
| Slika 62: | Jasno definirane oslonilne točke na robovih obcestnih objektov (prometni znaki).                                  | 80  |
| Slika 63: | Shematski postopek absolutne izravnave celotnih oblakov točk.   | 81  |
| Slika 64: | Histogram popravkov in prikaz orientacije normalnih vektorjev identičnih ravnin.                                  | 83  |
| Slika 65: | Deviacije glede na časovni potek zajema podatkov.   | 83  |
| Slika 66: | Histogram popravkov in prikaz orientacij normalnih vektorjev ravnin zadnje iteracije.                             | 86  |
| Slika 67: | Prikaz velikosti in razporeditve popravkov glede na čas zajema.   | 87  |
| Slika 68: | Prečni profil stranske priključne ceste pred in po kalibraciji.   | 88  |
| Slika 69: | Fasada obcestnega objekta pred in po kalibraciji.   | 88  |
| Slika 70: | Detajl avtomobila na parkirišču ob trasi pred in po kalibraciji.  | 89  |
| Slika 71: | Prečni profil voziščne konstrukcije s pločnikom pred in po kalibraciji.   | 89  |
| Slika 72: | Shematski prikaz vzorčenja oblaka točk glede na njegovo širino.   | 90  |
| Slika 73: | Graf natančnosti MLS sistema v odvisnosti od širine snemalnega pasu.  | 95  |
| Slika 74: | Slučajni vplivi na opazovanja, katerih vpadni kot je majhen, razdalja do LS pa velika.                            | 96  |
| Slika 75: | Specifika testnega poligona, kjer se izkažejo omejitve MLS sistema.   | 97  |
| Slika 76: | Preprosta klasifikacija za lažjo odstranitev šumov in vegetacije.   | 97  |
| Slika 77: | Razlika med testnim in komercialnimi sistemi v smislu konfiguracije LS.   | 98  |
| Slika 78: | Nagnjen LS prinaša ugodnejši (večji) vpadni kot laserskega žarka.   | 99  |
| Slika 79: | Različni načini uporabe MLS sistemov ter končni izdelki. (Vir: <a href="http://www.riegl.com">www.riegl.com</a> ) | 101 |
| Slika 80: | Možnost kombinacije laserskih podatkov z različnimi rastrskimi podlagami (boljša informativnost).                 | 101 |

**OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

|      |   |
|------|---|
| MLS  | angl. Mobile laser system; Mobilni laserski sistem                                |
| TLS  | angl. Terrestrial laser scanning; Terestrično lasersko skeniranje                 |
| INS  | angl. Inertial navigation system; Inercialni navigacijski sistem                  |
| TOF  | angl. Time of flight; Čas potovanja svetlobnega impulza                           |
| GNSS | angl. Global navigation satellite system; Globalni navigacijski satelitski sistem |
| ALS  | angl. Airborn laser scanning; Aerolasersko skeniranje                             |
| LS   | angl. Laser scanner; Laserski skener  |
| IMU  | angl. Inertial measurement unit; Inercialna merska enota                          |
| BA   | angl. Boresight Alignment; kotna neporavnost                                      |
| MMS  | angl. Mobile mapping systems; Mobilni merski sistem                               |
| EMV  | Elektromagnetno valovanje   |
| DR   | angl. Dead Reckoning  |
| KF   | Kalmanov filter   |
| MNK  | Metoda najmanjših kvadratov   |
| ENU  | East-North-Up koordinatni sistem; koordinatni sistem vzhod-sever-navzgor          |
| NED  | North-East-Down koordinatni sistem; koordinatni sistem sever-vzhod-navzdol        |
| SOCS | angl. Scanner's own coordinate system; Skenerjev lastni koordinatni sistem        |
| ICP  | angl. Iterative closest point   |

## **SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK**

**Dead reckoning:** postopek določitve položaja, ko imamo znan položaj v nekem trenutku ter s spremembo smeri, hitrosti in časa določimo nov položaj.

**Kotna nepravilnost - Boresight alignment:** nepravilnost med koordinatnimi osmi laserskega skenerja in inercialnega merskega sistema. V kontekstu naloge se uporablja tudi ekvivalentni izraz kalibracijski parametri.**Lever arm:** vektor v evklidskem prostoru med dvema koordinatnima izhodiščema (vektor oz. njegove komponente med koordinatnimi sistemi različnih senzorskih sistemov).

**Roll, pitch, yaw/heading:** v slovenski strokovni literaturi zasledimo prevod terminov roll kot nagib, pitch kot naklon in yaw/heading kot zasuk.

**Iterative closest point:** algoritem za registracijo oblaka točk brez veznih točk.

**Control point, check point, tie point:** v slovenski strokovni terminologiji uporabljamo izraze oslonilna točka (angl. control point), kontrolna točka (angl. check point) in vezna točka (angl. tie-point).

»Ta stran je namenoma prazna.«



# 1 UVOD

Uvodni del je razčlenjen na podkategorije, kar nakazuje strukturiran in eksaktno definiran pristop k izdelavi diplomskega dela. V uvodnih podglavjih predstavim motivacijo in idejo za izbiro tovrstne tematike, opredelim cilje ter obrazložim organiziranost diplomske naloge.

## 1.1 Motivacija in ideja

Mobilni kartirni sistemi, opremljeni z video kamerami, so na trgu prisotni že dve desetletji, vendar je v zadnjih letih tehnologija omogočila korenito spremembo v zajemu trirazsežnih (3D) prostorskih podatkov. Implementacija laserskega skenerja na platformi mobilnega kartirnega sistema je vzrok za izvor nove vrste mobilnih senzorjev in termina mobilni laserski sistem (MLS). Predpogoj za razvoj in komercialno uporabo MLS so zagotovo tudi znanje in izkušnje na področju terestričnega laserskega skeniranja (TLS), razvoj navigacijskih sistemov in splošno vodilo današnje družbe – doseči čim večjo učinkovitost ob najmanjših možnih stroških.

Medtem ko se terestrično lasersko skeniranje uporablja za 3D zajem prostorskih podatkov nekega manjšega interesnega območja, lahko zračni ali mobilni laserski sistem uporabimo za zajem precej večjega območja, kot so npr. razni linijski objekti. Hkrati TLS zahteva podporo konvencionalnih geodetskih metod, s katerimi izmerimo oslonilne in kontrolne točke, na katere preko veznih točk georeferenciramo celoten set podatkov. Pri mobilnih laserskih sistemih pa je oblak točk že direktno georeferenciran preko sistema za navigacijo in pozicioniranje, ki ga sestavljata GNSS sprejemnik in inercialni merski sistem (INS) (Christian, B., Gerald. Z, Geert, V., et al. 2012).

Z razvojem novih tehnologij je področje daljinskega zaznavanje doživelo pravi razcvet, zato ni presenečenje, da nas vse več mladih to inovativno področje geodezije tudi preučuje. V mojem primeru je diplomska naloga docela povezana z zgornjo trditvijo, saj me področje mobilnega laserskega skeniranja zanima že dalj časa. V Sloveniji sicer področje še ni široko zastopano v geodetski sferi, vendar se počasi a vztrajno implementira tudi na našem ozemlju. Eno od pionirskih podjetji na tem področju, z lastnim razvojem, znanjem in programskim zaledjem je DFG CONSULTING d.o.o. V podjetju posedujejo mobilni kartirni sistem WideoCar, opremljen z videokamerami. Nedavno so pridobili tudi terestrični laserski skener Riegl VZ-400, ki ga uporabljajo za naloge statične/terestrične narave. Kolektiv ima razvojno usmerjeno vizijo, posledično se je pojavila ideja o sestavi novega mobilnega merskega sistema, kateri bi omogočal tudi laserski zajem podatkov, torej mobilni laserski sistem MLS. Ob tej priložnosti, ki zajema moje zanimanje za to področje in razvojno usmerjenost podjetja, smo se dogovorili za sodelovanje širše narave, kjer nam je pomoč in programsko opremo nudilo tudi avstrijsko podjetje RIEGL Laser Measurement Systems. Za pomoč se zahvaljujem obema ključnima protagonistoma v mojem diplomskem delu.

## 1.2 Opredelitev ciljev

Ciljev diplomske naloge je pravzaprav več in zajemajo tehniški, praktični in poslovni oz. ekonomski aspekt. Povsem tehniški cilj predstavlja izravnava različnih pasov oblaka točk, ki med seboj odstopajo, kot posledica linijske konfiguracije LS in kotne nepravilnosti (ang. boresight alignment). Termin »boresight alignment« v aerolaserskem skeniranju (ALS) med drugim definirata tudi Skaloud in Lichti (2006), ki ga obrazložita kot problem kotnega odstopanja, nepravilnosti oziroma rotacije med koordinatnimi osmi laserskega skenerja in koordinatnimi osmi inercialne merske enote (IMU). V slovenskem strokovnem jeziku nismo zasledili prevoda tega izraza, vendar smo se odločili, da bomo v diplomski nalogi uporabili izraz kotna nepravilnost oziroma kratico BA (akronim angleškega izraza), kjer je zaradi krajšega besedila to enostavneje. V teoretičnem kontekstu naloge se kotna nepravilnost lahko pojmuje tudi kot »kalibracijski parametri«, saj v postopku kalibracije določamo iskane kotne vrednosti, ki določijo nepravilnost koordinatnih osi.

Algoritmi za odpravo BA pri aerolaserskem skeniranju so že dalj časa znani in široko uporabljeni. V osnovi lahko princip prenesemo tudi na mobilne laserske sisteme, čeprav se tu način zajema podatkov močno razlikuje. Pri tehnologiji ALS je interesno območje brez težav vidno v vseh pasovih preleta, čeprav le-ti potekajo v različnih smereh, zato je določitev parametrov BA precej enostavna. Na drugi strani pa MLS sistemi v osnovi ne premorejo fleksibilnosti, da bi lahko zajeli iste objekte v različnih smereh vožnje med snemanjem. Ob identični prečni konfiguraciji LS in vožnji po levi kakor tudi desni strani ceste, skeniramo ravno nasproti si ležeči interesni območji, torej levi in desni pas ob cesti. Seveda je ta problem izpostavljen, kadar imamo LS konfiguriran kot 2D linijski, ki je usmerjen prečno na potek vožnje (Rieger, Studnicka, Pfennigbauer, Zach, 2010).

Teoretični cilj naloge je torej določiti parametre BA za linijski sistem MLS ter narediti izravnavo v relativnem in absolutnem smislu, tako da bo odstopanj med posameznimi snemalnimi pasovi čim manj.

Praktični cilj naloge je dodelati zasnovo celotne konstrukcije avtomobilske platforme, ki bi bila dovolj fleksibilna, da bi omogočala samo tehnologijo MMS, samo tehnologijo MLS ali kombinacijo obeh.

Poslovni oz. ekonomski vidik pa temelji na opredelitvi uporabe tovrstnega sistema v Sloveniji, analizi stroškov in oceni, ki ponazarja smotrnost uporabe MLS pred ostalimi tehnologijami v odvisnosti od velikosti projekta in dodane vrednosti.

### **1.3 Organiziranost naloge**

Diplomsko delo je razdeljeno v pet glavnih poglavij. V prvem so predstavljene motivacija, ideja in cilji. Drugo poglavje podaja širok spekter teoretičnih izhodišč, ki zajemajo tako posamezne senzorske elemente mobilnega laserskega sistema, kot tudi njihovo skupno implementacijo in komplementarno uporabo. Predstavljen je problem ne-kalibriranega sistema s pričakovano oceno natančnosti. V poglavju 3 obravnavamo terenski zajem podatkov mobilnega laserskega skeniranja, opišemo uporabljeno programsko opremo in metodologijo obdelave. Četrto poglavje prinaša vpogled v obdelavo podatkov mobilnega laserskega skeniranja, kjer uporabljamo različne pristope za določitev kalibracijskih parametrov (BA). Poleg pregleda rezultatov razvijemo tudi teze o omejitvah in možni uporabi sistema. V zadnjem, petem poglavju predstavimo zaključke ter ideje za nadaljnje raziskovanje. Povsem na koncu je v skladu s pravilnikom naveden seznam uporabljenih virov in literature.

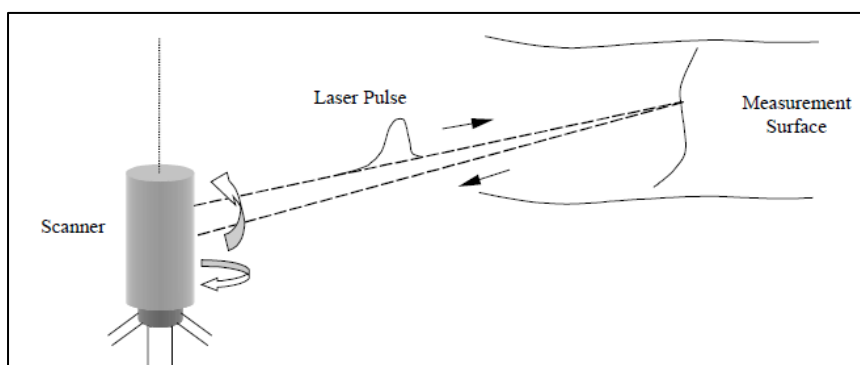
## 2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Poglavje predstavlja izbor teoretičnih tem, ki so potrebne za razumevanje obravnavane tematike. Opredeljene so posamezne tehnologije in merski postopki, vključno z detajlnim opisom nekaterih najpomembnejših senzorskih sistemov, ki imajo kot skupek celotnega mobilnega laserskega sistema določene posebnosti. Pri opisu posameznih tehnologij in možnih težav v obdelavi podatkov je pogosto mogoče najti vzporednice tudi s tehnologijo ALS, kjer je princip delovanja podoben, drugačen je le matematični model.

### 2.1 Lasersko skeniranje

Preden obravnavamo tehnologijo mobilnega laserskega skeniranja (MLS) je dobro predstaviti nekaj osnov o terestričnem laserskem skeniranju (TLS). Lahko bi dejali, da dandanes TLS ni več nova tehnologija, temveč je že široko uporabljena v različnih strokah. Osnovo predstavlja laserski skener, t.j. naprava, ki oddaja laserski signal oz. impulz ter beleži čas, energijo, amplitudo, ... povratnega signala. Glede na poznavanje teorije o elektromagnetnem valovanju (EMV) in posledično hitrosti svetlobe, lahko izračunamo čas potovanja laserskega signala od inštrumenta do objekta in nazaj.

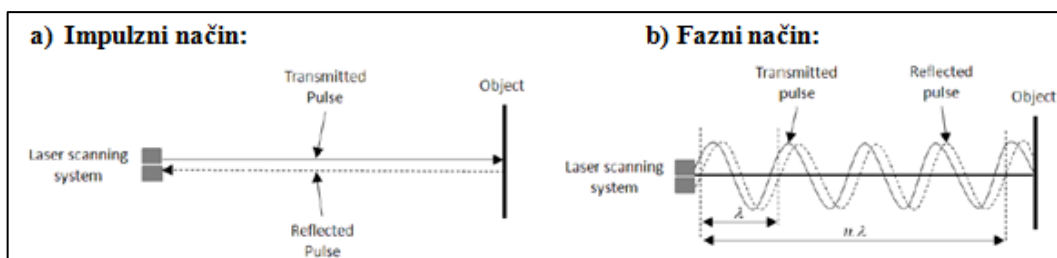
Izračuna se razdalja med inštrumentom in delom površja, ki ga aproksimiramo s točko, kjer se laserski žarek odbije. Za vsako izmerjeno točko sta skupaj z dolžino registrirana tudi vertikalni in horizontalni kot. Tako lahko izračunamo prostorske 3D koordinate vsake točke (X, Y, Z) na površini skeniranega objekta glede na pozicijo skenerja (Kastelic, 2010).



**Slika 1:** Princip delovanja terestričnega laserskega skenerja. (Vir: Lichti, 2000)

Poznamo različne tipe laserskih skenerjev, predvsem glede na tehnologijo določanja razdalje. Prva skupina laserskih skenerjev uporablja impulzni način merjenja dolžin, kar se v angleščini imenuje time of flight (TOF). Bistvo je torej čas potovanja svetlobnega impulza. Druga skupina uporablja fazni način, kjer inštrument pošilja modulirano (amplitudno, frekvenčno) EMV, tako da se združujeta dve

valovanji različnih frekvenc. Oslabljeni odbiti signal se primerja z referenčnim/oddanim žarkom, izmerjena fazna razlika pa služi za izračun dolžine (Kogoj, 2005).



Slika 2: Impulzni in fazni način delovanja laserskega skenerja (Kumar, 2012).

Poznamo tudi tretjo skupino, katere osnova je laserska triangulacija, vendar so tovrstni sistemi uporabni le pri bližnjih merjenjih in se ne uporabljajo na mobilnih platformah.

LS lahko tipiziramo tudi glede na način usmerjanja laserskega žarka, pri čemer prvi usmerjajo laserski žarek z dvema vrtljivima zrcaloma v horizontalni in vertikalni smeri, medtem ko drugi uporabljajo zgolj eno rotirajoče se zrcalo. To zrcalo odklanja žarek v vertikalni smeri, za horizontalno realizacijo pa poskrbi motorizirano obračanje glave inštrumenta.

### 2.1.1 Mobilno lasersko skeniranje (MLS)

Z razvojem tehnologije TLS so se izpostavile številne prednosti v tovrstnem načinu zajemanja podatkov. Težnja po še hitrejšem in finančno ugodnejšem zajemu večjih območji je povzročila, da sta svoj razcvet doživeli tudi tehnologija aerolaserskega skeniranja (ALS) in mobilnega laserskega skeniranja (MLS). Tehnologija MLS je imela ob svojem nastanku že dobro definirano teoretično in praktično osnovo, saj gre pravzaprav za nadgradnjo mobilnih merskih sistemov (MMS), ki za zajem prostorskih podatkov v glavnem uporabljajo video kamere.

Prvi MMS sistemi so bili vzpostavljeni v začetku devetdesetih let z namenom pridobivanja natančnih in ekonomičnih zbirk prostorskih podatkov. Dolgotrajne in drage konvencionalne metode so bile povod in vzrok za uspešno integracijo tovrstnih sistemov. MMS lahko definiramo kot premikajočo se platformo, na kateri so integrirani številni merski sistemi in senzorji. Ti služijo skoraj neprekinjenemu trirazsežnemu pozicioniraju same platforme, kakor tudi zbiranju geo-prostorskih podatkov, brez ali z omejeno zemeljsko kontrolo in z uporabo ene ali več baznih GNSS postaj. (Grejner-Brzezinska, 2002).

Precejšnja uporabnost sistema se kaže v upravljanju cest, kjer so podatki o širinah cest, oseh, talnih oznak, objektov ob cestah in stanju samega cestišča ključnega pomena. Pridobivanje teh podatkov na terenu s konvencionalnimi metodami je zamudno in včasih tudi nevarno. Z uporabo video tehnike in

integriranih sistemov GPS in INS je omogočeno tudi geolociranje objektov ob samem vozišču. Zajem podatkov se izvaja z mobilno enoto oz. avtomobilom, na katerem sta nameščeni dve ali več digitalnih kamer, podprtih s sistemom za določevanje položaja.

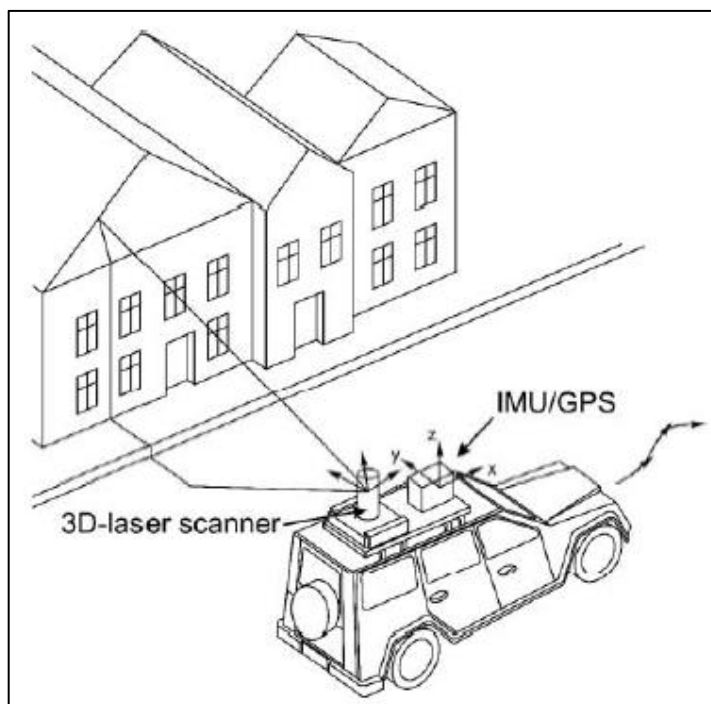
V zadnjem desetletju pa je tehnologija omogočila tudi korak dlje, laserski skener je razširil svoje področje uporabe tudi v kinematično izvedenih modelih in ne zgolj statičnih. Ob tej trditvi se navezujem na mobilne laserske sisteme (MLS), kjer gre v splošnem za LS, nameščen na mobilno platformo. Le-ta je v večini primerov realizirana na strehi večjega avtomobila, na vodnem plovilu, vlaku, itd..

Razvojno gledano je bil korak pričakovan, saj je bila celotna tehnologija že vpeljana v primeru MMS tehnologije, potrebno je bilo zgolj dodati še en senzorski sistem (LS), povečati prostor za shranjevanje velike količine podatkov in poskrbeti za časovno sinhronizacijo vseh senzorjev. V strojnem smislu je MLS dokaj enostaven, v kolikor zanemarimo kompleksno »drobovje« posameznih senzorjev, nekaj več razvoja je potrebno v smeri programske opreme za zajem in obdelavo podatkov.

Podobna iniciativa se je razvila tudi v podjetju DFG CONSULTING d.o.o., kjer so že posedovali tako terestrični laserski skener in mobilni merski sistem WideoCar kot tudi znanje in izkušnje, t.i. »know how«, za uporabo obeh. Eden izmed ciljev diplomske naloge je poleg obdelave tovrstnih podatkov in analize natančnosti tudi smiselno snovanje konstrukcije, ki bi omogočala čim enostavnejšo pretvorbo MLS v MMS sistem oz. njuno sinergijo.



**Slika 3:** Nabor komercialnih mobilnih laserskih sistemov (RIEGL, Dynascan, StreetMapper), predstavljenih v Salzburgu na konferenci ELMF 2012.



**Slika 4:** Tehnologija MLS s tremi ključnimi senzorji; LS, GPS/GNSS in IMU. (Rieger et al, 2010 )

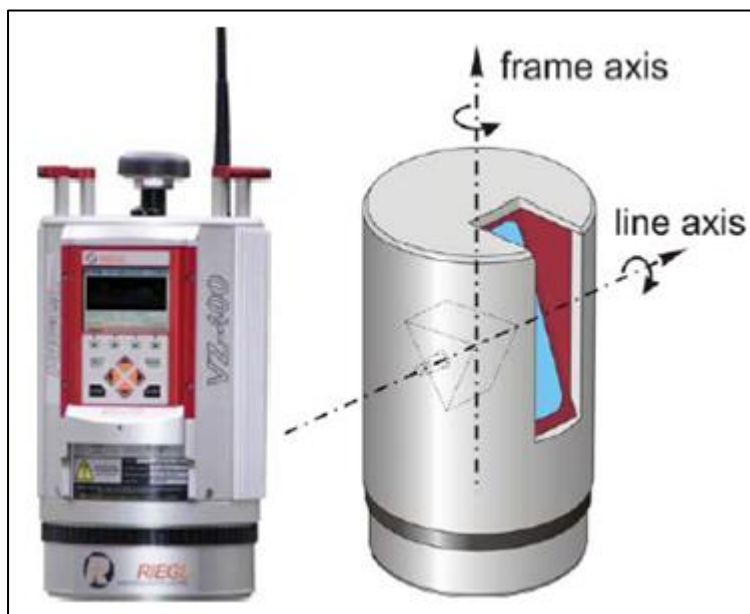
## 2.2 Komponente MLS

Znan pregovor pravi, da je veriga močna le toliko, kot je močan njen najšibkejši člen. Iz tega lahko v prenesenem pomenu povzamemo, da je potrebno za ocenjevanje kakovosti analizirati vsak sestavni del posebej. V primeru mobilnega laserskega sistema so to štiri ključne komponente oz. senzorji, ki bodo v nadaljevanju bolj ali manj podrobno predstavljeni. Največ pozornosti je namenjene sistemu IMU ter njegovemu odnosu do laserskega skenerja in GNSS antene/sprejemnika. Na prvi pogled morda ni očitno, vendar končna položajna natančnost močno zavisi od kakovosti tovrstnih inercialnih sistemov, katerih cene so vrtočljivo visoke. Analitične specifikacije v poglavjih od 2.2.1 do 2.2.4 se nanašajo na strojno opremo v lasti DFG CONSULTING d.o.o., katera je tudi bila uporabljena za snovanje in izvedbo MLS meritev.

### 2.2.1 Laserski skener

Nekaj splošnih informacij o delovanju laserskega skenerja je bilo predstavljenih že v poglavju 2.1 Lasersko skeniranje. Laserski skener je torej naprava, ki oddaja laserski signal oz. impulz ter beleži različne informacije povratnega signala. Preko pridobljenih informacij ter ob podpori fizikalne teorije o optiki in odboju laserskega žarka lahko določi položajne koordinate točk na skeniranem objektu v lastnem koordinatnem sistemu LS.

LS, uporabljen v našem sistemu, je Rieglov terestrični laserski skener VZ-400.



Slika 5: Laserski skener RIEGL VZ-400. (Rieger et al, 2010 )

Avstrijsko podjetje RIEGL Measurement Systems je ponudnik širokega spektra različnih laserskih skenerjev. Prednost njihove strojne opreme je predvsem velika prilagodljivost in široko področje uporabe. Večina komercialnih in preciznih MLS sistemov ima vgrajene Rieglove LS, saj naj bi po njihovih besedah le-ti združevali robustnost, preciznost, enostavno upravljanje in bogato uporabniško podporo s strani Riegla. Glede na pridobljene izkušnje lahko zgornje mnenje zgolj potrdimo.

V preglednici 1 so podane tehnične specifikacije laserskega skenerja, ki jih je mogoče pridobiti na proizvajalčevi spletni strani.

**Preglednica 1:** Osnovne tehnične specifikacije LS Riegl VZ-400. (Vir: RIEGL datasheet VZ-400, 2013 )

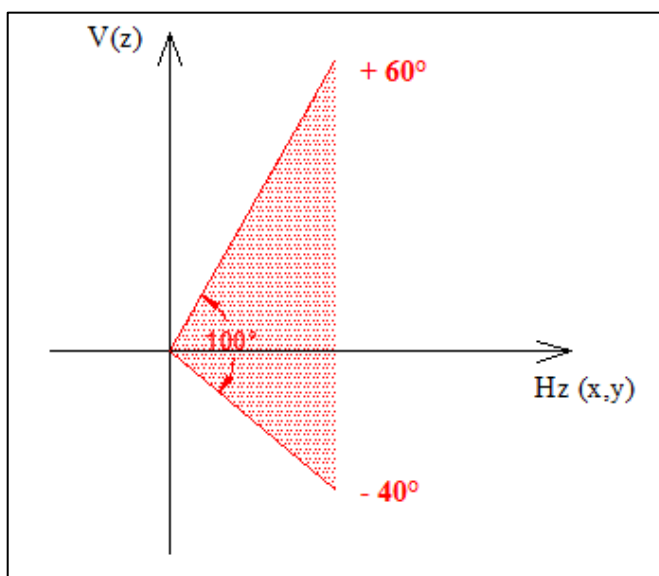
| Opis                    | Vrednost                              |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Frekvenca oddaje pulza  | 100-300 KHz                           |
| Maksimalni doseg        | 600 m                                 |
| Minimalni doseg         | 1,5 m                                 |
| Divergenca žarka        | 0,35 mrad                             |
| Zorno polje             | 100° (+60/-40)                        |
| Hitrost skeniranja      | 3 – 120 linij/s                       |
| Korak odklanjanja žarka | $0,0024^\circ < \Delta < 0,288^\circ$ |
| Mehanizem odklanjanja   | Rotirajoče zrcalo                     |

Prednost omenjenega LS je tudi v dejstvu, da ni potrebno, da je v horizontalnem položaju, temveč se ga lahko uporablja tudi v nagnjeni ali celo ležeči konfiguraciji. LS Riegl VZ-400 uporablja impulzni

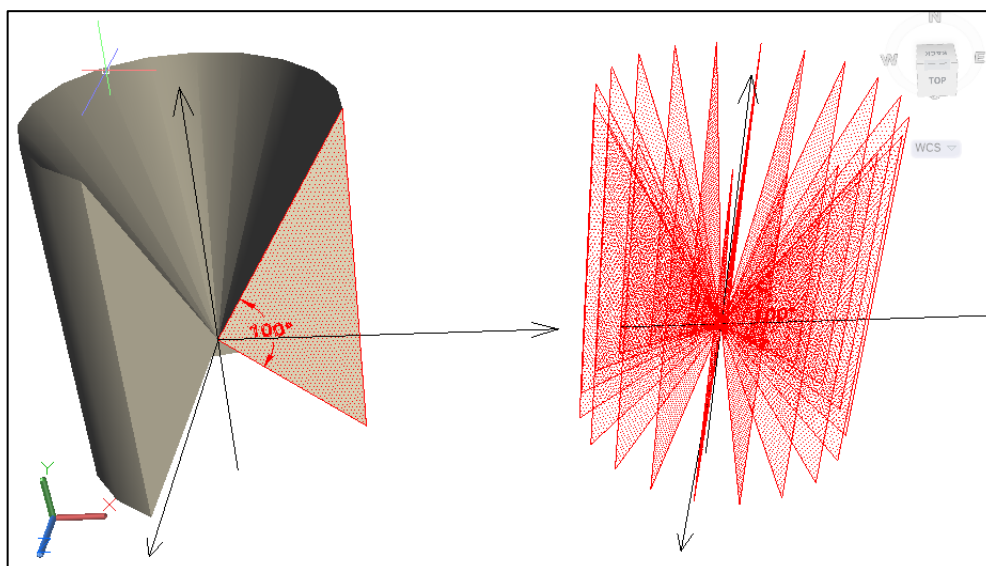


način merjenja dolžin oziroma time of flight (TOF). Bistvo je torej merjenje časa potovanja svetlobnega impulza. Glede na frekvenco oddanega EMV sodi laserska svetloba v bližnji infrardeči spekter. Vidno polje se realizira z rotirajočim se zrcalom, ki odklanja žarek v vertikalni smeri, za horizontalno premikanje pa poskrbi motorizirano obračanje glave inštrumenta.

Specifikacije podajajo  $100^\circ$  široko zorno polje, ki je realizirano v obliki, prikazani na sliki 6.

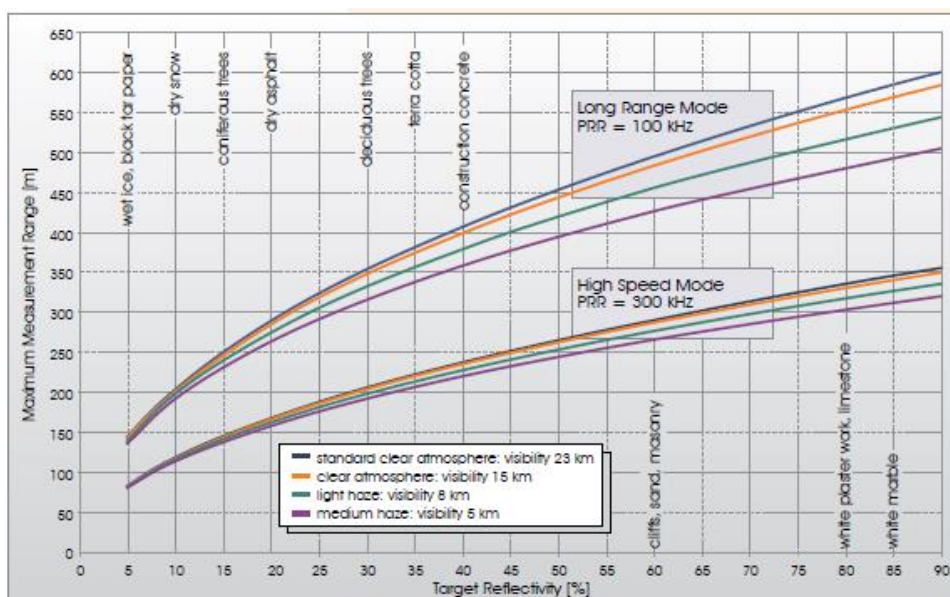


**Slika 6:** Zorno polje laserskega skenerja. Zenitna razdalja je element intervala  $[30^\circ, 130^\circ]$ .



**Slika 7:** 3D upodobitev zornega polja, ki ga med rotiranjem pokrije laserski žarek skenerja.

O sami natančnosti laserskega skenerja je bilo narejenih že veliko študij. Zagotovo ni bistvo, da v kontekstu diplomske naloge o MLS tehnologiji detajlno analiziramo natančnost posameznega senzorja, temveč sistema kot celote. Potrebno pa se je zavedati, da je za dobre končne rezultate potrebno kalibrirati vsak senzorski sistem posebej, kakor tudi njihov kompozit. Natančnost dotičnega LS je podana v specifikacijah proizvajalca, vendar le-ta močno variira glede na oddaljenost objekta od skenerja, odbojne lastnosti površine, strukture objekta, vpadnega kota, zaporednih odbojev in še mnogo drugih dejavnikov. Prav zaradi kompleksnosti ocenjevanja natančnosti in točnosti, ki je odvisna predvsem od pogojev okolja, se tu, glede na namen naloge, omejimo zgolj na specificirano teoretično natančnost.



**Slika 8:** Maksimalni doseg LS VZ-400 v odvisnosti od reflektivnosti materiala in atmosferskih pogojev. (RIEGL datasheet VZ-400, 2013 )

## 2.2.2 Inercialni merski sistem (INS)

Kaj pravzaprav je pojem inercija? Lahko bi jo obrazložil kot lastnost telesa, da le-ta ohranja translacijsko in rotacijsko hitrost konstantno, vse dokler ni prisotnih nobenih novih zunanjih sil ali navorov. Referenčni inercialni sistem je tisti, v katerem veljajo Newtonovi zakoni gibanja. Inercialni koordinatni sistemi običajno ne sovpadajo z navigacijskim koordinatnim sistemom, saj je iz konstrukcijskih razlogov praktično nemogoče zagotoviti enako izhodišče. Lokalni koordinatni sistem, v katerem določamo položaj objekta na zemeljskem površju, rotira in tudi pospešuje skupaj z Zemljo, medtem ko inercialni sistemi ne rotirajo in ne pospešujejo. Lahko pa z inercialnimi sistemi in njihovimi senzorji določamo inercialne pospeške in rotacije (Grewal, 2007).

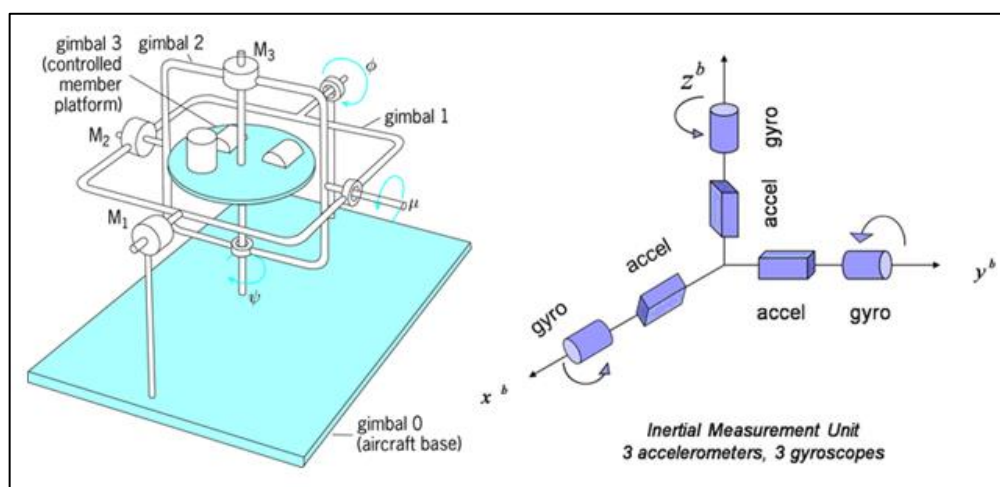
Osnovna opazovanja so meritve pospeškov vzdolž posameznih osi v navigacijskem koordinatnem sistemu. Koordinatne osi, po katerih se meri pospeške, se stabilizira z žiroskopi. Merilniki zaznavajo pospeške ( $a$ ), ki jih lahko modeliramo z drugim Newtonovim zakonom ( $F$  je sila, ki deluje na telo z maso  $m$ , brez gravitacije).

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

Sestav inercialnih senzorjev (angl: Inertial Sensor Assembly – ISA) predstavlja skupek med seboj toga povezanih inercialnih senzorjev na platformi. Tvorijo ga trije merilniki pospeškov in trije žiroskopi (Grewal, 2007).

V splošnem inercialne navigacijske sisteme razdelimo v dve skupini:

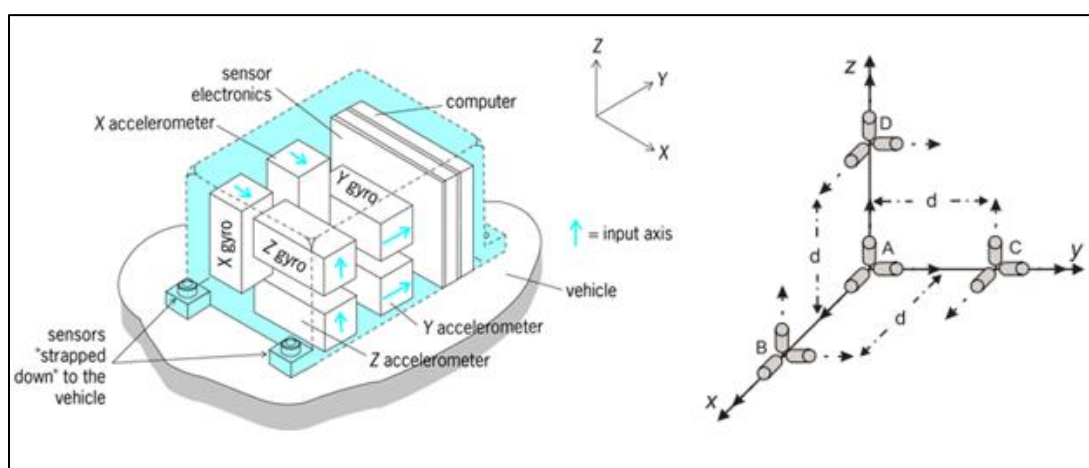
- žiroskopsko stabiliziran sistem,
- sistem s fiksiranimi senzorji.



Slika 9: Žiroskopsko stabiliziran inercialni sistem v modelnem in osnem pogledu. (Access Science, 2013)

Žiroskopsko stabilizirani sistemi so bili razviti v obdobju, ko tedanji računalniki še niso omogočali preračuna v realnem času. V tem sistemu so senzori vedno obrnjeni v nastavljen položaj, ki se ne spreminja kljub premikanju gostujočega vozila oz. platforme. Prednost pri tovrstni tehnologiji je, da so senzori izolirani od hitrih zasukov, kar pripomore k zmanjšanju pogreškov in boljši natančnosti. So pa taki sistemi večji, težji in dražji od ostalih.

Sistem s fiksiranimi senzori je sestav inercialnih sensorjev, togo pritrjen na ohišje oz. konstrukcijo vozila. V tem primeru se rotacije neposredno zaznajo. Sistem deluje elektronsko in ne več mehansko kot je to v primeru žiroskopsko stabiliziranega sistema. Glavna prednost pred žiroskopskimi je nižja cena (Grewal, 2007).



**Slika 10:** Inercialni sistem s fiksnimi »strapdown« senzori v modelnem in osnem pogledu.

(Access Science, 2013)

### 2.2.2.1 Žiroskopi

Naloga žiroskopov je torej mehanska realizacija inercialnega koordinatnega sistema, kjer je ključna ohranitev smeri v inercialnem prostoru.

Same žiroskope kot senzore lahko razdelimo v tri skupine:

- mehanske žiroskope,
- piezoelektrične žiroskope,
- optične žiroskope.

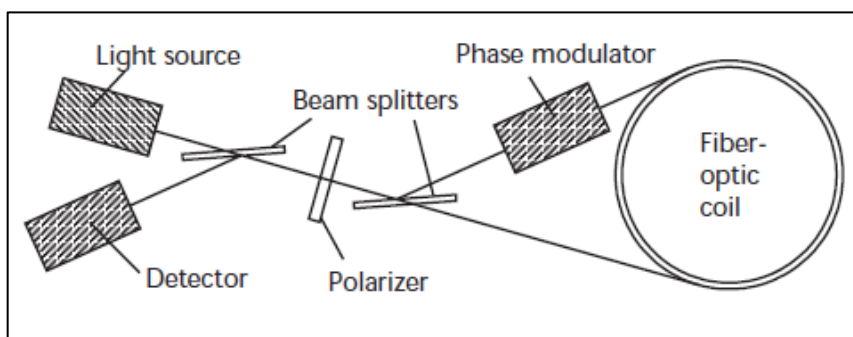
Za predstavitev delovanja je zanimiv predvsem optični žiroskop, namreč tovrstni žiroskopi so gradniki INS sistema, uporabljenega v praktični izvedbi diplomskega dela.

Optični žiroskopi temeljijo na Sagnacovem efektu, ki definira naslednjo trditev: svetlobno valovanje, ki potuje po mirujočem vodniku v nasprotnih si smereh, doseže začetno oz. končno točko vodnika

istočasno. V kolikor vodnik zavrtimo, svetlobno valovanje v smeri vrtenja vodnika opravi daljšo pot in v tej analogiji svetlobno valovanje v obratni smeri krajšo pot. Časovna razlika med obema valovanjema služi za izračun kotne hitrosti vrtenja optičnega žiroskopa (Stopar, 1998).

Ker imamo pri optičnih žiroskopih opravka s svetlobo oz. EMV, jih lahko nadalje delimo na fazne in krožne optične žiroskope.

Podobno kot pri razdaljemerih tudi fazni optični žiroskop deluje po principu interference dveh EMV. Izvor svetlobe pade na delilec žarkov, ki EMV razdeli na dva enaka žarka, ta pa potujeta skozi optični vodnik v nasprotnih smereh. Ob izhodu nato delilec žarkov zopet združi valovanji, združeni valovanji interferirata ter se na detektorju primerjata, določi se fazna razlika. (Free EBooks, 2013)



**Slika 11:** Fazni optični žiroskop in princip njegovega delovanja. (Free EBooks, 2013)

Ob rotaciji žiroskopa med svetlobnimi valovanji nastane fazna razlika, ki je podana kot:

$$\Phi_c \approx \frac{8\pi NA\omega^2}{\lambda_0 c_c} \quad (2)$$

Kjer je:

$\lambda_0$ : valovna dolžina EMV

A: območje oz. površina, obdana z vodnikom, zvitim v tuljavo

N: število obratov vodnika/tuljave

$c_c$ : hitrost EMV v tuljavi

$\omega$ : kotna hitrost

Drugo skupino optičnih žiroskopov predstavlja krožni laserski žiroskop, katerega realizira optična votlina z dvema neodvisnima in koherentnima žarkoma svetlobe, potujočima v nasprotno smer. Zaradi

ojačanja jakosti svetlobnega valovanja je v žiroskopu zmes plinov helija in neona. V kotih vodnika so nameščena dielektrična zrcala, ki selektivno odbijajo svetlobne žarke (Ranfl, 2009). Eno od zrcal je polprepustno in na ta način omogoča optično zaznavanje rotacije s foto detektorjem. S pomočjo katode in dveh anod v optično votlino posredujemo dva laserska žarka v nasprotnih smereh, njuno dolžino pa prilagajajo položaji zrcal, s čimer dosežejo optično resonanco znotraj votline. Kakšni so pogoji za optično resonanco? Dolžina poti žarkov mora biti celoštevilski večkratnik njegove valovne dolžine. Superimpozicija dveh laserskih žarkov realizira mirujoč žarek, ki ohranja orientacijo v inercialnem koordinatnem sistemu. Ob rotaciji žiroskopa senzor zazna interferenco med dvema nasprotno usmerjenima laserskima žarkoma (Titterton, 2004). Fazna razlika med žarkoma je podana kot:

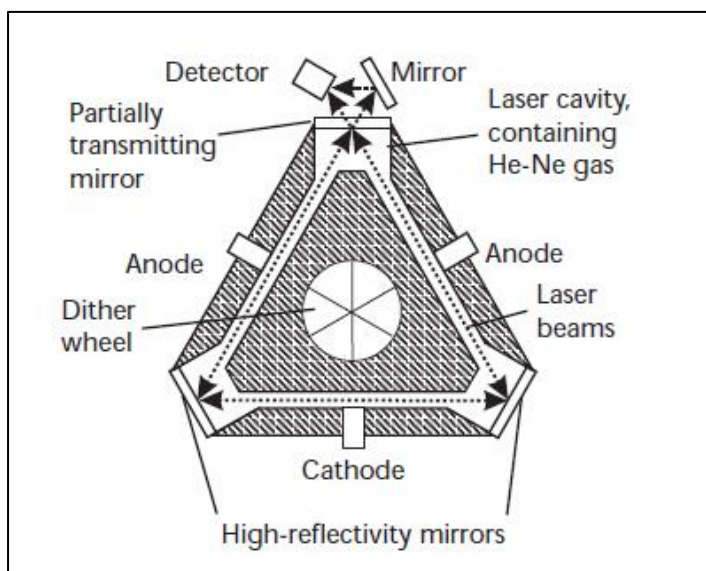
$$\Delta f \approx \frac{4A\omega^2}{\lambda_0} \quad (3)$$

Kjer je:

$\lambda_0$ : valovna dolžina EMV

A: območje poti laserskega žarka v žiroskopu

$\omega$ : kotna hitrost vrtenja osi, ki je pravokotna na ravnino svetlobnih žarkov



**Slika 12:** Konstrukcija krožnega laserskega žiroskopa. (Free EBooks, 2013)

Krožni laserski žiroskop je majhen, enostaven, sodi med najnatančnejše, uporaben je tudi, kadar je čas opazovanja daljši, zahtevana pa je visoka zanesljivost meritev (Ranfl, 2009).

### 2.2.2.2 Merilniki pospeškov

Merilniki pospeškov so eni izmed ključnih senzorjev INS sistema. Kot pove že ime samo gre za inštrumente, ki merijo spremembo hitrosti objekta. Gre za izračun iz povezave povzročene sile  $F$  in mase  $m$ . Izhodni podatek merilnikov pospeškov je ponavadi spreminjajoča se električna napetost ali premik kazalca na skali. Ločimo: merilnik pospeška na podlagi mehanske vrtavke, merilnik pospeškov z nihalom in merilnik pospeškov z nihajočo struno. Osnovni princip delovanja katerega koli merilca pospeškov je enak, razlikujejo se le po metodi spreminjanja pospeška v ustrezno vrednost električne napetosti na izhodni enoti senzorja (Ranfl, 2009).

Inercialni sistem v lasti DFG Consulting d.o.o, ki je tudi element celotnega MLS sistema, je iMAR-FSAS s tremi optičnimi žiroskopi in tremi servo pospeškometri. Sistem senzorjev je tu neposredno pritrjen na ohišje nosilnega objekta.



**Slika 13:** IMU iMAR-FSAS s tehničnimi specifikacijami

(Imar navigations, 2013)

Osi IMU sovpadajo z osmi telesa, merijo pa se projekcije specifičnih sil in kotne hitrosti objektnega koordinatnega sistema. Vrednosti pospeškov je potrebno transformirati v navigacijski koordinatni sistem s pomočjo rotacijske matrike, ki jo določimo na podlagi odčitanih vrednosti žiroskopov. Vrednosti pospeškov nato množimo z ustreznimi elementi rotacijske matrike ter tako dobimo komponente pospeška v smeri koordinatnih osi, le-te pa uporabimo za izračun hitrosti v smereh koordinatnih osi (Kozmus, 2009).



**Preglednica 2:** Tehnične specifikacije IMU iMAR-FSAS (Ranfl, 2009).

| Karakteristika   | Vrednost                                |
|--|---|
| Hitrost vzorčenja podatkov                             | 200Hz                                   |
| Faktor merila  | 300 ppm                                 |
| Šum kotnih meritev                                     | $0,16 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Pogrešek izhodne enote pospeškometerov                 | 1,0 mg                                  |
| Šum meritve hitrosti                                   | 50 $\mu\text{g}/\text{Hz}$              |
| Vpliv nelinearnosti in faktorja merila pospeškometerov | 300 ppm                                 |
| Pogrešek izhodne enote žiroskopov                      | 0,75 $^\circ/\text{h}$                  |

Glede na natančnost, velikost in ceno obstaja več različnih tipov IMU. V najvišji razred spadajo t.i. »navigation-grade« IMU sistemi. Njihove cene so astronomsko visoke, saj njihovi senzorji, zaradi izredno majhnih pogreškov, omogočajo navigacijo brez dodatnih inštrumentov. V srednji razred lahko uvrstimo t.i. »tactical-grade« IMU, kamor spada tudi iMAR-FSAS v lasti DFG Consulting d.o.o.. Vedno bolj pa so uporabne tudi manjše IMU enote MEMS (angl. Micro Electro Mechanical System), katerih površina čipov meri tudi manj kot 1 cm<sup>2</sup>. Njihova natančnost je v primerjavi z dražjimi izvedbami še vedno omejena, vendar je zelo ugodna cena vplivala na njihovo širšo uporabo (Kozmus, 2009).

### 2.2.3 Odometer

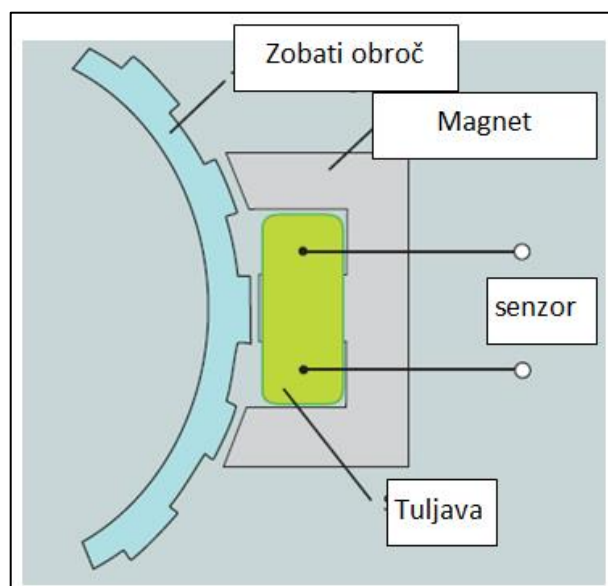
Odometer je naprava, ki je v vsakdanji tehniki široko uporabljena, srečamo ga predvsem v vozilih. Z odometrom se merijo hitrosti in razdalje, ki jih prevozi vozilo, ali pa se merjenje hitrosti in razdalje lahko osredotoči na vsako kolo posebej. Tako imajo denimo tudi zavorni sistemi ABS nameščen odometer, ki šteje število obratov posameznega kolesa. Sistem je torej uporaben tudi v MLS tehnologiji, kjer sta odometer in INS sistem podpora navigacijskemu sistemu. Za štetje vrtljajev osi se uporabljajo optični, mehanski in elektronski sistemi, senzorji pa lahko zaznavajo vrtljaje diskretno ali neprekinjeno (Ranfl, 2009).

Poznamo več vrst oz. tipov senzorjev, ki se uporabljajo v tehnični izvedbi odometra:

- induktivni senzor,
- senzor na principu Hallov-egova efekta,
- optični senzor,
- senzor z Dopplerjevim radarjem.

Tudi odometer v lasti DFG Consulting, d.o.o ima vgrajen induktivni senzor.





**Slika 14:** Induktivni senzor (Machinedesign, 2013).

Induktivni senzor pri svojem delovanju uporablja Faradayev zakon, ki pravi, da se v tuljavi, pravokotni na spreminjajoče magnetno polje, inducira električni tok. Ob prehodu zobatih obročkov skozi magnetno zanko se jakost magnetnega polja zmanjša. Glede na kotno hitrost vrtenja osi variira tudi jakost izhodnega signala. Hitreje kot se vrti os, močnejši je signal in obratno. Seveda imajo senzori določeno hitrostno omejitev pri kateri senzori še zaznajo rotacijo (angl.: cut-off speed). (Ranfl, 2009).

Odometre je potrebno tudi kalibrirati, saj mora prepotovana razdalja ustrezati številu vrtljajev osi odometra. Če poznamo obseg kolesa in njegovo število obratov lahko ob predpostavki, da zanemarimo spodrsavanje, določimo skupno prevoženo razdaljo.

#### 2.2.4 GNSS (GPS)

Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS) oz. GPS kot eden izmed njih, je pravzaprav sestav satelitov, ki zagotavlja neprekinjen radijski signal, katerega je na Zemlji in v njeni bližini možno uporabljati za navigacijske potrebe. Kot je bilo navedeno v zapiskih s predavanja (Stopar, 2011/2012), GPS sateliti oddajajo osnovno frekvenco  $f = 10,23$  MHz, ki je sestavljena iz dveh nosilnih valovanj L1 in L2. Za določitev položaja s sistemom GPS moramo poznati razdaljo do najmanj štirih satelitov v določenem trenutku. Ob predpostavki, da se EMV širi s svetlobno hitrostjo  $c$ , lahko razdajo med GPS

satelitom in sprejemnikom izračunamo na podlagi časovnega zamika med oddajo signala na satelitu in sprejemom na sprejemniku.

V GPS tehnologiji ločimo kodna in fazna opazovanja. Kodna opazovanja pravzaprav temeljijo na opazovanjih psevdorazdalj  $P_k^p$  med satelitom  $p$  in sprejemnikom  $k$ .

$$P_k^p(t_k) = (t_k - t^p) c \quad (4)$$

Kjer je:

$t_k$  čas sprejemnika  $k$ , ki je bil izmerjen s sprejemnikovo uro ob času sprejema signala

$t^p$  čas satelita  $p$ , izmerjen s satelitovo uro

Časovni zamik se na sprejemniku lahko izmeri z ločljivostjo 1 % valovne dolžine kode ali manj. Glede na valovno dolžino obeh sprejetih kod ( $\lambda_{C/A} = 300 \text{ m}$ ,  $\lambda_P = 30 \text{ m}$ ), predstavlja ločljivost 1 % v dolžinskem smislu 3 m za C/A-kodo in 0,3 m za P-kodo.

Za potrebe geodezije so v splošnem kodna opazovanja preslabe natančnosti, zato se uporabljajo fazna opazovanja.

Fazna opazovanja temeljijo na nemoduliranih nosilnih valovanjih L1 in L2. Tudi tu se določa razdalja med satelitom in sprejemnikom, princip pa je nekoliko drugačen. Določa se fazna razlika med fazo valovanja, oddanega s satelita, in fazo, generirano v sprejemniku. Posledica spreminjanja razdalje med satelitom in sprejemnikom je spreminjanje faze valovanja. Za izmero faze valovanja v splošnem potrebujemo valovanji enakih frekvenc, v primeru GPS tehnologije pa temu ni tako zaradi gibanja satelita in pojava Dopplerjevega efekta. Težava se reši s sestavljenim valovanjem dveh različnih frekvenc. Izmerjena razlika faze se tako nanaša na razliko med sestavljenim valovanjem in nominalnem valovanjem GPS sprejemnika. Razdaljo med satelitom in sprejemnikom lahko izračunamo, če poznamo valovno dolžino valovanja, število celih valov med satelitom in sprejemnikom, del faze na satelitu v trenutku oddaje in del faze na sprejemniku v trenutku sprejema.

Osnovno enačbo za izračun razdalje satelit – sprejemnik na osnovi faznih opazovanj lahko zapišemo:

$$\Phi_k^p(t) = \varphi_k(t) - \varphi^p(t) + N_k^p \lambda \quad (5)$$

Kjer je:

$\Phi_k^p(t)$  psevdorazdalja med satelitom p in sprejemnikom k v enotah valovne dolžine

$\varphi_k(t)$  vrednost faze, ko v določenem trenutku t valovanje prispe do sprejemnika k

$\varphi^p(t)$  vrednost faze s satelita p oddanega valovanja v trenutku t

$N_k^p(1)$  neznano število celih valov med satelitom in sprejemnikom v začetku opazovanj

Sprememba opazovane faze pomeni spremembo razdalje med satelitom in sprejemnikom, ne glede na to, ali se giblje samo satelit ali oba. Tudi tu sprejemnik lahko fazo izmeri z natančnostjo 1 % valovne dolžine, ki pa je v primeru faznih opazovanj precej manjša ( $L1 \approx 0,19 \text{ m}$ ,  $L2 \approx 0,24 \text{ m}$ ). V dolžinskem smislu to pomeni 1,9 mm oz. 2,4 mm. Natančnost meritev na podlagi faznih opazovanj je tako občutno višja kot natančnost kodnih, za faktor cca. 1000.

Za določanje položaja točk z geodetsko natančnostjo so ključne fazne razlike, saj predstavljajo osnovo za določitev relativnega položaja med več sprejemniki. Poznamo enojno, dvojno in trojno fazno razliko. Z enojnimi faznimi razlikami odstranimo vpliv pogreška satelitove ure, v dvojnih faznih razlikah dodatno eliminiramo pogrešek ure sprejemnika, s trojnimi pa izločimo še neznano število celih valov, saj je le-to konstantno.

Konfiguracija obravnavanega MLS sistema je vsebovala GNSS sprejemnik Novatel PROPAK V3. Gre za dvo-frekvenčni GNSS sprejemnik, ki sprejema GPS opazovanja.



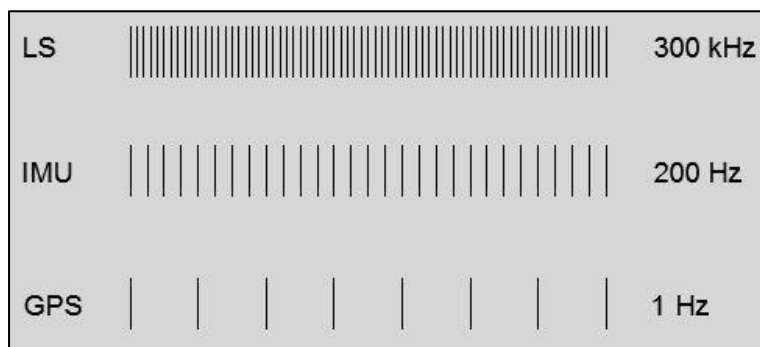
**Slika 15:** Novatel GNSS sprejemnik ProPak – V3, vgrajen v sistem WideoCar.

Zgoraj je opisan zgolj pregled teoretičnih osnov določitve položaja s tehnologijo GPS. Platforma MLS sistema se med zajemom podatkov giblje s sorazmerno veliko hitrostjo, zato je smiselno podati nekaj teoretičnih osnov tudi o kinematičnem določevanju položaja s tehnologijo GNSS.

O kinematičnem določevanju položaja govorimo, ko se sprejemnik giblje. Njegov položaj lahko določamo sproti ali z naknadno obdelavo, pri čemer natančnejše rezultate dobimo v drugem primeru.

V primeru MLS tehnologije predstavlja izračunana trajektorija osnovno ogrodje, na katerega se "pripenjajo" preostali prostorski podatki, zato je čim boljša določitev njenega relativnega in absolutnega položaja glavna skrb.

V primeru statičnih opazovanj je nadštevilnost velika, torej imamo več opazovanj kot neznank, medtem ko se pri kinematičnem načinu položaj vseskozi spreminja, kar se odraža v novih neznankah. Določitev položaja v kinematičnih modelih je načelno podobna sistemu DGPS (Diferencialni GPS), le da se tu ne računa popravkov psevdorazdalj, temveč določa elemente baznega vektorja med referenčnim in premičnim sprejemnikom. Komponente baznega vektorja se določi z obdelavo tako faznih kot tudi kodnih opazovanj referenčnega in premičnega sprejemnika. Najpomembnejši element je določitev števila celih valov v začetnem postopku inicializacije sistema. Kakovost nadalje določenih položajev točk v veliki meri zavisi od kakovosti inicializacije na začetku in tudi koncu izmere. Razdalja med referenčnim in premičnim sprejemnikom naj ne bi presegala 10-15 km (Kozmus, 2003). Ob ustrezni strojni oprepi in naknadni obdelavi je mogoče doseči pod centimetrsko natančnost. Kinematična GPS/GNSS opazovanja temeljijo na faznih meritvah, ki so bistveno bolj občutljiva na vplive okolja kot kodna opazovanja. Okolje se med zajemom podatkov nenehno spreminja, posledica so prekinitve in izgube GPS signala ter vpliv večpotja (angl. »multipath«). V oteženih pogojih (slab signal GPS) je torej precizna določitev položaja zgolj s sistemom GPS močno ovirana, v ta namen se hkrati z GPS meritvami izvajajo tudi meritve z inercialnimi senzorji.



**Slika 16:** Shematska primerjava frekvenčnega območja delovanja posameznih senzorjev.

### 2.2.5 Kombinacija GPS – INS meritev

Do sedaj so bili predstavljeni domala vsi najpomembnejši senzorji na platformi MLS. Z izjemo LS vsi ostali služijo določanju položaja vozila skozi čas. V kolikor bi vsak sistem deloval ločeno, bi bila učinkovitost tovrstnih senzorjev precej manjša, zanemaril bi se izkoristek možnega skupnega potenciala. V primeru določanja trajektorije vozila zgolj na podlagi kinematične GPS metode zaradi različnih vplivov prihaja do prekinitve GPS signala. Prav z integracijo senzorjev v postopku sprejema in obdelave podatkov pa te vrzeli zapolnimo z meritvami ostalih senzorjev.

Način določitve položaja, ko imamo znan položaj v nekem trenutku ter s spremembo smeri, hitrosti in časa določimo nov položaj, imenujemo postopek DR (angl. »Dead Reckoning«), (Kozmus, 2009).

Najbolj primeren in komplementaren sestav DR sistema je kombinacija GPS in INS. Inercialni sistemi omogočajo izredno natančno določitev premikanja vozila, v kolikor je časovni interval kratek. Z naraščanjem časa opazovanja narašča tudi pogrešek kot posledica integriranja pospeškov in kotnih hitrosti po času. Z akumulacijo vpliva šumov v tem časovnem intervalu se manjša natančnost in zanesljivost določitve položaja.

Kot opisuje Ranfl (2009) lahko z združevanjem GPS in INS meritev izgube GPS signala nadomestimo z meritvami INS senzorjev. Prav tako meritve inercialnega sistema močno pripomorejo k terenski učinkovitosti, saj omogočajo hitrejše sledenje in ponovno določanje GPS signala po njegovi prekinitvi (zgolj ob uporabi RTK metode izmere in v močno sklopljenem GPS/INS sistemu). Pogosto se v procesiranju priključi še podatke odometra.

**Preglednica 3:** Primerjava lastnosti GPS sprejemnikov in inercialnih senzorjev (Ranfl, 2009).

|                              | <b>GPS</b>                                    | <b>INS</b>                   |
|------------------------------|---|------------------------------|
| <b>Princip meritev</b>       | določevanje dolžin na podlagi časovnih razlik | inercialni pospeški          |
| <b>Delovanje sistema</b>     | odvisno od vesoljskega segmenta GNSS          | avtonomno                    |
| <b>Izhodne spremenljivke</b> | položaj, čas                                  | položaji, orientacijski koti |
| <b>Dolgoročni pogreški</b>   | majhni  | veliki                       |
| <b>Kratkoročni pogreški</b>  | veliki  | majhni                       |
| <b>Količina podatkov</b>     | majhna  | velika                       |
| <b>Stroški opreme</b>        | nizki   | visoki                       |

Na začetku izvajanja meritev z inercialnimi navigacijskimi sistemi je potrebno določiti začetno orientacijo le-teh. S časom pogreški inercialnih senzorjev naraščajo, zato jih je potrebno večkrat orientirati. Na ta način določimo analitične vrednosti odklona, naklona in usmerjenosti inercialnih senzorjev. Običajno se orientacija izvede ob mirovanju sistema, vendar se je z razvojem tehnik in algoritmov za združevanje GPS in inercialnih meritev pojavila tudi možnost določevanja začetne orientacije med premikanjem sistema, ki sicer v praksi podaja nekoliko slabši rezultat. (Hofmann – Welenhoff, 2003).

Združitev GPS in INS meritev se opravi s pomočjo enega od treh glavnih načinov združevanja:

- nesklopljena združitev (angl. »uncoupled integration«)
- šibko sklopljena združitev oz. prosto sklapljanje (angl. »loosely coupled integration«)
- močno sklopljena združitev oz. vezano sklapljanje (angl. »tightly coupled integration«)

#### Nesklopljena združitev meritev:

Pri sistemu nesklopljenega združevanja podatkov se meritve in izračunavanje položajev opravljata neodvisno (z GPS sprejemnikom in INS senzorji). Inercialni sistem nam poda podatke o spremembi hitrosti in smeri, GPS sprejemnik pa podatke o položaju in oceno natančnosti le-tega. Združevanje poteka po preprostem algoritmu. Osnova je GPS sistem, vendar ko ni na voljo ustreznega signala za določitev položaja, uporabimo meritve inercialnega sistema – vse do tedaj, ko lahko zopet izračunamo položaj z GPS opazovanji.

#### Šibko sklopljena združitev meritev:

Nesklopljeno rešitev lahko izboljšamo, če uporabimo meritve sistema GPS za modeliranje napak v inercialnem sistemu. Modeliranje se opravlja v postopku Kalmanovega filtriranja, kjer lahko ocenimo pogreške inercialnih senzorjev. Gre za preprost, uporaben in robusten sistem združevanja GPS/INS meritev.

#### Močno sklopljena združitev meritev

Ta temelji na skupni obdelavi meritev vsakega od sistemov GPS ter INS. Kot pri šibko sklopljenem načinu se tudi tu uporabi Kalmanov filter, v katerem se združijo meritve obeh podsistemov. Prednost tovrstnega sistema je, da lahko s pomočjo sistema GPS pridobimo podatke o položaju vozila tudi če ni na voljo GPS signala. V močno sklopljenem sistemu je tako dovolj, da namesto sprejema signala štirih, sprejemamo signal z dveh ali treh satelitov. Povrhu tega pa je še lažje določiti neznano število s satelita oddanih valov (Hofmann – Welenhoff, 2003).

### 2.2.5.1 Kalmanov filter

V besedilu diplomske naloge je bil izraz Kalmanov filter uporabljen že večkrat. Glede na njegovo pomembno vlogo pri združevanju in obdelavi GPS in INS meritev bom v nadaljevanju predstavil osnovni koncept diskretnega kalmanovega filtra.

Kalmanov filter (KF) je prvi opisal prof. R.R. Kalman leta 1960 in od takrat je KF najpogostejše orodje za ocenjevanje neznank v številnih aplikacijah. Algoritem predstavlja zaporedno (rekurzivno) oceno neznanih parametrov stanja sistema.

Postopek izvedemo v dveh korakih oz. stopnjah:

- Napoved parametrov
- Obnovitev ocenjenih parametrov

V napovedi uporabimo dinamični model, ki opisuje povezave med neznankami v času. Napoved izvedemo zaradi ocene neznank v času izvedbe vsakega niza opazovanj in tudi ocene neznank med meritvami, za kar je potrebna interpolacija. V drugem koraku preoblikovanja/korelacije kombiniramo podatke opazovanj iz predhodne napovedi z novimi opazovanji (Bar-Shalom, 2001).

Izvedenja preko Kalmanovega filtra poteka preko povratne kontrole. Filter določi vrednosti neznank v določenem trenutku in nato prejme povratno informacijo v obliki opazovanj. Kalmanov filter se torej izvaja kot zaporedje napovedi (predhodne ocene) in preoblikovanja. V fazi napovedi določimo vrednosti neznank in njim pripadajočih varianc ter kovarianc kot a-priori vrednosti za naslednji časovni korak. Preoblikovanje ali korelacija pa je namenjena vključitvi novih opazovanj v a-priori določitev, z namenom izboljšave a-posteriori določitve neznank. Kalmanov filter torej predstavlja optimalno kombinacijo v smislu minimalizacije varianc med oceno parametrov iz predhodnega časovnega trenutka in trenutnimi opazovanji (Bar-Shalom, 2001).

Po zapiskih predavanj (Sterle, 2012) je v enačbah od (6) do (15) predstavljen zaporeden cikel določevanja stanja sistema in natančnosti za to stanje, hkrati pa so definirani tudi začetni pogoji.

- A-priori ocena vektorja neznank za trenutek k:

$$X\bar{k} = A_{k-1} \cdot X_{k-1} \tag{6}$$

- A-posteriori ocena vrednosti vektorja neznank za trenutek k:

$$X_k = f(X\bar{k}, l_k) \tag{7}$$

A-priori ocena  $X_{\bar{k}}$  temelji na sistemski matriki  $A_k$  (matrika prehajanja stanj sistema neznank, velikosti  $u \times u$ ) in a-posteriori oceni iz prejšnjega trenutka  $X_{k-1}$ . A-posteriori ocena  $X_k$  pa temelji na a-priori oceni  $X_{\bar{k}}$  in opazovanjih v istem trenutku  $l_k$ . Na ta način postopamo za vse vrednosti  $k$ .

Ob tem ima filter osnovne tri predpostavke:

- Linearnost:

$$X_k = L_k \cdot X_{\bar{k}} + K_k \cdot l_k \quad \rightarrow \quad L_k = I - K_k \quad (8)$$

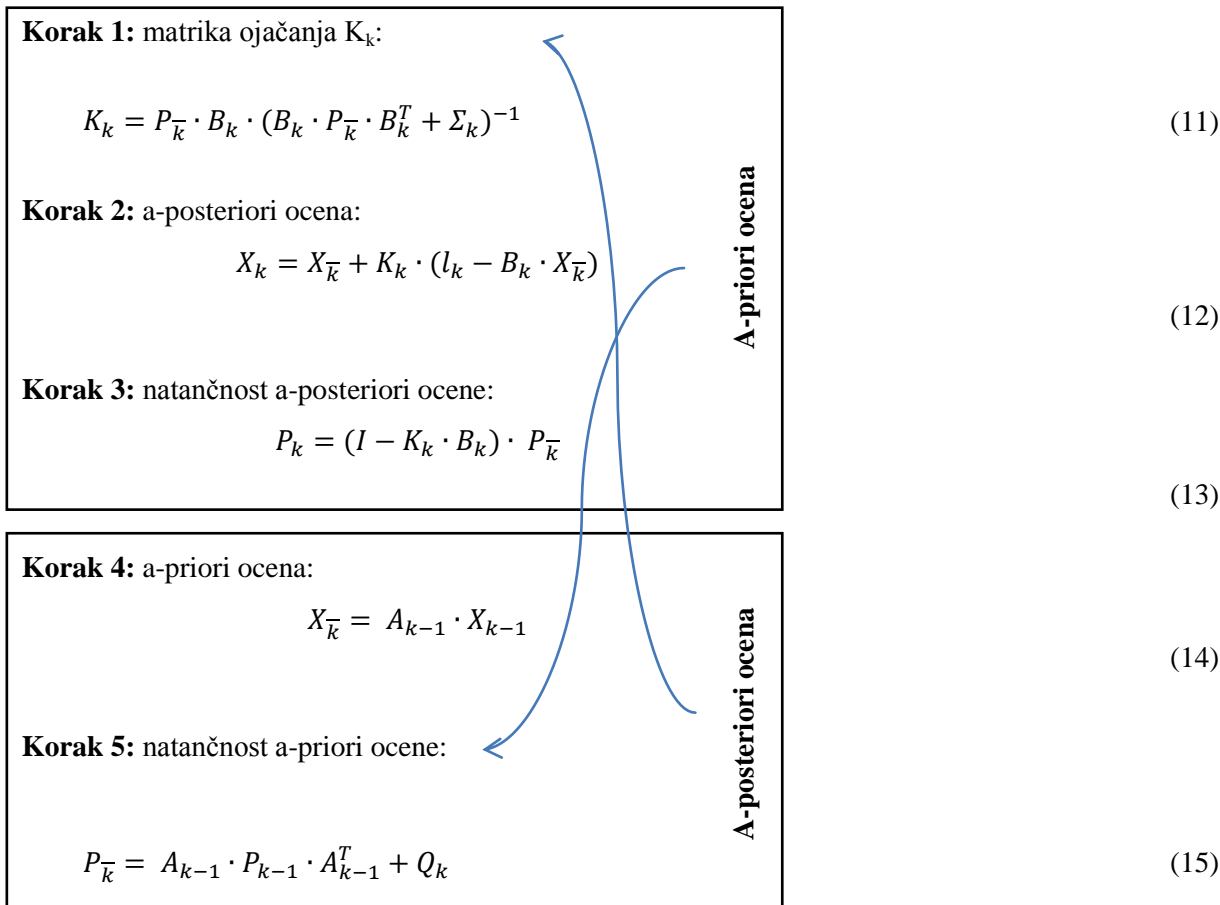
- Nepristranskost:

$$E[X_{\bar{k}} - X] = 0 \quad E[X_k - X] = 0 \quad (9)$$

- Minimalna varianca:

$$E[(X_{\bar{k}} - X) \cdot (X_{\bar{k}} - X)^T] = P_k \rightarrow \min \quad (10)$$

Celoten postopek filtra lahko prikažemo v naslednjih petih korakih:

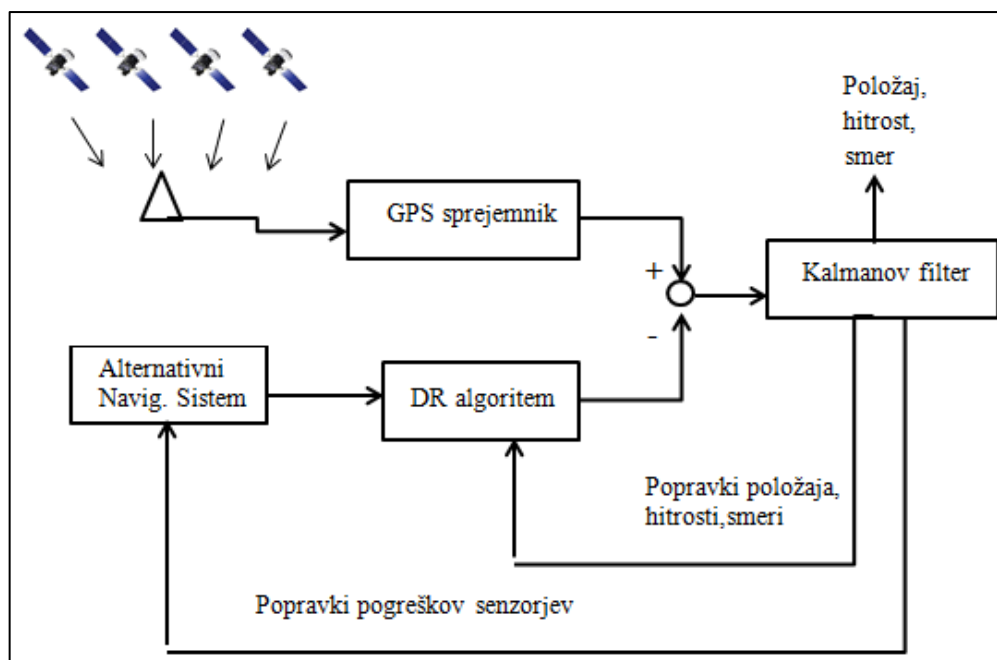




Inicializacija filtra je podana z začetno vrednostjo neznank  $X_0$  in začetno kovariančno matriko neznank  $P_0$ . Pravzaprav začetne vrednosti pogojev niso bistvene, vektor  $X_0$  lahko nastavimo tudi na ničelni vektor, saj ocenjene vrednosti hitro konvergirajo k pravi vrednosti. Pri začetni kovariančni matriki pa je pomembno le to, da so njene vrednosti postavljene dovolj visoko (slaba natančnost), ker tako začetni pogoji ne vplivajo na kasnejše rezultate (Sterle, 2012).

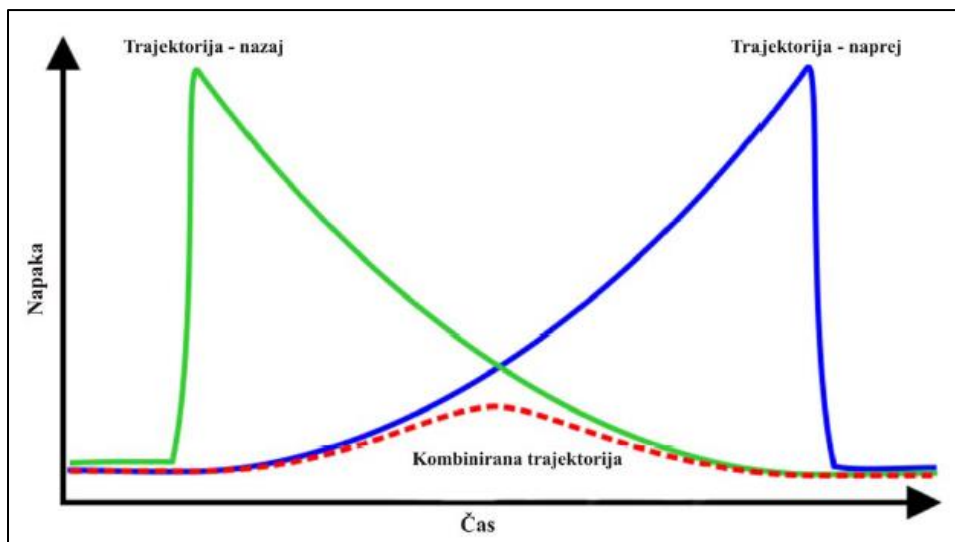
Vrednost sistemskega šuma je ključnega pomena za izravnane vrednosti s pomočjo KF. V kolikor je vrednost šuma večja, bo KF močno vezan na zadnjo točko, posledično bodo tudi izravnane vrednosti zelo podobne prvotnim. Ob manjšem šumu pa se KF obnaša podobno kot izravnava po metodi najmanjših kvadratov (MNK). Skleпам, da se ob uporabi KF veliko pozornosti nameni odstranjevanju šuma, čeprav sem v literaturi zasledil, da je odstranjevanje oz. modeliranje šuma v opazovanjih zelo težavno in problematično. Zato je pomembno, da se pri določevanju položaja uporablja kakovostne senzorje in opremo.

KF se uporablja za kombiniranje inercialnih in GPS meritev. Podatki se združijo in med seboj primerjajo, nato pa se določi pogreške meritev za določevanje položaja z alternativnimi (inercialnimi) navigacijskimi sistemi. Ocenjene vrednosti pogreškov nam omogočajo izboljšanje določitve položaja z inercialnimi sistemi, kadar ni na voljo GPS signala.



Slika 17: Delovanje kalmanovega filtra pri združevanju različnih navigacijskih senzorjev (Ranfl, 2009).

Zaradi izvajanja faznih kinematičnih meritev v urbanih okoljih, pogosto prihaja do prekinitev signala, npr. pri podvozih, takrat se položaj določa le na osnovi inercialnih meritev. V ta namen obstajajo algoritmi, s katerimi lahko popravljamo inercialne meritve in izboljšamo položajno natančnost oz. točnost. Eden teh algoritmov je vzvratno glajenje (angl. backward smoothing). Postopek je povsem preprost, trajektorijo namreč računamo po času naprej in nazaj. Ob prekinitvi GPS signala deluje zgolj inercialni sistem. V KF ne pride do korekcije inercialnih meritev na podlagi meritev GPS, zato se pogoški akumulirajo, s časom natančnost pada. Pogoški po času naprej in nazaj bodo naraščali, vendar v obratno smer. V kolikor obe rešitvi združimo, dobimo kombinirano in zglajeno trajektorijo, ki je v relativnem smislu glede na posamezni trajektoriji (naprej in nazaj) bistveno manj pogošena.



**Slika 18:** Vzvratno glajenje, algoritem široko uporabljen v procesiranju podatkov MLS sistemov. (Ranfl, 2009)

### 2.3 Osno ve koordinatnih sistemov

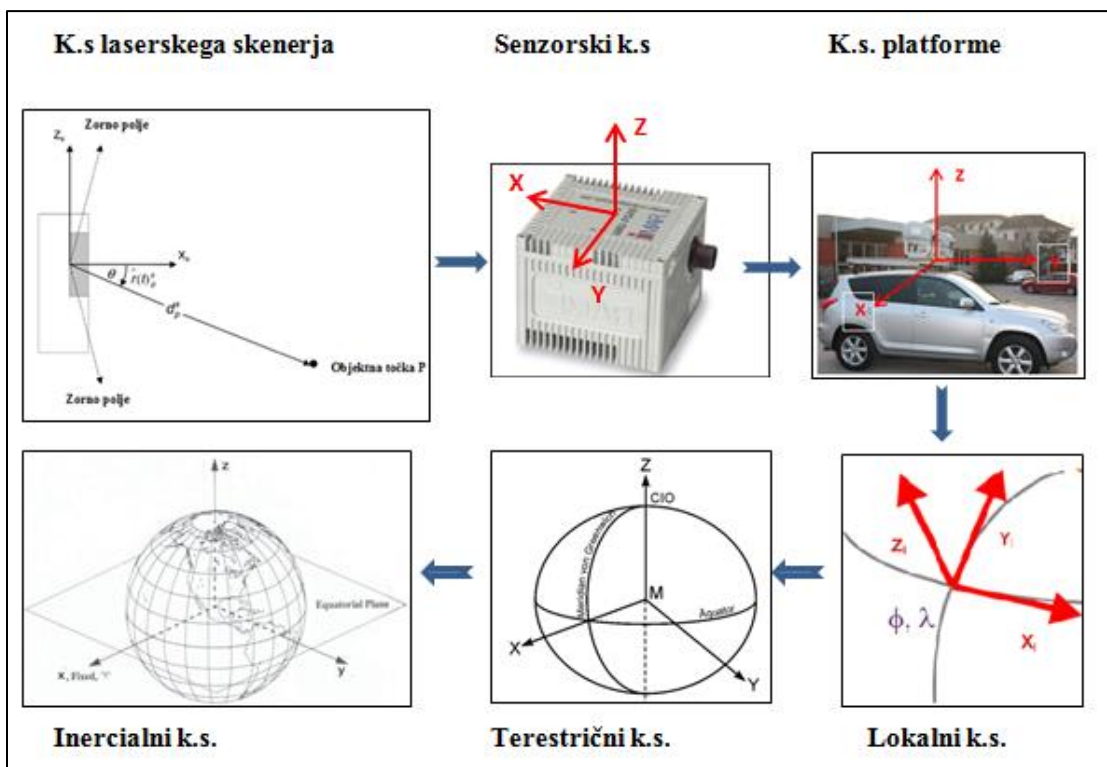
Glede na posebno specifiko inercialnih koordinatnih sistemov ter nadaljnje uporabe rotacijskih matrik za prehajanje med različnimi sistemi sem se odločil podati osnovne podatke o koordinatnih sistemih, saj na ta način dobimo širšo sliko obravnavanega problema.

Senzorji v INS merijo pospeške in zasuke relativno glede na referenčni inercialni koordinatni sistem, ki se glede na referenčni astronomski sistem ne spreminja. Cilj je, da meritve inercialnih senzorjev povežemo s poljubnim koordinatnim sistemom, tako da jih lahko uporabimo za določevanje prostorskih koordinat.

Osnovni koordinatni sistemi pri obravnavanju mobilne platforme z GPS/INS ter LS senzorji:

- Inercialni koordinatni sistem (ECI – Earth Centerd Inertial):
  - miruje ali se giblje premosorazmerno, nanj ne delujejo pospeški,
  - izhodišče je težišče Zemlje,
  - os X je usmerjena proti pomladišču,
  - os Z sovpada s srednjo osjo rotacije Zemlje,
  - os Y dopolnjuje sistem v desnosučen.
  
- Terestrični koordinatni sistem (ECEF- Earth Centerd Earth Fixed, npr. WGS84):
  - za razliko od inercialnega se ta vrti skupaj z Zemljo,
  - izhodišče je težišče Zemlje,
  - os X je presečišče ravnine ekvatorja in Meridiana Greenwich,
  - os Y poteka skozi dogovorjeni Zemljin pol – sovpada z osjo inercialnega sistema,
  - os Z dopolnjuje sistem v desnosučen.
  
- Lokalni koordinatni sistem:
  - izhodišče je poljubno,
  - os Z je ortogonalna na referenčni elipsoid (definirana s  $\phi$  in  $\lambda$ ),
  - os X je usmerjena proti severu in vzporedna tangenti meridiana v točki, kjer ga Z-os seka,
  - os Y je usmerjena proti vzhodu,
  - običajno se izhodišče nahaja v središču senzorskega sestava, torej se premika (definiramo lokalne usmerjenosti).
  
- Koordinatni sistem platforme:
  - nanaša se na platformo, ki jo uporabljamo pri zajemu in ji določamo položaj,
  - z njim določamo položaj relativno glede na lokalni koordinatni sistem,
  - izhodišče je običajno geometrijsko oz masno središče,
  - osi sovpadajo s primarnimi rotacijskimi osmi objekta,
  - os Z poteka navpično navzgor ali navzdol (odvisno ali imamo ALS ali MLS sistem),
  - os Y je usmerjena v vzdolžni smeri premikanja vozila, okoli nje merimo prečni nagib,
  - os X dopolnjuje sistem v desnosučen.
  
- Senzorski koordinatni sistem (IMU):
  - referenčni sestav v katerem je narejena inercialna enota,
  - v sistemu s fiksnimi senzorji je ta navadno poravnan s k.s. platforme, tako da imata oba sistema isto izhodišče in sta vzporedna,

- njegova orientacija je poljubna za vsak časovni trenutek, posledično moramo za vsak ta trenutek poznati položaj in orientacijo glede na k.s. platforme.
- Koordinatni sistem laserskega skenerja:
  - lahko izražen sferno ali kartezično,
  - običajno gre za sferno parametrizacijo skenirane točke,
  - izhodišče v presečišču rotacijskih osi LS.



Slika 19: Transformacije med koordinatnimi sistemi, ki jih je potrebno upoštevati pri MLS.

**2.3.1 Transformacije med koordinatnimi sistemi**

Poglejmo si še transformacijo med koordinatnimi sistemi v smislu enačb:

- Transformacija iz sfernega v kartezični koordinatni sistem LS:

$$\begin{aligned}
 x &= r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\
 y &= r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\
 z &= r \cdot \cos \theta
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Konstruktivsko je nemogoče zagotoviti, da se os rotirajočega zrcala in os laserskega skenerja sekata ter sta pravokotni, zato je potrebno upoštevati popravek:

$$\begin{aligned}x_e &= r_0 \cdot \cos \varphi_d \\y_e &= r_0 \cdot \cos \varphi_d\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}X_l &= r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + x_e \cdot \cos \varphi + y_e \cdot \sin \varphi \\Y_l &= r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + x_e \cdot \sin \varphi - y_e \cdot \cos \varphi \\Z_l &= r \cdot \cos \theta\end{aligned}\quad (18)$$

kjer so:

- r izmerjena razdalja med LS in objektno točko
- $\theta$  odklon laserskega žarka, ki ga definira rotirajoče se zrcalo
- $\varphi$  kot zasuka laserskega skenerja okoli njegove osi
- $r_0$  napaka merjenja dolžin zaradi odstopanja ravnine rotirajočega zrcala od nominalne vrednosti
- $\varphi_d$  odklon rotacijske osi LS

- Transformacija kartezičnega k.s. LS v želeni k.s. (lokalni ali globalni):

$$\begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS/IMU} \\ Y_{GPS/IMU} \\ Z_{GPS/IMU} \end{pmatrix} + M_{IMU}^m \cdot M_{LS}^{IMU} \cdot \left[ \begin{pmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{pmatrix} + T_{LS}^{IMU} \right]\quad (19)$$

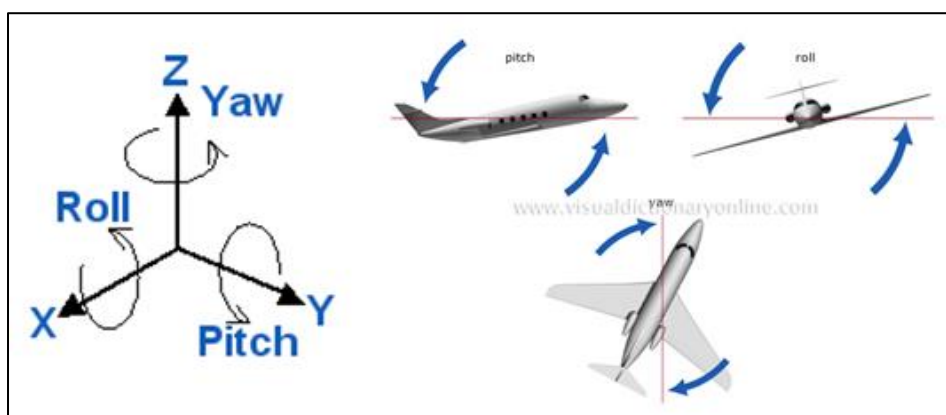
kjer so:

- $X_m, Y_m, Z_m$  koordinate v izbranem globalnem koordinatnem sistemu (ang. »mapping frame«)
- $(X, Y, Z)_{GPS/IMU}$  komponente translacijskega vektorja med IMU in »mapping frame«
- $M_{IMU}^m$  rotacijska matrika med osmi IMU in osmi izbranega k.s.
- $M_{LS}^{IMU}$  rotacijska matrika med osmi LS in IMU; kotna nepravilnost (angl. boresight alignment)
- $X_l, Y_l, Z_l$  komponente vektorja od LS do dotične objekte točne
- $T_{LS}^{IMU}$  translacija med izhodišči k.s. LS in IMU

Rotacija  $M_{LS}^{IMU}$  in translacija  $T_{LS}^{IMU}$  med koordinatnima sistemoma LS in IMU sta konstantni, v kolikor med snemanjem ni nobenih motenj, distorzij ali deformacij platforme. Zagotoviti je potrebno stabilno platformo. Na drugi strani pa rotacija  $M_{IMU}^m$  in translacija  $T_{GPS/IMU}^m$  med koordinatnima sistemoma IMU in izbranim globalnim k.s. nista konstantni, saj se spreminjata za vsako objektno lasersko točko.

## 2.4 Kotna nepravnanost

Kotno nepravnanost ali BA (angl. boresight alignment) lahko opredelimo kot kotno odstopanje med osmi koordinatnega sistema LS in osmi IMU, ki v splošnem nikoli niso povsem poravnane oz. osi niso vzporedne, čeprav so vrednosti kotov BA majhne. Problem kotnega odstopanja je jasno definiran in poznan v tehnologiji ALS že več kot desetletje. Čeprav so algoritmi za določitev vrednosti BA pri ALS v splošnem skoraj identični tistim v MLS, pa je način pridobivanja podatkov precej drugačen. Pri aerolaserskem skeniranju se lahko celotno interesno območje posname v vseh smereh preletov in je potemtakem v vsakem pasu vidno v celoti. To omogoči dovolj informacij, da je določitev elementov BA (kotne vrednosti »roll« - *nagib*, »pitch« - *naklon* in »yaw/heading« - *zasuk*) izvedljiva. MLS tehnologija v večini primerov nima možnosti, da bi v vseh smereh vožnje zajeli celotno interesno območje, saj je nemogoče zajeti identične objekte, v kolikor se vozimo v obratnih smereh in je LS konfiguriran kot 2D linijski (angl. push broom), orientiran pravokotno na smer vožnje in z omejenim vidnim poljem.

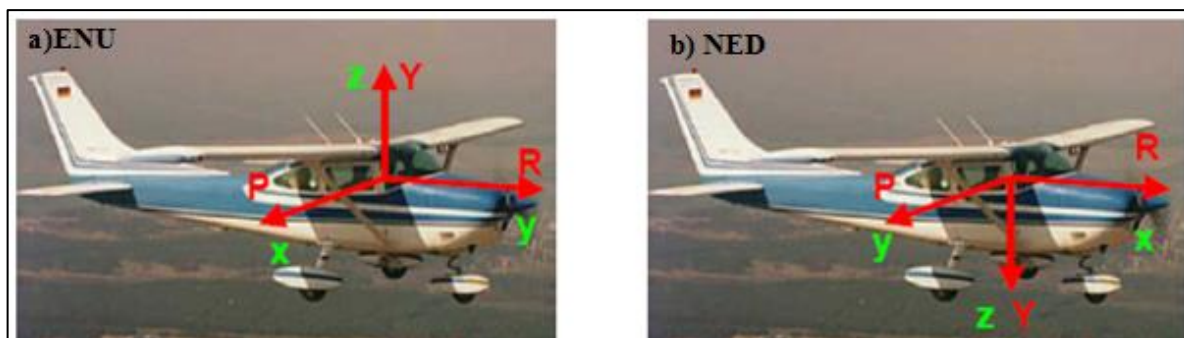


**Slika 20:** Pomen vrednosti Roll (nagib), Pitch (naklon) in Yaw/heading (zasuk) v praktičnem smislu.

(Vir: <http://diydrones.com/profiles/blogs/new-ground-station-idea>)

Kakšen je pravzaprav pomen zasukov v praktični uporabi. Preden odgovorim na to vprašanje je treba poudariti, da se vrednosti za *nagib* (angl. roll), *naklon* (angl. Pitch) in *zasuk* (angl. Yaw) po posameznih koordinatnih oseh razlikujejo glede na referenčni koordinatni navigacijski sestav. Najbolj

pogosti konfiguraciji IMU enote, ki definirata koordinatno-navigacijski okvir, sta ENU (East-North-Up) in NED (North-East-Down).



**Slika 21:** Obe najbolj uporabljeni konfiguraciji IMU enote na platformo. (Vir: RiWORLD datasheet)

Iz slike je razvidno, da se vrstni red zasukov med ENU in NED sestavom razlikuje:

$$\begin{aligned} M_{ENU} &= R_Z(\kappa) \cdot R_X(\gamma) \cdot R_Y(\rho) \\ M_{NED} &= R_Z(\kappa) \cdot R_Y(\gamma) \cdot R_X(\rho) \end{aligned} \quad (20)$$

Kjer so za ENU:

$$\begin{aligned} R_Z(\kappa) &= \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ R_Y(\rho) &= \begin{pmatrix} \cos(\rho) & 0 & \sin(\rho) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\rho) & 0 & \cos(\rho) \end{pmatrix} \\ R_X(\gamma) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

Vrednost *nagib* (angl. »roll«) torej implicira zasuk v obratni smeri vrtenja urinega kazalca okoli osi, ki definira smer leta ali vožnje vozila. Pri letalu bi to gibanje lahko opisali kot dviganje in spuščanje kril. Za ENU sistem je to rotacija okoli osi  $y$ , pri NED sistemu pa okoli osi  $x$ .

Vrednost *naklon* (angl. »pitch«) je rotacija v obratni smeri ure okoli osi, ki povezuje obe krili letala. Odraža se kot dviganje in spuščanje nosu plovila. Pri ENU sestavu je to rotacija okoli osi  $x$ , pri NED sestavu pa okoli osi  $y$ .

Kotna vrednost *zasuk* (angl. »yaw«), pogosto poimenovana tudi »heading«, definira rotacijo v obratni smeri ure okoli osi, ki navpično prebada trup letala ali drugega nosilca platforme. Odraža se kot

premikanje prednjega dela plovila levo ali desno. Pri ENU in NED konfiguraciji je to zasuk okoli osi z, ki imata obratno usmerjenost.

Za razumevanje problema BA bom le-tega razdelil v dve možnosti, glede na način zajema podatkov, kjer lahko uporabimo ALS ali MLS tehnologijo oz. platformo. Algoritmi, razviti in uporabljeni v ALS tehnologiji, so implementirani tudi v MLS tehnologijo z majhnimi odstopanji, zato bo teoretični del z enačbami podrobneje predstavljen v poglavju 2.4.1.

#### **2.4.1 Kotna neporavnost v aerolaserskem skeniranju**

Aerolasersko skeniranje je odličen način pridobivanja podatkov o modelu terena, saj lahko s to metodo zajema podatkov pridobimo sorazmerno veliko gostoto točk. Vplivov na natančnost določitve položaja posamezne točke na terenu je več. Poleg odbojnih lastnosti materiala, odklonskega kota laserskega žarka lidarske naprave (angl. Light Detection And Ranging, LiDAR), zaporednega odboja in ostalih vplivov lidarskih opazovanj, so tu za končno natančnost in točnost najbolj pomembni podatki o poziciji platforme, ki jih pridobimo na osnovi GPS/INS opazovanj, natančnost teh pa močno zavisi od kalibracije sistema kot celote. Kalibracijo sistema lahko razdelimo v dva sklopa. Prvi obravnava kalibracijo posameznih senzorskih sistemov, drugi pa kalibracijo že kalibriranih posameznih senzorjev, združenih v celoto. Pri drugem sklopu gre predvsem za določitev medsebojnega položaja in orientacije senzorjev na platformi. Translacije med koordinatnimi izhodišči lidarja, IMU in GNSS senzori se običajno določi že pred uporabo platforme, z različnimi fizikalnimi in mehanskimi metodami/meritvami. Na drugi strani pa je določitev rotacij BA možna šele med samim zajemom podatkov, ko natančnost GPS/INS sistema postane zadovoljive natančnosti (Skaloud, 2006).

Čeprav je bilo v preteklosti razvitih precej pristopov za določevanje elementov BA med foto-kamerami in IMU, je princip določitve teh odstopanj med ALS-IMU nekoliko drugačen. Kljub temu, da so bili algoritmi funkcionalni, so zahtevali veliko ročnih postopkov, bili so nestabilni, odražalo se je pomanjkanje statističnih ocen natančnosti. Skaloud (2006) je predstavil robusten pristop za določitev elementov BA v ALS. Izhodišče predstavlja modeliranje sistematičnih vplivov v enačbah direktnega georeferenciranja in pogoj, da skupina točk leži na skupni ravnini. Dobra kalibracija zahteva veliko število planarnih površin z različnimi orientacijami njihovih normal, kar je najlažje zagotoviti v urbanih območjih. V kolikor v skupnem modelu izravnave upoštevamo tako parametre ravnin, kot kalibracije, ni potrebno izvajati nikakršnih dodatnih opazovanj za določitev kalibracije, razen seveda samega kalibracijskega preleta. Potreba po kalibraciji sistema se pojavi zaradi lidarskih opazovanj in njihovih relacij/transformacij do GPS/INS podatkov. Ob uporabi poljubnega kartezičnega koordinatnega sistema za zajem podatkov (m), se enačba za direktno georeferenciranje lidarskih meritev v času  $t$ , z GPS/INS na identični platformi, glasi:



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^m + R_{IMU}^m \cdot \left[ (I + \Omega_{b^*}^b) \cdot T_S^{b^*} \cdot \begin{pmatrix} (\rho + \Delta\rho) \cdot \sin(\theta) \\ 0 \\ (\rho + \Delta\rho) \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}^b \right] \quad (22)$$

Kar lahko krajše, v vektorski obliki, zapišemo tudi kot:

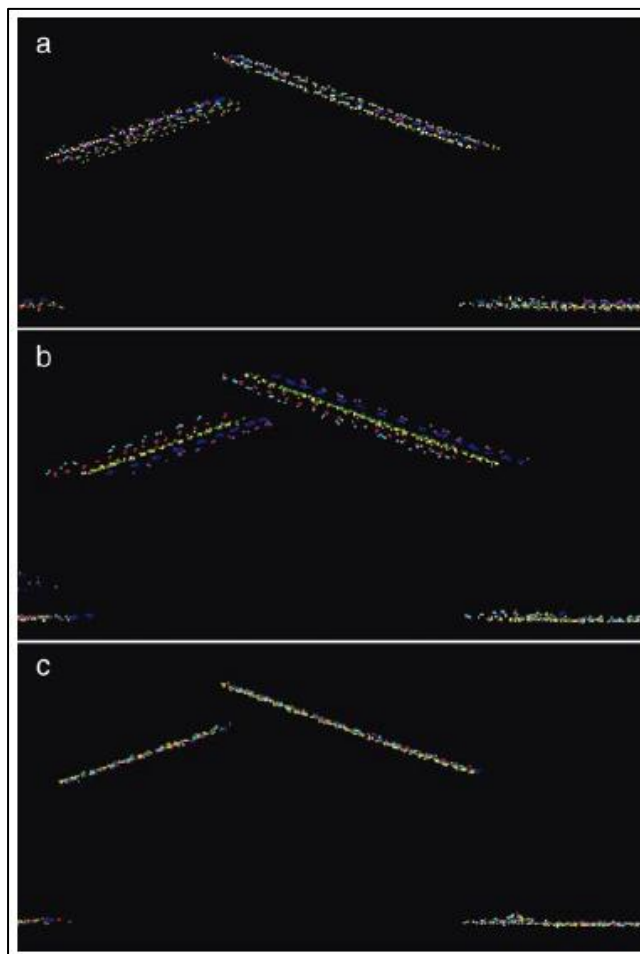
$$r_p^m = r(t)_{IMU}^m + R(t)_{IMU}^m \cdot \left[ M_{LS}^{IMU} \cdot d_P^{LS} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ 0 \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} + T_{IMU}^{LS} \right] \quad (23)$$

Kjer so:

|   |  |
|---|--|
| $r_p^m = [x \ y \ z]^T$   | vektor do poljubne točke P, v izbranem koordinatnem sistemu (m)                          |
| $r(t)_{IMU}^m = [X \ Y \ Z]^T$  | koordinate izhodišča IMU, v izbranem k.s. v času $t$                                     |
| $R(t)_{IMU}^m = f(r, p, y)$   | rotacijska matrika med IMU in izbranim k.s. v času $t$                                   |
| $M_{LS}^{IMU} = (I + \Omega_{b^*}^b) \cdot T_{LS}^{IMU*}$   | relativna orientacije med LS in IMU («bore-sight«)                                       |
| $d_P^{LS} = (\rho + \Delta\rho)$  | razdalja med poljubno točko P in LS  |
| $\hat{r}(t)_{LS}^p = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ 0 \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}$                               | smerni kosinusi vektorja od LS proti točki P, v k.s. LS                                  |
| $T_{IMU}^{LS} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  | vektor med izhodišči k.s. IMU in LS. (angl. »lever-arm«)                                 |
| $\Omega_{b^*}^b = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{pmatrix}$ | a-simetrični del matrike kotne nepravnanosti, z majhnimi koti $\alpha, \beta, \gamma$    |
| $T_{LS}^{IMU*}$   | a-priori definirana rotacijska matrika med LS in IMU, odvisna od konfiguracije platforme |
| $\theta$  | odklonski kot rotirajočega zrcala LS   |

Kalibracijski parametri v enačbi (22) oz. (23) so elementi vektorja  $T_{IMU}^{LS}$  (angl. lever-arm) in koti BA ( $\alpha, \beta, \gamma$ ). Kot je že bilo omenjeno, so elementi vektorja  $T_{IMU}^{LS}$  določeni predhodno, zato so izključeni iz kalibracije med letom. Tako kotne vrednosti BA postanejo edini predmet kalibracije.

Praktični vpliv kotov BA na natančnost zajetih podatkov je prikazan na sliki 22. Slika prikazuje prečni prerez strehe hiše, ki je bila zajeta na podlagi osmih preletov v različnih smereh. Vpliv vrednosti *nagib* (angl. roll), (slika 22 a) se vidi tako na ravnih kot nagnjenih površinah. Vpliv kota *naklon* (angl. Pitch), (slika 22 b) na horizontalnih ravninah ni opazen, ima pa nasproten vpliv na nagnjene ravnine. Posledice kota *zasuk* (angl. Yaw), (slika 22 c) ni mogoče razbrati iz prečnega profilnega pogleda.



**Slika 22:** Praktične posledice kotov BA, *nagib* (a), *naklon* (b) in *zasuk* (c). (Skaloud, 2006 )

Funkcionalni model temelji na pogoju, da georeferencirane laserske točke ležijo na površinah znane oblike, običajno so to ravnine. Parametri teh ravnin so določeni skupaj s kalibracijskimi parametri BA. Parametri ravnine  $j$  so definirani kot  $\vec{s}_j = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4]^T$ , kjer  $s_1$ ,  $s_2$  in  $s_3$  predstavljajo smerne kosinuse normalnega vektorja ravnine,  $s_4$  pa negativno ortogonalno razdaljo med ravnino in izbranim koordinatnim sistemom. Želeno obliko funkcionalnega modela za določitev iskanih parametrov tako zapišemo kot:

$$\left\langle \vec{s}_j, \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + R_{IMU}^m \cdot \left( \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + U_i \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \vec{a} \right) \right\rangle = 0 \quad (24)$$

kjer so:

$$\vec{g} = [X \ Y \ Z]^T$$

koordinate izhodišča IMU, v izbranem k.s. v času  $i$

$$R_{IMU}^m = f(r,p,y)$$

rotacijska matrika med IMU in izbranim k.s., parametrizirana z »roll«, »pitch« in »yaw« opazovanji v času  $i$

$\vec{a}$  vektor med izhodišči k.s. IMU in LS. (ang. »lever-arm«)

$[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$  neznani koti BA

$U_i$  a-simetrična matrika vektorja  $\vec{u}$

$$\vec{u} = [u \ v \ w]^T \equiv T_s^{b*} \cdot \begin{bmatrix} (\rho + \Delta\rho) \cdot \sin(\theta) \\ 0 \\ (\rho + \Delta\rho) \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Enačba (24) tako vsebuje dve skupini neznank, prve se nanašajo na BA, druge pa na koeficiente ravnin. Po linearizaciji se določitev popravkov  $\widehat{\delta}_1, \widehat{\delta}_2$  za oba seta parametrov izvede s pomočjo metode najmanjših kvadratov (Gauss-Helmertov model).

$$\begin{bmatrix} A_1^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A_1 & A_1^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A_2 \\ A_2^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A_1 & A_2^T (BP^{-1}B^T)^{-1} A_2 + G^T P_c G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{\delta}_1 \\ \widehat{\delta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T (BP^{-1}B^T)^{-1} w \\ A_2^T (BP^{-1}B^T)^{-1} w + G^T P_c w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Oz. krajše  $N \cdot \widehat{\delta} + u = 0$

Kjer so:

$A_1, A_2$  matriki parcialnih odvodov kalibracijskih parametrov in parametrov ravnin

$B$  matrika parcialnih odvodov opazovanj

$G$  matrika parcialnih odvodov lineariziranih vezi v parametrih ravnin

$w$  vektor odstopanj na podlagi trenutno ocenjenih parametrov in opazovanj

$P$  in  $P_c$  matriki uteži

Iskani parametri se nato iterativno izboljšujejo. Za začetek prve iteracije nastavimo vrednosti parametrov BA na 0, saj se pričakuje, da bodo le-ti imeli majhne vrednosti. Pri približnih vrednostih ravnin pa moramo že v prvi iteraciji poznati dobre približke. Kot opisuje Shakarji (1998), se problem rešuje z metodo ortogonalne regresije. Rešitev metode najmanjših kvadratov za normalni vektor  $\vec{n}$ , ki pripada ravnini  $j$ , se zreducira na problem lastnih vrednosti kovariančne matrike  $C$ , z vsemi  $m$  točkami  $\vec{r}_i$ , ki pripadajo ravnini  $j$  in se nanašajo na njen centroid.

$$C_{\vec{n}} = \left\{ \sum_{i=1}^m (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_i^T) \right\} \vec{n} = \sum_{i=1}^m \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ x_i y_i & y_i^2 & y_i z_i \\ x_i z_i & y_i z_i & z_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S1_j \\ S2_j \\ S3_j \end{bmatrix} = \lambda \cdot \vec{n} \quad (26)$$

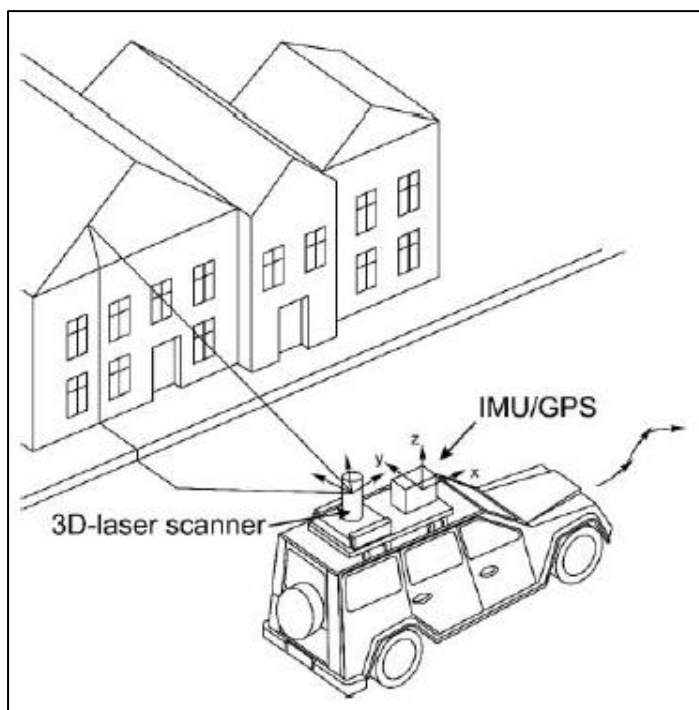
Ker je  $C$  simetrična, pozitivno semi-definitna matrika (vse tri lastne vrednosti so element realnih števil in hkrati večje ali enake 0) je vsota kvadratov ortogonalnih razdalj minimalna, ko je izbrana najmanjša

lastna vrednost. Ko je izračunan normalni vektor, se ortogonalna razdalja med izbranim k.s. in ravnino, torej  $s_4$ , določi kot  $s_{4j} = -\vec{n}^T \cdot \vec{r}$ .

Tako je torej definiran matematični model georeferenciranja in posledično določanje iskanih parametrov BA v ALS. Ob tem je zelo pomembno, da ustrezno izberemo kalibracijsko območje, saj mora le-to omogočati ekstrakcijo večjega števila različno orientiranih ravnin za uspešno kalibracijo sistema.

#### 2.4.2 Določitev kotne nepravnanosti v mobilnem laserskem sistemu

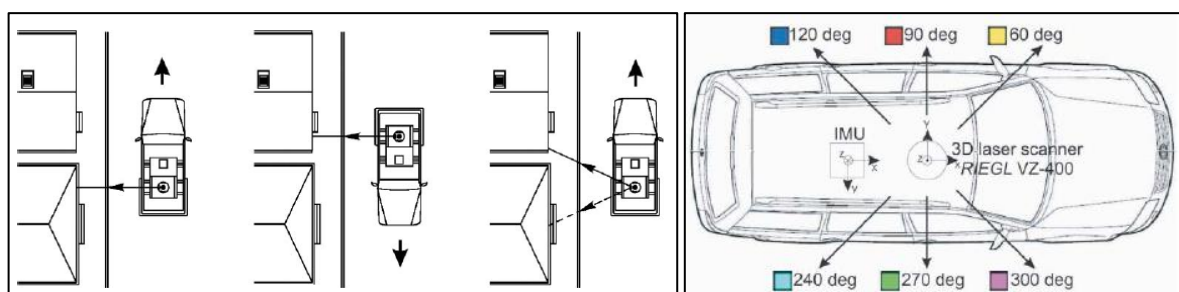
Določitev elementov BA v MLS sistemu se močno nanaša na 3D laserski skener, kot njegovo ključno komponento. Poleg podatkov o razdalji med LS in posamezno točko na snemalni površini, LS beleži tudi kotne vrednosti odklona laserskega žarka in rotacije LS, kar podaja orientacijo točke v skenerjevem lastnem koordinatnem sistemu (SOCS). Zato je tu ključnega pomena kalibracija LS kot samostojnega senzorja, pred njegovo implementacijo v MLS sistem. V kolikor MLS sistem vsebuje zgolj en LS, je ta običajno konfiguriran kot linijski, za spremembo položaja pa skrbi premikanje vozila. Pravzaprav je zadeva precej podobna pometajočim (angl. push-broom) senzorjem v ALS tehnologiji.



**Slika 23:** Tipična konfiguracija LS na mobilno platformo. Rotacijska os zrcala je vzporedna skeniranim objektom. (Rieger, et al., 2010)

V kolikor želimo izvesti kalibracijo MLS sistema, je najbolje izvajati snemanje v urbanem področju, kjer imamo jasno definirane ravne površine (predvsem fasade, strehe, znaki...), ki omogočajo izračun parametrov BA. Seveda je pri tem potrebno zagotoviti čim bolj odprto območje, ki omogoča neprekinjen sprejem in vidnost GNSS/GPS satelitov. Glede na frekvenco rotiranja zrcala LS, ki odklanja žarek, lahko določimo hitrost premikanja vozila v odvisnosti od gostote točk na skenirani površini.

Tovrstna metoda zahteva različne konfiguracije LS v obeh smereh vožnje. Na ta način dobimo večje število bolj ali manj prekrivajočih se oblakov točk, v odvisnosti od števila konfiguracij LS.

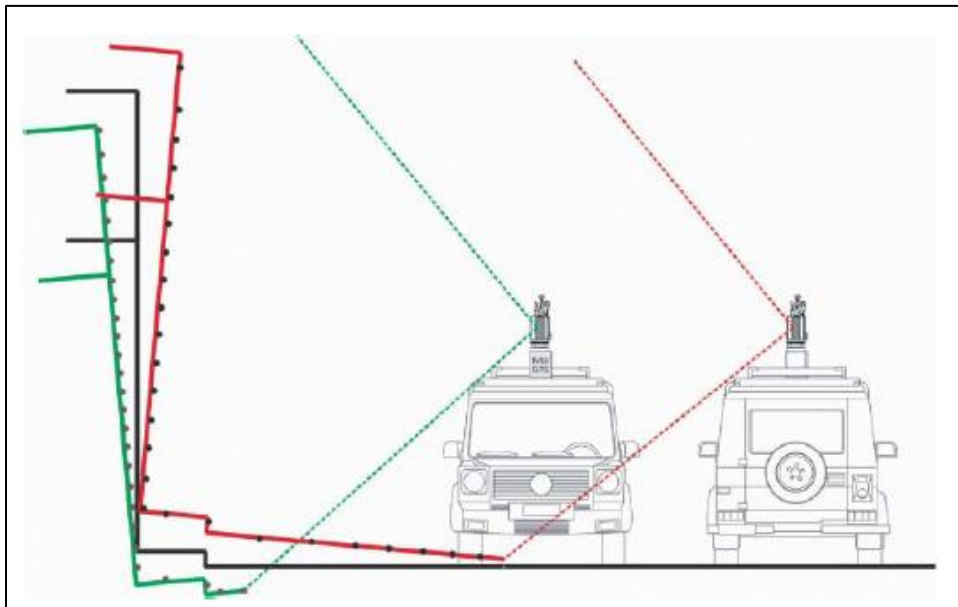


**Slika 24:** različne konfiguracije LS v obeh smereh vožnje. (Vir: Rieger et al., 2010)

Slika 24 prikazuje 6 različnih postavitvev LS, ki je konfiguriran kot 2D linijski (rotacija okoli svoje osi je zaklenjena, rotira zgolj zrcalo, ki odklanja laserski žarek). Če upoštevamo, da se z vsako konfiguracijo LS peljemo v obe vozni smeri, potem imamo  $6 \times 2 = 12$  različnih oblakov točk. Od tega se na vsaki strani cestišča prekriva po 6 oblakov, na vmesnem delu vozišča se v majhnem delu prekrivajo vsi.

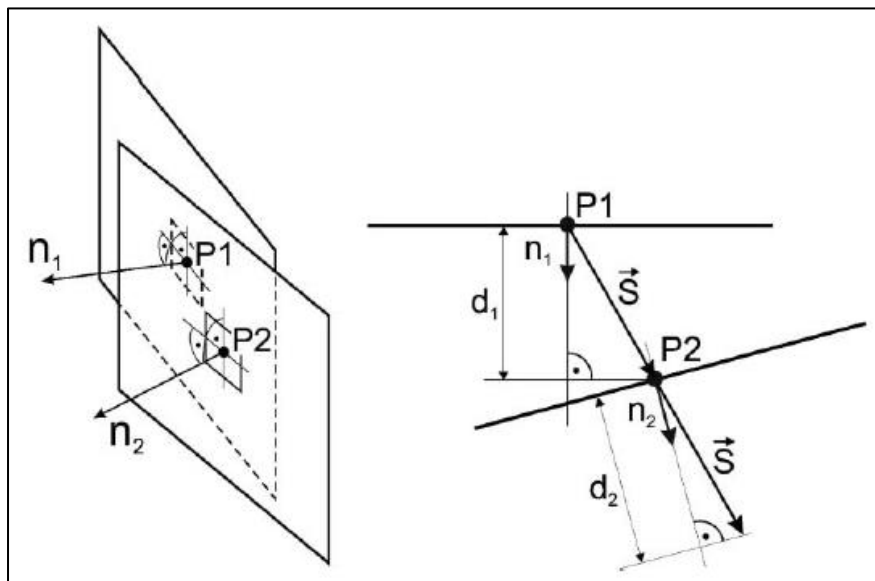
Praktična posledica ne-kalibriranega sistema je razvidna iz slike 25. Tu ima izmed elementov BA največji vpliv rotacija »roll«. Razdalja med identičnima ravninama v dveh prekrivajočih se oblakih točk je proporcionalno dvakrat večja od neznane kotne deviacije med LS in IMU, z obzirom na vrednost zasuka. (Rieger, et al., 2010).

Posledice ne odpravljenih korekcij BA so prisotne v vsakem MLS sistemu, saj je pravzaprav nemogoče zagotoviti mehansko poravnavo koordinatnih osi različnih senzorjev



**Slika 25:** Posledica ne-poravnosti oblakov točk, ki opisujeta identično površino, v odvisnosti od zasuka (angl. Roll) (Rieger, et al., 2010 )

Algoritem za izračun parametrov BA v MLS se podobno kot pri ALS nanaša na korespondenčne ravnine v 3D oblakih točk. V prekrivajočem se modelu dveh ali več oblakov točk algoritem zazna odgovarjajoče ravnine z definirano gladkostjo. Te ravnine so zastopane z njihovo velikostjo, lokacijo težišča in odgovarjajočim normalnim vektorjem. Slika 26 ponazarja dve identični ravnini v različnih pasovih oblaka točk.



**Slika 26:** Prikaz ravnin z njihovo velikostjo, lokacijo in projekcijo razdalje na normalni vektor.

(Rieger, et al., 2010)

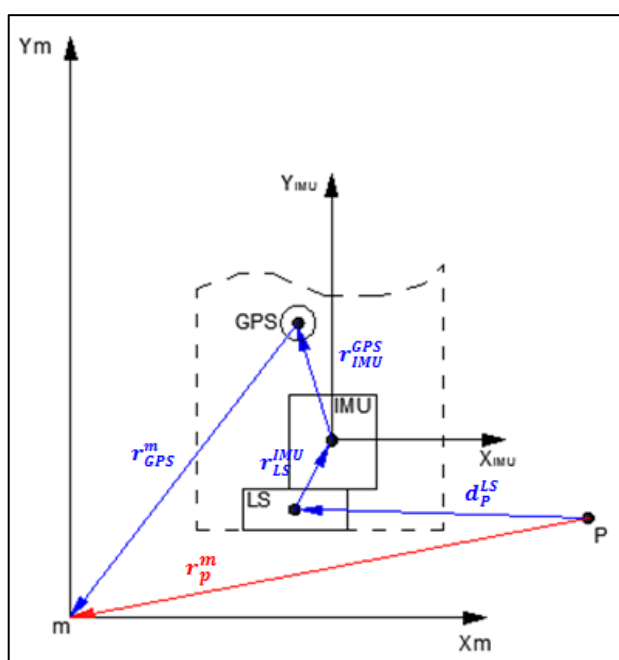
V postopku zaporedne izravnave se uporablja modificiran ICP (angl. Iterative Closest Point) algoritem. S spreminjanjem vrednosti BA (nagib, naklon, zasuk) iterativno reduciramo vsoto kvadratov razdalj  $\sigma$  vseh  $N$  parov identičnih ravnin, glede na projekcijo razdalje na normalna vektorja  $n_1^i$  in  $n_2^i$ , kar je po Rieger (2010) definirano v enačbah (27).

$$\begin{aligned}
 d_1^i &= (P_2^i - P_1^i) \cdot n_1^i \\
 d_2^i &= (P_2^i - P_1^i) \cdot n_2^i \\
 \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{d_1^i + d_2^i}{2} \right)^2}{N}}
 \end{aligned} \tag{27}$$

Postopek se zaključi, ko je napredek v zmanjševanju srednjega kvadrata razdalje manjši od vnaprej definiranega. Končni rezultat takšne izravnave oblaka točk so trije parametri BA (*nagib, naklon, zasuk*), kot posledica implementacije različnih senzorskih sistemov na skupno platformo.

Tudi tu se uporablja skoraj identična enačba za georeferenciranje podatkov kot pri ALS, razlikujejo se le smerni kosinusi vektorja proti točki P v koordinatnem sistemu LS, saj je le-ta v MLS konfiguriran vertikalno, pri ALS tehnologiji pa horizontalno. Enačbo ponazarja tudi slika 27.

$$r_p^m = r(t)_{GPS}^m + R(t)_{IMU}^m \cdot \left[ M_{LS}^{IMU} \cdot d_P^{LS} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \\ \sin(\theta) \end{pmatrix} + r_{LS}^{IMU} - r_{GPS}^{IMU} \right] \tag{28}$$



Slika 27: Grafična predstavitev odnosov med koordinatnimi sistemi posameznih senzorjev v sistemu MLS.

## 2.5 Pričakovana natančnost MLS sistema

V kolikor želimo rezultate praktičnih meritev tudi ovrednotiti, je potrebna predhodna analiza pričakovane natančnosti tovrstnih sistemov. Običajno skušamo definirati končno 3D položajno natančnost oblaka točk, torej je potrebno smiselno upoštevati parametre posameznih senzorjev ter jih modelirati v modelu napak oz. pogreškov.

Objektne koordinate točk, zajete z MLS sistemom, določimo po znani in že predstavljeni enačbi:

$$r_p^m = r_{GPS/IMU}^m + R_{IMU}^m \cdot [R_{LS}^{IMU} \cdot r_p^{LS} - a_{IMU}^{LS}] \quad (29)$$

Oziroma zapisano po komponentah:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_P^m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{GS}^m + R_{IMU}^m(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \left[ R_{LS}^{IMU}(d\omega, d\varphi, d\kappa) \cdot r_p^{LS}(\alpha, d) - \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{IMU}^{LS} \right] \quad (30)$$

Iz enačbe (30) je razvidno, da so objektne koordinate, izračunane iz povratnega laserskega žarka, odvisne od 14 parametrov.

Ti parametri so:

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| X(1), Y(2), Z(3)                      | Položajne koordinate navigacijskega senzorja (GPS sprejemnik)                                  |
| $\omega(4), \varphi(5), \kappa(6)$    | <i>Nagib, naklon in zasuk</i> senzorja IMU med zajemom podatkov; te vrednosti beleži IMU enota |
| $d\omega(7), d\varphi(8), d\kappa(9)$ | Kotna nepravnanost, ki jo je potrebno določiti s kalibracijo                                   |
| $\alpha(10), d(11)$                   | Podatki laserskega skenerja (odklonski kot in dolžina žarka do objekta)                        |
| $a_x(12), a_y(13), a_z(14)$           | Translacije med k.s. LS in IMU   |

Razvidno je, da enačba (30) ni linearna, zato jo je za ocenjevanje vplivov pogreškov potrebno linearizirati. Najlažje postopek opravimo z razvojem v Taylorjevo vrsto, ki na podlagi linearnih enačb omogoča ocenjevanje diferencialno majhnih pogreškov v opazovanih parametrih.

V kolikor lineariziramo enačbo (30) po vseh štirinajstih parametrih, dobimo splošno enačbo za ocenjevanje pogreškov.



$$\begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}_P^m = \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}_{GPS}^m + J \begin{bmatrix} d\omega \\ d\varphi \\ d\kappa \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} d\omega \\ d\varphi \\ d\kappa \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \delta d \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \delta a_x \\ \delta a_y \\ \delta a_z \end{bmatrix} \quad (31)$$

Kjer so J, K, B in C Jacobijanske matrike parcialnih odvodov, definirane kot:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_P^m}{\delta \omega} & \frac{\delta r_P^m}{\delta \varphi} & \frac{\delta r_P^m}{\delta \kappa} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_P^m}{\delta d\omega} & \frac{\delta r_P^m}{\delta d\varphi} & \frac{\delta r_P^m}{\delta d\kappa} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_P^m}{\delta \alpha} & \frac{\delta r_P^m}{\delta d} \end{bmatrix}, \quad (32)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_P^m}{\delta a_x} & \frac{\delta r_P^m}{\delta a_y} & \frac{\delta r_P^m}{\delta a_z} \end{bmatrix}$$

S tem smo določili metodologijo za izračun pričakovanih vrednosti pogreškov opazovanj, ki imajo vpliv na končno natančnost celotnega sistema. V nadaljevanju bodo po posameznih senzorjih predstavljeni možni vplivi na opazovanja in njihova velikost.

### 2.5.1 Vplivi IMU

IMU enota beleži kotne vrednosti *nagiba* (angl. roll), *naklona* (angl. pitch) in *zasuka* (angl. yaw) platforme glede na izbran koordinatni sistem. Zaradi kompleksnosti teh tehnološko naprednih enot, jih običajno kupimo od proizvajalca, le-ta pa nam poda specifikacije za dotično napravo. V splošnem se za zračne senzorske sisteme uporabljajo bolj natančne enote IMU, saj so razdalje od lidarskega sistema do površja precej večje, kot je to pri MLS sistemih. Popravljen položajna natančnost s pomočjo IMU ima zaradi večjih razdalj še toliko večji pomen. Tipična natančnost »tactical-grade« IMU sistemov je za *nagib* in *naklon* 0,015° ter za *zasuk* med 0,035° in 0,05°.

### 2.5.2 Vpliv kotne nepravilnosti

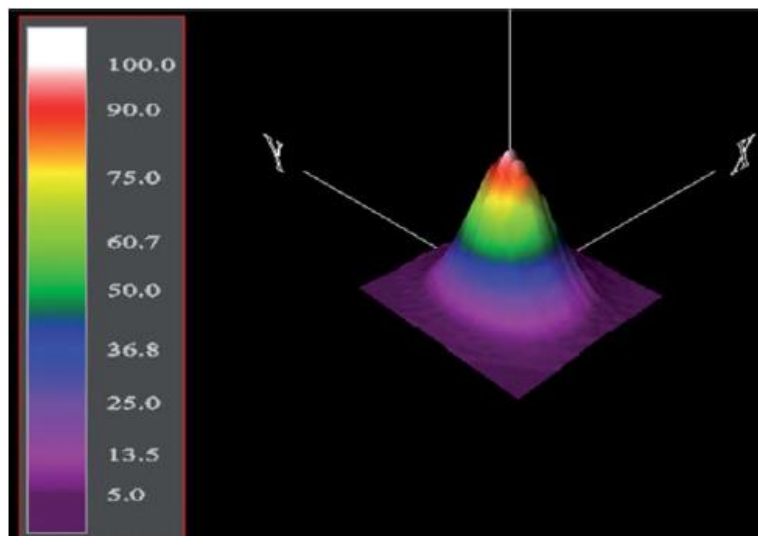
Vpliv kotne nepravilnosti se običajno določa po samem zajemu podatkov v postopku kalibracije. Temelj določitve neznanih vrednosti BA so prekrivajoči se pasovi oblaka točk, zajeti iz različnih smeri vožnje in konfiguracije LS. Vrednosti BA lahko določamo ročno ali avtomatsko. Pri ročnem načinu gre za spreminjanje vrednosti *nagiba*, *naklona* in *zasuka* (angl. roll, pitch in yaw), vse dokler oblaki ne sovpadajo na najboljši možni način. Postopek je časovno zamuden, hkrati pa zahteva izurjene operaterje in je potemtakem odvisen tudi od subjektivnega dela operaterja. Avtomatski postopek sam poišče identične ravnine in skozi postopek izravnave LSA (Least Square Adjustment) določi njihovo najbolj optimalno prilaganje.

Kot navaja Craig (2007), je natančnost ročne določitve elementov BA primerljiva natančnosti IMU senzorjev za beleženje rotacij. Avtomatski način z metodo najmanjših kvadratov pa omogoča precej boljše rezultate, saj je možno doseči natančnost *nagiba* in *naklona* pod  $0,001^\circ$  ter *zasuka* pod  $0,004^\circ$ .

### 2.5.3 Vplivi laserskega skenerja

Podroben pregled vplivov na opazovanja laserskega skenerja je moč najti v literaturi Morin (2002), v trenutnem poglavju obravnavamo zgolj pogreška merjenja dolžin ter kotov. Vzrok za to so specifikacije proizvajalca, ki običajno poda natančnost LS v teh dveh makro komponentah, namesto večjega števila manjših faktorjev, ki vplivajo na celotno napako. V kolikor je potrebno, je lahko enačba (30) razširjena, tako da upošteva še določene dodatne vplive LS.

Pogrešek merjenja dolžine je običajno povezan s časom potovanja laserskega impulza, ki je pogojen z natančnostjo merjenja le-tega. Na drugi strani pa kotni pogrešek odklona laserskega žarka lahko razdelimo na dve pod kategoriji. Prva se nanaša na kotno ločljivost odklona laserskega žarka in je potemtakem odvisna od kakovosti LS. Druga pod kategorija pa obravnava divergenco laserskega žarka, ki za samo analizo natančnosti ni tako trivialna kot najmanjši korak merjenja kotnih odklonov. Divergenca laserskega žarka postavlja vprašanje, kje je pravzaprav dejanska lokacija točke, od katere se je odbil laserski impulz. Vpliv se z večanjem razdalje do objekta povečuje, saj je odtis (angl. »footprint«) sorazmerno večji, položaj točke v tem odtisu pa toliko bolj vprašljiv. Zanimivo tezo podajata Lichti in Gordon (2004), ki demonstrirata pričakovano stopnjo zaupanja za točko znotraj odtisa. Le-ta je enaka četrtini premera laserskega pulza, merjeno v kotnih enotah. Ta teza predpostavlja enotno porazdelitev jakosti laserskega žarka skozi celoten premer laserskega žarka, vendar običajno temu ni tako. Slika 28 predstavlja tipično porazdelitev jakosti izhodnega pulza laserskega skenerja. Jakost ni enakomerna, ima značilen vrh in padajočo energijo proti robu žarka. To dejstvo nakazuje, da je stopnja negotovosti celo manjša od ene četrtine divergencence žarka, saj se z večjo močjo v središču laserskega pulza poveča verjetnost, da povratni impulz predstavlja točko v središču odtisa laserskega žarka.



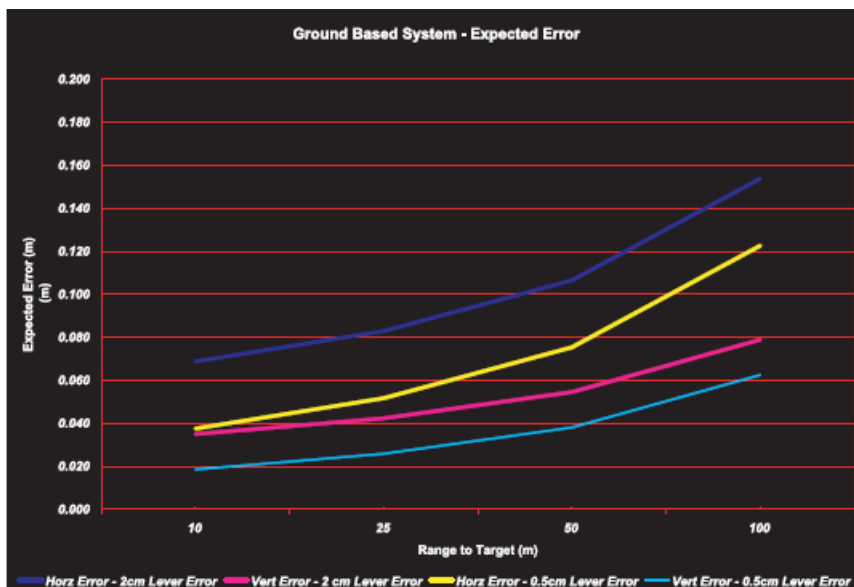
**Slika 28:** Relativna distribucija energije oddanega laserskega pulza z Terrapoint ALTM LIDAR System.

(Craig, 2004)

#### 2.5.4 Vpliv translacijskih vrednosti med senzorji (»lever-arm offsets«)

Iz principa mehanske konfiguracije je očitno, da izhodišča navigacijskih senzorjev in LS ne morejo sovpadati. Posledično moramo natančno poznati vrednosti odmikov med izhodišči posameznih sistemov, ki jih določimo indirektno z različnimi metodami. Najbolj pogosti sta fotogrametrična in strojniška. V praksi se vrednosti odmikov, zaradi velike korelacije z ostalimi vplivi, določajo na tedenski ravni. Posledično se odmiki določajo fizično, z različnimi merili ter ob podpori tehničnih risb, ki podajajo oddaljenosti centrov sistemov do neke točke na obodu. Metoda je sicer enostavna in hitra, vendar ima veliko možnih vplivov in pogoškov pri njeni izvedbi. Predpostavlja se, da je s tovrstno metodo možno določiti translacijske komponente vektorja med senzorji s centimetrsko natančnostjo. Prav tako mora mehanska konfiguracija zagotoviti togost, ki preprečuje premike med senzorji ob zajemu podatkov.

Slika 29 predstavlja horizontalni in vertikalni vpliv na končno natančnost ob različnih vrednostih določitve translacije med senzorji (angl. lever-arm). Temno moder trend predstavlja naraščajoč vpliv v horizontalni smeri, roza trend pa naraščajoč vpliv v vertikalni smeri, ob predpostavki, da je »lever-arm« določen z 2 cm natančnostjo. Rumena linija (Hz) in svetlo modra linija (V) pa nakazujeta vpliv »lever-arm-a«, kadar je ta določen z natančnostjo 0,5 cm.



**Slika 29:** Horizontalen in vertikalni vpliv MLS sistema v odvisnosti od natančnosti določitve položaja med senzorji. (Craig, 2004)

Iz grafa na sliki 29 je razvidno, da ima izboljšana natančnost določitve relativnega položaja med senzorji konstanten vpliv na opazovanja. To je glede na enačbo (30) tudi pričakovano, saj vrednosti »lever-arm« niso odvisne od določitve odklonskega kota laserskega žarka. Vpliv pospešeno narašča z večanjem razdalje do opazovanega objekta.

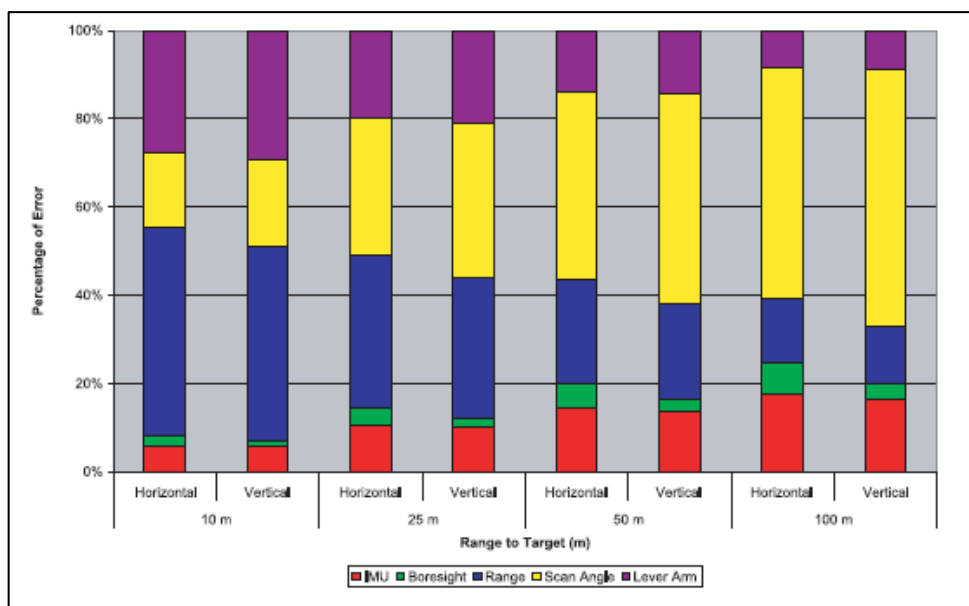
### 2.5.5 Vplivi na senzorje za določitev položaja (GPS)

Absolutno vrednost pričakovanih vplivov ob kinematični GPS izmeri je težko opredeliti, saj natančnost pozicioniranja predstavlja kombinacijo atmosferskih vplivov, vpliva večpotja (angl. »multipath«), slabe pokritosti s sateliti in geometrije, dolžine baznih vektorjev, izgube signala, itd. Tovrstne vplive je težko napovedati vnaprej, zato običajno ne nastopajo v generičnem modelu vplivov. Za kinematično izmero bi lahko natančnost pozicioniranja predstavili s »pravilom palca«, saj je pričakovana pozicijska natančnost v območju 1-2 cm + 1 PPM, višinska pa 2 cm + 1 PPM, ob relativno kratkih baznih vektorjih (< 10 km), brez izgube GPS signala, minimalnem večpotju in nizki ionosferski aktivnosti.

Vplivi določitve položaja platforme med zajemom podatkov imajo neposreden vpliv na končno absolutno pozicijsko natančnost oblaka točk, torej jih lahko določamo ločeno ter jih ob koncu prištejemo ostalim vplivom.

Natančnost MLS sistema v testnem polju, s povprečnimi razdaljami do objektov med 10-25 m in referenčno GPS postajo v radiju enega kilometra lahko ovrednotimo v horizontalni smeri na cca. 5 cm

in v vertikalni smeri na cca. 8 cm. Tovrstni rezultati so povsem teoretični, ob najboljših možnih pogojih in brez uporabe oslonilnih točk točk.



**Slika 30:** Odstotkovna razporeditev končne absolutne natančnosti po posameznih vplivih pri MLS sistemu.

(Craig, 2004)

Po Craig (2004) slika 30 predstavlja razporeditev pogreškov MLS sistema po posameznih vplivih. Z rdečo barvo je prikazan vpliv meritev IMU, z zeleno vpliv kotnega odstopanja med LS in IMU, t.i. »Boresight«, z modro pogrešek merjenja dolžin pri LS, z rumeno vpliv vpadnega kota laserskega žarka, ki je pogojen z divergenco in velikostjo odtisa žarka na površini, z vijolično pa vpliv »lever-arm«. Pogrešek določitve položaja s kinematično GPS izmero je tu namenoma izpuščen, saj je vnaprej njegov vpliv izredno težko modelirati, določi se ga ločeno in na koncu prišteje ostalim vplivom.

Razvidno je, da ima na končno absolutno natančnost MLS sistema največji vpliv prav laserski skener (seštevek modre in rumene barve), ob ločeni obravnavi sistema GPS. Pogrešek IMU enote je relativno majhen in znaša manj kot 20 %, upoštevajoč majhne razdalje do opazovanih objektov. Iz tega sledi, da je natančnost MLS sistema močno pogojena z natančnostjo laserskega skenerja, predvsem z njegovo mehansko konfiguracijo, ki posledično določa vpadni kot na interesno območje.

### **3 ZAJEM PODATKOV, UPORABLJENA PROGRAMSKA OPREMA IN METODOLOGIJA**

#### **3.1 Zajem podatkov**

Ideja o mobilnem laserskem sistemu se je v podjetju DFG Cosulting d.o.o pojavila že v marcu 2011. Takrat so z namenom testiranja obiskali avstrijsko-ameriško korporacijo RIEGL Laser Measurement Systems (v nadaljevanju RIEGL), s sedežem v Hornu, Avstrija. RIEGL je tako rekoč eno vodilnih podjetij na področju laserskega skeniranja na svetu. Proizvaja lastno strojno in programsko opremo ter je izrazito razvojno usmerjeno podjetje. Kot že omenjeno, DFG Consulting d.o.o. poseduje RIEGL-ov laserski skener, posledično je pretok znanja in informacij med podjetjema stalen.

Testna snemanja s komponentno sestavljenim MLS sistemom so se izvedla ob takratnem poslovnem sodelovanju, žal pa zaradi spleta okoliščin podatki kasneje niso bili obdelani, niti ni sistem zaživel konceptualno, še manj pa izvedbeno. V okviru diplomskega dela smo v tej smeri naredili velik korak naprej. V nadaljevanju poglavja je predstavljeno testno območje, vključno s konfiguracijo MLS sistema ter metodologijo zajema.

##### **3.1.1 Testno območje**

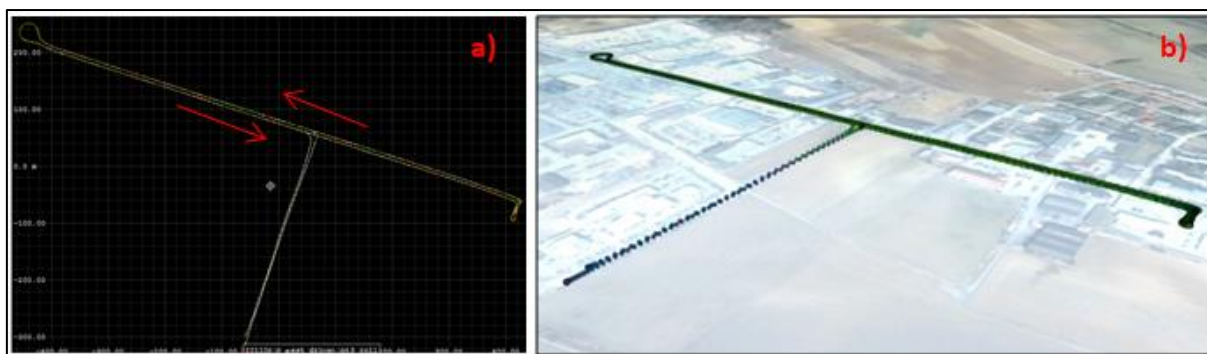
Geodetska dela, ki vključujejo GNSS/GPS opazovanja, so podvržena številnim spremenljivim vplivom. Pogosto spregledana, vendar ključna faza v izvajanju opazovanj z GNSS tehnologijo, je načrt opazovanj oz. načrtovanje GNSS izmere. Na ta način lahko predhodno omejimo določene vplive in povečamo možnost za kvalitetnejša opazovanja. MLS sistem prav tako vsebuje svoj GNSS/GPS segment, zato je tudi tu načrtovanje opazovanj ključnega pomena. Ob upoštevanju dejstva, da je bilo potrebno vzpostaviti testno kalibracijsko območje, je moralo biti le-to najbolj optimalno v smislu minimizacije vplivov na opazovanja. Ti vplivi so predvsem pokritost in razporeditev satelitov v času snemanja, ovire (visoke stavbe, podvozi), vpliv večpotja (angl. »multipath«), čas v dnevu, idr.

RIEGL ima v neposredni bližini svojih poslovnih prostorov že izbrano kalibracijsko območje, široko in odprto ulico z velikim številom sorazmerno nizkih vertikalnih objektov, ki služijo za lažje iskanje identičnih ravnin v postopkih izravnave in določanja elementov BA. Testna snemanja so tu s svojim komercialnim in naprednim sistemom že izvajali, zato je to območje zaradi neposredne primerjave zajetih podatkov, ki služijo kot referenca, še toliko bolj ustrezno. Testno snemanje je tako bilo izvedeno na ulici Prager Strasse v Hornu.



**Slika 31:** Ulica Prager Strasse v centru mesta Horn. (Bing maps, 2013)

Mogoče bi ob tej priložnosti dregnil ob sledeče dejstvo, s katerim tudi komentiram izbiro prikazovalnika Bing maps. V neposredni bližini mesta Horn je stacionirano vojaško oporišče, ki je očitno strateškega pomena. Posledično na tem območju svetovni gigant Google ne prikazuje zračnih posnetkov v Google zemljevidih, niti v Google Zemlji, oz. so ti močno zasenčeni. Ideja o uvozu .xml datoteke obdelanih podatkov, ki bi na nek način oponašala strukturo Google street-view pogleda, je žal brezpredmetna.



**Slika 32:** Obdelana trajektorija v Inertial explorerju (a) in uvoz le te v Google Zemljo (b).

Slika 32 prikazuje obdelano trajektorijo, kjer je vsako točka obarvana z določeno barvo, glede na kakovostni razred določitve položaja. Rdeči puščici na sliki 32 a) ponazarjata obe smeri vožnje. Ortogonalni del na interesno trajektorijo je služil za inicializacijo sistema.



Za boljšo predstavo podajam obseg skeniranega območja:

- dolžina cca. 800 m,
- maksimalna širina oblaka točk 140 m,
- skupno število točk ~ 43,7 milijonov.

### 3.1.2 Konfiguracija sistema

Pred samim zajemom podatkov je bilo potrebno sistem MLS sestaviti iz posameznih komponent v smiselno in delujočo celoto, kot prikazuje slika 33. Uporabljena je bila konstrukcija, ki jo DFG Consulting d.o.o uporablja kot platformo za svoj MMS sistem. MLS dodatno vsebuje še laserski skener, zato je bilo izvedenih nekaj modifikacij. MMS sistem ima GPS anteno, pozicionirano direktno nad IMU sistemom, tokrat pa je to mesto zavzel LS, GPS antena se je premaknila za določeno translacijsko vrednost. Prav ta vektor med IMU in GPS anteno je bilo potrebno določiti s strojnimi meritvami, kar je ponazorjeno v preglednici 4.



**Slika 33:** Celotna platforma MLS sistema, konfigurirana na avtomobilu.

**Preglednica 4:** Izmerjene translacijske vrednosti med IMU in GPS oz LS

| # IMU do | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] |
|----------|--------|--------|--------|
| GPS      | -225   | 20     | 745    |
| LS       | -22    | 20     | 484,5  |



Ob pogosti uporabi MLS sistema in večkratni montaži in demontaži je pred vsakim sklopom meritev priporočljivo izmeriti translacije med centri posameznih senzorjev, saj ima ta napaka neposreden vpliv na natančnost končnih rezultatov. V praksi se običajno translacijske meritve izvajajo na tedenski ali mesečni ravni. Med zajemom podatkov se položaj med senzorji ne sme spreminjati. Konstrukcija mora zagotavljati trdnost, togost in majhno temperaturno odvisnost. Najprimernejši material mora biti lahek, dovolj rigiden z majhnim koeficientom linearnega temperaturnega raztezka.

Konstrukcija sistema WC3 (WideoCar 3) je narejena iz aluminija, ki svojo prednost kaže predvsem v majhni masi. Linearni temperaturni razteznostni koeficient aluminija ( $\alpha = 2,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$ ) je glede na ostale kovine nekoliko višji, vendar je njegov vpliv še vedno v razumnih mejah, kar je razvidno iz enačbe (33).

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1m \cdot 0,000023 \frac{1}{K} \cdot 10K = 0,23mm \quad (33)$$

V kolikor se temperatura spremeni za  $10^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{K}$ , se 1 meter dolga aluminijasta palica podaljša/skrajša za 0,23 mm. Natančnost merjenja translacij z merskim trakom je ocenjena na cca. 5 mm, torej je sprememba 0,23 mm zanemarljivo majhna, posledično pa aluminij predstavlja pravo izbiro za snovanje konstrukcije.

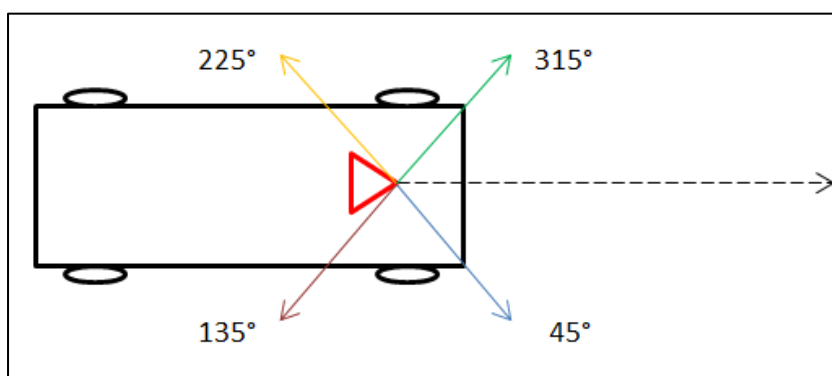


**Slika 34:** Koordinatni ENU sistem platforme.

Koordinatni sistem platforme je pogojen s konfiguracijo IMU sistema. Os  $y$  je usmerjena naprej, v smeri vožnje, os  $x$  je pravokotna na smer vožnje, os  $z$  pa je usmerjena navzgor.

### 3.1.3 Metodologija zajema

LS je nameščen direktno nad IMU sistemom, tako da os z LS in os z IMU sovpadata. Vozilo se med zajemom podatkov premika, posledično LS ne more delovati kot pri terestrični izvedbi, kjer se vrti okoli svoje osi, zrcalo pa odklanja žarek v vertikalni smeri. Ob tovrstnem delovanju bi dobili "spiralen" oblak točk z določeno vsebino na levi in določeno na desni strani ceste. LS se uporablja kot linijski pometajoči (angl. push-broom) senzor, kjer zaklenemo rotacijo okoli njegove osi in ga orientiramo v poljubno smer. Za doseg čim bolj reprezentativnega oblaka točk so bile izvedene štiri različne orientacije LS, kot je prikazano na sliki 35.



**Slika 35:** Shematski prikaz orientacij LS med zajemom podatkov.

Najbolj optimalna bi bila konfiguracija LS pravokotno na smer vožnje, na ta način bi zagotovili najugodnejši vpadni koti žarka, največjo gostoto točk in najmanjši odtis laserskega žarka, kar je za kalibracijo sistema ključnega pomena. Žal trenutna konstrukcija ne omogoča tovrstne konfiguracije, saj stranski pogled ovirajo kamere z relativno robustnim ohišjem. V kolikor bi se mobilno lasersko skeniranje izvajalo brez video podpore, potem je tudi ortogonalna izvedba na smer vožnje izvedljiva in tudi priporočljiva.

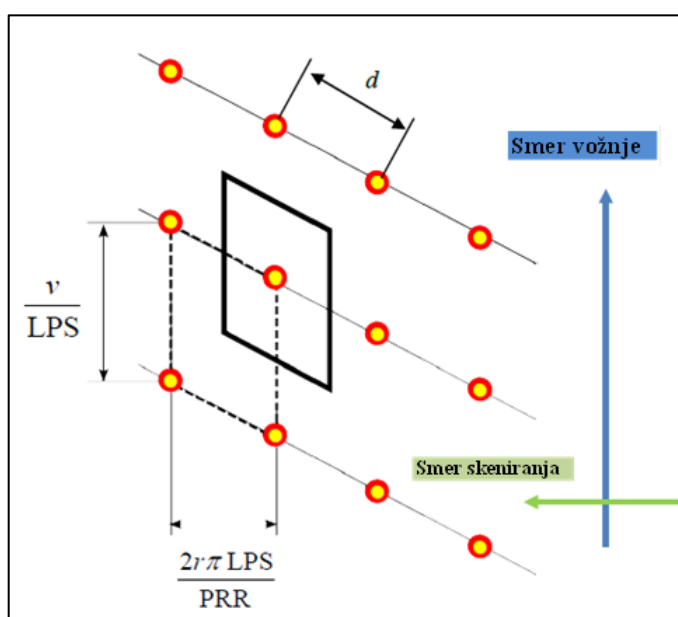
Za zagotavljanje ustreznih podatkov je ključna tudi izbira hitrosti premikanja vozila. Gostota točk v odvisnosti od hitrosti strmo pada, pada tudi gostota točk v odvisnosti od razdalje med LS in skeniranim objektom. Za namene kalibracije je smiselno izbrati čim nižjo hitrost. Testno snemanje smo izvedli s hitrostjo 30 km/h.

V kolikor nas zanima, kakšno gostoto točk bomo dosegli ob določeni hitrosti, oddaljenosti LS do objekta in frekvenci skeniranja LS, lahko to preprosto izračunamo na podlagi enačbe (34), ki jo podaja Rieger (2010).

$$D = \frac{LPS}{v} \cdot \frac{PRR}{2\pi r LPS} = \frac{PRR}{2\pi r v} \quad (34)$$

Kjer so

- D iskana gostota točk na kvadratni meter
- LPS število linij, ki jih LS skenira v sekundi (angl. »lines per second«)
- v hitrost premikanja vozila
- r razdalja od LS do skeniranega objekta
- PRR hitrost ponavljanja impulza LS (angl. »pulse repetition rate«)

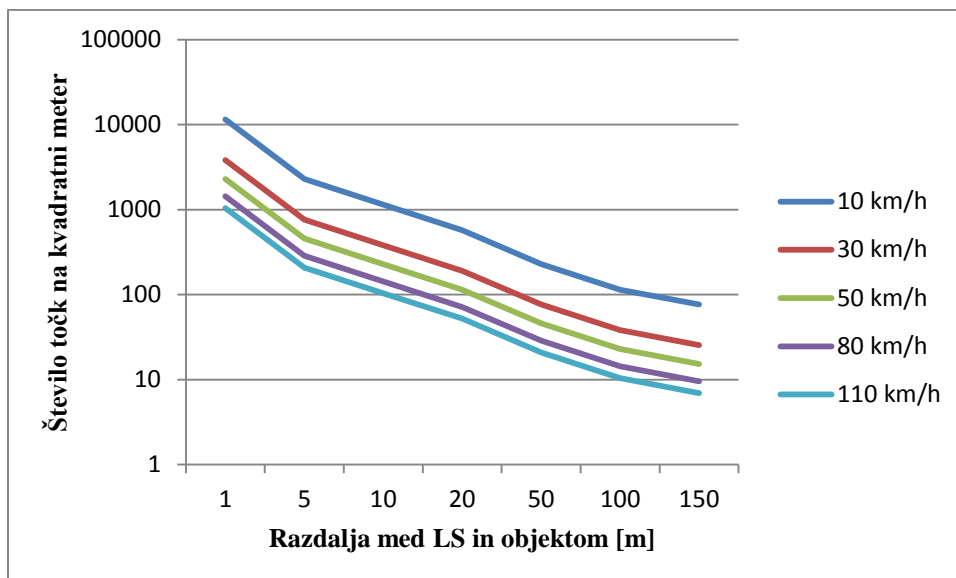


**Slika 36:** Grafična predstavitev vzorca točk na ravni površini vzdolž smeri vožnje in skeniranja.  
(Rieger, et.al, 2010)

V našem testnem primeru je bil uporabljen laserski skener Riegl VZ-400, s PRR 200 kHz. V kolikor želimo določiti gostoto točk na oddaljenosti 10 m od LS in ob hitrosti 30 km/h = 8,3 m/s, lahko to enostavno naredimo z vstavljanjem vrednosti v enačbo (34).

$$D = \frac{PRR}{2\pi r v} = \frac{200000 \frac{1}{s}}{2 \cdot \pi \cdot 10m \cdot 8,3 \frac{m}{s}} \approx 380 \quad (35)$$

Oblak točk v eni izmed štirih konfiguracij LS ima torej gostoto 380 točk na kvadratni meter. Če predpostavimo enakomerno gostoto točk v vseh dveh parih štirih prekrivajočih se oblakov točk, lahko to vrednost pomnožimo s faktorjem 4. Povprečna gostota celotnega oblaka točk na oddaljenosti 10 m tako znaša približno 1500 točk na kvadratni meter.



**Slika 37:** Grafikon na sliki prikazuje število točk na m<sup>2</sup> ob različnih hitrostih in razdaljah med LS in objektom.

Končna konfiguracija sistema določa tudi metodologijo zajema, ki je ob hitrosti 30 km/h in vožnji v obe smeri sledeča:

- LS usmerjen pod kotom 45° glede na smer vožnje (tja in nazaj),
- LS usmerjen pod kotom 135° glede na smer vožnje (tja in nazaj),
- LS usmerjen pod kotom 225° glede na smer vožnje (tja in nazaj),
- LS usmerjen pod kotom 315° glede na smer vožnje (tja in nazaj).

Ob štirih različnih orientacijah LS in vožnji v obe smeri z vsako izmed njih dobimo končnih 8 oblakov točk. Le-ti tvorijo dva para po štiri prekrivajočih se oblakov točk. Vmesni preklap med obema paroma je sorazmerno majhen, kar dodatno oteži kalibracijo.



**Slika 38:** Zajem podatkov na terenu a) in rezultat kot oblak točk b).

Na sliki 38 b) je prikazan zračni perspektivni pogled na skupen oblak točk, katerega sestavlja 43,7 milijonov točk, razprostira se čez 800 m dolžine, največja širina pa je 140 m.

### 3.1.4 Referenčni podatki

MLS tehnologija zahteva zajem lokacijskih podatkov s pomočjo kinematične metode GPS izmere z naknadno obdelavo. V ta namen je RIEGL vzpostavil statični GPS sprejemnik v neposredni bližini svojih poslovnih prostorov oz. v neposredni bližini testnega poligona Prager Strasse, ki je služil kot bazna postaja za post-procesiranje GPS podatkov. Pri kasnejši obdelavi laserskih podatkov se je pojavila napaka, ki je nakazovala na nedoslednosti v zvezi s koordinatami bazne postaje v višinskem smislu. Ta vrednost predstavlja cca. 8 m zamik po višini, ki je nastal kot groba »češka« napaka pri prepisovanju podatkov. Točnih vrednosti danes brez obiska Horna ni možno pridobiti, posledično je bilo višinski koordinati bazne postaje prišteti pavšalni 8 m. To dejstvo v določeni meri zmanjšuje kakovost absolutnega georeferenciranja oblaka točk v prostor. Diskusija na to tematiko sledi v poglavju 4.2, kjer ovrednotimo rezultate.

**Preglednica 5:** Geografske koordinate bazne postaje v Hornu.

| Koordinate bazne postaje |                                  |     |           |
|--------------------------|----------------------------------|-----|-----------|
| $\varphi$                | 48°                              | 39' | 38,45008" |
| $\lambda$                | 15°                              | 39' | 19,08262" |
| <b>h</b>                 | 349,44 m +8 m = <b>357, 44 m</b> |     |           |

Zajeti podatki MLS so mi omogočili kalibracijo sistema in določitev neznanih kotov BA skozi postopek relativne izravnave. Zakaj sem uporabil izraz relativne? Brez kakršnih koli oslonilnih točk lahko določamo kalibracijske parametre zgolj z iterativno izravnavo identičnih ravnin, s katero želimo doseči najbolj optimalno prekrivanje oblakov točk na celotnem območju. V tem primeru oblake izravnamo med seboj zgolj v relativnem smislu, absolutno pa je njihov položaj v 3D prostoru lahko napačen. Optimalno rešitev za absolutno oceno natančnosti bi predstavljale realizirane reflektivne oslonilne točke z znanim položajem, katere bi predhodno zajeli z eno od geodetskih metod (klasična terestrična izmera, GPS izmera). Te tarče bi bile zaradi povečane reflektivnosti jasno določljive v oblaku točk. Iz oblaka bi lahko določili koordinate teh veznih točk in jih primerjali s koordinatami identičnih oslonilnih točk, izmerjenih predhodno in neodvisno. Na ta način bi oblak izravnali tudi absolutno, ga georeferencirali v prostor ter ocenili absolutno oceno natančnosti. Žal je leta 2011 med obiskom Horna in izvajanjem meritev zmanjkalo časa za realizacijo teh tarč. V prvi fazi je bila v diplomskem delu predvidena zgolj relativna izravnava oblakov točk in določitev ustreznih

kalibracijskih parametrov. Skozi pridobivanje poglobljenega znanja na to tematiko sem prišel do zaključka, da je kritično ovrednotenje rezultatov brez absolutnih referenčnih podatkov močno vprašljivo. Podjetje RIEGL mi je v ta namen priskrbelo referenčni set podatkov. Ob tem mislim na absolutno georeferenciran oblak točk identičnega območja, zajet z profesionalnim MLS sistemom RIEGL VMX-450. Le ta je bil na podlagi oslonilnih in veznih točk absolutno postavljen v prostor, sistem pa je bil predhodno kalibriran.

Ob prisotnosti referenčnega seta laserskih podatkov sem lahko izločil karakteristične točke, ki so jasno določljive tako v referenčnem kot tudi mojem, testnem setu laserskih točk. Določene koordinate v referenčnih podatkih so služile kot oslonilne točke, v svojem testnem oblaku točk pa sem določil korespondenčne vezne točke. S tem je bila omogočena izravnava in ocena natančnosti tudi v absolutnem smislu.

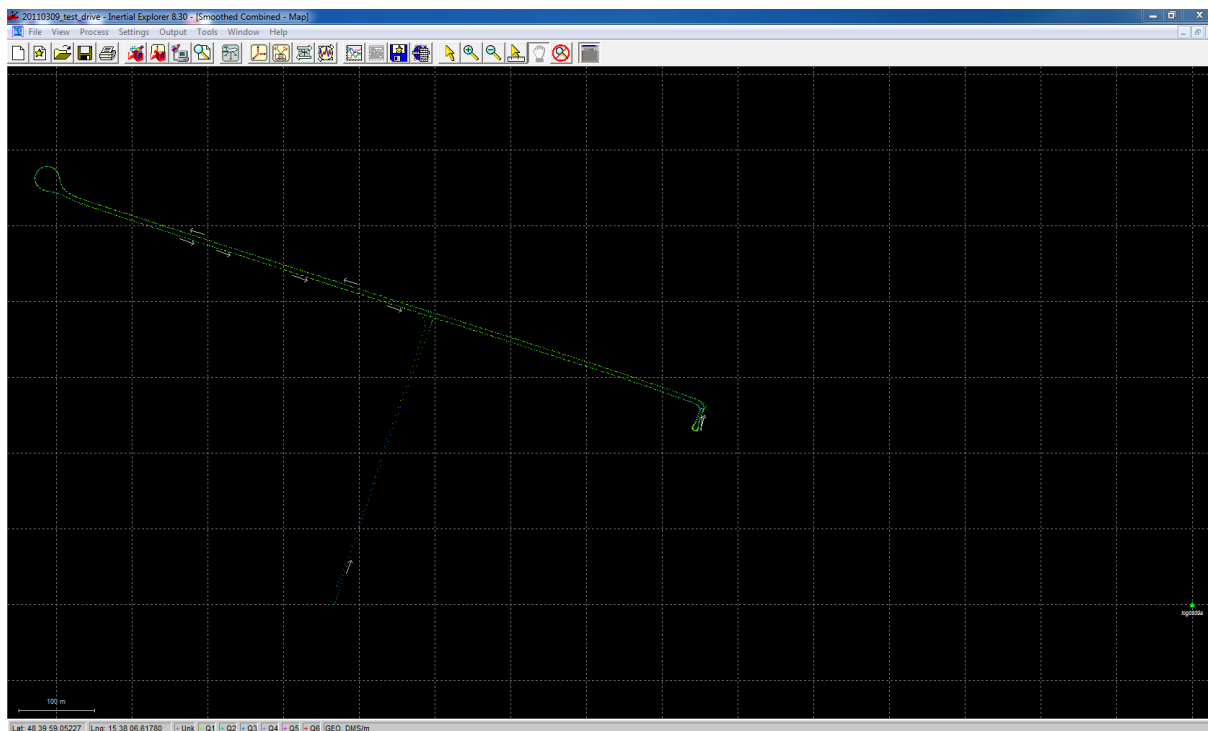
## **3.2 Programska oprema**

V diplomskem delu sem za obdelavo podatkov uporabljal dva večja programska paketa. Prvi, NovAtel Waypoint Inertial explorer 8.30, je služil za obdelavo GPS/IMU podatkov. Drugi predstavlja niz programov korporacije RIEGL, na čelu z obsežnim RiPROCESS orodjem, ki služi za obdelavo laserskih podatkov, zajetih z MLS sistemom.

### **3.2.1 Inertial explorer**

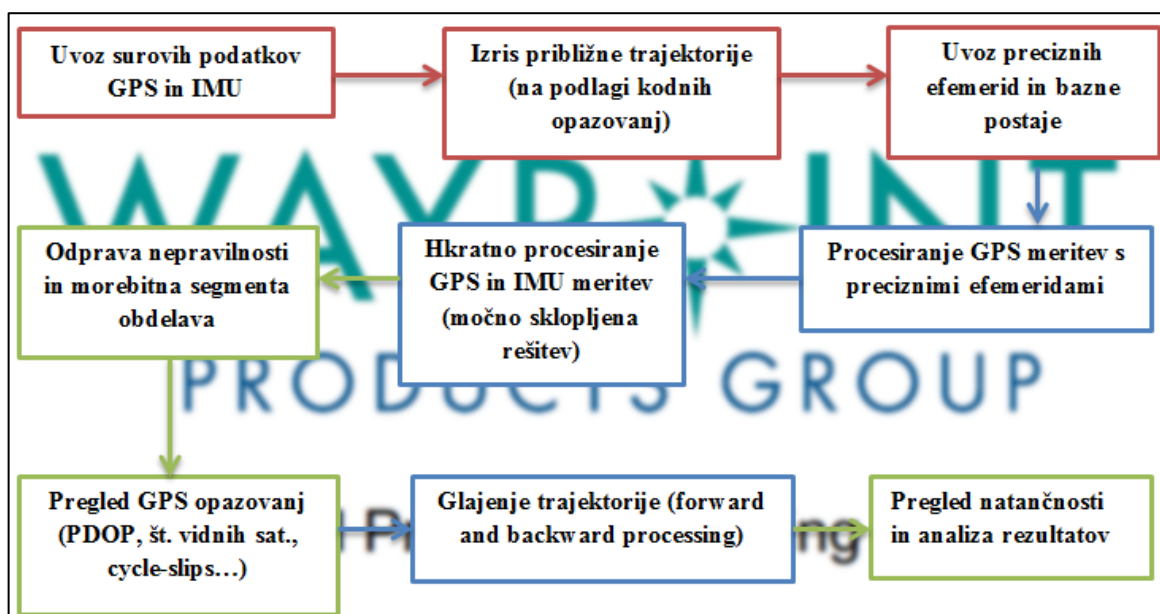
Inertial explorer 8.30 je izdelek Waypoint produktne skupine znotraj korporacije NovAtel. Služi za post-procesiranje GPS in IMU podatkov, njuno združevanje, izračun trajektorije, oceno natančnosti, idr. Fokus obdelave je na podatkih laserskega skenerja in kalibraciji MLS sistema, zato bo obdelava trajektorije, ob pomoči slik, predstavljena zgolj v smislu rezultatov.

Slika 39 predstavlja trajektorijo na podlagi GPS in INS meritev, katerih točke so glede na standardni odklon položaja obarvane z različnimi barvami. Natančnosti so klasificirane v 6 kakovostnih razredov in so obarvane od svetlo zelene, preko modre do morebitne rdeče barve, ki predstavlja najslabši kakovostni razred. Povsem desno spodaj je locirana bazna postaja, ki od samega interesnega območja ni oddaljena več kot 500 m. Prikaz je rezultat skupnega močno sklopljenega procesiranja GPS/IMU meritev, vključno z glajenjem. Vse točke spadajo med prve 3 kakovostne razrede. Interval registracije GPS meritev je bil nastavljen na 1 s.



Slika 39: Trajektorija interesnega območja v programu Inertial Explorer.

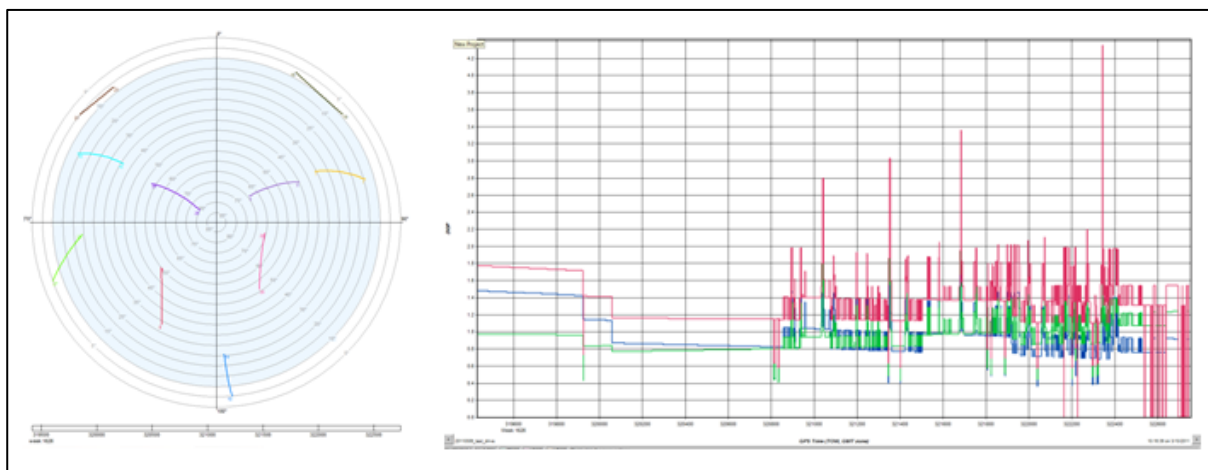
Potek obdelave trajektorije je najenostavneje ponazoriti s preprostim diagramom na sliki 40, kjer si naloge lahko sledijo tudi v nekoliko drugačnem zaporedju, odvisno od namena uporabe in izkušenosti operaterja.



Slika 40: Diagram poteka obdelave podatkov GPS/IMU v programu Inertial explorer.

V prvem koraku v programski paket uvozimo surove podatke o GPS in IMU meritvah. Program nam sam izriše približni potek in položaj trajektorije na podlagi kodnih opazovanj, zgolj z upoštevanjem GPS meritev (brez INS). Vse točke trajektorije so obarvane z enako barvo, saj analiza natančnosti še ni bila opravljena.

Drugi korak predstavlja uvoz preciznih efemerid ter referenčno bazno postajo. Efemeride lahko za določen datum, časovni okvir in približen položaj snamemo s spleta, vendar šele ob njihovi objavi, kar je običajno slaba dva tedna. Ko pridobimo precizne efemeride, lahko določimo položaj na osnovi GPS meritev. Rezultat je boljši kot v prvem koraku, dobimo tudi jasno oceno kaj se je dogajalo med meritvami, koliko signalov s satelitov smo prejeli, ali so bili prisotni krajši izpadi signala (angl. cycle-slips), kakšne so bile vrednosti PDOP, HDOP, VDOP. Po pregledu teh parametrov ugotovimo, da na določenih segmentih ni bilo zadostnega števila satelitov, signal je bil izgubljen, pojavili so se »cycle-slips«, itd.



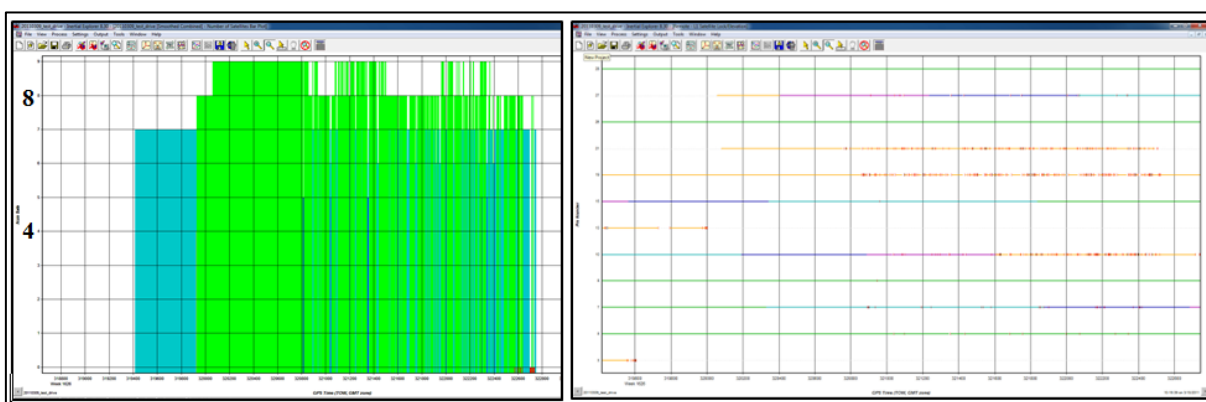
**Slika 41:** Levi del slike predstavlja konstelacijo satelitov v času meritev, desni pa vrednosti PDOP (rdeča), HDOP(zelena) in VDOP (modra).

Na podlagi grafikonov v sliki 41 je razvidno, da je bila konstelacija satelitov med zajemom podatkov dobra, vidnih je bilo skoraj 10 GPS satelitov. Vrednosti P, H in V DOP so generalno med 0,8 in 2,0, kar je prav tako zadovoljiv rezultat.



V tretjem koraku ponovno poženemo obdelavo, vendar tokrat vključimo tudi meritve IMU sistema. Program nam omogoča šibko sklopljeno rešitev združevanja ter močno sklopljeno rešitev. Več o združevanju GPS in INS meritev je že opisano v poglavju 2.2.5 Kombinacija GPS-INS meritev. Najbolj optimalen rezultat običajno dosežemo z močno sklopljeno rešitvijo.

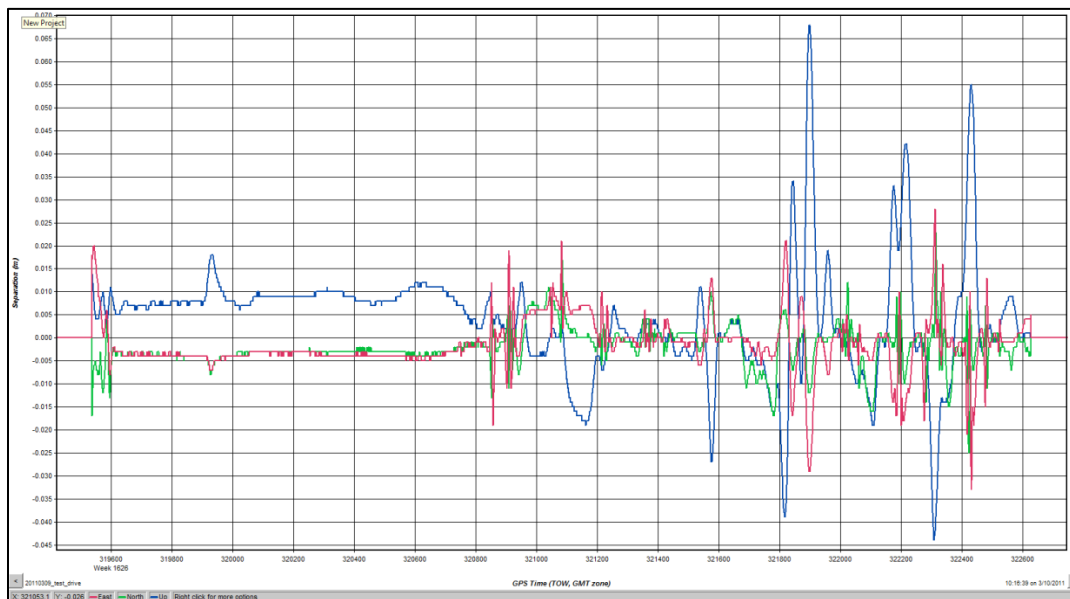
V četrtem koraku ponovno pregledamo določene parametre in problematična časovna območja, kjer samo GPS rešitev ni postregla z zadovoljivimi rezultati. V kolikor so posamezni časovni intervali močno obremenjeni z vplivi, le-te odstranimo iz skupne obdelava in jih obravnavamo posebej. Ob koncu preverimo natančnost določitve položaja in le-tega v naslednjem koraku poskušamo še izboljšati.



**Slika 42:** Levo je prikaz števila s satelita oddanih signalov, desno pa prikaz sprejema signala z manjšimi prekinitvami in »cycle-slipi«.

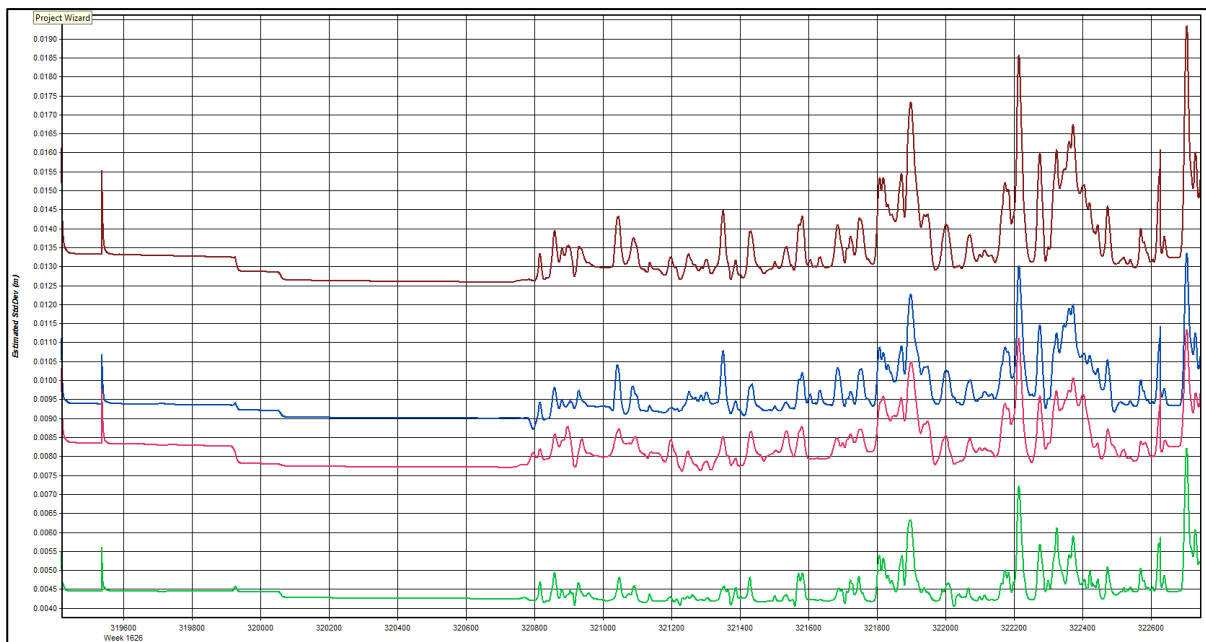
Med zajemom podatkov je bilo vseskozi na voljo 4 ali več satelitov, povprečno pa je bila ta vrednost kar med 6 in 7. »Cycle-slipov« je bilo med izvajanjem meritev relativno malo, ti so se večinoma pojavili ob obračanju vozila.

V petem koraku s pomočjo filtrov glajenja precej izboljšamo rezultat. V območjih, kjer ni GPS signala, deluje zgolj inercialni sistem, čigar natančnost s časom pada. V kolikor gre za stalno oviro na tem območju, se le-ta pojavi pri vožnji tja in nazaj. Pogreški po času naprej in nazaj bodo naraščali, vendar v obratno smer. Če rešitvi združimo, dobimo kombinirano in zglajeno trajektorijo, ki je v relativnem smislu glede na posamezni trajektoriji (naprej in nazaj), bistveno manj pogrešena.



**Slika 43:** Združena separacija oz. glajenje med trajektorijo po poti naprej in nazaj za koordinate IMU sistema; E (rdeča), N (Zelena), UP (modra).

Grafikon na sliki 43 prikazuje razliko v položaju (koordinatne razlike) med rešitvijo trajektorije po poti naprej in rešitvijo po poti nazaj. Več kot 90 % meritev se nahaja v velikostnem razredu med [-1,5; 2] cm. Razlika med potjo naprej in potjo nazaj ima nekaj večjih skokov, ki dosegajo vrednost do 6 cm. Pregled položaja ob dotičnem času (angl. »timestamp«) ponazarja, da so te vrednosti večinoma na območjih obračanja, kjer pravzaprav LS ni izvajal meritev.



**Slika 44:** Standardna deviacija določitve položaja na podlagi močno sklopljene in glajene rešitve.

Separacija oz. odstopanje izračunanih koordinat po poti naprej in nazaj je lahko tudi posledica slabo določenih komponent vektorja premika med centri GPS antene in IMU enote, zato je predhodno potrebno te vrednosti večkrat neodvisno določiti.

Slika 44 predstavlja natančnost končne rešitve obdelave trajektorije. Ta je bila določena na podlagi močno sklopljenega združevanja GPS in IMU meritev z dodanim glajenjem po poti naprej in nazaj.

Zelena barva predstavlja standardno deviacijo izračunane koordinate N («North»). Vrednost se giblje med 3 in 8 milimetri in je izmed vseh treh koordinat najbolj natančno določena. Rdeča barva prikazuje standardno deviacijo koordinat E («East») skozi čas. Tu se vrednosti gibljejo nekaj pod centimetrom. Modra barva ponazarja višinsko koordinato, ki je določena z natančnostjo centimetra in pol. Skupna standardna deviacija trajektorije (rjava barva) ponazarja kvadratni koren vsote kvadratov treh koordinatnih vrednosti in se giblje okoli dveh centimetrov. Rezultati so izredno dobri, pravzaprav skoraj predobri. Vrednosti standardnih deviacij so določene statistično, zato ocenjujem, da je njihova vrednost manjša od dejanske. Kljub temu je natančnost položaja vozila med zajemom podatkov določena izredno dobro in služi kot vhodni podatek za nadaljnjo obdelavo laserskih podatkov.

### **3.2.2 Uporabljeni programski paketi podjetja RIEGL**

#### **3.2.2.1 RiACQUIRE**

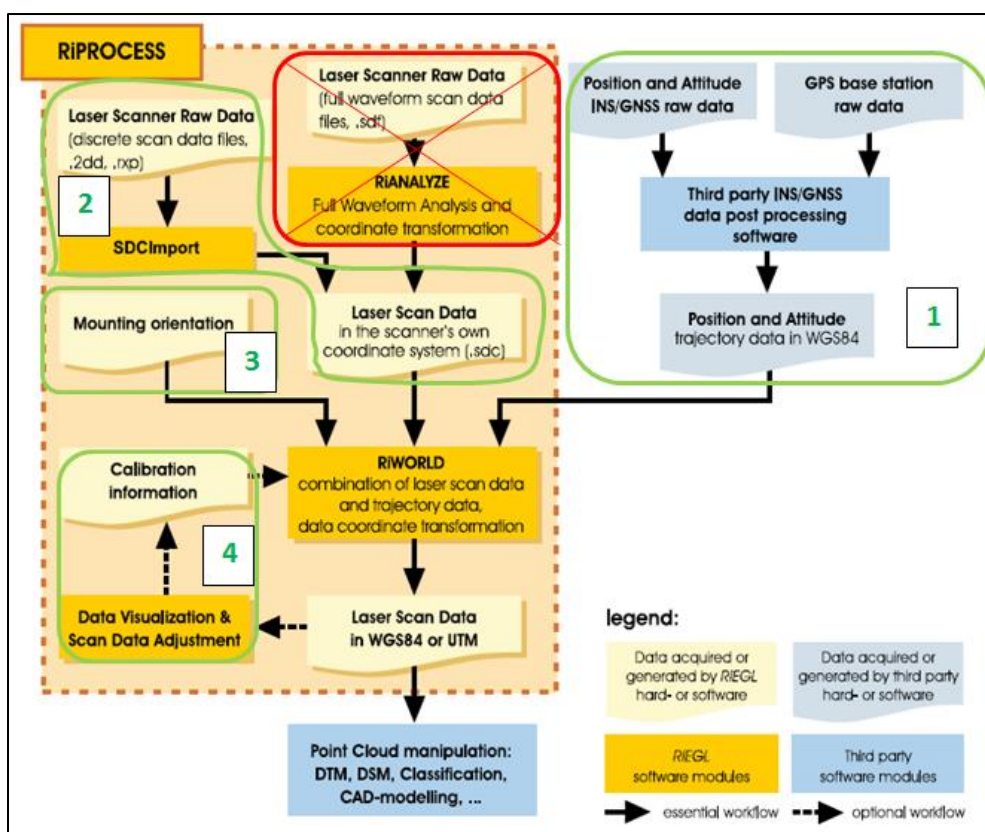
Testiranje sistema in zajem podatkov je potekal v sodelovanju z RIEGL Laser Measurement Systems. Za namen terenskega zajema podatkov so priskrbeli programsko orodje RiACQUIRE, ki združuje enostaven a hkrati programsko močan modul za nadzor in komunikacijo z integriranimi senzorji v MLS sistemu. Z namenom zmanjšanja obremenitve operaterja se v uporabniškem vmesniku prikazuje zgolj najbolj relevantna vsebina, ukazi pa se večino izvajajo pol samodejno. Gumbi v grafičnem vmesniku so veliki, celoten program zaradi posebnosti svoje uporabe deluje precej robustno in kompaktno, kar je glede na otežene pogoje dela v premikajočem se vozilu vsekakor dobrodošlo. Med terenskim zajemom se nam prikazujejo grafični podatki laserskega skenerja in GPS/IMU enote, s čimer lahko izkušen operater v trenutku zazna določene nepravilnosti. Celotna zgodovina sprejema podatkov in izvršenih ukazov se shranjuje v posebno datoteko, ki služi kot snemalni dnevnik in jo kasneje lahko analiziramo v pisarni. Potrebno pa je poudariti, da RiACQUIRE deluje zgolj z RIEGL-ovimi laserskimi skenerji, kar je pravzaprav tudi za pričakovati.

### 3.2.2.2 RiPROCESS

Usmeritev diplomskega dela ni bila na terenskem zajemu podatkov, marveč na njihovi obdelavi in kalibraciji sistema MLS. V ta namen je RIEGL razvil močno programsko orodje RiPROCESS, ki omogoča detajlno obdelavo podatkov, njihovo izravnavo, absolutno georeferenciranje, klasifikacijo laserskih podatkov, vizualno manipulacijo in možnost izvajanja določenih analiz.

Cena za letno licenco tega zelo uporabnega programskega paketa je relativno visoka, zato sem še toliko bolj hvaležen podjetju RIEGL, da so mi omogočili brezplačno testno licenco za obdobje meseca in pol, med 23.01.2013 in 06.03.2013. V tem časovnem oknu sem obdelal testne podatke, opravil praktični del diplomskega dela in se detajlno seznanil z uporabnostjo programskega okolja RiPROCESS. Na podlagi delovnih izkušenj z dotičnim programom so nastala tudi video navodila, ki bolj podrobno in eksplicitno navajajo zaporedje določenih ukazov in poskušajo uporabniku priskrbiti dodatne informacije, ki jih ni možno zaslediti v uradnih uporabniških navodilih programa.

Na sliki 45 je prikazan generalni potek izvajanja nalog v programskem okolju RiPROCESS, ki sem ga razdelil v 4 večje korake, katere bom v nadaljevanju tudi opisal. Analiza programskega paketa RiPROCESS ni namen diplomskega dela, zato je pregled splošen in ne opisuje podrobnosti.



Slika 45: Generalni potek dela (angl. »workflow«) v programskem paketu RiPROCESS.

(Riegl Data sheet, 2013)

Prvi korak pri obdelavi zajetih podatkov z MLS sistemom je izračun trajektorije. RIEGL v svojih programskih paketih tega ne omogoča, sej se ukvarja s tehnologijo laserskega skeniranja. Razvijalci in ponudniki GNSS opreme pa nudijo tudi programsko podporo temu segmentu. Tako se izračun trajektorije opravi v drugih licenčnih programih (angl. »third party software«), obdelani podatki pa služijo kot vhodni podatek, na katerega se »pripenjajo« podatki laserskega skeniranja. Izračun podatkov trajektorije je bil opravljen s pomočjo modula Inertial Explorer 8.30 in je opisan v poglavju 3.2.1.

RiPROCESS omogoča polnovalovno (angl. full waveform) analizo podatkov laserskega skenerja. Ta tehnologija se uporablja predvsem v aerolaserskem skeniranju, orodje RiPROCESS pa je namenjeno tako zračnemu kot zemeljskemu mobilnemu laserskemu skeniranju. Ker LS med testnimi meritvami ni bil konfiguriran za izvedbo polnovalovne analize, je ta korak v obdelavi podatkov nepotreben, omenjam ga zgolj zaradi prikaza vseh možnosti obdelav v programskem paketu. Na sliki 45 je ta sklop nalog prečrtan z rdečim križem.

Drugi korak zavzema uvoz vseh surovih \*.rxp datotek. RIEGL-ovi laserski skenerji pri svojem delu ustvarijo surovo podatkovno datoteko \*.rxp s specifično strukturo podatkov, ki jo berejo le lastniški programi iste korporacije. Surove \*.rxp datoteke uvozimo v RiPROCESS s pomočjo modula SDC Import, ki preoblikuje podatke v lastni koordinatni sistem laserskega skenerja, ti pa pridobijo končnico \*.sdc.

Do tu je bilo delo povsem enostavno, tretji korak pa zahteva nekoliko večjo pazljivost in nekoliko več dodatnega poznavanja delovanja sistema. S pomočjo programske pripravljenih matrik v prazna polja vnesemo podatke o odnosih med posameznimi senzorji (transformacijske matrike med koordinatnimi sistemi LS, IMU, GPS). Skupaj z \*.sdc datotekami, podatkih o orientaciji in medsebojnih odnosih senzorjev, nadaljujemo v samostojen programski paket, v RiPROCESS je zastopan kot dodatni modul z imenom RiWORLD. Le-ta nam podatke oblaka točk pretvori v izbrani globalni koordinatni sistem z (npr. UTM) ali brez projekcije (npr. ETRS89, WGS84). Glede na zmogljivost procesnega računalnika in velikost \*.sdc datotek variira tudi čas pretvorbe. Po tem koraku je podatke možno vizualizirati, pregledovati, analizirati, itd. V kolikor sistem ni kalibriran, so jasno vidna odstopanja med identičnimi ravninami, ki jih moramo skozi proces kalibracije oz. izravnave tudi odpraviti. Vizualizacija podatkov je precej obremenjujoča za grafično kartico računalnika. Glede na uporabniške izkušnje je optimalna grafična kartica, ki vsebuje 1GB ali več lastnega pomnilnika. Zelo priporočljiva je tudi uporaba hitrega SSD diska, saj je količina podatkov izjemno velika, hitrost pa v veliki meri zavisi tudi od hitrosti branja in zapisovanja podatkov na disk, še posebej kadar delamo varnostne kopije obdelanih podatkov. Povprečen čas obdelave z mojim prenosnikom je trajal 15 minut, obdelavo pa sem pognal več kot sto krat. Tako je skupno programsko procesiranje v obdobju dobrega meseca presežlo 25 ur, tu seveda govorim zgolj o pretvorbi podatkov in ne o ostalih nalogah, ki so časovno še veliko bolj zamudne.

Četrty korak je časovno najbolj zamuden, subjektiven, zahteva največ znanja in izkušenj in je pogostokrat odvisen od same narave problema s katerim se soočamo. Vizualizirane podatke nato preko različnih modulov za izravnavo skušamo izboljšati. Značilnosti obravnavane naloge nam narekujejo, katere parametre želimo izravnati. Relativna izravnavo poteka preko identičnih ravnin in iskanja najboljšega prileganja med njimi. Po opravljeni izravnavi pregledamo rezultate, v kolikor smo z njimi zadovoljni, jih potrdimo. Generirajo se kalibracijski parametri, s katerimi dodatno vstopimo v korak 3 in ponovno poženemo obdelavo skozi RiWORLD. Po končani obdelavi lahko oblak točk zopet vizualiziramo ter si ogledamo napredek. Ta korak se lahko ponavlja v več iteracijah, v odvisnosti od uporabnikovih ciljev in želja. Po želji lahko vključimo tudi oslonilne točke in oblak še dodatno georeferenciramo v prostor.

### 3.3 Metodologija kalibracije v RiPROCESS

Kalibracija MLS sistema se v programskem okolju RiPROCESS izvaja v dialogu »Scan data adjustment«. Glede na izbrane parametre lahko določamo ali gre za izravnavo v relativnem ali absolutnem smislu. S pomočjo izravnavo se med drugim določi tudi neznane vrednosti BA, torej nagib, naklon in zasuk (angl. roll, pitch in yaw).

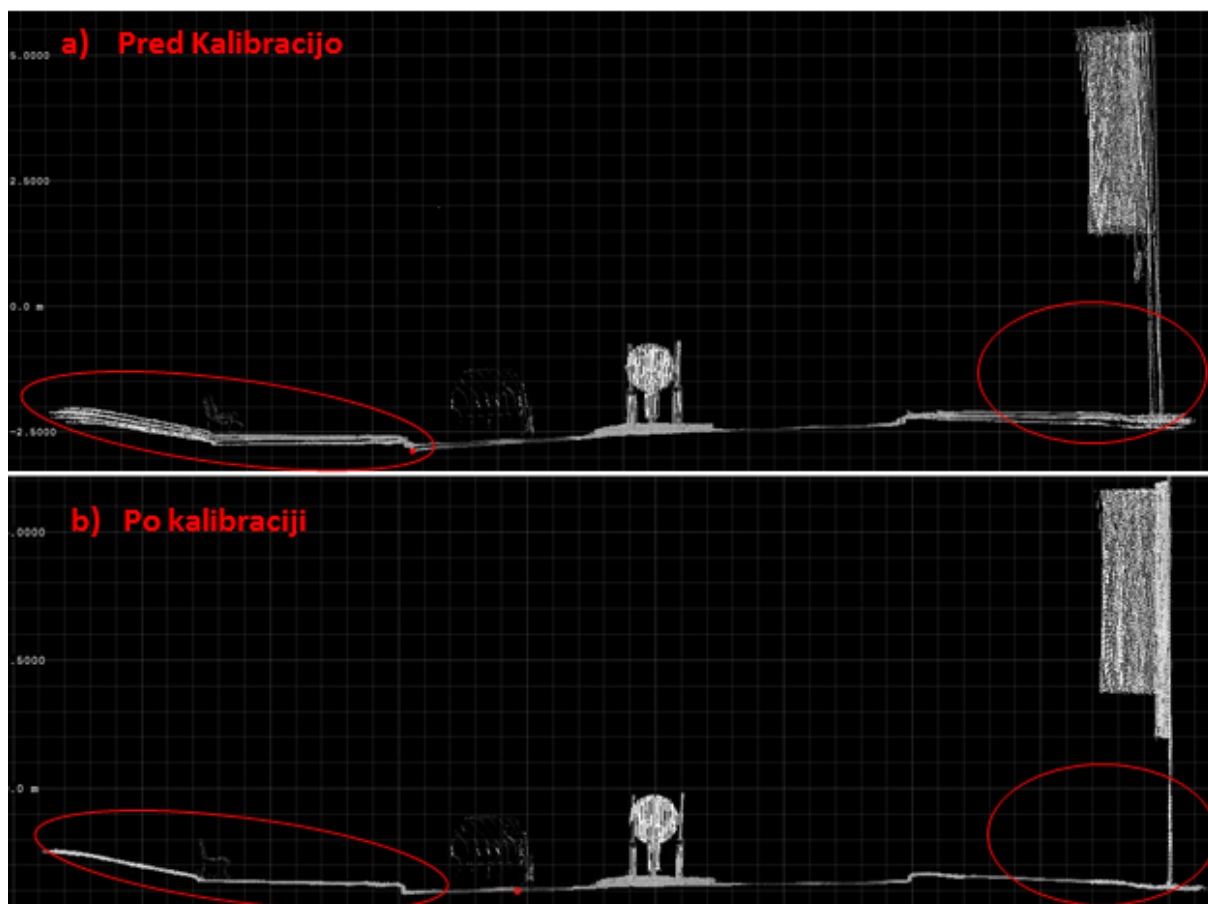
Predhodno je potrebno definirati določene zasuke in premike v povezavi s koordinatnimi sistemi senzorjev. Tu velja izpostaviti standardno 4x4 matriko med lastnim koordinatnim sistemom LS (SOCS) in GPS/IMU koordinatnim sistemom (enačba 36).

$$SOCS \rightarrow GPS/IMU = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -0,022 \\ 1 & 0 & 0 & 0,020 \\ 0 & 0 & 1 & 0,4845 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Pod-matrika 3x3 v enačbi 36, obkrožena z rdečo barvo, ponazarja rotacije med osmi koordinatnega sistema LS in IMU/GPS sistema. Zaradi dotične konfiguracije IMU enote je navigacijski sestav v obliki ENU (East-North-Up), kjer so sekvence rotacij v sledečem zaporedju: *nagib* → *naklon* → *zasuk*. Glede na enčbo (36) je razvidno, da je imel LS drugačno orientacijo osi, zato je bila potrebna njihova transformacija. Osi X in Y sta zamenjani, X pa ima pri tem tudi obratno usmerjenost (rotacija za 180°). Vektor 1x3 v desni strani enačbe, obkrožen z modro barvo, predstavlja translacijo med LS in IMU sistemom (»lever arm«). Spodnja 3x1 matrika v enačbi (36) definira pravokotnost med osmi obeh k.s. Same ničle definirajo vzporednost oz. pravokotnost koordinatnih osi v obeh sistemih (LS in IMU). Zadnja 1x1 pod-matrika predstavlja merilo, vrednost 1 nakazuje enako merilo v obeh koordinatnih sistemih. V kolikor hočemo pravilno vizualizirati podatke, je ta matrika ključnega

pomena. Prav tako lahko v postopku kalibracije izravnamo tudi vrednosti »lever arm«, ki so v matriki obkrožene z modro barvo.

Postavi se vprašanje, kakšen je cilj kalibracije in kaj želimo z njo doseči. Odgovor na to vprašanje podaja slika 46.

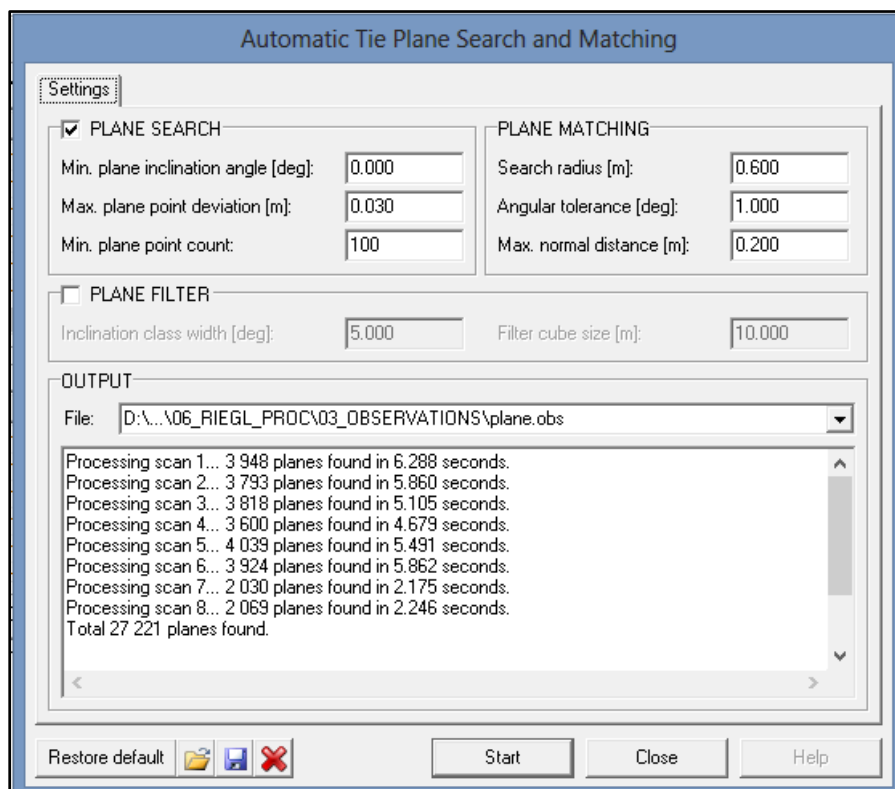


**Slika 46:** Razlika med zajetimi podatki profila ceste pred in po kalibraciji.

S pomočjo kalibracije ter posledično določitve neznanih kotov (*nagib, naklon, zasuk*) med LS in IMU želimo doseči relativno ujemanje oblakov točk med seboj. Kasneje z oslonilnimi točkami oblak še dodatno izravnamo in ga georeferenciramo v prostor. Slika 46 prikazuje profil cestišča ter obcestja pred in po izvedeni kalibraciji. Razlika je očitna predvsem z oddaljevanjem od trajektorije, kjer ravnine odstopajo med seboj kot posledica *nagiba* (angl. roll). Kvaliteten IMU sistem in korektno izpeljana kalibracija sta ključna pogoja za doseganje geodetske natančnosti pri izvajanju MLS meritev.

Programsko okolje RiPROCESS kalibracijo oz. izravnavo izvaja na podlagi iskanja oz. določitve identičnih ravnin, ki bi v splošnem morale sovpadati. Zaradi različnih dejavnikov se te ravnine ne prekrivajo v zeleni meri. To stanje nazorno opisuje slika 25, princip minimiziranja ortogonalnih razdalj med ravninami pa enačba (27).

Preden želimo vhodne podatke izravnati, je potrebno identične ravnine tudi določiti, kar lahko storimo ročno ali samodejno. V prvi fazi iteraciji izravnave priporočam ročno določevanje identičnih ravnin, saj določene ravnine odstopajo preveč, da bi jih samodejno iskanje sploh identificiralo kot skupne. Ko opravimo kalibracijo na podlagi ročno določenih identičnih ravnin in pridobimo prve približke iskanih parametrov postopek ponovimo, s tem da tokrat vključimo tudi samodejno iskanje ravnin. Tudi samodejno iskanje zahteva, da definiramo določene parametre, ki programu podajajo informacijo, kaj naj spozna za identično ravnino.



**Slika 47:** Dialog za iskanje identičnih ravnin v programskem okolju RiPROCESS.

V dialogu se parametri delijo v tri skupine:

- Parametri za določitev skupine točk kot ravnine (»Plane search«)
- Parametri za iskanje identičnih ravnin (»Plane matching«)
- Parametri za filtriranje identičnih ravnin (»Plane filter«)



a) Parametri za določitev skupine točk kot ravnine (»Plane search«)

- minimalni inklinacijski kot skupine točk,
- maksimalna deviacija točk v določeni skupini, ki se obravnava kot ravnina,
- minimalno število točk, da lahko to skupino identificiramo kot ravnino.

Minimalni inklinacijski kot se predvsem uporablja pri ALS, za MLS je privzeto nastavljen na 0. Maksimalna deviacija točk v ravnini ponazarja koliko lahko točke v določeni skupini še odstopajo od izračunane ravnine skozi njih, da je ta površina spoznana za ravnino. V prvih iteracijah iskanja sem običajno to vrednost nastavljal na nekaj centimetrov, proti koncu pa sem uporabljal vrednost 2 cm. Minimalno število točk v ravnini je privzeto nastavljeno na 100. Algoritem skozi celoten oblak točk določi ravnine, ki ustrezajo vsem trem kriterijem.

b) Parametri za iskanje identičnih ravnin (»Plane matching«)

- radij iskanja [m],
- kotna toleranca med normalama [ $^{\circ}$ ],
- maksimalna dolžina normale [m].

Radij iskanja predstavlja 3D razdaljo, v kateri sta dve ravnini lahko spoznani za identični. V začetni fazi je vrednost privzeto nastavljena na 1m, kasneje pa se jo iterativno manjša, običajno nekje do 20 cm. Kotna toleranca med normalama določa kakšno je lahko maksimalno kotno odstopanje med normalama, če ju postavimo v isto izhodišče. Zopet je tu privzeta vrednost nastavljena na  $1^{\circ}$ , bistveno pa te vrednosti med nadaljnjimi iteracijami nisem spreminjal. Maksimalna dolžina normale je pravzaprav projekcija normalnega vektorja med dvema ravninama. Določa koliko sta ravnini v paralelnem smislu lahko oddaljeni (angl. »offset«). Izmed vseh treh je to eden ključnih parametrov. Zopet je tu privzeta vrednost 1 m, ki pa je za naravo dotičnega testnega območja občutno previsoka. Najvišja vrednost, katera pri iskanju ne identificira napačnih ravnin za skupne, je 20 cm. V kolikor želimo, da sta dve ravnini spoznani za identični, morata ustrezati vsem trem naštetim pogojem.

c) Parametri za filtriranje identičnih ravnin (»Plane filter«)

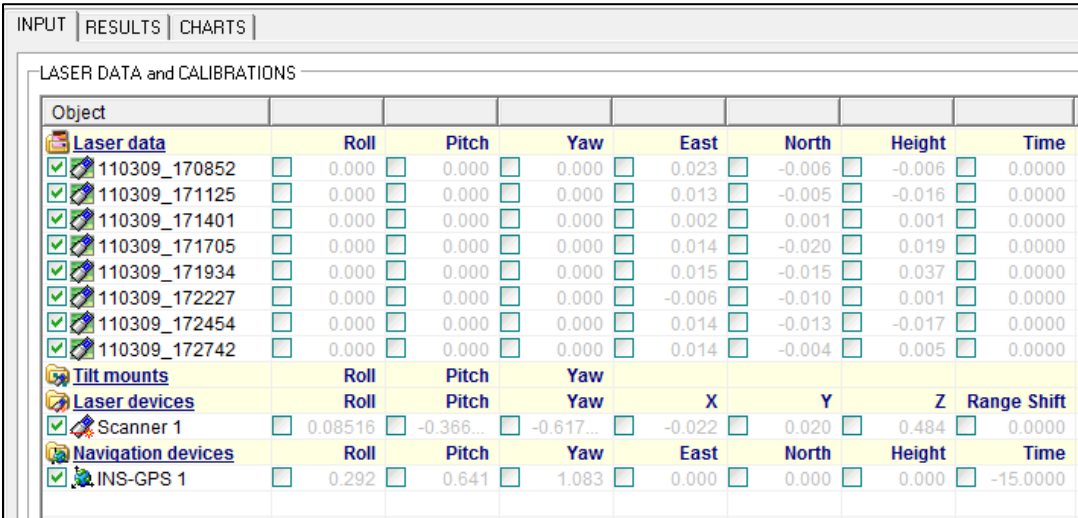
- velikost inklinacijskega razreda,
- velikost segmentov.

Filtriranje omogoča bistveno redukcijo števila odgovarjajočih skupnih ravnin. V postopku filtriranja so ravnine klasificirane glede na inklinacijski kot in njihovo prostorsko distribucijo. Velikost

inklinacijskega razred oz koraka je privzeto nastavljena na 5°, velikost kubične celica pa na 10 m. Ravnine so klasicifirane glede na oba parametra in se zreducirajo na predstavnika vsake skupine. Število ravnin se tako občutno zmanjša, kar je v nekaterih primerih priporočljivo, saj nočemo, da nam preveliko število vhodnih parametrov statistično izboljša skupno standardno deviacijo, ki je dejansko slabše kakovosti.

V kolikor se odločimo za ročno določevanje identičnih ravnin, je postopek precej zamuden. Na celotni dolžini testnega območja je določevanje skupnih ravnin trajalo do 5 ur, v tem času pa je bilo možno določiti med 500 in 700 identičnih ravnin. Za primerjavo je samodejni postopek, vključno s filtriranjem, v pol minute uspel definirati 26 tisoč ravnin, od katerih je bilo 3700 spoznanih za identične, glede na predhodno določene parametre. Skozi celoten potek praktičnega dela je bilo zaradi različnih testiranj potrebno ročno iskanje identičnih ravnin ponoviti več kot desetkrat, zato je precej bolj optimalno uporabljati zmogljiv in hiter računalnik.

Izbrane identične ravnine služijo kot vhodni podatek za izravnavo, parametre, katere želimo izravnati, izberemo interaktivno v modulu »Scan data adjustment«.



| Object                    | Roll    | Pitch     | Yaw       | East   | North  | Height | Time        |
|---------------------------|---------|-----------|-----------|--------|--------|--------|-------------|
| <b>Laser data</b>         |         |           |           |        |        |        |             |
| 110309_170852             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.023  | -0.006 | -0.006 | 0.0000      |
| 110309_171125             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.013  | -0.005 | -0.016 | 0.0000      |
| 110309_171401             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.002  | 0.001  | 0.001  | 0.0000      |
| 110309_171705             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.014  | -0.020 | 0.019  | 0.0000      |
| 110309_171934             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.015  | -0.015 | 0.037  | 0.0000      |
| 110309_172227             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | -0.006 | -0.010 | 0.001  | 0.0000      |
| 110309_172454             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.014  | -0.013 | -0.017 | 0.0000      |
| 110309_172742             | 0.000   | 0.000     | 0.000     | 0.014  | -0.004 | 0.005  | 0.0000      |
| <b>Tilt mounts</b>        |         |           |           |        |        |        |             |
| <b>Laser devices</b>      |         |           |           | X      | Y      | Z      | Range Shift |
| Scanner 1                 | 0.08516 | -0.366... | -0.617... | -0.022 | 0.020  | 0.484  | 0.0000      |
| <b>Navigation devices</b> |         |           |           | East   | North  | Height | Time        |
| INS-GPS 1                 | 0.292   | 0.641     | 1.083     | 0.000  | 0.000  | 0.000  | -15.0000    |

Slika 48: Dialog za izravnavo v programskem okolju RiPROCESS.

Slika 48 nazorno prikazuje vse možne parametre, ki jih lahko izravnamo. Prvih 8 podatkovnih virov predstavlja vseh 8 različnih oblakov točk, posnetih med zajemom podatkov. Zaradi dotične konfiguracije sestavljenega MLS sistema je teh oblakov več kot pri komercialnih sistemih. RIEGL-ov komercialni sistem VMX-250 vsebuje 2 laserska skenerja. Posledično se je ob delovanju obeh potrebno peljati v vsako smer enkrat, s čimer dobimo samo 4 prekrivajoče se oblake. Naslednji podatkovni vir je LS in zadnji GPS/INS sistem. Pri vsakem izmed podatkovnih virov lahko izravnavamo kote *nagiba*, *naklona*, *zasuka*, translacije po koordinatnih oseh (pri oblaku točk in

GPS/INS sistemu so to E,N,H, pri LS pa X, Y, Z), ali celo čas registracije (angl. »time stamp«). V kolikor sistem še ni kalibriran, so vse začetne vrednosti nastavljene na 0, razen translacijske vrednosti med LS in IMU, torej parametri X, Y in Z pri podatkovnem viru laserskega skenerja, katere vnesemo že ob kreiranju projekta. Glede na način izravnave in želen rezultat poljubno izbiramo proste parametre. Splošnega pravila za optimalno izravnavo podatkov v smislu izbire parametrov pravzaprav ni. Uporabnik se prilagaja specifikam projekta in skuša doseči kar se da optimalen rezultat. Tudi v strokovnih člankih in drugi literaturi pravzaprav ni možno zaslediti, kateri so bili vsi tisti parametri, ki so se izravnavali hkrati, običajno so predstavljeni zgolj rezultati. Vsako podjetje verjetno najde najboljši recept, ki ga zaradi poslovnih skrivnosti ne želi izdati. V ta namen sem izvedel veliko število različnih izravnav ter poskušal ugotoviti najbolj optimalno rešitev.

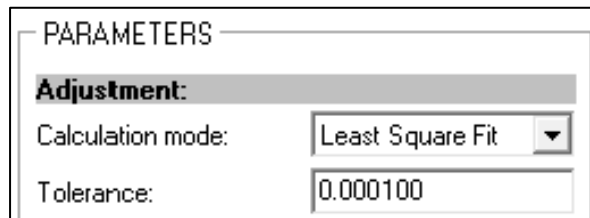
Med mojim obiskom strokovnega simpozija v Salzburgu (European LIDAR Mapping Forum) v decembru 2012 je RIEGL že predstavil prve osnutke novega programskega orodja RiPRECISION, ki bo namenjen izključno kalibraciji sistema. Določeni postopki bodo poenostavljeni, robustnejši in eksplicitno namenjeni določitvi elementov BA (*nagib, naklon, zasuk*). Žal v času praktične izvedbe diplomske naloge (februar in marec 2013) programski paket še ni bil uradno izdan.

V nadaljevanju bosta predstavljena postopka relativne in absolutne izravnave oz. kalibracije, skupaj z različnimi možnostmi pristopa k problemu izbire ustreznih prostih parametrov.

### 3.3.1 Relativna izravnava

Relativna izravnava obravnava najboljše možno medsebojno prileganje oblakov točk, v smislu minimizacije prostorskih odstopanj identičnih ravnin. Nekalibriran MLS sistem zahteva večje število iteracij in ustrezno izbiro postopka izravnave. Programsko okolje RiPROCESS v prvem koraku ponuja izbiro med dvema različnima tehnikama izravnave. Prva je t.i. metoda najmanjših kvadratov, druga pa je robustna metoda izravnave. V določenih primerih grobo pogrešenih opazovanj se robustna izravnava izkaže kot ustrezna, predvsem v prvi iteraciji, kjer želimo zmanjšati vpliv močno odstopajočih vrednosti. V splošnem robustni način izravnave stremi k minimizaciji popravkov opazovanj v absolutnem smislu. Pri nekalibriranem MLS sistemu so napake, kot posledica BA, relativno velike, z večanjem razdalje od LS do objekta pa hitro naraščajo (podobno stanje prikazuje slika 46). V kolikor bi tu izbrali robustno metodo izravnave, bi pomemben delež močno odstopajočih ravnin imel premajhen vpliv na končni rezultat. Statistično določena standardna deviacija sicer nakazuje zelo dober rezultat, vizualni pregled pa pokaže ustrezno natančnost, v smislu prekrivanja ravnin, le v območju blizu trajektorije vozila. Z večanjem razdalje med LS in objektom vpliv nekalibriranih elementov BA ni odstranjen v želeni meri.

V praksi se za kalibracijo MLS sistema najpogosteje uporablja izravnavo po metodi najmanjših kvadratov, ki skuša minimizirati vsoto kvadratov popravkov opazovanj. V primeru MLS izravnave se za popravek opazovanja definira razdaljo med dvema identičnima ravninama.



**Slika 49:** Izbira metode izravnave in tolerance med naslednjo iteracijo v programskem okolju RiPROCESS.

Ne glede na izbiro metode izravnave dodatno definiramo še tolerančno vrednost. Toleranca je pravzaprav vrednost, pri kateri izravnavo prekine iterativni izračun najugodnejšega rezultata. To se zgodi v primeru, ko rezultat izravnave od predhodnega izračuna odstopa za manjšo vrednost, kot jo definiramo v toleranci.

$$x_i - x_{i-1} < Toleranca \quad (37)$$

Z izkušnjami kmalu pridobimo občutek, kolikšna je optimalna tolerančna vrednost. Pretirano zmanjševanje tolerančne vrednosti nima bistvenega vpliva na končni rezultat izravnave, občutno pa se podaljša njen čas izvajanja.

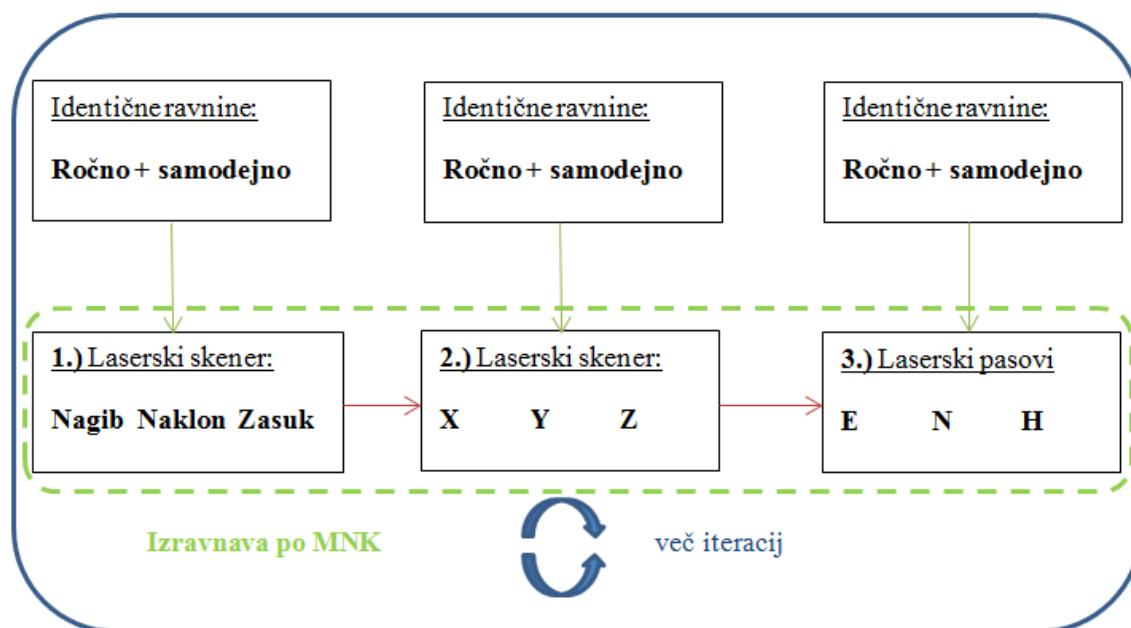
Določili smo torej identične ravnine (ročno ali samodejno), izbrali metodo izravnave in tolerančno vrednost, ostane zgolj določitev prostih parametrov, ki naj se izravnajo.

Splošnega pravila, koliko in katere proste parametre v izravnavi izbrati, pravzaprav ni. Najbolj standardna je izbira 6 parametrov, t.j. elementov BA (*nagib, naklon, zasuk*) ter »lever arm« med LS in GPS/IMU (X,Y,Z). Zanimive rezultate podaja povzetek delavnic OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research), na temo aero-triangulacije (Heipke, et.al, 2002). V okviru delavnic je bilo vključenih 12 različnih podjetji, ki so morala neodvisno, na podlagi testnega preleta, izvesti kalibracijo aero-snemalnega sistema. Zanimivo je, da je od 12 različnih sodelujočih, kar 8 podjetij izbralo različen matematičen model v smislu določitve prostih parametrov, ki so variirali od 6 pa vse do 21 različnih prostih vrednosti. Nekateri so izravnavo izvajali v enem koraku, spet drugi v dveh ali več. Članek samo dodatno potrjuje predhodno postavljeno tezo, da splošnega pravila določitve prostih parametrov v izravnavi ni. Za namene testiranja in iskanja optimalnega pristopa k

izravnavi podatkov sem opravil večje število konceptualno različnih izravnav, ki bodo v nadaljevanju predstavljene v obliki shematskih diagramov.

Možnost A:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk* laserskega skenerja → BA,
  - druga izravnava: relacija med ks. LS in IMU (X, Y, Z),
  - tretja izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov (E, N, H).
- } Metoda najmanjših kvadratov (MNK)



**Slika 50:** Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave.

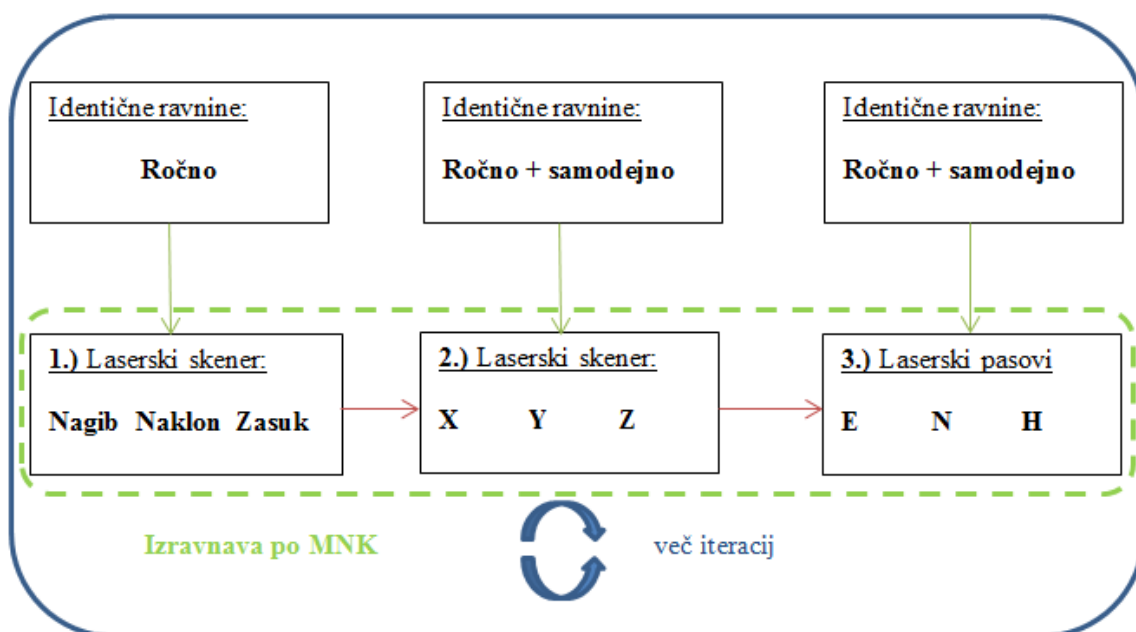
Primer A nakazuje izravnavo po metodi najmanjših kvadratov (MNK). Že v prvem delu izravnave se ravnine določa tako ročno, kot samodejno, proste parametre pa predstavljajo elementi BA (nagib, naklon in zasuk med LS in IMU). Po izravnavi podatke ponovno obdelamo z dodanimi kalibracijskimi vrednostmi ter jih vizualiziramo. Zopet se lotimo izravnave, kjer kot prosti parametri nastopajo elementi vektorja med ks. LS in IMU (»Lever-arm«; X, Y, Z). Oblak točk znova obdelamo z novimi kalibracijskimi vrednostmi, jih vizualiziramo ter opravimo še tretjo izravnavo, kjer vseh 8 oblakov točk med sabo koordinatno premaknemo, da dosežemo najboljše možno prileganje. Vrednosti premika so majhne, v rangi centimetra. Oblake točk ponovno obdelamo z novimi kalibracijskimi podatki. Celoten postopek treh izravnav lahko tudi iterativno ponavljamo, vendar več kot dve iteraciji pravzaprav nista potrebni.

Tovrstni pristop k izravnavi ni najboljši, saj z avtomatskim iskanjem ravnin že v prvem koraku, kjer podatki še sorazmerno močno odstopajo, identificiramo določene ravnine za skupne, čeprav te niso.

Predstavljajmo si, da ob cestišču stoji reklamni pano debeline 15 cm. Z vožnjo v eno in drugo smer pano zajamemo z obeh ploskovnih strani. V algoritmu za prepoznavanje skupnih ravnin imamo parameter, ki ponazarja maksimalno oddaljenost med dvema identičnima ravninama, nastavljen na 20 centimetrov. Algoritem bo torej vse ravnine na eni in drugi strani reklamnega panoja identificiral kot identične, čeprav to niso. Prav zaradi specifične občestnih objektov kvaliteta algoritma za določanje identičnih ravnin močno zavisi od smotrnosti uporabnikove konfiguracije iskalnih parametrov. Paziti je potrebno, da ne izberemo previsoke vrednosti. Ob izbiri prenizke vrednosti pa lahko tvegamo izgubo določenih ključnih opazovanj (identičnih ravnin) v smislu izravnave. Smiselna je torej ročna določitev skupnih ravnin oblakov točk v prvem koraku izravnave. V drugem koraku, ko so podatki že bližje pravi vrednosti (ravnine so bližje skupaj), je poleg ročnega smotrno tudi avtomatsko iskanje identičnih ravnin.

#### Možnost B:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk* laserskega skenerja  $\rightarrow$  BA,
- druga izravnava: relacija med ks. LS in IMU (X, Y, Z),
- tretja izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov (E, N, H).

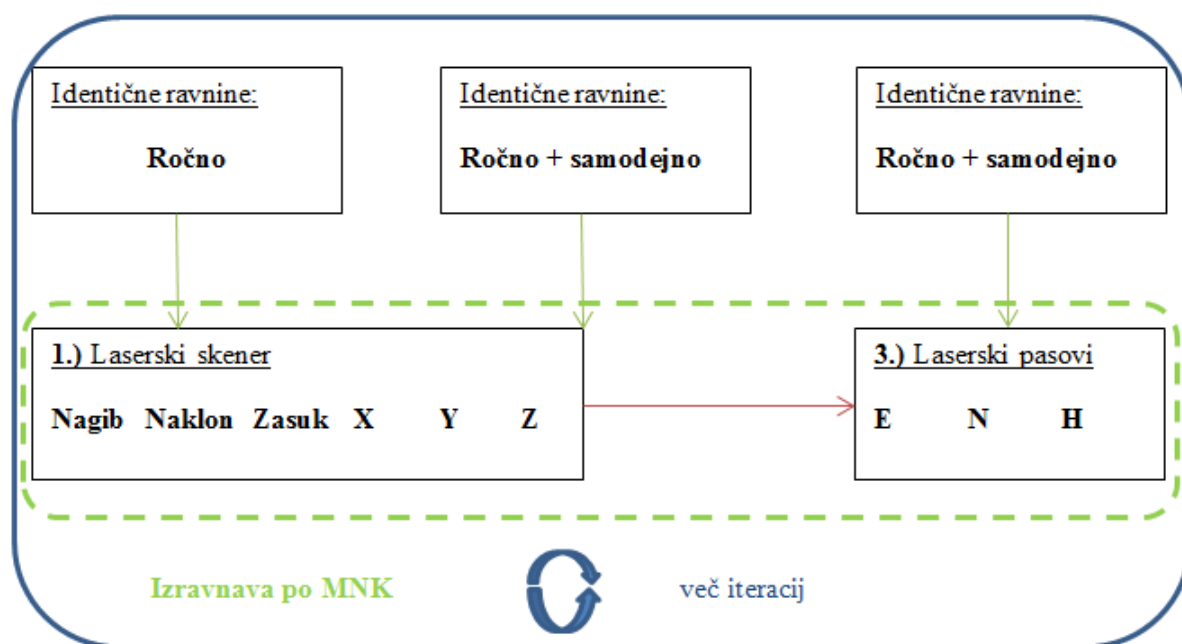


**Slika 51:** Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (2).

Način kalibracije podatkov v postopku B je enak tistemu v postopku A, dodatno je odpravljena pomanjkljivost avtomatskega iskanja skupnih ravnin v prvem koraku izravnave. Ravnine se tu določajo zgolj ročno, kar je glede na specifikko obravnavanega problema ustrežnejše.

#### Možnost C:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk*, X, Y, Z laserskega skenerja,
- druga izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov (E, N, H).

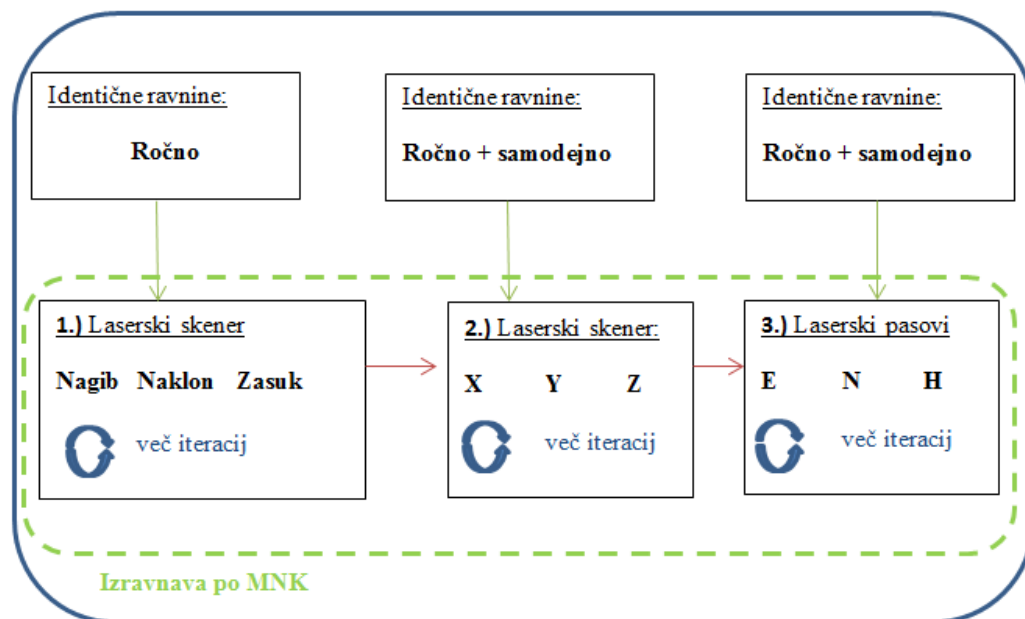


Slika 52: Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (3).

Tretja možnost je generalno precej podobna načinu A in B z razliko, da tu združimo prva dva koraka izravnave. Namesto dvakratne obravnave treh parov parametrov jih tu zajamemo šest naenkrat (*nagib, naklon, zasuk*, X, Y, Z). Gre za enega najbolj splošnih postopkov v izravnavi MLS podatkov.

#### Možnost D:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk* → BA, (več zaporednih iteracij),
- druga izravnava: relacija med ks. LS in IMU (X, Y, Z), (več zaporednih iteracij),
- tretja izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov (E, N, H) ,(več zaporednih iteracij).

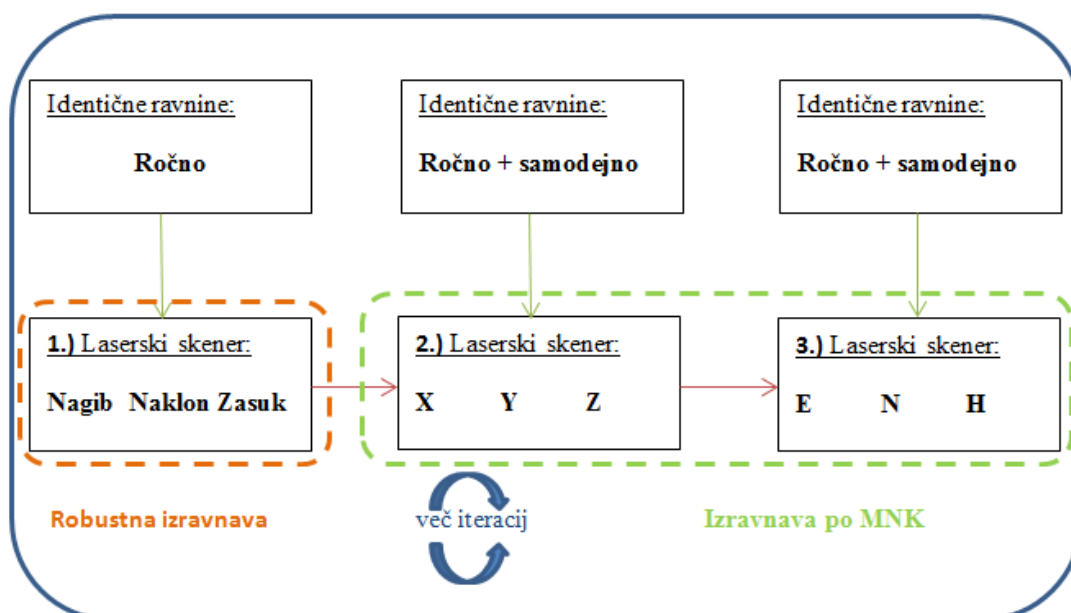


Slika 53: Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (4).

Možnost D je pravzaprav izpeljanka načina B. Razlika je le v tem, da posamezne izravnave izvajamo iterativno že v smislu zaporednih ponovitev izravnav istih prostih parametrov. V določenih primerih se dotična rešitev izkaže za ustrežnejšo.

#### Možnost E:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk* laserskega skenerja → BA,
- druga izravnava: relacija med ks. LS in IMU (X, Y, Z),
- tretja izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov (E, N, H).



Slika 54: Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. izravnave (5).



Opcija E zopet predstavlja izpeljanko možnosti B, s to razliko, da tu v prvem koraku uporabimo robustno metodo izravnave. Cilj izravnave je kalibracija sistema, posledično nočemo izgubiti opazovanj, ki imajo dejansko večji doprinos h končni napaki, kar bi se do določene mere zgodilo ob uporabi robustne izravnave. V prvem koraku tako robustna izravnava ni najboljša opcija.

Načeloma so bili predstavljene le nekatere možne izvedbe relativne izravnave v smislu izbire ustreznih parametrov in kronološkega zaporedja izvajanja iteracij. Običajno narava problema in izkušnje operaterja določajo izbrani način izravnave podatkov. Kljub temu vse zgoraj naštete opcije podajajo podoben rezultat. Prej ko slej operater prispe do točke, kjer vizualno, s pregledom podatkov, težko oceni napredek in kakovost podatkov glede na predhodno izravnano. Z večanjem števila iteracij običajno lahko izboljša statistično določeno standardno deviacijo celotne izravnave, kot tudi posameznih parametrov. Ključno je zavedanje operaterja, da izredno visoka statistična natančnost ne pomeni vedno tudi ekvivalentno odličen rezultat kalibracije, ki ga lahko ocenimo tudi vizualno. Pomembno je torej, da stremimo k optimalni izravnavi, ki upošteva reprezentativen vzorec vhodnih opazovanj in se ne ozira le na doseganje visoke statistične natančnosti. Le na ta način lahko določimo najbolj optimalno geometrično ujemanje oz. prekrivanje več različnih pasov oblaka točk.

### **3.3.2 »Absolutna« izravnava**

Zajem podatkov z MLS sistemom se za pozicioniranje v prostor zanaša na svoj GPS/INS segment. Zaradi različnih vplivov naknadno izračunana trajektorija vsebuje določene sistematične ali slučajne pogreške, ki pomenijo položajno odstopanje trajektorije od prave vrednosti. Podatki laserskega skeniranja se skupaj s svojimi vplivi pripenjajo na predhodno določeno trajektorijo, ki je prav tako obremenjena z določenimi pogreški, vplivi se torej akumulirajo. Oblak točk glede na podatke integriranih senzorjev pridobi koordinate v izbranem lokalnem/globalnem koordinatnem sistemu. V kolikor želimo oceniti absolutno natančnost končnega produkta MLS sistema, torej geolociranega oblaka točk, moramo le-tega koordinatno primerjati z nekimi danimi količinami, ki jih privzamemo za točne.

V naslovu tega podpoglavja je uporabljen izraz »absolutna izravnava«, ki predstavlja izravnavo v absolutnem smislu, kjer celoten oblak točk izravnamo še na določene dane in a-priori znane količine, ki jih v tem primeru predstavljajo oslonilne točke. Sicer bi bilo pravilno, da bi oslonilne točke z reflektivnimi tarčami realizirali na samem terenu ter jih posledično zajeli že v fazi skeniranja podatkov. Predhodno bi seveda vsem oslonilnim točkam določili koordinate v izbranem koordinatnem sistemu po eni izmed geodetskih metod. Žal zaradi časovnih omejitev pri izvedbi testnega snemanja ta postopek ni bil izveden. RIEGL je naknadno priskrbel referenčni oblak točk, geolociran v ETRS89 koordinatnem sistemu, ki je služil kot vir podatkov za ekstrakcijo karakterističnih točk, vidnih v

referenčnem in testnem setu podatkov, katere so nadalje služile kot referenčne oslonilne točke. Kakovostni rang natančnosti določitve koordinat oslonilnih točk je sicer nižji kot pri optimalni terenski izvedbi, vendar vseeno podaja približno oceno absolutne pozicijske natančnosti oblaka točk.

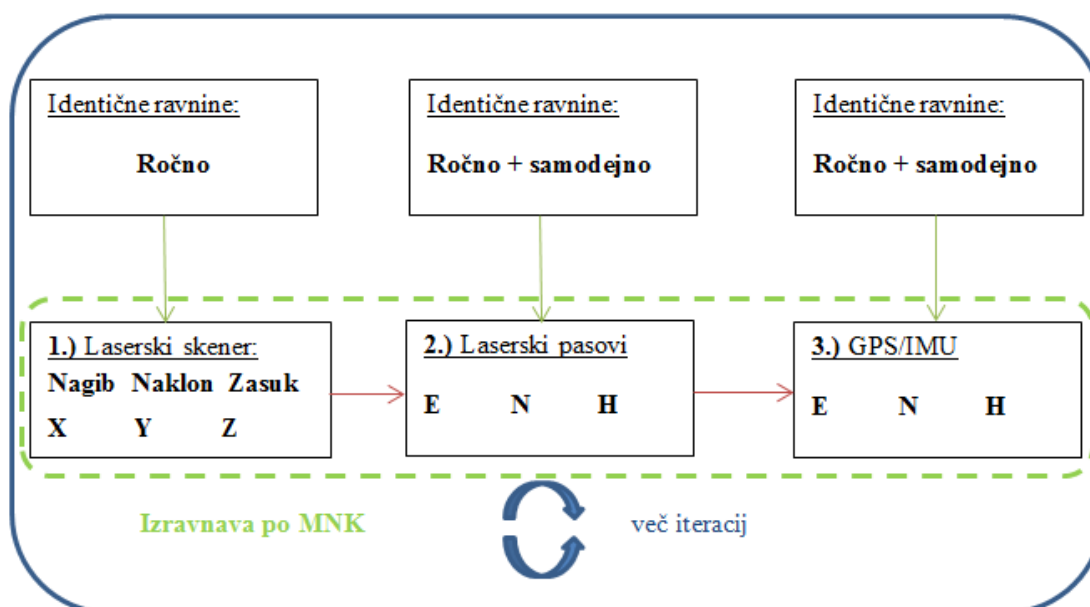
RIEGL-ov programski paket omogoča relativno skalo odbojnosti, kjer absolutno bela površina predstavlja reflektivnost 0, bolj ko se približujemo črni barvi pa vrednost odbojnosti pada (negativne vrednosti). Retroreflektivne površine (tarče, prometni znaki, registrske tablice, ...) močneje odbijajo svetlobo in imajo v relativni odbojni lestvici pozitivno vrednost. Te površine je s preprostim algoritmom mogoče locirati, kar tudi aplicira avtomatsko iskanje signaliziranih oslonilnih tarč.

Postopek absolutne izravnave je pravzaprav docela podoben relativni izravnavi z razliko, da tu vključimo še 3 dodatne parametre (E,N,H), s katerimi GPS/INS sistem koordinatno premaknemo v prostoru (s tem transliramo tudi celoten oblak točk), da se vezne točke čim bolj prilegajo oslonilnim.

Podobno kot v primeru relativne izravnave, bom tudi tu v obliki shematskega diagrama predstavil dve različici oz. varianti izvedbe.

#### Možnost A:

- prva izravnava: *nagib, naklon, zasuk* + opsijsko (X, Y, Z) laserskega skenerja → BA,
- druga izravnava: manjši premiki osmih laserskih pasov za boljše relativno prileganje (E, N, H),
- tretja izravnava: translacija GPS/INS senzorja v prostoru (E, N, H).

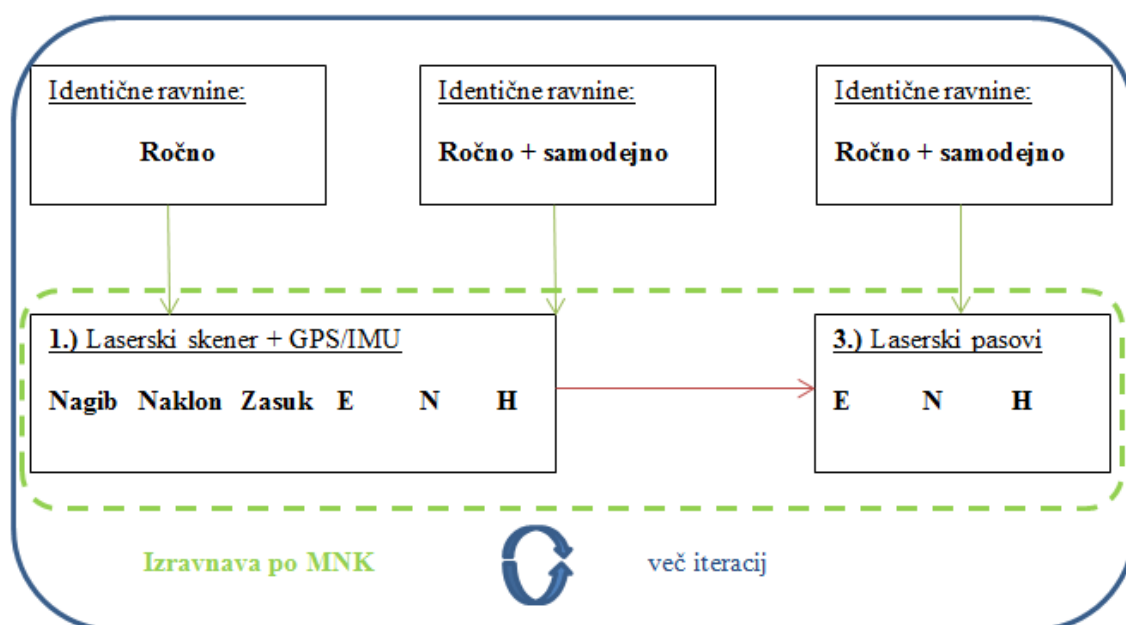


**Slika 55:** Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. absolutne izravnave (1).

Vidimo, da shematski diagram podaja izravnavo v relativnem smislu, kjer v zadnjem koraku relativno izravnani oblak točk premaknemo še na pravi 3D položaj, ki ga definirajo odgovarjajoče oslonilne točke.

Možnost B:

- prva izravnavo: *nagib, naklon, zasuk* + (E, N, H) GPS/IMU, opcijsko še (X, Y, Z) LS,
- druga izravnavo: manjši premiki osmih laserskih pasov za boljše relativno prilaganje (E, N, H).



**Slika 56:** Shematski prikaz enega izmed možnih postopkov kalibracije oz. absolutne izravnave (2).

Druga varianta absolutnega načina izravnave že v prvi iteraciji obravnava tudi dane količine. V smislu hitrejše konvergence prostih parametrov proti pravi absolutni vrednosti, je tovrstna metoda celo nekoliko ustrežnejša kot možnost absolutne izravnave A.

Kakršen koli projekt MLS sistema, ki zahteva doseganje geodetske natančnosti, mora vključevati realizacijo in predhodno izmero oslonilnih tarč na smiselnih razdaljah v odvisnosti od hitrosti. Pomemben faktor pri načrtovanju oslonilnih tarč so tudi pogoji okolja. Območje s slabim ali celo brez GPS signala (predori) se zanašajo zgolj na INS meritve, katerih natančnost s časom pada, zato je ključno realizirati zadostno število tarč, ki služijo kot a-priori dane količine. Brez a-priori koordinat oslonilnih točk je praktično nemogoče oceniti natančnost končnega oblaka točk v izbranem lokalnem ali globalnem koordinatnem sistemu.

## 4 OBDELAVA PODATKOV MLS, REZULTATI IN DISKUSIJA

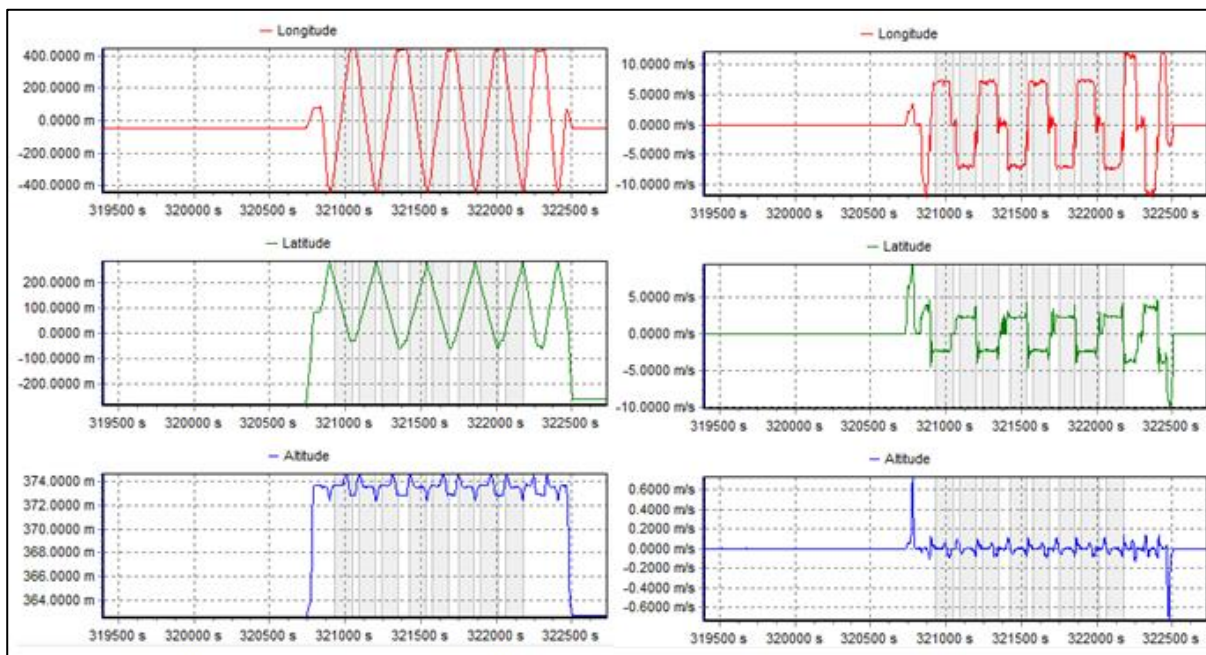
### 4.1 Obdelava podatkov

Obdelava podatkov MLS sistema zahteva določene izkušnje in znanja s področja tehnologij GNSS, INS in laserskega skeniranja, prav tako pa tudi izkušnje z uporabo MLS programske opreme. V dobrem mesecu in pol obdelav na identičnem setu podatkov lahko trdim, da sem pridobil nekaj izkušenj ter ključnih informacij, ki so mi pomagale tvoriti končno izvedbo in kritično oceno obdelave v programskem modulu RiPROCESS. Zagotovo bi lažje sklepal o določenih zakonitostih, če bi imel na razpolago različne sete podatkov, s prav tako različnimi značilnostmi.

V diplomskem delu je že bila predstavljena tehnologija MLS, njeni senzorji, posledice nekalibriranega MLS sistema, testno območje, načini obdelav v programski opremi, itd. V dotičnem poglavju podajam izbrani postopek izravnave s pripadajočimi rezultati, odstopanji, posebnostmi, omejitvami ter tudi uporabo tovrstnega MLS sistema.

#### 4.1.1 Pregled podatkov uvožene trajektorije

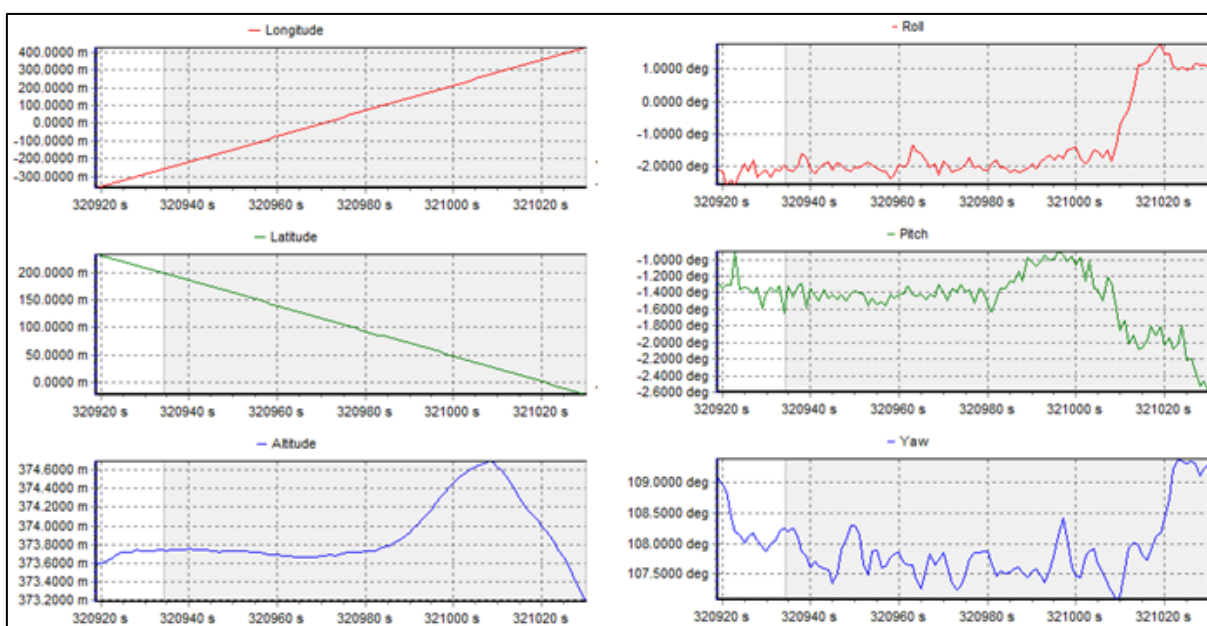
Trajektorija je bila predhodno obdelana v programski opremi, ki ni v lasti RIEGL-a, vendar program RiPROCESS omogoča določene analize že obdelane trajektorije. Te analize so predvsem razni diagrami, ki ponazarjajo statistično relevantne informacije v zvezi z lastnostmi celotne trajektorije, kot tudi njenih posameznih segmentov.



Slika 57: Koordinatna analiza celotne trajektorije v programu RiPROCESS.

Slika 57 na svoji levi strani prikazuje 3 grafe, ki ponazarjajo potek celotne trajektorije po koordinatah. Rdeča barva se nanaša na geografsko dolžino, zelena na geografsko širino in modra na višinski profil. Desna stran prikazuje prvi odvod teh količin, kar predstavlja hitrost premikanja med zajemom podatkov po posameznih koordinatah. Opaziti je mogoče »cik-cak« vzorec, kar je povsem logičen rezultat identičnih poti v eno in drugo smer. Vse skupaj je pri grafu geografske dolžine in širine možno opaziti 6 lokalnih ekstremov, kar pomeni 12 različnih segmentov vožnje po principu tja in nazaj. Skozi celotno diplomsko delo navajam, da je bilo teh voženj 8, zakaj torej tu številka 12? Odgovor podaja desni del slike, ki prikazuje hitrosti po posameznih segmentih. Razvidno je, da je bil prvi ter da so bili zadnji trije segmenti odpeljani z višjo hitrostjo. Preventivno je bilo v cilju testiranja izvedenih več snemanj z različnimi hitrostmi, za samo kalibracijo pa sem uporabil zgolj tiste pri najnižji hitrosti 30 km/h, ki zaradi večje gostote točk omogočajo lažjo analizo.

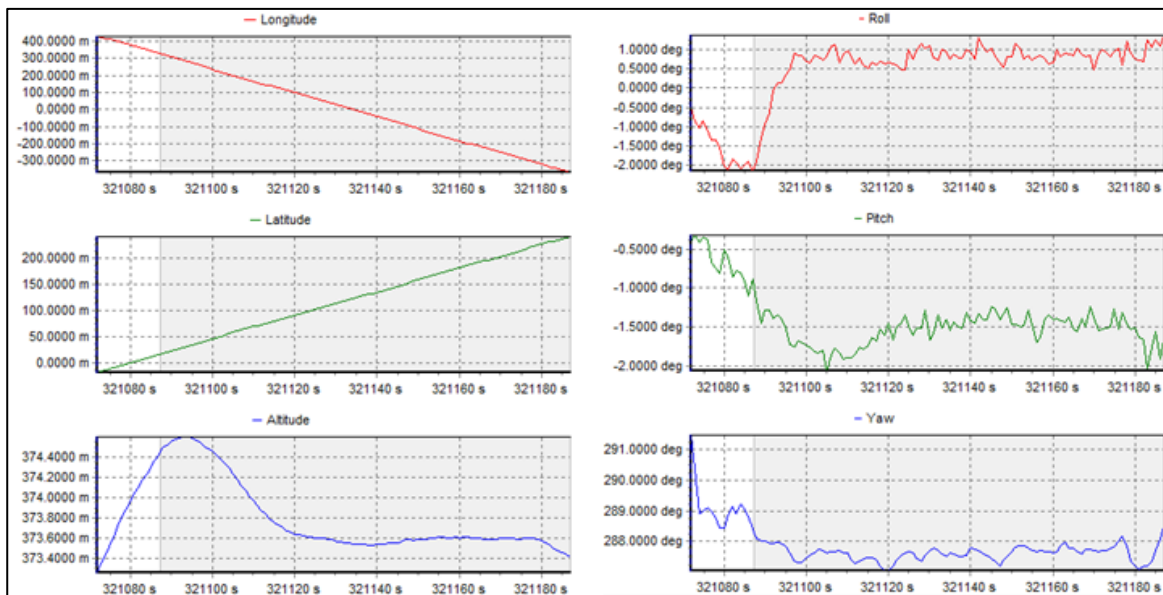
Celotno trajektorijo pa je možno razdeliti in analizirati tudi na posamezen segment, torej na segment »tja« ter segment »nazaj«.



Slika 58: Analiza delne trajektorije v vožnji »naprej«.

Tovrstni delni prikaz trajektorije jasneje podaja koordinato dogajanje na snemalni trasi. Na levi strani slike 58 grafi enako kot na sliki 57 prikazujejo geografsko dolžino (rdeča), geografsko širino (zelena) ter višinski profil omenjene trase v smeri naprej. Desna stran slike pa prikazuje z IMU napravo izmerjene vrednosti *nagiba*, *naklona* in *zasuka* (angl. roll, pitch, yaw) v kotnih enotah.

Za boljše predstavo je smiselno analizirati tudi delno trajektorijo v obratni smeri vožnje.

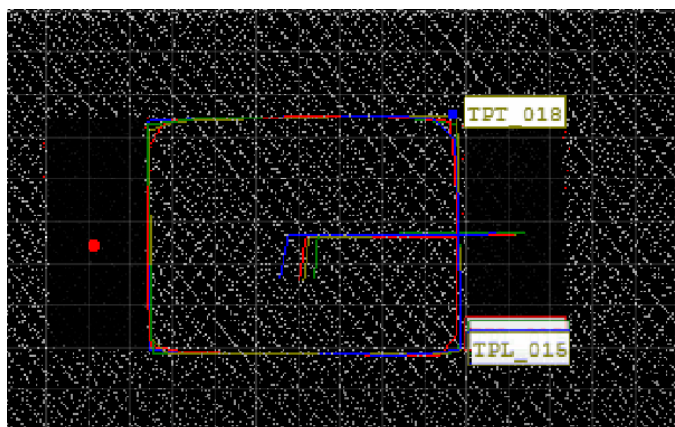


Slika 59: Analiza delne trajektorije za vožnjo »nazaj«.

Kot je bilo pričakovati nam grafi pri vožnji v nasprotno smer, kot prikazuje slika 59, podajajo ravno obratno strukturo grafov spreminjanja koordinat, kakor tudi izmerjene kotne rotacije, ki pa nekoliko variirajo zaradi različnih pogojev na obeh straneh cestišč.

#### 4.1.2 Identične ravnine in oslonilne točke

Po nastavitvi ustreznih parametrov programa in pregledu uvoženih podatkov trajektorije sledi kalibracija sistema, še pred postopkom kalibracije pa sem na celotnem interesnem območju poskušal najti čim več identičnih ravnin v različnih pasovih laserskega oblaka točk. V dobrih petih urah je s skrbnim delom možno določiti tudi do 600 takih veznih ravnin, ki služijo kot vhodni podatek za prvo iteracijo izravnave. Narava dela v programskem okolju dopušča napake, ki so kasneje transparentne v okviru odstopanj v izravnavi, posledično jih lahko naknadno odstranimo.

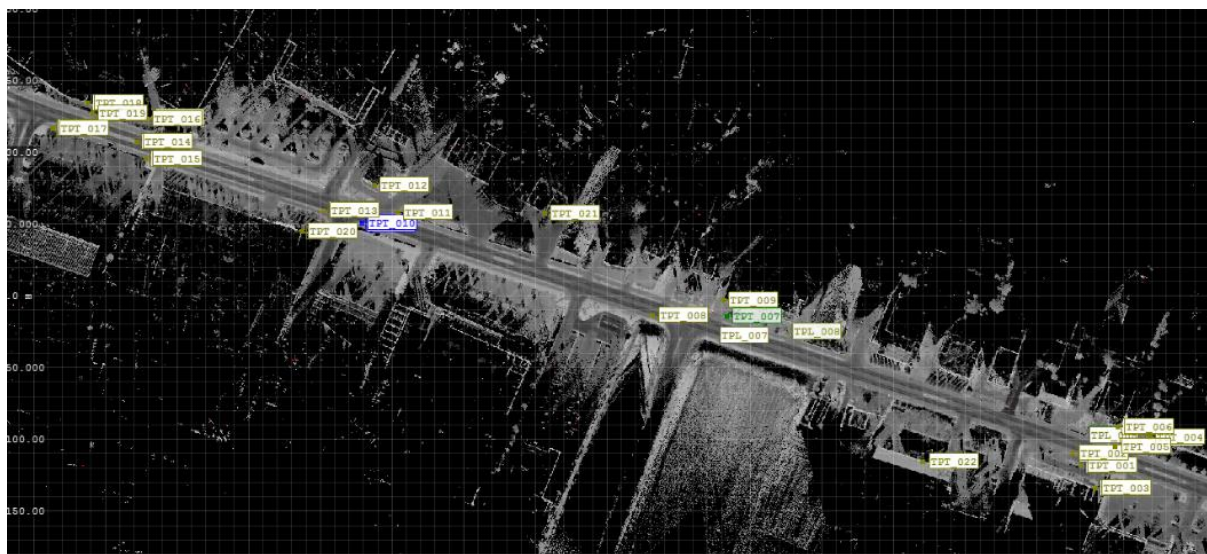


Slika 60: identične točke in ravnine na fasadi objekta med dvema oknom.



Slika 60 prikazuje 4 identične ravnine, predstavljene vsaka s svojo barvo ter z normalnim vektorjem na ravnino. Ročno ali samodejno določene ravnine služijo kot vhodni podatek izravnave, ki glede na metodo skuša zmanjšati ortogonalne razdalje med posameznimi ravninami, ki predstavljajo enak detajl, a se ne prekrivajo v celoti.

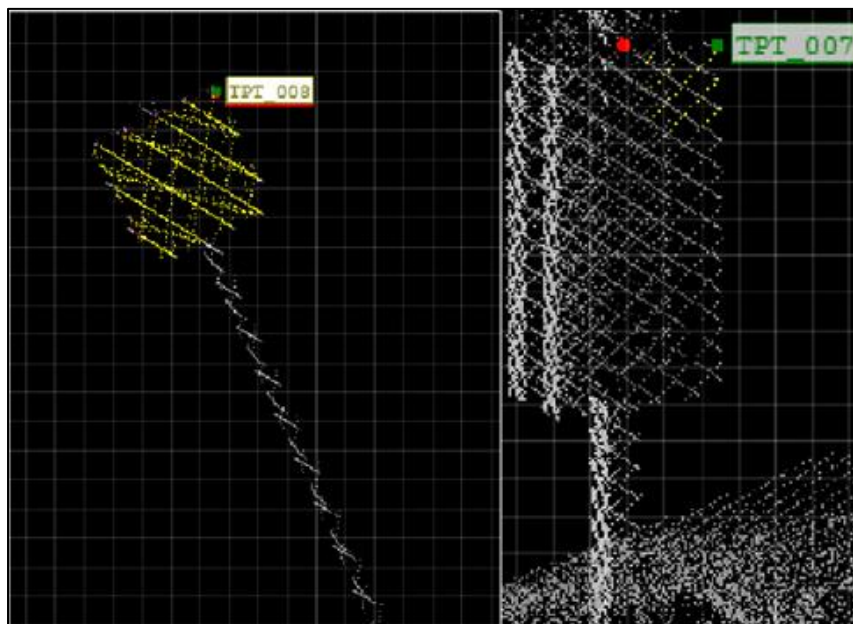
Na voljo sem imel tudi referenčni set podatkov, ki je služil kot vir za zajem oslonilnih točk, ki sem jih sem kasneje povezal na ročno določene vezne točke v testnem oblaku točk. Konfiguracija in prostorska razporeditev oslonilnih točk je razvidna s slike 61.



**Slika 61:** Prostorska razporeditev oslonilnih točk po celotnem testnem območju.

Vse skupaj se na testnem območju nahaja 21 oslonilnih točk, ki so locirane na obeh skrajnih legah ter v sredinskem predelu. Zagotoviti sem hotel enakomerno kontrolo kakovosti in natančnosti, zato sem določil večje število oslonilnih točk kot je nujno potrebno. »Post – festum« določitev oslonilnih točk ima tudi določene slabosti. Jasno definiran detajl je možno razbrati zgolj v bližini trajektorije, z oddaljevanjem od nje pa tako natančnost kot tudi gostota točk padata, posledično se večina oslonilnih točk nahaja v pasu, ki sega 25 m na vsako stran vozne trajektorije. Ima pa tovrstni način poleg številnih slabosti tudi določeno prednost. Ob terenski signalizaciji oslonilnih točk pogosto signaliziramo zgolj višinski profil v dosegu operaterja. Ob prisotnosti referenčnega oblaka točk pa lahko primerjamo koordinate jasno definiranih točk tudi na strehah objektov, saj tako lažje in bolje ocenimo absolutno natančnost oblaka točk skozi njegov celoten višinski profil.

Slika 58 prikazuje detajlno določitev oslonilnih točk na obcestnih objektih pravilnih oblik (predvsem reklamni panoji ter prometni znaki), kjer je možno razbrati jasno definirane robove.



**Slika 62:** Jasno definirane oslonilne točke na robovih obcestnih objektov (prometni znaki).

#### 4.1.3 Izravnava

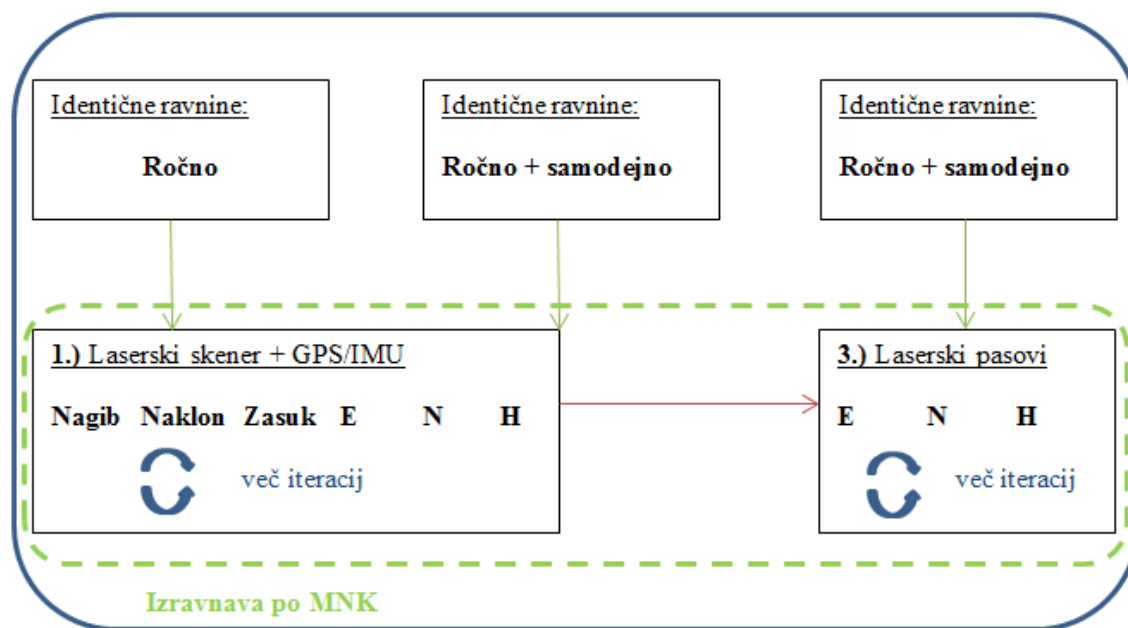
Po ročni določitvi identičnih ravnin, ekstrakciji in uvozu oslonilnih točk ter nastavitvi ustreznih parametrov sledi postopek izravnave v absolutnem smislu, kjer v prvem koraku kalibriramo sistem ter na ta način določimo neznane elemente BA. Shematsko lahko postopek izravnave ponazorimo z že predstavljeno možnostjo absolutne izravnave, in sicer derivat možnosti B.

Shematski potek izravnave:

- prva izravnava: [(*nagib, naklon, zasuk*) LS + (E, N, H) GPS/IMU] – 2 iteraciji
- druga izravnava: translacija GPS/INS senzorja v prostoru (E, N, H)

Zanimivo je izpostaviti dejstvo, da v postopkih izravnave nisem obravnaval vrednosti »lever-arm« med LS in IMU. Vrednosti so bile predhodno precej natančno in nadštevilno izmerjene. Med testnimi postopki izravnave sem kot proste parametre določil tudi te translacijske vrednosti med ks. LS in IMU. Izkazalo se je, da je velikostni rang popravkov tu zanemarljivo majhen. Posledično torej ni smiselno, da v izravnavo vključujem dodatne parametre, ki imajo že dovolj dobre približne oz. že kar točne vrednosti. Popravki se na ta način porazdelijo na manjše število prostih parametrov, s tem se zveča verjetnost točne določitve elementov BA (*nagib, naklon, zasuk*).





**Slika 63:** Shematski postopek absolutne izravnave celotnih oblakov točk.

V prvi in drugi iteraciji smo hkrati izravnavali 6 parametrov. Trije neznani kotni zasuki (*nagib*, *naklon*, *zasuk*) in tri koordinatne translacije GPS/IMU enote (E, N, H), s čimer se oblak točk tudi absolutno georeferencira glede na oslonilne točke. Tretja iteracija je zajemala majhne relativne koordinatne premike (E, N, H) med vsemi osmimi oblaki točk, s čimer se še dodatno izboljša njihovo prekrivanje. Na ta način se je skupno izravnavalo 30 različnih parametrov, v prvi in drugi izravnavi 6, v tretji pa  $8 \times 3 = 24$  različnih prostih parametrov. Skozi vse tri iteracije je bila uporabljena metoda najmanjših kvadratov. V naslednjem poglavju so predstavljeni rezultati izravnave.

## 4.2 Rezultati

Rezultati so predstavljeni v obliki preglednic in slik ter po posameznih iteracijah.

### ➤ Iteracija 1:

**Preglednica 6:** Izbira metode izravnave in ostalih parametrov.

| Parametri izravnave      |         |
|--------------------------|---------|
| Čas izračuna             | 34 s    |
| Metoda izravnave         | MNK     |
| Toleranca                | 0,00001 |
| Določitev ravnin         | Ročno   |
| Iskalni radij [m]        | /       |
| Kotno odstopanje [°]     | /       |
| Max. dolžina normale [m] | /       |

**Preglednica 7:** Izravnani prosti parametri in njihove statistične natančnosti.

| #               | Laserski skener [°] |                |             | GPS/INS [m] |          |          |
|-----------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|----------|----------|
|                 | Nagib (Roll)        | Naklon (Pitch) | Zasuk (Yaw) | E           | N        | H        |
| <b>Vrednost</b> | 0,43114             | 0,27455        | 0,45173     | 0,17        | 0,231    | 0,357    |
| <b>Sigma</b>    | 0,002680            | 0,002678       | 0,002740    | 0,007831    | 0,007867 | 0,007881 |

**Preglednica 8:** Skupni/generalni rezultat izračuna.

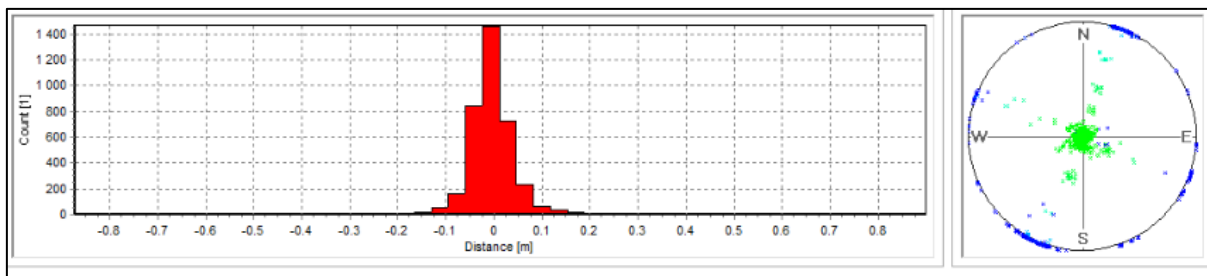
| Rezultati izračuna     |               |
|------------------------|---------------|
| Št. prostih parametrov | 6             |
| Št. opazovanj          | 3754          |
| Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0606</b> |

**Preglednica 9:** Standardna deviacija po posameznih pasovih oblakov točk.

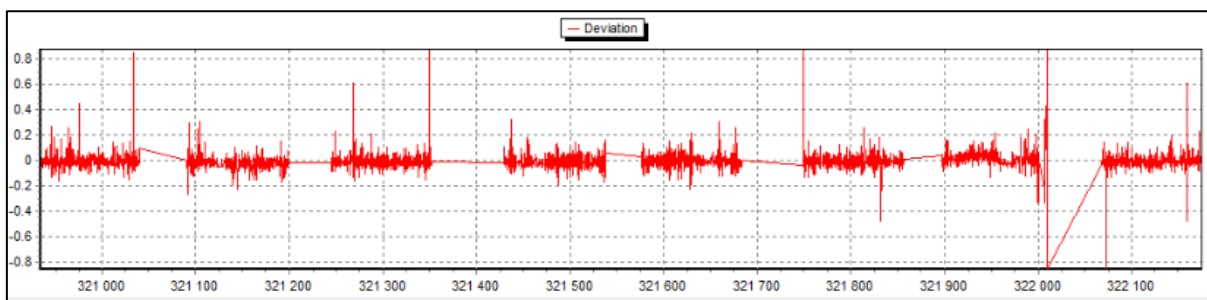
| Laserski pasovi    |               |
|--------------------|---------------|
| #                  | Std. dev. [m] |
| <b>225° nazaj</b>  | <b>0,107</b>  |
| <b>225° naprej</b> | 0,059         |
| <b>45° nazaj</b>   | 0,055         |
| <b>315° naprej</b> | 0,055         |
| <b>315° nazaj</b>  | 0,053         |
| <b>135° nazaj</b>  | 0,052         |
| <b>45° naprej</b>  | 0,049         |
| <b>135° naprej</b> | 0,047         |

V prvi iteraciji gre pravzaprav za kalibracijo sistema, kjer določamo neznane elemente BA (*nagib, naklon, zasuk*) ter oblak točk absolutno »vežemo« na oslonilne točke. Iz preglednice 6 je razvidno, da je bila izbrana metoda najmanjših kvadratov, toleranca med predhodnim in naslednjim korakom znaša 0,00001, ravnine so bile določene ročno, izračun pa se je izvajal 34 sekund. Preglednica 7 nato podaja bolj detajlen pregled izravnanih parametrov z njihovimi pripadajočimi natančnostmi. Preglednica 8 podaja skupen rezultat izračuna oz. skupno natančnost oblaka točk v relativnem in absolutnem smislu, ki po prvi iteraciji znaša dobrih 6 cm. Preglednica 9 implicira natančnost po posameznem laserskem pasu.

Razvidno je, da je natančnost pasu, kjer je bil LS konfiguriran pod kotom 225° med vožnjo nazaj, občutno slabše natančnosti (za rang 2) glede na ostale. Po pregledu dotičnega oblaka točk je bilo ugotovljeno, da so bile povsem na začetku trase prisotne napake v sprejemu GPS signala, zato je bilo začetnih 10 m v nadaljnjih iteracijah odstranjenih iz postopka kalibracije.



**Slika 64:** Histogram popravkov in prikaz orientacije normalnih vektorjev identičnih ravnin.



**Slika 65:** Deviacije glede na časovni potek zajema podatkov.

Ob koncu izravnave se nam grafično izriše tudi histogram popravkov in orientacijski diagram. Histogram popravkov pridobi znano obliko normalne porazdelitve, kjer se največji delež popravkov nahaja v bližini ničle, oz. so ti popravki majhni, rezultat je torej pričakovan. Na desni strani pa pridobimo tudi informacijo o orientaciji vseh ravnin, ki smo jih uporabili v izravnavi. Najbolje je, da so normalni vektorji ravnin orientirani v čim večje število smeri, saj s tem dobimo reprezentativen vzorec. Nočemo le tega, da so ravnine orientirane samo v eno smer, npr. da identične ravnine izberemo zgolj na navpičnih stenah, ki so vzporedne glede na smer gibanja. Orientacijske točke na grafu tvorijo nekakšen križ, kar je glede na konfiguracijo trase in vožnjo v obe smeri prav tako pričakovan rezultat.

Slika 65 prikazuje razporeditev in velikost popravkov glede na sekundno časovno skalo trajektorije. Opazi se 8 zgoščenih področji, ki predstavljajo časovni okvir, v katerih se je zajemal vsak izmed osmih pasov oblaka točk. Skoraj vsak vsebuje določena večja odstopanja, ki so lahko sistematične ali slučajne narave. Grobe napake so v tej fazi večinoma že odstranjene. Predvsem so opazna večja odstopanja pri predzadnjem, sedmem oblaku točk v časovni kronologiji. Prav ta pas pa predstavlja konfiguracijo LS 225°\_nazaj, ki je za faktor 2 slabše natančnosti kot ostali.

➤ Iteracija 2:

Izravnavamo identične parametre kot v prvem koraku z razliko, da so tu identične ravnine določene tudi avtomatsko. Posledično je število opazovanj mnogo večje, poveča se statistična natančnost obravnavanih količin.

**Preglednica 10:** Parametri druge iteracije izravnave.

| Parametri izravnave  |                |
|----------------------|----------------|
| Čas izračuna         | 26 s           |
| Metoda izravnave     | MNK            |
| Toleranca            | 0,00001        |
| Določitev ravnin     | Ročno + Avtom. |
| Iskalni radij [m]    | 0,5            |
| Kotno odstopanje [°] | 1              |

**Preglednica 11:** Izravnani prosti parametri druge iteracije.

| #               | Laserski skener [°] |                |             | GPS/INS [m] |          |          |
|-----------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|----------|----------|
|                 | Nagib (Roll)        | Naklon (Pitch) | Zasuk (Yaw) | E           | N        | H        |
| <b>Vrednost</b> | 0,43312             | 0,2716         | 0,46824     | 0,164       | 0,235    | 0,36     |
| <b>Sigma</b>    | 0,001569            | 0,001516       | 0,001405    | 0,004822    | 0,005504 | 0,005666 |

**Preglednica 12:** Rezultati izravnave skupno in po posameznih laserskih pasovih.

| Rezultati izračuna     |               | Laserski pasovi |               |
|------------------------|---------------|-----------------|---------------|
| Št. prostih parametrov | 6             | #               | Std. dev. [m] |
| Št. opazovanj          | 5400          | 225° nazaj      | 0,052         |
| Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0395</b> | 315° nazaj      | 0,045         |
|                        |               | 45° naprej      | 0,044         |
|                        |               | 135° naprej     | 0,04          |
|                        |               | 45° nazaj       | 0,036         |
|                        |               | 225° naprej     | 0,033         |
|                        |               | 315° naprej     | 0,033         |
|                        |               | 135° nazaj      | 0,032         |

Za lažjo oceno razlik in napredka v primerjavi s prvo iteracijo podajam tudi tabelo razlik med obema iteracijama.

**Preglednica 13:** Razlike vrednosti prostih parametrov med prvo in drugo iteracijo.

| #               | $\Delta$ Laserski skener [°] |                |              | $\Delta$ GPS/INS [m] |            |            |
|-----------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------|------------|------------|
|                 | $\Delta$ Roll                | $\Delta$ Pitch | $\Delta$ Yaw | $\Delta$ E           | $\Delta$ N | $\Delta$ H |
| <b>Vrednost</b> | -0,00198                     | 0,00295        | -0,01651     | 0,006                | -0,004     | -0,003     |
| <b>Sigma</b>    | 0,001111                     | 0,001162       | 0,001335     | 0,003009             | 0,002363   | 0,002215   |

Preglednica 13 nakazuje, da so se iskane kotne vrednosti BA med prvo in drugo iteracijo v povprečju spremenile za slabih 8". Položajno se je zgodil premik v rangi pol centimetra, rang natančnosti posameznih izravnanih parametrov pa se je v povprečju izboljšal za faktor 1,6.

Prav tako se je za faktor 1,5 izboljšal tudi skupen rezultat izravnave, ki sedaj znaša 3,95 cm.

Tretji in zadnji korak pa predstavlja še izravnavo v smislu majhnih koordinatnih premikov (E, N, H) osmih oblakov točk v odvisnosti od oslonilnih točk, s čimer dosežemo najbolj optimalno prileganje. Določenih odstopanj ne moremo odpraviti zgolj s kalibracijo elementov BA, zato so potrebni ti dodatni premiki. Eden od možnih vzrokov je denimo različna kakovost izračunane trajektorije med vožnjo v isto smer, v različnih časovnih trenutkih, ob različnih konfiguracijah LS.

➤ Iteracija 3:

**Preglednica 14:** Parametri tretje iteracije izravnave.

| <b>Parametri izravnave</b> |                |
|----------------------------|----------------|
| Čas izračuna               | 1 min 23s      |
| Metoda izravnave           | MNK            |
| Toleranca                  | 0,00001        |
| Določitev ravnin           | Ročno + Avtom. |
| Iskalni radij [m]          | 0,2            |
| Kotno odstopanje [°]       | 1              |
| Max. dolžina normale [m]   | 0,1            |

**Preglednica 15:** Premiki laserskih pasov med seboj, v odvisnosti od oslonilnih točk.

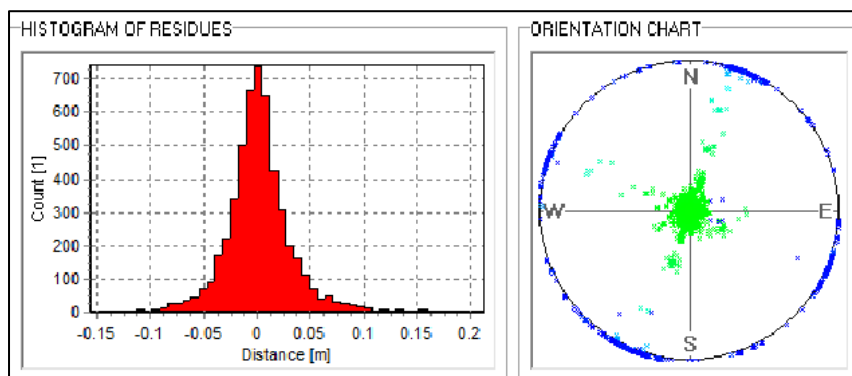
| Laserski pasovi |        |        |        |            |            |            |
|-----------------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| #               | E [m]  | N [m]  | H [m]  | $\sigma E$ | $\sigma N$ | $\sigma H$ |
| 45° nazaj       | 0      | 0,003  | 0,006  | 0,0622     | 0,07535    | 0,05583    |
| 45° naprej      | -0,003 | 0,011  | -0,007 | 0,06342    | 0,06606    | 0,05058    |
| 135° nazaj      | -0,005 | 0,013  | 0,013  | 0,06493    | 0,07596    | 0,04731    |
| 135° naprej     | -0,003 | -0,001 | 0,028  | 0,08472    | 0,07969    | 0,06341    |
| 315° nazaj      | -0,005 | 0,004  | 0,033  | 0,07997    | 0,04081    | 0,04543    |
| 315° naprej     | -0,009 | -0,001 | 0,016  | 0,08166    | 0,08093    | 0,04624    |
| 225° nazaj      | -0,017 | 0,012  | 0,006  | 0,06163    | 0,04561    | 0,04491    |
| 225° naprej     | 0      | 0,005  | 0,024  | 0,06322    | 0,07537    | 0,05151    |

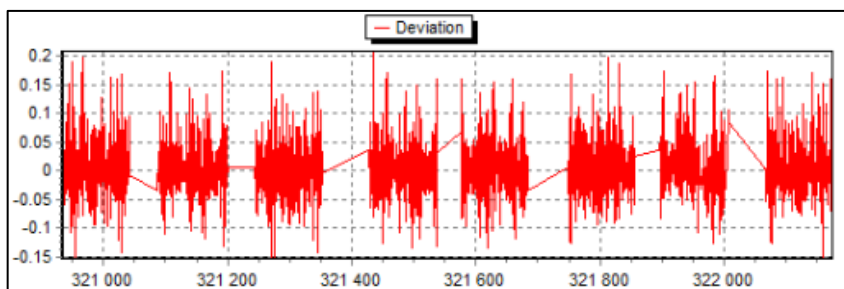
**Preglednica 16:** Rezultati tretje in zadnje iteracije izravnave/kalibracije.

| Rezultati izračuna     |               |
|------------------------|---------------|
| Št. prostih parametrov | 24            |
| Št. opazovanj          | 5278          |
| Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0327</b> |

| Laserski pasovi |               |
|-----------------|---------------|
| #               | Std. dev. [m] |
| 225° nazaj      | 0,037         |
| 45° nazaj       | 0,033         |
| 315° nazaj      | 0,033         |
| 135° naprej     | 0,033         |
| 45° naprej      | 0,033         |
| 225° naprej     | 0,032         |
| 315° naprej     | 0,031         |
| 135° nazaj      | 0,029         |

Preglednica 15 ponazarja majhne premike med posameznimi oblaki točk, v odvisnosti do oslonilnih točk. Ti premiki so majhni in v večini primerov znašajo manj kot centimeter. Skupna ocenjena natančnost zdaj znaša 3,27 cm.

**Slika 66:** Histogram popravkov in prikaz orientacij normalnih vektorjev ravnin zadnje iteracije.



**Slika 67:** Prikaz velikosti in razporeditve popravkov glede na čas zajema.

Parametri izravnave, ki so za diplomsko delo ključnega pomena, so elementi BA, ki so pravzaprav ključni kalibracijski parametri. Po zaključeni izravnavi tako te vrednosti znašajo **0,43312°** za *nagib* (angl. roll) , **0,2716°** *naklon* (angl. pitch) in **0,46824°** za *zasuk* (angl. yaw)

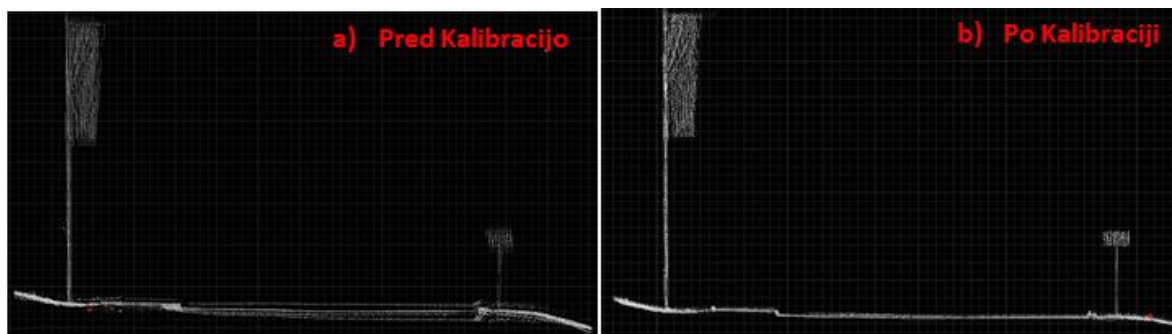
V kolikor bi sedaj meritve s tovrstnim MLS sistemom ponovili, začetne neznane vrednosti ne bi nastavili na 0, temveč bi uporabili zgoraj določena kotna odstopanja. Ti so dovolj dober približek pravi vrednosti, da bi oblaki točk med seboj bistveno bolj sovpadali. Za ponovno določitev oz. izboljšavo parametrov BA bi uporabili zgolj avtomatsko iskanje identičnih ravnin, celoten postopek kalibracije bi s tem omejili na nekaj minut. V kolikor že imamo dobre približne vrednosti kalibracijskih parametrov, lahko kalibracijo izvedemo pred vsakim projektnim snemanjem, saj nam postopek izravnave vzame zelo malo časa.

Bolj zanimivo je morda komentirati položajne premike oblakov točk glede na referenčne oslonilne točke. Ti premiki znašajo po osi E **16,4** cm, po koordinati N **23,5** cm in po višini **36** cm. Po absolutni izravnavi je položajna natančnost ocenjena na dobre 3 centimetre. Kakšen bi bil torej položajni pogrešek v kolikor oslonilnih točk ne bi uporabili. Če translacije evklidsko seštejemo dobimo vektor premika dolžine **46** cm. Potrebna je torej razlaga, čemu tako »velika« vrednost.

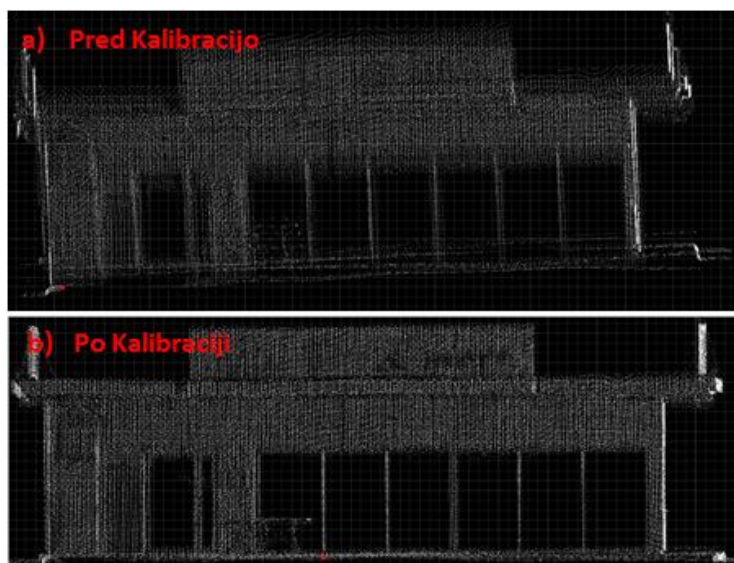
Prva ključna opazka se nanaša na grobo pogrešene koordinate bazne postaje, ki je bila uporabljena za izračun trajektorije. Problematična je predvsem višina bazne referenčne točke, ki je bila pogrešena in naknadno pavšalno zaokrožena na približno pravo vrednost. Drugi večji vzrok gre iskati v pogrešku danih količin. Referenčni oblak točk, ki mi ga je posredoval RIEGL, je bil realiziran v ETRS89 koordinatnem sistemu z bazno postajo postavljeno na eni izmed oslonilnih točk na sami trasi snemanja. Moj testni oblak točk pa je postavljen v WGS84 koordinatni sistem z bazno postajo realizirano na dvorišču za RIEGL-ovimi poslovnimi prostori. Kljub transformaciji obeh setov podatkov v isti referenčni koordinatni sistem so tu možna manjša odstopanja. Tretji vzrok gre zagotovo iskati v natančnosti določitve oslonilnih in veznih točk. Če privzamemo, da je referenčni oblak točk na svoji celotni dolžini pozicionirana v prostor s točnostjo 2 cm, je to vrednost možno pripisati vsaki naknadno določeni oslonilni točki. Glede na gostoto točk je na večji oddaljenosti zelo težko določiti koordinate določenega roba objekta, ki služi kot oslonilna točka, z natančnostjo boljšo

od 3-4 cm. Podobna situacija je v testnem oblaku točk, kjer je naknadno potrebno določiti vezne točke. Glede na dejstvo, da sistem še ni kalibriran, oblaki v kalibracijskem postopku še ne sovpadajo. Natančnost oz. točnost določitve koordinat veznih točk lahko tako ocenim na 4-8 cm, odvisno od gostote točk in oddaljenosti točke od trajektorije. Akumulacija teh vplivov kaj kmalu vrne vrednost 15 cm. Ob upoštevanju grobe napake referenčne bazne točke za izračun trajektorije v višinskem smislu (višine v tej oceni torej ne upoštevamo), pogreške danih količin in akumuliranih vrednosti, ki nastanejo kot posledica metode določevanja oslonilnih točk, lahko položajno točnost oblaka točk opišemo s krogom premera do največ 10 cm. Kot je že bilo omenjeno pa z upoštevanjem oslonilnih točk lahko dosežemo natančnost 3,95 cm.

Najbolj nazorno lahko posledico uspešne kalibracije prikažemo s slikovnim gradivom, ki podaja stanje istega detajla pred in po kalibracijskem postopku.

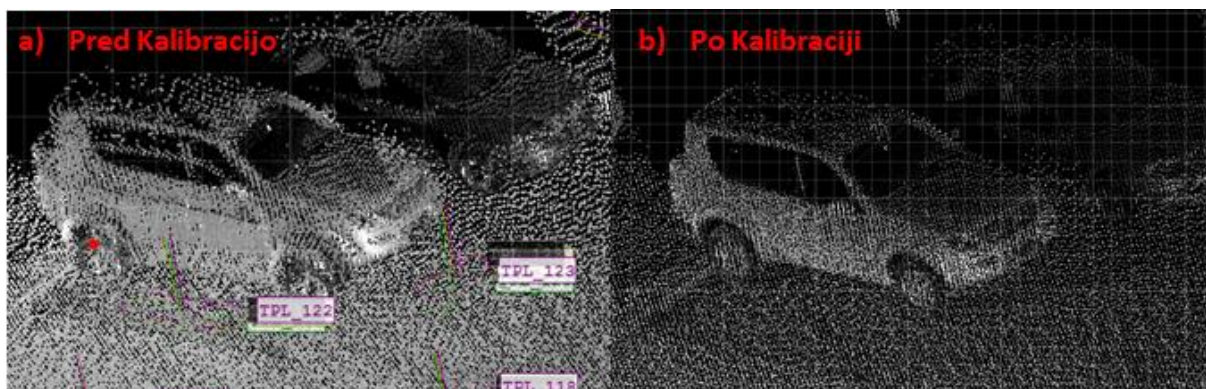


**Slika 68:** Prečni profil stranske priključne ceste pred in po kalibraciji.

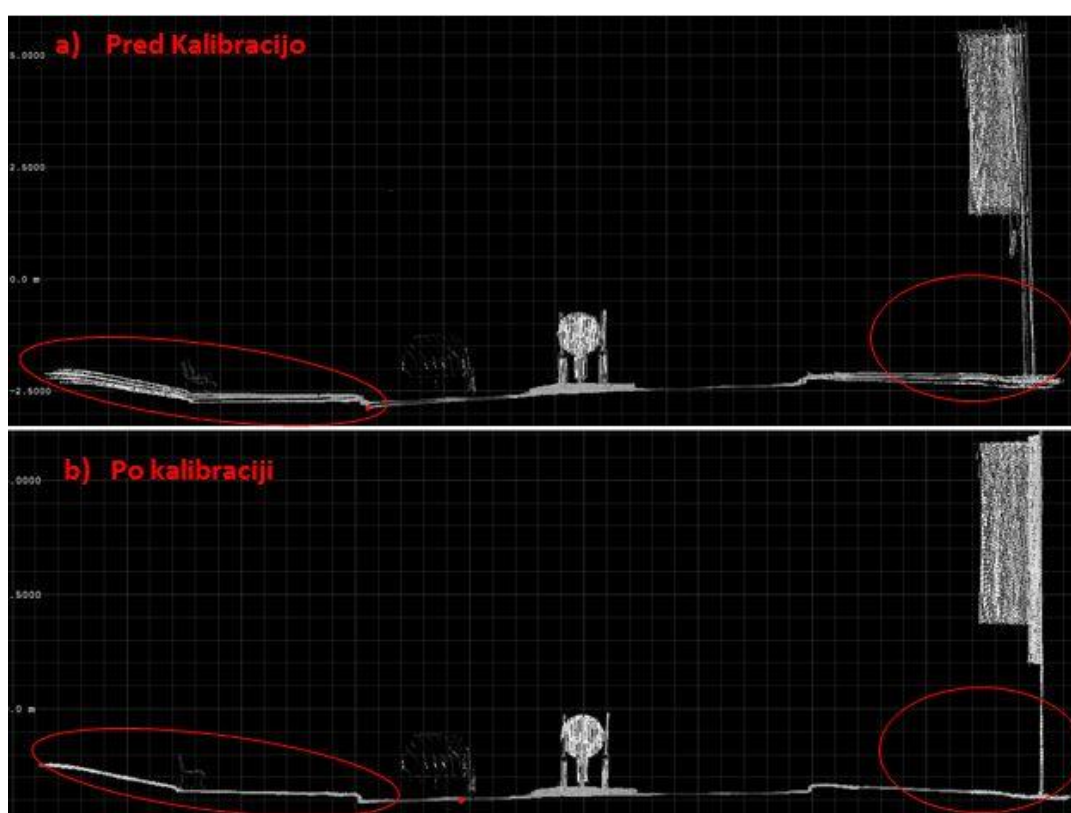


**Slika 69:** Fasada občestnega objekta pred in po kalibraciji.





Slika 70: Detajl avtomobila na parkirišču ob trasi pred in po kalibraciji.



Slika 71: Prečni profil voziščne konstrukcije s pločnikom pred in po kalibraciji.

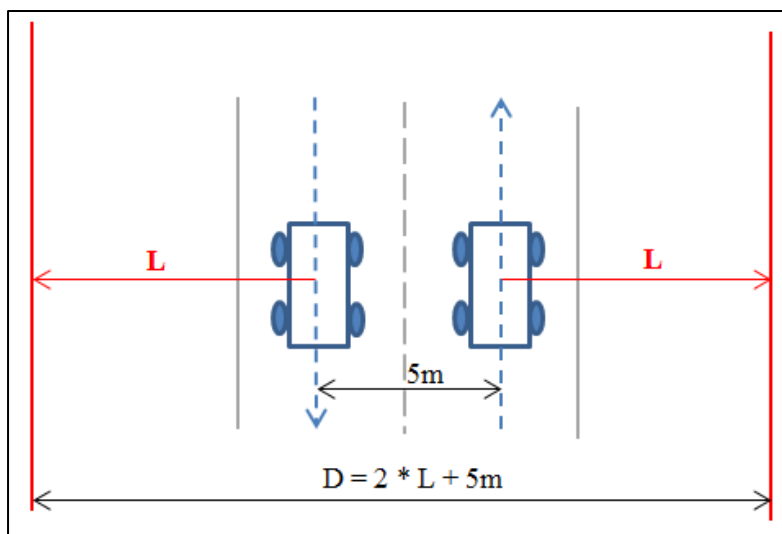
Slike 68-71 jasno implicirajo prednosti kalibriranega sistema. Med posameznimi iteracijami in različnimi postopki izravnave si pomagamo tudi z vizualnim pregledom podatkov, ki je mnogokrat boljši pokazatelj kot pa zgolj statistična natančnost, ki se jo lahko umetno izboljša. Prej ko slej pridemo do stopnje, ko je zelo težko opaziti napredek kalibracije z vizualnim pregledom oblaka točk. S kakšno dodatno iteracijo sicer še lahko nekaj izboljšamo statistično oceno natančnosti, vendar kmalu ugotovimo, da smo dosegli globalni minimum. Potrebno se je zavedati, da zgolj opazovanje statistično določene ocene natančnosti po koncu izravnave ni dovolj. Z dovolj velikim številom opazovanj na območju, ki je bližje trajektoriji (tam so odstopanja in popravki manjši) lahko statistično dosežemo izredno dobro natančnost, vendar vizualni pregled oblaka točk razkrije še vedno prisotne vplive ne-

kalibriranosti sistema. Potrebno je torej zagotoviti enakomerno porazdelitev opazovanj (identičnih ravnin) skozi celotno območje, ki ga zajema obravnavani oblak točk.

Testno območje je zelo specifično, saj je v neposredni bližini trajektorije prisotnih veliko objektov (hiše, vegetacija, ograje, avtomobili...), ki le delno prepuščajo laserske žarke. Posledično so območja, ki ležijo za temi objekti, realizirana z veliko manjšim številom točk, slabše natančnosti in z večkratnim odbojem. Celoten oblak točk je na nekaterih območjih širok tudi do 140 m, vendar se 90 % identičnih ravnin, uporabljenih pri izravnavi, nahaja v pasu širokem 60 m, torej 30 m na vsako stran vozne trajektorije. Iz tega sledi ugotovitev, ki jo je možno podpreti tudi z vizualnim pregledom oblaka točk, da zgoraj ocenjena natančnost kalibracije/izravnave 3,95 cm ni realna vrednost za celoten set podatkov. Prava ocena natančnosti za celotno širino oblaka točk bi po vsej verjetnosti bila za faktor 2 ali 3 večja. Ta ugotovitev in dejstvo, da bi se tovrstni MLS sistem v praksi uporabljal zgolj za ožje interesno območje, sta pripeljala do zaključka, da bom celoten postopek kalibracije ponovil na različnih vzorcih v odvisnosti širine oblaka točk oz. dosega laserskega skenerja.

#### 4.2.1 Vzorčenje, sistematični in slučajni vplivi

Glede na ugotovitve, predstavljene v prejšnjem poglavju, je logičen sklep, da kalibracijo sistema ponovno opravi na različnih variantah oblaka točk. Različne variante se nanašajo na različne dolžine med LS in skeniranim objektom, kar na koncu pomeni različne širine oblaka točk. Izravnava na celotnem setu podatkov je bila opravljena, odločil sem se še za tri dodatne analize. Kalibracijo sistema sem izvedel na oblaku točk, ki na vsako stran trajektorije zavzema pas širine  $L = 30$  m,  $L = 20$  m in  $L = 10$  m, torej še tri dodatne kalibracijske postopke. Celotna širina ( $D$ ) oblaka točk je glede na skico 72 približno 65 m ob  $L = 30$  m, 45 m ob  $L = 20$  m in 25 m ob  $L = 10$  m.



Slika 72: Shematski prikaz vzorčenja oblaka točk glede na njegovo širino.

V praksi se tovrstni MLS sistem največkrat uporablja za kratke oddaljenosti LS od detajla, torej za vrednosti  $10\text{ m} < L < 15\text{ m}$ . Zaradi določenih konstrukcijskih pogojev natančnost sistema z večanjem razdalje med LS in objektom pada. S tovrstnim vzorčenjem želimo ugotoviti, kakšna je še sprejemljiva natančnost, v okviru katere dotični MLS sistem lahko obravnavamo kot uporaben. Prav tako nas zanima rang natančnosti, ki ga dosežemo na različnih oddaljenostih. Podobno kot pri kalibracijskem postopku celotnega oblaka točk bodo tudi tu rezultati predstavljeni v tabelarni obliki. Zaradi boljše preglednosti tu ne bom podajal vmesnih rezultatov posamezne iteracije, temveč zgolj končni rezultat. Izbrani način izravnave je pri vseh treh izvedenkah izjemno podoben tistemu pri kalibraciji celotnega oblaka točk, zato v nadaljevanju ne navajam shematskih diagramov poteka.

a) Oddaljenost 30 m na vsako stran trajektorije

Postopek je identičen tistemu pri kalibraciji celotnega oblaka točk s to razliko, da je tu oblak predhodno zreduciran na širino 65 m, ki odgovarja 30 m pasu na vsako stran trajektorije. Število identičnih vseh točk in identičnih ravnin je manjše, ravnine so enakomerno zastopane po celotnem izrezu oblaka točk, zato gre pričakovati, da bo rezultat odražal dejansko natančnost na tovrstni oddaljenosti.

**Preglednica 17:** Parametri prve vzorčne izravnave in njen končni rezultat.

| Parametri izravnave      |               | Rezultati izračuna     |               |
|--------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| Čas izračuna             | 1 min 3 s     | Št. prostih parametrov | 6,6,24        |
| Metoda izravnave         | MNK           | Št. opazovanj          | 5426          |
| Toleranca                | 0,00001       | Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0382</b> |
| Določitev ravnin         | Ročno+ avtom. |                        |               |
| Iskalni radij [m]        | 1             |                        |               |
| Kotno odstopanje [°]     | 1             |                        |               |
| Max. dolžina normale [m] | 0,1           |                        |               |

**Preglednica 18:** Kalibrirani elementi BA in globalni premiki.

| #               | Laserski skener [°] |                |             | GPS/INS [m] |         |          |
|-----------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|---------|----------|
|                 | Nagib (Roll)        | Naklon (Pitch) | Zasuk (Yaw) | E           | N       | H        |
| <b>Vrednost</b> | 0,40556             | 0,24399        | 0,46464     | 0,161       | 0,237   | 0,371    |
| <b>Sigma</b>    | 0,031970            | 0,026715       | 0,051288    | 0,052545    | 0,52239 | 0,054345 |

**Preglednica 19:** Relativni premiki laserskih pasov med seboj in natančnosti po posameznem pasu.

| Laserski pasovi |        |        |        |
|-----------------|--------|--------|--------|
| #               | E [m]  | N [m]  | H [m]  |
| 45° nazaj       | 0,005  | 0      | -0,001 |
| 45° naprej      | 0,003  | 0,008  | -0,013 |
| 135° nazaj      | 0,001  | 0,011  | 0,002  |
| 135° naprej     | -0,001 | 0,003  | 0,018  |
| 315° nazaj      | -0,009 | 0,004  | 0,02   |
| 315° naprej     | 0      | -0,003 | 0,002  |
| 225° nazaj      | -0,009 | 0,008  | -0,01  |
| 225° naprej     | 0,008  | 0,003  | 0,006  |

| Laserski pasovi |               |
|-----------------|---------------|
| #               | Std. dev. [m] |
| 225° nazaj      | 0,043         |
| 45° naprej      | 0,038         |
| 315° nazaj      | 0,037         |
| 45° nazaj       | 0,036         |
| 135° naprej     | 0,036         |
| 225° naprej     | 0,034         |
| 315° naprej     | 0,032         |
| 135° nazaj      | 0,031         |

Vsi rezultati, vključno z celotno globalno natančnostjo izravnave, so precej podobni tistim pri obravnavi celotnega oblaka točk, kar samo še dodatno nakazuje, da statistična natančnost, dosežena ob izravnavi pri celotni širini oblaka točk, zagotovo ni v rangu natančnosti 4 cm, temveč nekoliko slabša. Dosežena globalna natančnost oblaka točk ob upoštevanju oslonilnih točk in oddaljenosti  $L = 30$  m tako znaša 3,82 cm. Globalni premiki so zaradi nekoliko spremenjenega vrstnega reda iteracij nekoliko drugačni, vendar še vedno primerljivi s predhodnimi v milimetrskem rangu. Vizualni pregled podaja kvalitetno kalibracijo sistema, možno pa je opaziti nekatere manjše slučajne in sistematične vplive na obrobju testnega območja.

b) Oddaljenost 20 m na vsako stran trajektorije

Tudi tu gre analogijo iskati s prejšnjim primerom, le da je tu območje še nekoliko ožje,  $L = 20$  m na vsako stran trajektorije.

**Preglednica 20:** Parametri druge vzorčne izravnave in njen končni rezultat

| Parametri izravnave      |                  |
|--------------------------|------------------|
| Čas izračuna             | 48s              |
| Metoda izravnave         | MNK              |
| Toleranca                | 0,00001          |
| Določitev ravnin         | Ročno+<br>avtom. |
| Iskalni radij [m]        | 1                |
| Kotno odstopanje [°]     | 1                |
| Max. dolžina normale [m] | 0,1              |

| Rezultati izračuna     |               |
|------------------------|---------------|
| Št. prostih parametrov | 6,6,24        |
| Št. opazovanj          | 4878          |
| Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0358</b> |

**Preglednica 21:** Kalibrirani elementi BA in globalni premiki drugega vzorca.

| #               | Laserski skener [°] |                |             | GPS/INS [m] |         |          |
|-----------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|---------|----------|
|                 | Nagib (Roll)        | Naklon (Pitch) | Zasuk (Yaw) | E           | N       | H        |
| <b>Vrednost</b> | 0,41127             | 0,25777        | 0,46719     | 0,164       | 0,244   | 0,374    |
| <b>Sigma</b>    | 0,026075            | 0,022223       | 0,043665    | 0,050192    | 0,04921 | 0,049747 |

**Preglednica 22:** Relativni premiki laserskih pasov med seboj v drugem vzorcu.

| Laserski pasovi |        |        |        |
|-----------------|--------|--------|--------|
| #               | E [m]  | N [m]  | H [m]  |
| 45° nazaj       | 0,002  | -0,007 | -0,003 |
| 45° naprej      | 0      | 0      | -0,016 |
| 135° nazaj      | -0,001 | 0,002  | 0      |
| 135° naprej     | -0,004 | -0,003 | 0,016  |
| 315° nazaj      | -0,012 | -0,001 | 0,018  |
| 315° naprej     | -0,002 | -0,011 | 0      |
| 225° nazaj      | -0,012 | 0,002  | -0,012 |
| 225° naprej     | 0,004  | -0,005 | 0,004  |

Pri oddaljenosti med LS in detajlom, ki znaša 20 m na vsako stran, se globalna natančnost oblaka točk ne izboljša signifikantno. Verjetno bi se s povsem enakim pristopom izravnave kot v ne vzorčnem primeru lahko globalno natančnost tudi nekoliko izboljšalo. Postopek izravnave je bil iz povsem testnih razlogov tu nekoliko drugačen. Najprej smo vzorčni set podatkov relativno izravnali med seboj, nato pa dodatno še globalno v prostoru v odvisnosti od oslonilnih točk. Skupna globalna ocena natančnosti laserskega oblaka širokega približno 45 m znaša 3,58 cm.

c) Oddaljenost 10 m na vsako stran trajektorije

Po ustaljenem vzorcu podajam rezultate kalibracije v obliki preglednic.

**Preglednica 23:** Parametri tretje vzorčne izravnave in njen končni rezultat

| Parametri izravnave      |               |
|--------------------------|---------------|
| Čas izračuna             | 48s           |
| Metoda izravnave         | MNK           |
| Toleranca                | 0,00001       |
| Določitev ravnin         | Ročno+ avtom. |
| Iskalni radij [m]        | 1             |
| Kotno odstopanje [°]     | 1             |
| Max. dolžina normale [m] | 0,1           |

| Rezultati izračuna     |               |
|------------------------|---------------|
| Št. prostih parametrov | 6,6,24        |
| Št. opazovanj          | 3549          |
| Stand. Deviacija [m]   | <b>0,0254</b> |

**Preglednica 24:** Kalibrirani elementi BA in globalni premiki tretjega vzorca.

| #        | Laserski skener [°] |                |             | GPS/INS [m] |          |          |
|----------|---------------------|----------------|-------------|-------------|----------|----------|
|          | Nagib (Roll)        | Naklon (Pitch) | Zasuk (Yaw) | E           | N        | H        |
| Vrednost | 0,39272             | 0,22966        | 0,45279     | 0,157       | 0,243    | 0,378    |
| Sigma    | 0,028536            | 0,022581       | 0,053941    | 0,041834    | 0,041569 | 0,039117 |

**Preglednica 25:** Relativni premiki laserskih pasov med seboj v tretjem vzorcu.

| Laserski pasovi |        |        |        | Laserski pasovi |               |
|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|---------------|
| #               | E [m]  | N [m]  | H [m]  | #               | Std. dev. [m] |
| 45° nazaj       | 0,006  | -0,001 | -0,003 | 225° nazaj      | 0,031         |
| 45° naprej      | 0,002  | -0,001 | -0,015 | 315° nazaj      | 0,027         |
| 135° nazaj      | 0,002  | 0,003  | -0,001 | 135° naprej     | 0,026         |
| 135° naprej     | 0,003  | -0,004 | 0,013  | 45° naprej      | 0,026         |
| 315° nazaj      | 0,002  | -0,002 | 0,016  | 45° nazaj       | 0,025         |
| 315° naprej     | -0,004 | -0,009 | -0,001 | 225° naprej     | 0,023         |
| 225° nazaj      | -0,007 | 0,007  | -0,017 | 315° naprej     | 0,022         |
| 225° naprej     | 0,004  | -0,001 | 0,001  | 135° nazaj      | 0,022         |

Ožje interesno območje občutno izboljša statistično natančnost same izravnave, saj so ravnine na krajših oddaljenostih relativno precej bližje druga drugi, popravki so posledično manjši. Za sam kalibracijski proces je v smislu določitve parametrov BA (*nagib*, *naklon*, *zasuk*) to premajhno interesno območje, saj se vplivi parametrov BA še ne razvijejo v polni meri, posledično jih tudi ne moremo v celoti odpraviti. Ko je sistem že kalibriran pa je na tovrstnih oddaljenostih možno dosegati izredno visoko natančnost, ob upoštevanju tehničnih specifikacij posameznih senzorskih sistemov, kot tudi same, ne najbolj optimalne, konfiguracije laserskega skenerja na platformo. V pasu širine 10 m na vsako stran vozne trajektorije lahko dosežemo natančnost okoli 2,5 cm, ob določenih modifikacijah vpadnega kota laserskega žarka pa celo višjo.

Po vzorčni obravnavi oblaka točk in večkratni kalibraciji je smiselna primerjava vrednosti izravnanih parametrov.

**Preglednica 26:** Primerjava parametrov pri različnih vhodnih podatkih kalibracije.

| #                | Laserski skener [°] |                 |                 | GPS/INS [m]   |                |                |
|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|
|                  | Roll                | Pitch           | Yaw             | E             | N              | H              |
| Celoten oblak    | 0,43312             | 0,2716          | 0,46824         | 0,164         | 0,235          | 0,36           |
| L = 30 m         | 0,40556             | 0,24399         | 0,46464         | 0,161         | 0,237          | 0,371          |
| L = 20 m         | 0,41127             | 0,25777         | 0,46719         | 0,164         | 0,244          | 0,374          |
| L = 10 m         | 0,39272             | 0,22966         | 0,45279         | 0,157         | 0,243          | 0,378          |
| <b>Povprečje</b> | <b>0,410668</b>     | <b>0,250755</b> | <b>0,463215</b> | <b>0,1615</b> | <b>0,23975</b> | <b>0,37075</b> |

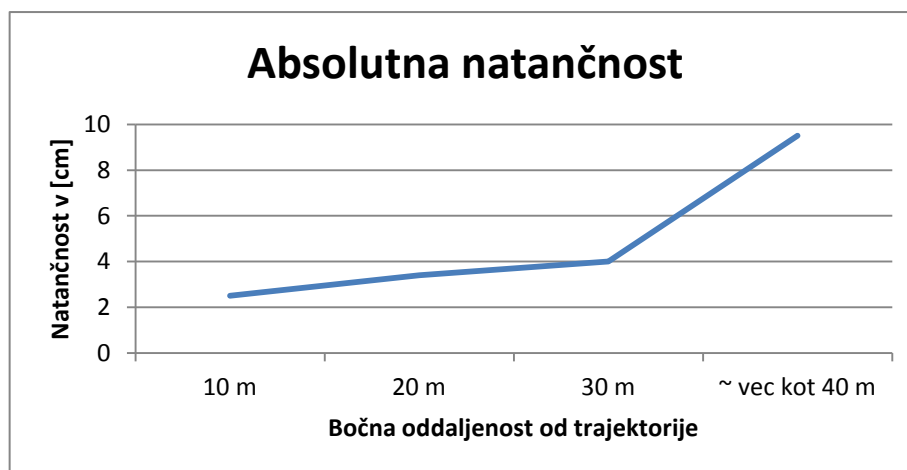


Preglednica 26 podaja zanimive ugotovitve. Krčenje vhodnega kalibracijskega območja sicer vpliva na izboljšanje statistične natančnosti samega kalibracijskega postopka, vendar se parametri med posameznimi izvedenkami precej razlikujejo, predvsem vrednosti *nagiba* in *naklona* (angl. roll in pitch). Najbolj objektivni vzorec vplivov posameznih parametrov je obravnavan le pri celotnem oblaku točk, zato so ti izravnani parametri bližje dejanski vrednosti kot tisti, ki izhajajo iz vzorčnih oblakov. Če bi celoten oblak točk procesirali s parametri, ki so bili določeni pri širini območja  $L = 10$  m, bi bil na legah, ki so oddaljene več kot 10 m, vpliv ne-kalibriranega sistema še vedno prisoten. Čemu torej vzorčenje, če celoten oblak točk podaja najustreznejše kalibracijske parametre? Z različnimi možnostmi izravnave po posameznih dolžinskih sekcijah je možno ugotoviti, kakšen je pričakovani rang natančnosti MLS sistema v odvisnosti od razdalje med LS in opazovanim detajlom. Iz tovrstne analize lahko prikažemo, kje so meje uporabnosti dotičnega mobilnega merskega sistema v geodetskih nalogah. Za naloge kartiranja in GIS okolji je natančnost MLS sistema več kot zadovoljiva, za naloge geodezije pa so potrebne skrbne meritve, oslonilne točke, optimalni pogoji ter ustrezna razdalja LS do skeniranih objektov.

Glede na ugotovitve pri obširni analizi, obravnavi in izravnavi podatkov, ocenjujem teoretično natančnost MLS sistema v odvisnosti od širine oblaka točk, kot je prikazano v preglednici 27.

**Preglednica 27:** Ocena relativne in predvsem absolutne natančnosti MLS sistema z obzirom do oslonilnih točk.

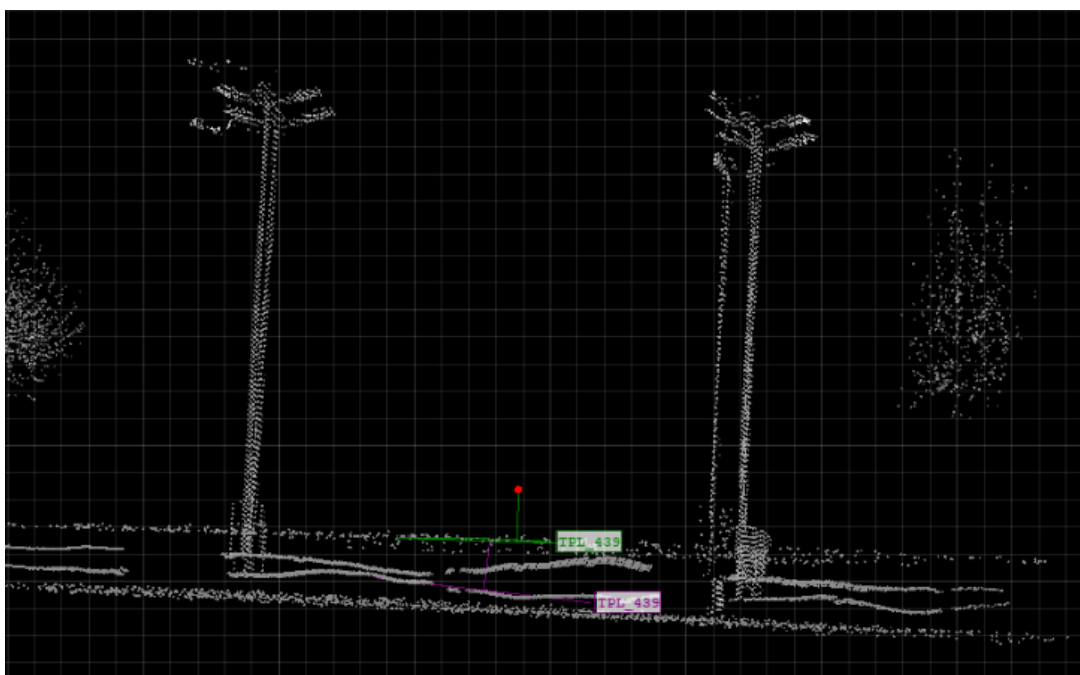
| <b>MLS Tehnologija</b>  |                               |                     |                     |
|---|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Natančnost (relativna in absolutna) glede na referenčne podatke |                               |                     |                     |
| Bočna oddaljenost od trajektorije                               | Širina pasu (2*10m + med trj) | Relativna nat. [cm] | Absolutna nat. [cm] |
| 10 m  | ~ 25 m                        | 1,9                 | <b>2,5</b>          |
| 20 m  | ~ 45 m                        | 3                   | <b>3,4</b>          |
| 30 m  | ~ 65 m                        | 3,8                 | <b>4</b>            |
| ~ vec kot 40 m  | ~ vec kot 85m                 | 5,5                 | <b>9,5</b>          |



**Slika 73:** Graf natančnosti MLS sistema v odvisnosti od širine snemalnega pasu.

Preglednica 27 ter graf na sliki 73 podajata teoretično oceno pričakovane natančnosti MLS sistema glede na širino snemalnega pasu ob prisotnih oslonilnih točkah. Tovrstna konfiguracija laserskega skenerja na platformo ima svoje omejitve glede natančnosti, kar jasno nakazuje trend krivulje na sliki 73. Ocenjujem, da je maksimalna razdalja, kjer MLS sistem še lahko zagotovi spodobno natančnost oblaka točk, 30 metrov na vsako stran snemalne trajektorije. Teoretično določene vrednosti, ki se nahajajo v preglednici 27 so pridobljene ob upoštevanju najoptimalnejših pogojev ter s čim manjšim oz. minimalnim številom sistematičnih in slučajnih vplivov.

Na posameznih odsekih oblaka točk so se pojavili določeni slučajni pogreški, ki jih v postopkih kalibracije ni bilo možno odpraviti. Slika 74 prikazuje ploščad precej oddaljenega parkirišča, pred kakršno koli kalibracijo oz. izravnavo. Na tem območju se prekrivajo po 4 laserski pasovi, ki zaradi nekalibriranega sistema ne sovpadajo oz. ne koincidirajo. Načeloma, ob odsotnosti slučajnih ali sistematičnih vplivov, bi oblaki morali biti vzporedni, s postopkom kalibracije bi nato dosegli čim boljše ujemanje. Kot prikazuje slika 74 pa 2 izmed pasov oblaka točk nista diskretne narave, temveč je njuna površina precej razgibana.

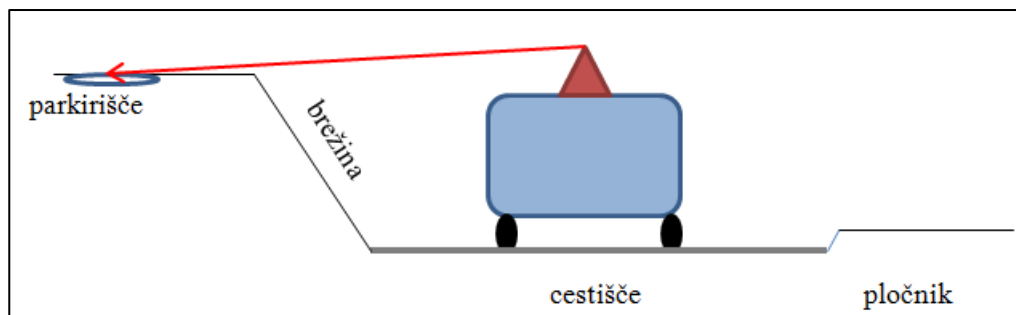


**Slika 74:** Slučajni vplivi na opazovanja, katerih vpadni kot je majhen, razdalja do LS pa velika.

Tovrstni vplivi se pojavljajo zgolj na dveh skrajnih legah trase in so pogojeni z različnimi dejavniki. Prvi je povezan z izredno majhnim vpadnim kotom laserskega žarka na hrapavo asfaltno površino, posledično je odtis laserskega žarka zelo velik, jakost odbojnega valovanja pa majhna. Obe legi sta skrajni in zato je bil na teh mestih potreben obrat avtomobila za snemanje v drugi smeri. Sledilo je obdobje pospeševanja in vibracij, ki jih IMU ni učinkovito modeliral, rotirajoče se zrcalo laserskega skenerja pa očitno ne kompenzira in ne duši tovrstnih vibracij. Prav tako je vozišče na obeh območjih,



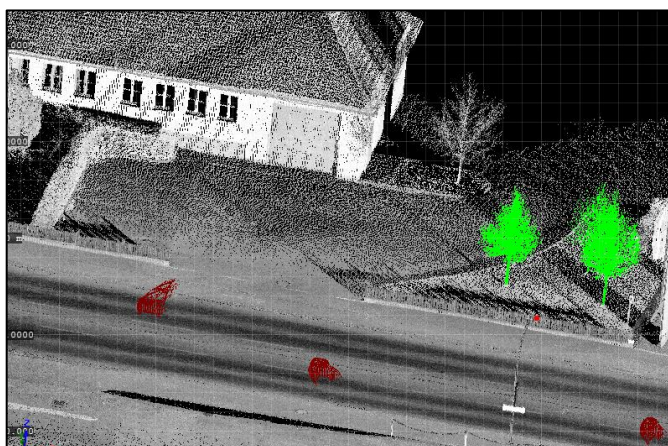
kjer je prisoten ta vpliv, rahlo poškodovano. Oba pasova, ki imata valovito obliko, izhajata iz trajektorije v obratno smer (na drugi strani cestišča), zato je razdalja do detajla še nekoliko večja, vpadni kot pa zaradi specifične konfiguracije terena res minimalen. Poleg tega pa je zaradi nizke grmičevnate vegetacije velika prisotnost šuma.



**Slika 75:** Specifika testnega poligona, kjer se izkažejo omejitve MLS sistema.

Slika 75 shematsko ponazarja nastalo situacijo. Problem vpadnega kota se izraža predvsem v primerih, kjer je zaradi določenih nasipov in brežin posamezna horizontalna ravnina (npr. parkirišče) skoraj v višini laserskega skenerja. Vpadni kot na to ravno površino je izredno majhen, določeni prisotni vplivi in vibracije pa še dodatno poslabšajo natančnost na tovrstnih območjih. Sistem kot tak ima očitno tudi določene omejitve.

Kot zanimivost lahko tu omenimo tudi prisotnost šumov v meritvah (avtomobili, pešci, vegetacija). Programski paket RiPROCESS ne predvideva odstranitve šumov pred samo kalibracijo sistema, kot v geodeziji narekuje splošna praksa, temveč šele po opravljeni izravnavi. S pomočjo algoritmov program izloči šume iz postopka izravnave, po opravljeni kalibraciji pa s preprostim postopkom klasifikacije omogoča določitev in odstranitev teh motečih elementov, predvsem v smislu vizualne preglednosti pred oddajo projekta naročniku.

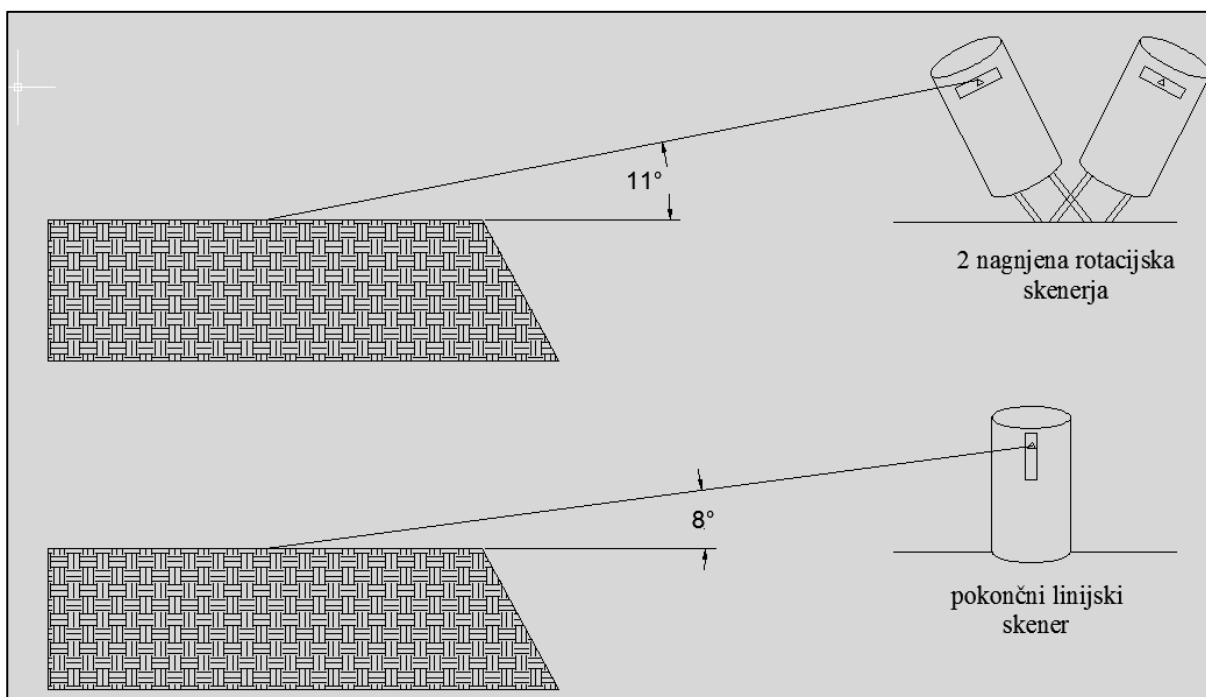


**Slika 76:** Preprosta klasifikacija za lažjo odstranitev šumov in vegetacije.

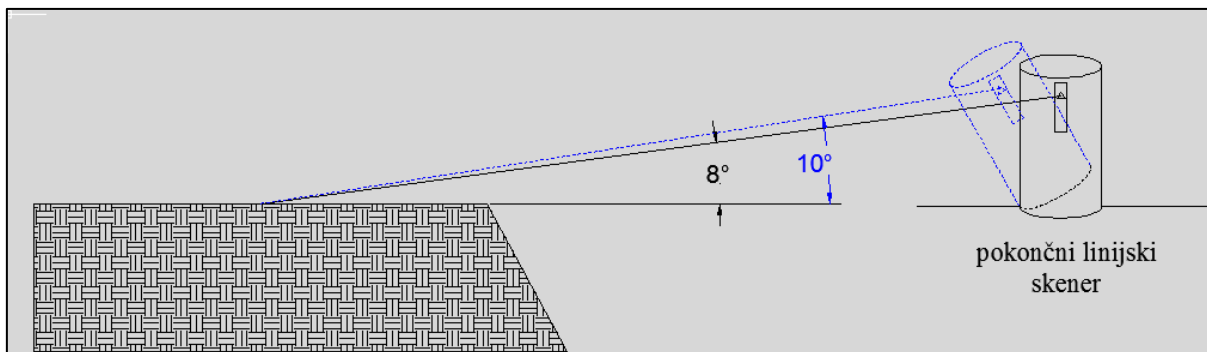
#### 4.2.2 Omejitve sistema

O omejitvah testnega MLS sistema nekaj nakazuje že predhodno poglavje 4.2.1, kjer je predstavljena maksimalna snemalna razdalja, kjer je sistem še uporaben za geodetske naloge in znaša 30 m na vsako stran vozne trajektorije. Generalno gledano je maksimalna snemalna razdalja posledica vpliva vpadnega kota. Vpadni kot je pravzaprav najpomembnejši faktor, ki vpliva na končno natančnost oblaka točk, v kolikor ne upoštevamo morebitnih napak v GNSS opazovanjih. Smiselno je torej nameniti nekaj pozornosti tudi sami mehanski konstrukciji in namestitvi laserskega skenerja na platformo. Zgolj vertikalna postavitev enega laserskega skenerja, kot je bilo v obravnavanem primeru, ni optimalna za snemanje horizontalnih površin, saj se z večanjem razdalje do objekta vpadni kot hitro zmanjšuje.

Bolj optimalna bi bila poševna konfiguracija laserskega skenerja, ki zahteva nekoliko več vloženege dela pri izvedbi konstrukcije ter predstavlja težavnejšo določitev rotacij in translacij med koordinatnimi osmi različnih senzorjev. S poševno nagnjenim laserskim skenerjem bi lahko povečali domet mobilnega laserskega sistema ter hkrati izboljšali natančnost tako na bližnjih, kot tudi na bolj oddaljenih detajlih. Večina komercialnih MLS sistemov ima vgrajenih 2 ali več nagnjenih laserskih skenerjev. S tem se poveča vpadni kot na interesno območje (le-to običajno zajema voziščno konstrukcijo z bližnjimi objekti in ne detajlov na večjih višinah), hkrati pa se zaradi dveh LS zmanjša število »prevozov« za polovico in s tem tudi število različnih pasov, kar olajša in izboljša kalibracijski postopek.



**Slika 77:** Razlika med testnim in komercialnimi sistemi v smislu konfiguracije LS.



**Slika 78:** Nagnjen LS prinaša ugodnejši (večji) vpadni kot laserskega žarka.

Sliki 77 in 78 skušata na shematski način pokazati prednosti, ki jih prinaša nagnjena konfiguracija laserskega skenerja v relaciji do vpadnega kota laserskega žarka. Testni MLS sistem ima določene omejitve, vendar je vseeno uporaben in lahko dosega zelo visoke natančnosti do približno 20 m razdalje med LS in objektom v obeh smereh vožnje, kar je običajno tudi interesno območje večine naročnikov tovrstnih MLS storitev.

Z uporabo zgolj enega laserskega skenerja je delo na terenu nekoliko bolj zamudno v primerjavi s komercialnimi sistemi, ki zahtevajo vsaj polovico manj prevozov interesnega območja. Zaradi časovnih in ekonomskih razlogov je trenutno testni MLS sistem primeren za zajem manjših območji, od nekaj 100 m v smeri vožnje, do nekaj km (2-5 km).

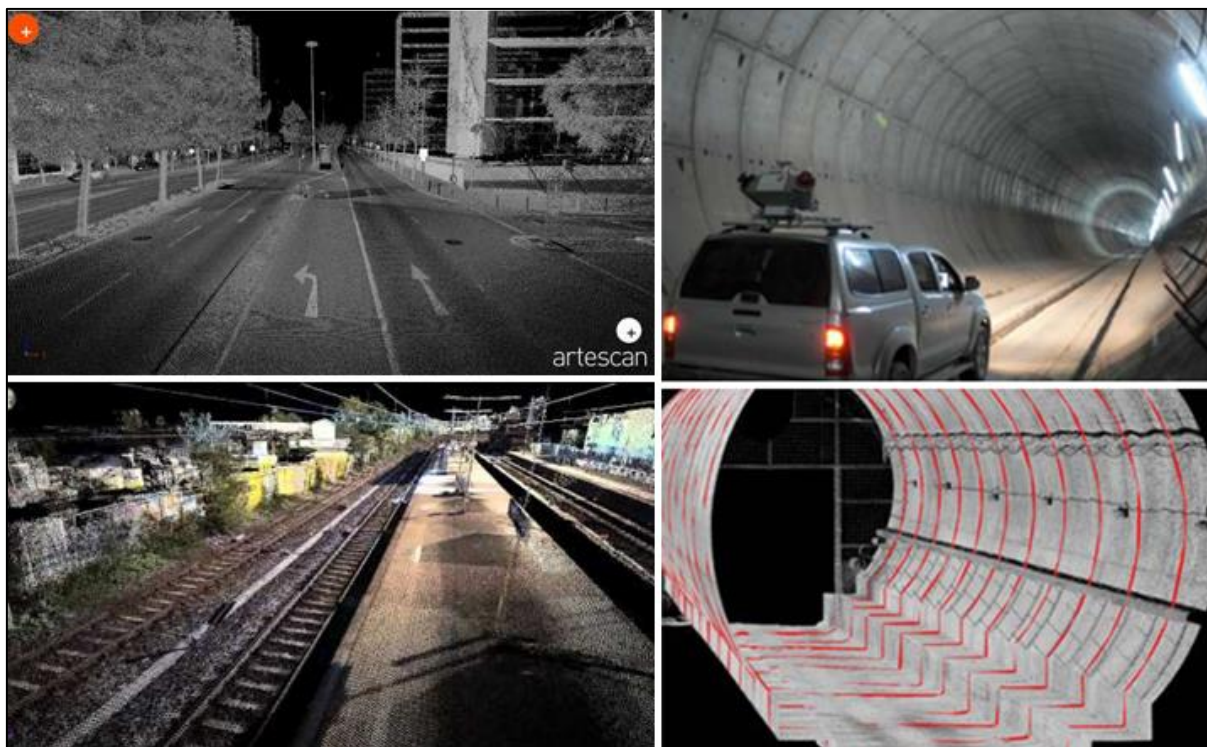
#### 4.2.3 Uporaba

Uporaba MLS sistemov zavzema širok spekter različnih aplikacij. V splošnem je največji poudarek na zajemu podatkov o cestah, železnicah ter predorih. Na ta način je možno pridobiti številne podatke:

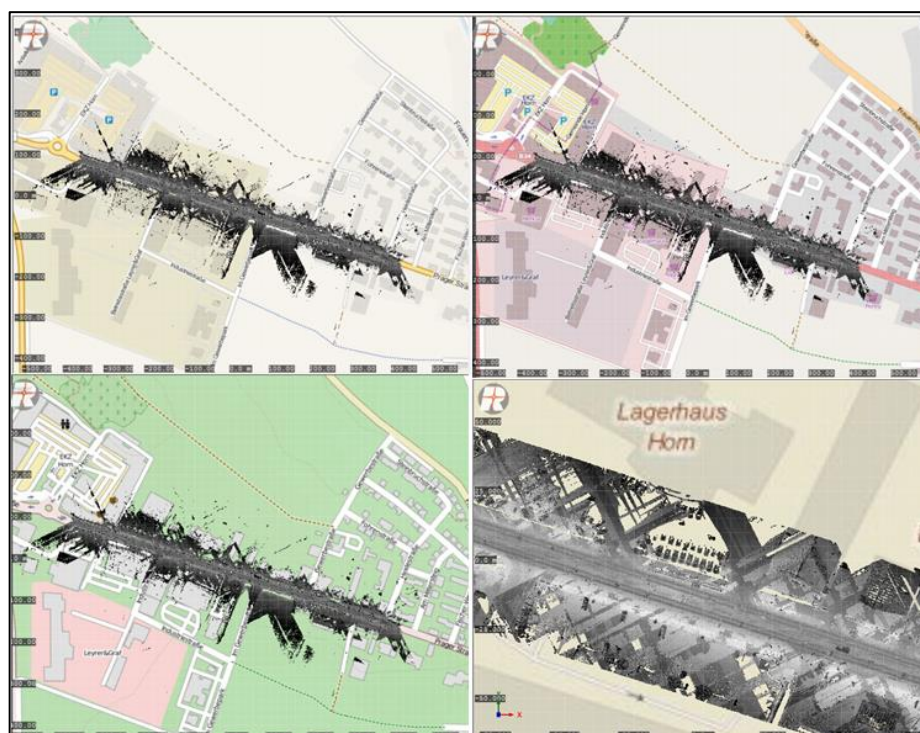
- banka cestnih podatkov,
- ocena poškodovanosti cestišča,
- gabariti nadvozov,
- zaraščanje obcestnega pasu,
- DMR cestišča,
- modeliranje nevarnih odsekov in animacija prometnih nezgod,
- prepoznavanje prometnih znakov,
- kombinacija videa in 3D modela,
- modeliranje mest (Google Street View),
- dokumentacija posledic naravnih nesreč,

- spremljanje premikov in napredka gradnje predorov,
- avtomatska ekstrakcija profilov iz 3D modela predora,
- zajem nadzemnih vodov,
- analiza tirnic in možnosti srečanja dveh vlakov ob različnih hitrostih,
- ...

Namen poglavja ni opisovati možnih načinov uporabe MLS sistemov v splošnem, temveč v določeni meri odgovoriti na poslovni in ekonomski vidik smotrnosti izvajanja teh tehnološko naprednih opazovanj. Ni presenečenje, da Slovenija in njena podjetja do danes še nimajo komercialno operativnega MLS sistema. Trg je majhen, razmere v geodetski sferi pa so tako kot drugje precej zaostrene. Kljub temu je razvoj takega sistema eden od možnih pristopov k povečanju dodane vrednosti. Nakup komercialnega sistema je po moji oceni ekonomsko upravičen, če v obdobju dveh do treh let MLS tehnologija podjetju ustvari približno pol milijona evrov prihodkov. S to vrednostjo se pokrijejo stroški nakupa strojne in programske opreme, izobraževanj ter tekočega vzdrževanja v tem času. Šele po tem obdobju pa lahko s komercialnim sistemom ustvarjamo dobiček. Slovenija je ob teh podatkih občutno premajhen trg, zato je nujno potreben predor v tujino. Na drugi strani pa je možno s precej lastnega znanja na področju strojne in programske opreme vzpostaviti lasten MLS sistem, kot je to prikazano v diplomski nalogi. V kolikor že posedujemo laserski skener ter GNSS opremo, največji strošek predstavlja IMU senzor. Najoptimalnejša je torej nadgradnja s sistema MMS v MLS. Stroški so v tem primeru predvsem povezani z razvojem. Tudi slovenski trg je že zrel za določene manjše projekte, kjer bi MLS tehnologija občutno skrajšala čas izvedbe terenskih meritev. Pojavi se seveda vprašanje, kakšna je minimalna cena, s katero bi nastopili na posameznem projektu oz. cena, ki pokrije osnovne stroške. Po pričanju tujih podjetji z izkušnjami na tem področju (Salzburg ELMF 2012) se cene določajo na kilometer snemanja ali na snemalni dan. Cene na kilometer zajetih in obdelanih podatkov se gibljejo med 1.000 € in 4.000 € oz. med 12.000 € in 23.000 € za snemalni dan.



Slika 79: Različni načini uporabe MLS sistemov ter končni izdelki. (Vir: [www.riegl.com](http://www.riegl.com))



Slika 80: Možnost kombinacije laserskih podatkov z različnimi rastrskimi podlagami (boljša informativnost).

## 5 ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO

Mobilni laserski sistemi predstavljajo inovativen način za pridobivanje velike količine trirazsežnih podatkov. Kljub svoji veliki nakupni ceni se v tujini široko uporabljajo, saj poleg racionalizacije terenskih meritev zagotavljajo tudi dovolj oprijemljive rezultate. V Sloveniji je trg in splošno gospodarsko stanje na stopnji, ki podjetju v naslednjih nekaj letih zagotovo ne bi upravičilo nakup komercialnega MLS sistema. Z lastnim razvojem lahko stroške za vzpostavitev tovrstnega sistema zmanjšamo za skoraj dve tretjini, hkrati povečujemo dodano vrednost in vlagamo v razvoj, ki naj bi bil po mnenju mnogih edini način za izhod iz gospodarskega krča.

V diplomski nalogi je predstavljen lastni razvoj mobilnega laserskega sistema v podjetju DFG Consulting d.o.o, ob pomoči in podpori RIEGL Laser Measurement Systems. Začetne cilji naloge, ki zajemajo teoretični, praktični in poslovni vidik, so doseženi. Teoretični vidik se nanaša na kalibracijo povezanih senzorskih sistemov in določitev kalibracijskih parametrov. Na podlagi predhodne teoretične analize natančnosti, naj bi s pomočjo MLS sistema, brez uporabe oslonilnih točk, bilo možno doseči položajno natančnost v obsegu 10 centimetrov. Zaradi grobih napak v referenčnih podatkih je absolutna ocena natančnosti nekoliko pod vprašanjem, vendar ocenjujem, da testirani MLS sistem, brez uporabe oslonilnih točk, lahko dosega položajno točnost oblaka točk med 10 in 20 cm, odvisno od pogojev v času zajema podatkov. Ob dodatno uporabljenih oslonilnih točkah se absolutna natančnost/točnost poveča za faktor 5. V kolikor povprečna razdalja med laserskim skenerjem in interesnim območjem ne presega 20 m, lahko testni MLS sistem dosega absolutno točnost v obsegu 2,5 -3,5 cm. Po pričakovanjih natančnost z večanjem razdalje od objekta do laserskega skenerja občutno pada, kar je ob povsem vertikalni konfiguraciji laserskega skenerja običajen pojav. Zaradi majhnih vpadnih kotov laserskih žarkov na horizontalne površine ima sistem določene omejitve. Za doseganje sprejemljive natančnosti oblaka točk maksimalna širina snemalnega pasu znaša 60 m, torej največ 30 m na vsako stran trajektorije. Prav tako sistem zaradi specifične senzorjev in konstrukcijskih pogojev, ki se odražajo v relativno dolgem času za zajem podatkov, glede na komercialne sisteme, ni namenjen zajemu podatkov na daljših linijskih objektih. Trenutno je sistem optimiziran za nekaj 100 metrske do nekaj kilometrske odseke (2-5 km).

V postopku kalibracije so bili določeni elementi BA (kotno odstopanje), ki v povprečju znašajo: *nagib*  $0,410668^\circ$ , *naklon*  $0,250755^\circ$ , *zasuk*  $0,463215^\circ$ . Z upoštevanjem teh parametrov (za razliko od nekalibriranega sistema, kjer laserski pasovi med seboj ne sovpadajo), ravnine v posameznih prekrivajočih se pasovih oblaka točk sovpadajo.

Praktični vidik naloge pod vprašaj postavi konstrukcijo platforme. Izkaže se, da je najugodnejše konstrukcijo, zaradi teže, zasnovati na osnovi aluminija, kljub njegovemu najnižjemu koeficientu



linearne temperaturne razteznosti. Zaradi večje fleksibilnosti je dodana možnost poljubne izbire snemalnih senzorjev (preklop med MMS in MLS), kar je zagotovo prednost pred zaprtimi komercialnimi sistemi. Za razliko od testne konfiguracije je v bodoče smiselna poševna/nagnjena pritrditev laserskega skenerja na platformo, kar sicer oteži matematični model sistema, vendar izboljša njegove izvedbene lastnosti (domet, natančnost).

Poslovni vidik naloge obravnava predvsem cenovno umestitev te nove tehnologije glede na domači trg. Po pričanju tujih podjetji se cene za kilometer zajetih in obdelanih podatkov z MLS tehnologijo gibljejo med 1.000 € in 4.000 € oz. med 12.000 € in 23.000 € za snemalni dan, odvisno od zahtevane natančnosti, gostote točk, klasifikacije, ekstrakcije profilov, itd. Glede na prve odzive in povpraševanja predvidevam, da bo slovenski trg prihajajočo MLS tehnologijo uspešno sprejel in uporabljal, v kolikor bodo cene vsaj med 20 % in 40 % nižje od zgoraj navedenih.

Ob zaključku naloge se že porajajo nove ideje, ki presegajo okvir diplomskega dela, zato ostajajo cilj za prihodnost. Ob tem mislim predvsem na komplementarno uporabo MLS in ALS sistema, katerega se realizira z majhnim, radijsko vodenim in brezpilotnim plovilom UAV (angl. Unmanned aerial vehicle). Zanimiva je tudi konfiguracija laserskega skenerja, ki je usmerjen direktno navzdol proti voziščni konstrukciji, s čimer lahko ustvarimo natančen 3D model vozišča, kakor tudi ortofoto. Na ta način bi lahko z določenimi algoritmi avtomatizirali postopek iskanja razpok, lukenj in ostalih poškodb vozišča. Smiselna in zelo uporabna je tudi implementacija »Ladybgu« kamer, ki omogočajo 360° panoramski zajem slik v visoki ločljivosti HD (angl. High Definition). Še vedno pa te ideje predstavljajo že znane in uporabljene tehnologije in so v veliki meri povezane z nadgradnjo in dokupom strojne opreme. Ideja, ki že živi v določenih strojnih in robotskih aplikacijah, je uporaba MLS sistema v kombinaciji s SLAM (angl. Simultaneous localization and mapping) algoritmi. SLAM tehnologija že deluje v robotiki in na podlagi podatkov laserskega skeniranja omogoča navigacijo robotov v prostoru. V večini primerov je tehnologija omejena na notranje prostore z jasno definiranimi horizontalnimi ali vertikalnimi površinami. V tem trenutku je teza, da bo kombinacija MLS in SLAM tehnologije v bodoče krojila strojno, robotsko in avtomobilsko industrijo morda drzna in futuristična, vendar izreden tehnološki razvoj in minimalna razpolovna doba znanja nakazujeta nasprotno.

## VIRI

Access Science, Connecting Students to Science. 2013.

<http://www.accessscience.com/loadBinary.aspx?aID=5753&filename=342700FG0040.gif>

(Pridobljeno 22. 3. 2013.)

Bar-Shalom, Y., Rong Li, X., Thiagalainagam K. 2001. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. New York, John Wiley & Sons, inc: 558 str.

Bing maps. 2013.

<http://www.bing.com/maps/#JnE9LnByYWdlciUyYnN0cmFzc2UIMmJob3JuJTdlc3N0LjA1N2VwZy4xJmJiPTY2LjI3ODA2MzcyMzE5NTMIN2U4My40OTkyOTcxNDIIN2UxNC40NjE2NTE2MDc2NDUxJTdlLTU0LjQ4ODk4NDEwOA==> (Pridobljeno 11. 4. 2013.)

Christian, B., Gerald, Z., Geert, V., Camillo, R., Andreas, U., Nikolaus, S., Michalel, D. 2012. Analysis of mobile laser scanning data and multi-view image reconstruction. V: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia: p. 163 – 168.

Craig, G. 2007. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. Journal of Applied Geodesy 1 (2007): p. 147-157.

Craig, G. 2007. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. Journal of Applied Geodesy 1 (2007): p. 148.

DIY DRONES, The Leading Community for Personal UAVs. 2013.

<http://diydrones.com/profiles/blogs/new-ground-station-idea> (Pridobljeno 17. 4. 2013.)

Free EBooks, CHAPTER 4. 2013. Inertial sensors: p. 105-109.

[http://www.artechhouse.com/uploads/public/documents/chapters/Groves\\_255\\_CH4.pdf](http://www.artechhouse.com/uploads/public/documents/chapters/Groves_255_CH4.pdf)

(Pridobljeno 05. 03. 2013.)

Grewal, M. S., Weill, L.R., Andrews, A. P. 2007. Global Positioning Systems. Inertial Navigation and Integration. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc: 525 str.



Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H. 2002. Analysis of the results of the OEEPE test »Integrated sensor orientation«. Test report and Workshop Proceedings, Frankfurt, July 2002: p. 31-38.

Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K., Wieser, M. 2003. Navigation – Principles of Positioning and Guidance. Wein, Springer Verlag: 427 str.

IMAR navigations Data Sheet IMU FSAF. 2013.

[http://www.imarnavigation.de/downloads/IMU\\_FSAS\\_E\\_EI\\_SN.pdf](http://www.imarnavigation.de/downloads/IMU_FSAS_E_EI_SN.pdf) (Pridobljeno 12. 03. 2013.)

J. Skaloud and D. Lichti. 2006. Rigorous approach to bore-sight selfcalibration in airborne laser scanning, ISPRS J. of Photogrammetry & Remote Sensing 61: p. 47–49.

Kastelic, M. 2010. Obdelava podatkov laserskega skeniranja v programu Geomagic in na primeru Mislejevega portala. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kastelic): 4 f.

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 16.

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. Geod. vestnik 47, 1-2: 406-407.

Kozmus, T.K. 2009. Združeni sistemi GNSS/INS za neprekinjeno navigacijo. Geod. vestnik 53, 1-2: 244-245.

Kumar, P. 2012. Road features Extraction Using Terrestrial Mobile Laser Scanning System. Ph.D. Thesis. National University of Ireland Maynooth. Maynooth, Co. Kildare, Ireland: 44f.

Lichti, D. D., and S. J. Gordon. 2004. Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. Proceedings of FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22–27: p. 1-16.

Lichti, D., Stewart, M., Tsakiri, M., Snow, A. 2000. Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. V: International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000: p. 486.

Machine design. 2013.

<http://machinedesign.com/sites/machinedesign.com/files/images/variable-reluctance-sensor.jpg>

(Pridobljeno 09. 03. 2013.)

Morin, K. W. 2002. Calibration of Airborne Laser Scanners, Masters Thesis, The University of Calgary. UCGE Report #20179.

<http://www.ensu.ucalgary.ca/links/GradTheses.html> (Pridobljeno 15. 03. 2013.)

Ranfl, U. 2009. Uporaba kalmanovega filtra pri povezavi različnih senzorjev za določevanje položaja v cestnem mobilnem kartirnem sistemu. Magisterska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Ranfl): 56f.

Ranfl, U. 2009. Uporaba kalmanovega filtra pri povezavi različnih senzorjev za določevanje položaja v cestnem mobilnem kartirnem sistemu. Magisterska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Ranfl): 79f.

Riegl Data Sheet VZ-400. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. 2013.

[http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_VZ-400\\_01-02-2013.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_VZ-400_01-02-2013.pdf)

(Pridobljeno 25. 03. 2013.)

Riegl Laser Measurement Systems. 2013.

<http://www.riegl.com/media-events/projects/mobile-scanning/project/joao-boavida-adriano-oliveira-bruno-santos-precise-long-tunnel-survey-uring-the-iriegli-vmx/> (Pridobljeno 07. 05. 2013.)

Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., Ullrich, A. 2010. Advances in Mobile Laser Scanning Data Acquisition. Facing the challenges – Building the capacity: proceedings of the FIG Congress in Sydney 210, April 11 – 16 2010: p. 9.

Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., Ullrich, A. 2010. Advances in Mobile Laser Scanning Data Acquisition. Facing the challenges – Building the capacity: proceedings of the FIG Congress in Sydney 210, April 11 – 16 2010: p. 1 – 15.

Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., Zach, G. 2010. Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. Journal of Applied Geodesy 4 (2010): p. 13–21

Rieger, P., Studnicka, N., Pfennigbauer, M., Zach, G. 2010. Boresight alignment method for mobile laser scanning systems. Journal of Applied Geodesy 4 (2010): p. 15–21

RiWOLRD Geo Referencing Software datasheet. RIEGL LMS GmbH. 2012. (Pridobljeno april 2013)

Shakarji, C.M. 1998. Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system. National Institute of Standards and Technology. Journal of Research 103, 1-6: 633–641.

Sterle, O. 2012. Izravnalni račun III, vaje (2011/2012). VAJA 4 – Kalmanov filter. Navodila za izvedbo vaj.

Stopar, B., Turk, G. 1998. Inercialni navigacijski sistemi. Raziskovalna naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Titterton, D. H., and J. L. Weston. 2004. Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd ed., Stevenage, England: IEE.

ZESS - Zentrum für Sensorsysteme. 2013.

<http://www.zess.uni-siegen.de/home/das-zess/forschung/navigation.html> (Pridobljeno 17. 03. 2013.)