

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Marko M. Pejić

**TAČNOST MODELIRANJA OBJEKATA  
TEHNOLOGIJOM TERESTRIČKOG LASERSKOG  
SKENIRANJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Marko M. Pejić

**ACCURACY OF THE OBJECTS MODELLING  
USING TERRESTRIAL LASER SCANNING  
TECHNOLOGY**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

*Informacije o mentoru i članovima komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije*

Mentor:

v. prof. dr Branko Božić, dipl. inž. geod.  
Univerzitet u Beogradu,  
Građevinski fakultet.

Članovi komisije:

1. v. prof. dr Branko Božić, dipl. inž. geod.  
Univerzitet u Beogradu,  
Građevinski fakultet.

2. v. prof. dr Zagorka Gospavić, dipl. inž. geod.  
Univerzitet u Beogradu,  
Građevinski fakultet.

3. v. prof. dr Siniša Delčev, dipl. inž. geod.  
Univerzitet u Beogradu,  
Građevinski fakultet.

4. v. prof. dr Goran Todorović, dipl. inž. el.  
Univerzitet u Beogradu,  
Građevinski fakultet.

5. doc. dr Biljana Abolmasov, dipl. inž. geol.  
Univerzitet u Beogradu,  
Rudarsko-geološki fakultet.

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

*Posebnu zahvalnost dugujem mentoru v. prof. dr Branku Božiću koji mi je dao ideju i usmeravao me u ovom istraživanju. Naročitu zahvalnost dugujem i dvema jakim ženama, doc. dr Biljani Abolmasov i v. prof. dr Zagorki Gospavić za stalnu podršku i korisne savete. Posebno cenim sugestije kolega v. prof. dr Siniše Delčeva i v. prof. dr Gorana Todorovića.*

*Zahvaljujem se profesoru u penziji, dr Gligoriju Peroviću, mom mentoru na magistarskim studijama, koji je uvek bio tu, raspoložen za beskrajno duge stručne razgovore tokom izrade ove teze koji su meni naročito koristili. Zahvalan sam mu i na pažljivo pročitanoj tekstu disertacije i datim sugestijama.*

*Posebno cenim napor kolegice Jelene Pandžić, studentkinje doktorskih studija, na detaljno pročitanoj doktoratu i ukazanim slovnim i stilskim greškama.*

*Želim da se zahvalim sadašnjim i bivšim profesorima i kolegama sa Katedre za geodeziju i geoinformatiku Građevinskog fakulteta u Beogradu i Vojnotehničke akademije, koji su mi usadili i rasplamsali ljubav prema geodetskoj nauci.*

*Zahvaljujem se kolegama iz privrede, bez kojih bi izrada ove disertacije bila tehnički nemoguća. Preduzeću Vekom Geo iz Beograda i direktoru Veljku Fuštiću, na pruženoj tehničkoj podršci i ustupanju instrumenta Leica Scan Station 2. Preduzeću Iga-Plan iz Sarajeva, posebno Aliji Botiću na obezbeđivanju instrumenata Leica HDS 3000 i Riegl VZ-400 sa pratećim softverskim licencama, i učestvovanju u eksperimentalnim merenjima. Petru Ćurčiću na logističkoj podršci i pomoći u realizaciji merenja u kontrolnim mrežama test objekata. Takođe, veliku zahvalnost dugujem i preduzeću Porr Beograd, posebno direktoru Bobanu Veličkoviću, na pokazanoj spremnosti za uvođenje tehnoloških inovacija i obezbeđivanje test lokacije za ovu disertaciju.*

*Konačno, želim da iskažem posebnu zahvalnost mojim voljenima, na podršci i razumevanju tokom četvorogodišnjeg intenzivnog rada na ovoj tezi. Ovu disertaciju posvećujem sinovima Urošu i Vuku, u čijem ću odrastanju, nadam se, od sada biti više prisutan.*

*Marko Pejić*



## Rezime

Skorašnja unapređenja performansi sistema terestričkog laserskog skeniranja (TLS) i trend opadanja cene ukazuju na značajan potencijal ove tehnologije i u zahtevnim inženjerskim zadacima. Pored činjenice da pojedini TLS poseduju frekvenciju skeniranja i preko 1.000.000 Hz, aspekt tačnosti ove metode geodetskog merenja igra presudnu ulogu u inženjerstvu. Postizanje adekvatne *tačnosti modeliranja objekata tehnologijom TLS* se osigurava projektovanjem geodetskog eksperimenta. To podrazumeva optimizaciju relevantnih parametara merenja i metodologije obrade podataka, kroz analizu uticaja različitih izvora grešaka u procesu merenja, instrumentalne preciznosti i performansi TLS, sagledavanja prostorne konfiguracije objekta i analize grešaka modela registracije i georeferenciranja.

U radu su date osnove tehnologije TLS, matematički modeli opažanja, registracije i georeferenciranja. Predstavljeni su i analizirani različiti izvori grešaka merenja TLS koje potiču od instrumenta, sredine, objekta skeniranja i metodologije registracije i georeferenciranja. Predstavljena su trenutna dostignuća i ograničenja kalibracije TLS. Date su osnovne postavke 3D modeliranja oblaka tačaka tehnikama MNK uklapanja površi i zapreminskog modeliranja.

Predložena je pojednostavljena procedura ispitivanja TLS po kriterijumima standarda ISO17123. Ona obuhvata ispitivanje, analizu i ocenu tačnosti TLS u laboratorijskim uslovima, po ugledu na postupke kalibracije sistema i mreže skenerskih signala. Metrološka laboratorija Građevinskog fakulteta u Beogradu je prilagođena za postupke ispitivanja TLS i izvršeno je ispitivanje jednog modela TLS.

Najvažniji rezultati disertacije odnose se na: formiranje proširenog stohastičkog modela direktnog georeferenciranja, ustanovljavanje metodologije projektovanja merenja TLS na inženjerskim objektima i metodologiju indirektnog georeferenciranja linijskih objekata.

Modifikovan je kompletan teorijski model grešaka direktnog georeferenciranja, korišćenjem procedure poznate stanice i orijentacije, i to u formi kovarijacione matrice

koordinata tačkaka. Ona sadrži sve relevantne uticaje, i to: deklarisanu preciznost rezultata TLS merenja, uticaje datih veličina kontrolne geodetske mreže, greške centrisanja, horizontiranja i merenja visine TLS i greške centrisanja i viziranja signala. Model je formiran na osnovu uticaja pojedinačnih izvora grešaka na vektor translacije i rotacije sistema oko  $z$ -ose.

U metodologiji optimizacije parametara skeniranja polazi se od analize uticaja različitih izvora grešaka na tačnost skeniranja objekta, odnosno od definisanja dominantnih uticaja na rezultate opažanja. Projektovanje eksperimenta TLS koje uključuje i optimizaciju parametara skeniranja izvršeno je na osnovu geometrijskih karakteristika test objekta u vidu 12 železničkih tunela. Izvršeno je projektovanje lokacija stanica TLS, dozvoljene dužine vizure i uglovne rezolucije skeniranja. Optimizacija je izvršena na osnovu ključnih ograničavajućih faktora: veličine upadnog ugla laserskog zraka na površ objekta, teorijskog doprinosa upadnog ugla intenzitetu povratnog zračenja i principa zanemarljivosti komponenti varijansi rezultata merenja rastojanja. Predložena metodologija projektovanja se odnosi na skeniranje objekata izduženog oblika (cevovodi, tuneli, podzemni hodnici, putevi itd.), koji generalno predstavljaju nepovoljan slučaj u smislu ostvarivanja potrebne tačnosti i pouzdanosti geodetskog eksperimenta. Maksimalna dozvoljena vrednost upadnog ugla laserskog zraka pri datim gabaritima test tunela iznosi  $78^\circ$ , maksimalna dozvoljena dužina vizure 13 m, rastojanje između susednih stanica TLS 26 m i optimalna vrednost uglovne rezolucije skeniranja iznosi 60".

Predložen je metod kontrolisanja multiplikacije grešaka registracije scena, uvođenjem *arbitrarnog pristupa* pri indirektnom georeferenciranju oblaka tačkaka u dva koraka. Na osnovu podataka skeniranja tunela dugačkog 1260 m, pokazana je efikasnost arbitrarnog pristupa u postizanju zahtevane tačnosti modela prostorne transformacije u odnosu na klasičan pristup. Time je ostvarena mogućnost postizanja visoke apsolutne tačnosti modela inženjerskog objekta i u uslovima nepovoljne geometrije za sprovođenje geodetskog eksperimenta. Standardna greška arbitrarnog georeferenciranja, odnosno 3D apsolutna standardna greška konačnog oblaka tačkaka u najdužem tunelu iznosi 10.6 mm, dok standardnom metodologijom indirektnog georeferenciranja te greške dostižu i vrednost od 1 m.

*Ključne reči:* terestričko lasersko skeniranje, inženjerstvo, tačnost, izvori grešaka, metrologija, projektovanje, eksperiment, registracija, georeferenciranje, tuneli

*Naučna oblast:* Geodetsko inženjerstvo

*Uža naučna oblast:* Modeliranje i menadžment u geodeziji; Inženjerska geodezija.

UDK: 528.41:[528.718:621.397.331.2](043.3)

## Abstract

In high-demanding engineering applications, the latest performance improvements of the terrestrial lasers scanning (TLS) system and price decreasing trend shows the significant potential of this technology. Beside the fact that some scanners have the scanning frequency of over 1.000.000 Hz, in the engineering applications the accuracy of this survey method plays the key role. Achievement of the satisfactory accuracy of the object modelling using TLS has to be done by experiment designing. This implies the optimization process of the relevant measurements parameters and of the methodology of measurement processing through analysis of the different sources of measurement errors, instrumental precision and performance of the specific TLS, spatial configuration of the object and analysis of the models of registration and georeferencing errors.

This work presents the fundamentals of TLS technology, mathematical models of measurements, registration and georeferencing. The different types of errors and their influences on the measurement quality are presented and analyzed. The sources of these errors are discussed in detail and treated as instrumental, environmental, object related and registration and georeferencing methodology dependent. The present TLS calibration achievements and existing operational limits are also analyzed. The basics of the point cloud 3D modelling techniques based on the least square fitting and volumetric approaches are given.

The simplified test procedure of the TLS accuracy investigation in accordance with the ISO17123 standard is proposed. The proposed procedure covers investigation, analysis and accuracy estimation of the TLS system in laboratory conditions. This procedure is developed based on the model of the system calibration and the network design procedures. Metrological laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Belgrade is customized for TLS testing. The accuracy investigation of a commercial TLS has been performed.

The most important thesis results are related to the establishment of the outspread stochastic model of the direct georeferencing, methodology of the TLS measurements design and indirect georeferencing approach for the elongated engineering objects.

The complete theoretical error model is modified for the case of the direct point cloud georeferencing using procedures of the TLS centering and orienting. The model is given in the form of a variance-covariance matrix of the point coordinates in the control network coordinate system. The variance-covariance matrix contains all significant influence factors, such are: instrumental precision of the TLS linear and angular measurements, the uncertainty of the geodetic control network, TLS centering, levelling and height measuring errors and errors of the signal centering and pointing. The error model is developed based on the influence of individual factors/error sources on the translation vector and rotation vector around z-axis.

The proposed methodology of the optimization of the scanning parameters starts from the analysis of the different error sources on the scanning accuracy, segregation of the significant influences in the present object configuration conditions. TLS experiment design that includes the optimization of the scanning parameters is conducted based on the case geometry of the 12 railway single-track tunnels. On this test example, the location of the TLS stations, allowed scanning distance and angular scanning resolution are designed. The optimization is performed by taking into account the essential limiting factor such as the incidence angle of the laser beam to the object surface, theoretical contribution of the incidence angle to the signal deterioration and the neglectivity principle of the variance components of the measured range. The proposed methodology is related to the scanning of elongated objects (tunnels, corridors, pipelines, underground passages etc), which generally represent unfavourable cases in providing geodetic measurements of sufficient accuracy and reliability. The maximal favourable incidence angle of the laser beam in the case tunnels is  $78^\circ$ , maximal scanning distance is 13 m, and consequently the optimal size of the scanner shifting along the tunnel alignment is 26 m and optimal scanning angular resolution is  $60''$ .

The methodology of the arbitrary georeferencing in two steps is also proposed. This approach holds the final point cloud geometric distortion, due to scans registration

errors multiplication, to the given limits. For the 1260 m long tunnel example, efficiency of the arbitrary georeferencing approach is shown as opposed to the classical indirect approach. This creates the possibility of achieving the high geometric accuracy of the engineering object model, even in the environment unfavourable for the geodetic measurements. Standard error of the arbitrary georeferencing method in the longest example tunnel is 10.6 mm, while residuals of the standard indirect georeferencing approach goes up to 1 m.

*Key words:* terrestrial laser scanning, engineering, accuracy, error sources, metrology, design, experiment, registration, georeferencing, tunnels

*Scientific field:* Geodetic engineering

*Major in:* Modelling and management in geodesy; Engineering geodesy.

UDC: 528.41:[528.718:621.397.331.2](043.3)

## SADRŽAJ

<b>REZIME.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Predmet istraživanja .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Cilj i polazne hipoteze istraživanja .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Prethodni radovi.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Doprinis doktorske disertacije .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5 Pregled sadržaja teze .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OSNOVE TEHNOLOGIJE TERESTRIČKOG LASERSKOG SKENIRANJA OBJEKATA U GEODETSKOM INŽENJERSTVU .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Mesto TLS metode u inženjerskoj geodeziji .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Metode merenja u inženjerskoj geodeziji.....	16
2.1.2 Metoda TLS u geodetskom inženjerstvu.....	17
<b>2.2 Osnovni principi laserskog određivanja rastojanja .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Elektromagnetni talasi.....	20
2.2.2 Laser .....	22
2.2.2.1 <i>Bezbednost laserskog zraka.....</i>	<i>24</i>
2.2.3 Impulsna “time of flight” merenja.....	26
2.2.4 Fazne metode laserskog merenja.....	29
2.2.4.1 <i>AMCW tehnika određivanja rastojanja.....</i>	<i>30</i>
2.2.4.2 <i>FMCW tehnika određivanja rastojanja.....</i>	<i>31</i>
2.2.5 Kombinacija impulsnih i faznih merenja .....	32
<b>2.3 Sistem za divergenciju laserskog snopa i merenje vrednosti pravaca.....</b>	<b>32</b>
2.3.1 Uredaj za divergenciju laserskog snopa .....	32
2.3.2 Sistem za merenje vrednosti pravca .....	34

<b>3</b>	<b>MATEMATIČKI MODEL SKENIRANJA I MODELI REGISTRACIJE I</b>	
	<b>GEOREFERENCIRANJA.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Osnovne matematičke relacije opažanja.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Registracija i georeferenciranje oblaka tačaka .....</b>	<b>37</b>
3.2.1	Funkcionalni model registracije i georeferenciranja .....	38
3.2.2	Metode registracije podataka skeniranja .....	43
3.2.2.1	<i>Registracija tipskim signalima .....</i>	<i>44</i>
3.2.2.2	<i>Registracija po morfološkim detaljima .....</i>	<i>45</i>
3.2.2.3	<i>Registracija najboljim uklapanjem površi .....</i>	<i>47</i>
3.2.2.4	<i>Registracija pravilnim geometrijskim figurama.....</i>	<i>49</i>
3.2.2.5	<i>Kombinacija metoda .....</i>	<i>50</i>
3.2.3	Metode georeferenciranja podataka skeniranja .....	50
3.2.3.1	<i>Direktna metoda .....</i>	<i>50</i>
3.2.3.2	<i>Indirektna metoda .....</i>	<i>52</i>
3.2.3.3	<i>Prednosti i nedostaci direktne i indirektna metode georeferenciranja .....</i>	<i>55</i>
<b>4</b>	<b>IZVORI GREŠAKA TLS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Instrumentalne greške .....</b>	<b>62</b>
4.1.1	Greške merenja rastojanja .....	63
4.1.1.1	<i>Preciznost laserskog daljinomera .....</i>	<i>63</i>
4.1.1.2	<i>Adiciona i multiplikaciona greška laserskog daljinomera TLS.....</i>	<i>64</i>
4.1.1.3	<i>Uticaj obima laserskog snopa na nesigurnost rezultata merenja rastojanja - efekat „izmešanih piksela“.....</i>	<i>66</i>
4.1.2	Greške merenja vrednosti horizontalnog i vertikalnog pravca.....	68
4.1.2.1	<i>Preciznost merenja pravaca.....</i>	<i>68</i>
4.1.2.2	<i>Adiciona i multiplikaciona greška u rezultatima merenja pravaca .....</i>	<i>69</i>
4.1.2.3	<i>Greška merenja vrednosti pravaca usled uticaja obima laserskog snopa .....</i>	<i>69</i>
4.1.3	Greške sinhronizacije senzora .....	70
4.1.4	Greške glavnih osa TLS .....	71



4.1.4.1	<i>Definicija glavnih osa TLS</i> .....	71
4.1.4.2	<i>Karakteristične greške osa TLS i ekscentriciteti</i> .....	72
4.1.4.3	<i>Efekat klaćenja osa TLS</i> .....	75
<b>4.2</b>	<b>Greške koje potiču od uticaja sredine</b> .....	<b>75</b>
4.2.1	Atmosferski uticaji .....	76
4.2.2	Uticaji vremenskih prilika.....	77
4.2.3	Uticaj iluminacije.....	78
4.2.4	Uticaj vibracija i nestabilnosti TLS.....	79
<b>4.3</b>	<b>Greške koje potiču od karakteristika objekta skeniranja</b> .....	<b>79</b>
4.3.1	Reflektivnost površi objekta.....	80
4.3.1.1	<i>Boja površi i talasna dužina lasera</i> .....	80
4.3.1.2	<i>Hrapavost površi</i> .....	82
4.3.1.3	<i>Temperatura i vlažnost površi</i> .....	83
4.3.2	Upadni ugao laserskog zraka.....	83
<b>4.4</b>	<b>Greške registracije i georeferenciranja</b> .....	<b>85</b>
4.4.1	Greške indirektno metode georeferenciranja.....	85
4.4.1.1	<i>Greške indirektnog georeferenciranja u dva koraka</i> .....	87
4.4.1.2	<i>Greške indirektnog georeferenciranja u jednom koraku</i> .....	89
4.4.1.3	<i>Mogućnosti unapređenja preciznosti indirektnog georeferenciranja</i> .....	90
4.4.2	Greške direktno metode georeferenciranja.....	91
4.4.2.1	<i>Greške procedure poznate stanice i orijentacije TLS</i> .....	92
4.4.2.2	<i>Greške procedure presecanja nazad</i> .....	97
<b>5</b>	<b>MODELI SISTEMATSKIH UTICAJA I KALIBRACIJA TLS</b> .....	<b>100</b>
<b>5.1</b>	<b>Generalni modeli sistematskih grešaka TLS i kalibracija sistema</b> .....	<b>100</b>
5.1.1	Modeli sistematskih uticaja izvornih opažanja TLS .....	101
5.1.1.1	<i>Rastojanje</i> .....	101
5.1.1.2	<i>Horizontalni ugao</i> .....	103
5.1.1.3	<i>Vertikalni ugao</i> .....	104

5.1.2	Kalibracija sistema .....	106
<b>5.2</b>	<b>Kalibracija komponenti TLS .....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>3D MODELIRANJE OBLAKA TAČAKA .....</b>	<b>112</b>
<b>6.1</b>	<b>MNK modeli uklapanja linija i površi.....</b>	<b>114</b>
6.1.1	Matematički oblici linija i površi .....	115
6.1.2	Algebarska i geometrijska mera rastojanja .....	116
6.1.3	MNK uklapanje osnovnih geometrijskih primitiva.....	118
6.1.3.1	<i>MNK uklapanje ravni.....</i>	<i>119</i>
6.1.3.2	<i>MNK uklapanje sfere.....</i>	<i>120</i>
6.1.3.3	<i>MNK uklapanje cilindra.....</i>	<i>121</i>
6.1.4	B-rep i CSG modeli.....	122
<b>6.2</b>	<b>3D triangulacija i zapreminske tehnike modeliranja oblaka tačaka.....</b>	<b>123</b>
<b>7</b>	<b>EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>126</b>
<b>7.1</b>	<b>Laboratorijsko ispitivanje tačnosti TLS .....</b>	<b>126</b>
7.1.1	Značajniji radovi .....	127
7.1.2	Metodologija ispitivanja TLS u laboratorijskim uslovima.....	128
7.1.2.1	<i>Test poligon i konfiguracija mreže.....</i>	<i>129</i>
7.1.2.2	<i>Statistički ocenjivači i analiza tačnosti podataka skeniranja.....</i>	<i>131</i>
7.1.3	Rezultati i diskusija laboratorijskog ispitivanja tačnosti skenera.....	134
7.1.3.1	<i>Kontrolna mreža skenerskih signala.....</i>	<i>134</i>
7.1.3.2	<i>Rezultati skeniranja i analiza tačnosti .....</i>	<i>135</i>
7.1.3.2.1	<i>Preciznost određivanja centra markice .....</i>	<i>136</i>
7.1.3.2.2	<i>Transformacija rezultata skeniranja, ocena i analiza grešaka .....</i>	<i>137</i>
7.1.3.2.3	<i>Uticaj nagiba i doprinos grešci centrisanja TLS .....</i>	<i>140</i>
7.1.3.2.4	<i>Analiza 3D dužina između skenerskih markica.....</i>	<i>140</i>
7.1.3.2.5	<i>Sferna statistika vektora grešaka.....</i>	<i>142</i>
<b>7.2</b>	<b>Projektovanje i realizacija eksperimenta skeniranja tunela.....</b>	<b>144</b>
7.2.1	Širi kontekst skeniranja tunela i prethodni radovi.....	145
7.2.2	Metodologija projektovanja eksperimenta .....	147

7.2.2.1	<i>Optimizacija parametara skeniranja.....</i>	147
7.2.2.1.1	Faktor gustine tačaka.....	148
7.2.2.1.2	Faktor upadnog ugla laserskog zraka.....	150
7.2.2.1.3	Definisanje lokacija stajališta TLS.....	152
7.2.2.1.4	Izbor TLS.....	152
7.2.2.2	<i>Registracija i georeferenciranje.....</i>	153
7.2.2.3	<i>Kontrolna geodetska mreža.....</i>	155
7.2.3	Rezultati i diskusija.....	156
7.2.3.1	<i>Test područje i projektni zahtevi.....</i>	156
7.2.3.2	<i>Optimizacija parametara skeniranja i izbor instrumenta.....</i>	158
7.2.3.3	<i>Projektno rešenje i realizacija kontrolne geodetske mreže i rezultati registracije i georeferenciranja.....</i>	159
7.2.3.3.1	Optimizacija i realizacija kontrolne geodetske mreže tunela.....	160
7.2.3.3.2	Rezultati registracije i georeferenciranja.....	164
7.2.3.4	<i>3D modeliranje oblaka tačaka tunela i finalni CAD crteži.....</i>	169
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....</b>	<b>173</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>179</b>
	<b>PRILOZI.....</b>	<b>192</b>
	<b>SPISAK SLIKA.....</b>	<b>196</b>
	<b>SPISAK TABELA.....</b>	<b>201</b>
	<b>BIOGRAFIJA AUTORA.....</b>	<b>203</b>

## 1 Uvod

Unapređenjem funkcionalnih karakteristika laserskih skenera i razvojem informacionih tehnologija, u poslednje vreme su se stvorili osnovni preduslovi da se u okviru jednog zaokruženog procesa snimanja i obrade podataka zadovolje dva osnovna zahteva:

- stvaranje realnog modela objekta po formi, dimenzijama i obliku,
- visoka 3D tačnost oblaka tačaka objekta.

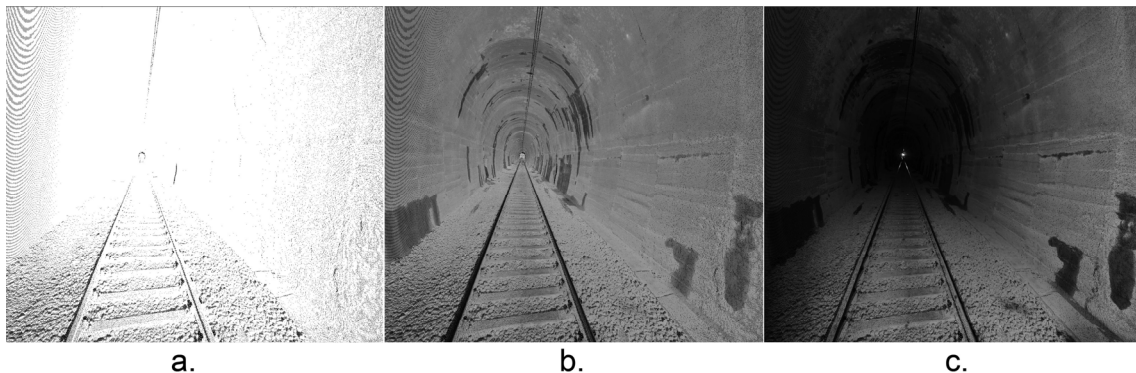
Prvi zahtev se odnosi na interpretaciju objekta snimanja i mogućnost dokumentovanja izvedenog stanja u tom smislu, dok je drugi interesantniji sa geodetskog stanovišta, odnosno stanovišta geometrijske tačnosti oblaka tačaka objekta.

Razvoju funkcionalne tehnologije terestričkog laserskog skeniranja (TLS) prethodila je pojava LIDAR-a ili LADAR-a (*LIght Detecting And Ranging* ili *LAser Detection And Ranging*) sistema sedamdesetih godina dvadesetog veka. LIDAR je korišćen u oblastima daljinske detekcije Zemlje, a noseća platforma je uglavnom bila avion ili satelit, pa se danas LIDAR uglavnom terminološki vezuje za te sisteme.

Tehnološki razlozi, odnosno teškoće postizanja centimetarske tačnosti na manjim rastojanjima uslovile su kašnjenje tehnologije TLS od tridesetak godina. Devedesetih godina prethodnog veka pojavu terestričkog LIDAR-a, odnosno TLS, omogućio je napredak u tehnologiji izrade laserskih mikro-čipova i proizvodnji optičkih elemenata, razvoj mikro elektro-mehaničkih sistema, unapređenje performansi računara i razvoj specijalnih algoritama za obradu podataka skeniranja. Dvadesetak godina primene i razvoja TLS takođe karakteriše permanentno usavršavanje u pogledu poboljšanja performansi skeniranja, tačnosti i pouzdanosti podataka, kao i dimenzija, težine i cene TLS. Sa druge strane, može se reći da razvoj softvera, odnosno posebnih algoritama za obradu podataka skeniranja u izvesnoj meri zaostaje za napretkom TLS i računarskog hardvera.

Terestrički laserski skener detektuje i snima geometrijske podatke, a zahvaljujući visokoj rezoluciji i podatke o teksturi objekata koji reflektuju elektromagnetnu energiju. Ovi uređaji vrše merenja sa određenom mernom nesigurnošću, a zapis je trodimenzionalni (3D) podatak koji se naziva oblak tačaka (Slika 1-1a.). Oblaku tačaka se može pridružiti dodatni atribut u vidu intenziteta povratnog zračenja za svaku tačku (Slika 1-1b.), koji zavisi od stepena reflektivnosti objekta. Svakoju skeniranoj tački se može pridružiti i RGB (*Red Green Blue*) vrednost, na osnovu dodatno integrisanog CCD (*Charged Coupled Device*) senzora i odgovarajuće optike, koja je sastavni deo većine modela TLS, što pored oblika i dimenzija svakako doprinosi stvaranju realnog modela objekta i po formi (Slika 1-1c.).

Za savremeni TLS se ne može reći da je automatska totalna stanica niti digitalna kamera. I pored dodirnih tačaka sa postojećim mernim sistemima u geodeziji, tehnologija TLS je posebna klasa instrumenta koja podrazumeva specifičnu metodologiju merenja i obrade podataka (detaljnije u poglavlju 2.1).

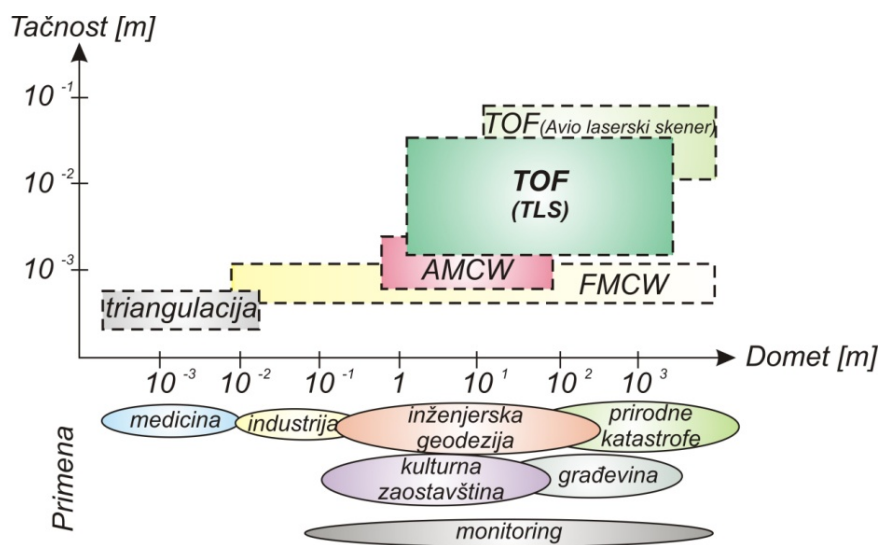


Slika 1-1 Oblak tačaka tunela. Bez dodatnih atributa (a.), sa atributom intenziteta povratnog zračenja (b.) i atributom RGB vrednosti (c.)

Dva osnovna sistema koja čine TLS su laser za merenje dužine (daljinomer) i uređaj za skretanje laserskog snopa (*beam deflection unit*). Laser obezbeđuje moduliranu informaciju potrebnu za određivanje rastojanja od emitera do objekta, koja se određuje na različite načine. Laseri se razlikuju po talasnoj dužini, divergenciji snopa, i snazi koja je ograničena do veličine koja ne oštećuje ljudsko oko. Skretanje laserskog snopa je neophodno da bi se postiglo kontinualno skeniranje objekta, a tehnički se najčešće ostvaruje upotrebom oscilirajućih ili rotirajućih ogledala. Zahvaljujući toj činjenici kod

TLS uređaja je nemoguće ostvariti viziranje pojedinačne tačke na objektu. Takođe, rezolucija skeniranja je direktno uslovljena veličinom skretanja laserskog snopa.

Obzirom da svetlost putuje gotovo konstantnom brzinom kroz medijum, rastojanje se može odrediti na osnovu vremena za koje se svetlost vrati do detektora. Ti sistemi su poznati kao TOF sistemi (*Time Of Flight*). TOF merenja mogu takođe biti ostvarena indirektno preko faznih merenja kontinualnih talasa. Metod triangulacije podrazumeva formiranje trougla pomoću dva poznata ugla (izlazna i ulazna) i konstantne baze, na osnovu čega se može odrediti rastojanje do objekta. Domet i tačnost TLS u najvećoj meri zavise od metodologije određivanja rastojanja. Metod triangulacije se koristi za veoma bliska rastojanja, metod faznih merenja za merenja od bliskih do srednjih rastojanja i metod impulsnih TOF merenja od srednjih do velikih rastojanja (detaljnije u poglavlju 2.2). Slika 1-2 ilustruje tačnost i domet tipičnih metoda određivanja rastojanja pomoću TLS i na osnovu toga njihovu klasifikaciju i oblasti u kojima se primenjuju.



Slika 1-2 Metode laserskog određivanja rastojanja, oblasti primene, domet i tačnost TLS (Schulz, 2007)

Kada se govori o tehnologiji TLS, važno je reći da se pod ovim terminom mogu podrazumevati i TLS koji nisu stacionarni, već su postavljeni na pokretne platforme. Obzirom da se instrument u toku merenja kreće, slično kao i kod skeniranja iz vazduha, sistem mora posedovati i dodatne uređaje poput GNSS senzora, inercijalnih sistema i inklinometara, na osnovu kojih se u realnom vremenu definišu pozicije i nagibi

instrumenta. Međutim, zbog činjenice da se instrument nalazi na nestabilnoj platformi, i pored upotrebe skupih senzora, kvalitet podataka skeniranja ovim instrumentima u vidu položajne tačnosti je na nižem nivou. Ovi instrumenti su uglavnom GIS orijentisani, ili se koriste u projektima gde geodetska tačnost nije osnovni prioritet, pa stoga nisu dalje razmatrani.

U inženjerskoj geodeziji se pretežno koriste stacionarni impulsni TOF i fazni AMCW skeneri. Većina proizvođača ovih uređaja ima više tipova skenera zavisno od željenih karakteristika. Konstrukcija i tehničko rešenje TLS je uglavnom uslovljeno sa tri željena funkcionalna parametra: preciznost, domet i brzina skeniranja.

## 1.1 Predmet istraživanja

Tehnologija terestričkog laserskog skeniranja je prisutna u geodeziji od ranih 90-ih godina dvadesetog veka, a nagli razvoj je ostvaren tek nakon 2000. godine. Glavna prednost ove u odnosu na konvencionalne terestričke tehnike merenja je u činjenici da se za kratko vreme može prikupiti velika količina podataka. Osim toga, objekat se diskretizuje velikim brojem tačaka te je moguće dobiti vizuelno veran trodimenzionalni model.

Tehnologija TLS ima potencijal da bude široko prihvaćena geodetska metoda. Skorašnja poboljšanja u vidu funkcionalnosti, brzine, dometa i preciznosti su omogućila sasvim nove oblasti primene ove tehnologije u geodeziji. Moderni skeneri, pored vrhunskih performansi skeniranja, imaju mogućnost centrisanja, orijentisanja i nivelisanja oblaka tačaka, odnosno sve više preuzimaju princip rada i u njih se ugrađuju uređaji slični onim kao kod klasičnih geodetskih instrumenta. Brzine skeniranja pojedinih visokopreciznih TLS prelaze i 1.000.000 tačaka u sekundi, što je činjenica koja čini skeniranje metodom kakva do sada nije bila prisutna u geodetskom inženjerstvu.

Do skoro su oblasti geodetske primene TLS bile u radovima gde nije prioritet ostvariti visoku položajnu tačnost, odnosno za snimanje kulturno-istorijskih spomenika, fasada objekata, i za izradu topografskih podloga. U poslednje vreme su prisutni pionirski

radovi na uvođenju ove tehnologije u oblasti geodetskog inženjerstva, gde se uglavnom zahteva visoka geometrijska tačnost prikupljenih podataka.

U kontekstu tehnologije TLS potrebno je uvesti i termin *kvalitet* podataka koji pored pozicione tačnosti skeniranja podrazumeva i parametar rezolucije oblaka tačaka. Pod terminom *rezolucija* skeniranja podrazumeva se vrednost najmanjeg ugaonog otklona laserskog zraka po horizontalnoj i vertikalnoj osi TLS. Kada se uzme u obzir i parametar rastojanja objekta od stajališta skenera, dobija se rezolucija (gustina) oblaka tačaka. U praksi se rezolucija oblaka tačaka često meša sa tačnošću oblaka tačaka. Položajna tačnost oblaka tačaka i rezolucija utiču na tačnost 3D modela objekta. Takođe, pod terminom rezolucija skeniranja se može podrazumevati i vrednost najmanje razlike rastojanja koja se može detektovati laserskim daljinomerom, kao i najmanja vrednost razlike reflektivnosti objekta koja se može detektovati (radiometrijska rezolucija).

Principijelno gledano, tačnost skeniranja se odnosi na izvorne rezultate opažanja, odnosno na podatke rezultata merenja. Stoga je potrebno jasno razlikovati pojmove *podatak* i *informacija*.

- *Podatak* predstavlja izvorni rezultat opažanja. U slučaju tehnologije TLS to su dužina i dva ugla. Do izvornog podatka se najčešće ne može doći direktno.
- *Informacija* predstavlja rezultat obrade, manipulacije ili organizovanja podataka, odnosno predstavlja kontekst u kojem su izvršena merenja podataka. Ukoliko se podatak može jednoznačno iskoristiti, onda to predstavlja informaciju.

Modeliranje, kao opšta naučna metoda označava predstavljanje bitnih odredbi nekog objekta kao celine, dok je model imitacija, prototip ili projekcija objekta – prošle, postojeće i moguće buduće realnosti. Modeli mogu biti idealni ili stvarni. U svetlu tehnologije TLS, modeliranje inženjerskog objekta označava predstavljanje svojstava objekta po dimenzijama, obliku i teksturi i nekim dodatnim karakteristikama koje zavise od talasne dužine lasera i reflektivnosti objekta.



Obzirom da se na osnovu eksperimenta dobija oblak tačaka, koji predstavlja organizovane i obrađene rezultate opažanja, to se oblak tačaka treba smatrati upotrebljivom informacijom. Može se reći da oblak tačaka predstavlja jedan od modela 3D realnosti, najčešće limitirane upotrebne vrednosti, koja se može unaprediti poboljšanjem rezolucije i modeliranjem oblaka tačaka.

Model objekta u vidu oblaka tačaka (*point cloud model*) se sve više diferencira u praksi i literaturi kao posebna vrsta 3D modela objekata (Arayici, 2008; Foix i dr., 2010; Hu i dr., 2008; Nebiker i dr., 2010), zahvaljujući potencijalno veoma visokoj prostornoj rezoluciji skeniranja. Primenom TLS tehnologije, uglavnom ne postoji potreba za strukturiranjem oblaka tačaka karakterističnim prelomnim linijama. Zbog toga se sve češće postavlja pitanje potrebe 3D modeliranja oblaka tačaka. Sa druge strane, postoje značajni nedostaci modela objekta u vidu oblaka tačaka. Na primer prilikom skeniranja industrijskih objekata sa mnoštvom cevi i različitih mašinskih elemenata koji se međusobno zaklanjaju, često postoje „rupe“ u podacima. 3D modeliranjem oblaka tačaka nedostatak podataka se može nadomestiti. Takođe, količina podataka se smanjuje sa nekoliko miliona tačaka na nekoliko parametara izravnavajuće površi i dobija se kontinualna forma objekta pogodna za CAD manipulisanje.

3D modeliranje oblaka tačaka objekta linijama ili površima (najboljim uklapanjem ravni, sfere, cilindra, i sl.), ili zapreminskim modeliranjem (poglavlje 6), unapređuje njegovu upotrebnu vrednost i preciznost modela objekta, zbog visoke redundantnosti opažanja. Predstavlja fazu nakon koje sledi generisanje različitih proizvoda poput: profila, pogleda, preseka i numeričkih izveštaja, kako bi projekat skeniranja u inženjerstvu bio upotrebljiv za krajnje korisnike.

Visoku tačnost 3D modeliranja oblaka tačaka je nemoguće postići koristeći oblak tačaka niskog nivoa tačnosti i/ili male prostorne rezolucije, čak iako se koriste najsavršeniji algoritmi za modeliranje objekta. Dodatno, algoritmi za modeliranje oblaka tačaka su često tzv. „crna kutija“ alati, koji se teško analiziraju (Reshetyuk, 2009).

Dakle, može se reći da *tačnost modeliranja objekata* na osnovu TLS težišno podrazumeva analizu uticaja izvora grešaka u procesu merenja i procesa obrade rezultata merenja u smislu registracije i georeferenciranja. Formiranje korektnog (u

granicama projektovane tačnosti) oblaka tačaka je karakterističan i suštinski domet geodetskog stručnjaka. Ukoliko je poznata rezolucija i preciznost individualnih tačaka, egzaktno se može odrediti i preciznost modeliranih geometrijskih primitiva, npr. model sfere, ravni ili cilindra. To ukazuje na potrebu da se u geodetskom inženjerstvu izvorima grešaka samog eksperimenta, prenosa grešaka tokom registracije i georeferenciranja mora posvetiti najveća pažnja prilikom modeliranja jednog objekta tehnologijom TLS. Ipak, u poglavlju 6, autor se osvrnuo i na metode 3D modeliranja oblaka tačaka, obzirom da se ta faza često podrazumeva u jednom praktičnom zadatku upotrebe TLS sistema u inženjerskoj geodeziji.

Relativno skoro, TLS metoda merenja se izdvojila kao posebna metoda u geodeziji. U inženjerskoj geodeziji TLS trenutno nije široko zastupljen. Postoje slučajevi u kojima TLS tehnologija još uvek ne može da zameni visokoprecizne geodetske metode (tahimetrija, nivelman). Sa druge strane, u slučajevima specifičnih objekata i projektnih zahteva, TLS već polako postaje standard, a naročito u modeliranju i utvrđivanju geometrije objekata poput brana, tunela, cevovoda i industrijskih postrojenja. Dometi TLS tehnologije, projektovanje eksperimenta i modeliranje podataka opažanja postaju interesantni za istraživanje.

U ovom radu predstavljena je metodologija projektovanja eksperimenta skeniranja, registracije i georeferenciranja sa realizacijom merenja i modeliranja tunela radi kontrole geometrije izvedenog stanja tunela.

## 1.2 Cilj i polazne hipoteze istraživanja

U skladu sa predmetom istraživanja ove doktorske disertacije, izdvajaju se tri osnovna cilja istraživanja:

- Utvrđivanje mogućnosti tehnologije terestričkog laserskog skeniranja u modeliranju inženjerskog objekta, gde se uglavnom zahteva visoka geometrijska tačnost. U skladu sa tim potrebno je detaljno analizirati glavne izvore grešaka merenja i obrade podataka.

- Utvrđivanje geometrijske tačnosti sistema TLS. Definisanje procedure za metrološko ispitivanje tačnosti TLS, i analiza tačnosti na osnovu podataka merenja.
- Definisanje uslova pri merenju i procedura obrade rezultata merenja za ostvarivanje visoke tačnosti. Na primeru konkretnog inženjerskog objekta, projektovanje eksperimenta skeniranja i obrade podataka i njegova realizacija.

Generalno, mogu se definisati tri hipoteze ovog naučnog istraživanja:

- Prva hipoteza: Dominantni izvori grešaka koji utiču na geometrijsku tačnost modeliranja objekta su: instrumentalne prirode (greška merenja dužine, greška vertikalnog i horizontalnog otklona laserskog snopa), udaljenost i orijentacija objekta, reflektivnost površi objekta, rezolucija skeniranja, georeferenciranje i modeliranje objekta.
- Druga hipoteza: Moguće je ostvariti visoku položajnu tačnost karakterističnih tačaka objekta, uz poštovanje određenih procedura tokom planiranja, snimanja i obrade rezultata merenja.
- Treća hipoteza: Zahtevi za postizanjem visoke geometrijske tačnosti modela objekta formiraju drugačiji pristup realizaciji geodetskog osmatranja objekta, gde se on ne mora obavezno diskretizovati na karakterističnim mestima, već se može posmatrati kao celina.

### 1.3 Prethodni radovi

Razmatranjem i definisanjem TLS tehnologije kao specifične metode merenja u inženjerskoj geodeziji bavili su se uglavnom nemački autori (Luhmann, 2002; Zogg, 2008; Wunderlich, 2006).

Značajniji radovi koji tretiraju problematiku skeniranja i obrade podataka u geodetskom inženjerstvu su: (Eling, 2009; Rabbani, 2007; Reshetyuk, 2009; Schulz, 2007). Radovi

koji se bave projektovanjem eksperimenta skeniranja su retki (Soudarissanane i dr., 2008) i bave se smanjenjem grešaka oblaka tačaka optimizacijom mesta stajališta TLS.

Primena tehnologije TLS u tunelima je razmatrana iz vizure različitih naučnih disciplina. Sa geotehničkog aspekta interesantan je (Fekete i dr., 2010; Lato i dr., 2009), sa aspekta TLS standarda (Lam, 2006). (Lemy i dr., 2006; Lindenbergh i dr., 2005; Lindenbergh i dr., 2009) bave se mogućnostima tehnologije TLS u deformacionoj analizi tunela. Radovi koji tretiraju problem TLS tehnologije u dugačkim tunelima, kao i projektovanje inženjerskog eksperimenta skeniranja linijskih objekata ne postoje.

Ispitivanjem tačnosti TLS se bavio veliki broj autora. Pojedina istraživanja se fokusiraju na tačnost konkretnog TLS (Lindenbergh i dr., 2005; Kersten i dr., 2005), dok se druga bave upoređivanjem tačnosti različitih TLS (Kersten i dr., 2008; Reshetyuk, 2006a). Greške glavnih osa TLS se analiziraju u radovima (Kersten i dr., 2005; Neitzel, 2007; Schulz, 2007; Schneider, 2009). Pojedine karakteristike sistema TLS, kao što su uticaj obima laserskog zraka i efekat izmešanih piksela (Hebert i Krotkov, 1992; Lichti i Gordon, 2004; Lichti i Skaloud, 2010; Schulz, 2007), doprinos upadnog ugla laserskog zraka (Soudarissanane i dr., 2009; Soudarissanane i dr., 2011), karakteristike objekta skeniranja (Boehler i dr., 2003; Bucksch i dr., 2007; Hanke i dr., 2006; Hodge, 2010; Lichti i Harvey, 2002; Lindenbergh i dr., 2005; Pesci i Teza, 2008; Voegtler i dr., 2008) i okoline prostiranja lasera (Beraldin i dr., 2010; Hejbudzka i dr., 2010; Voisin i dr., 2007; Reshetyuk, 2006; Voegtler i dr., 2008) su analizirane nad eksperimentalnim podacima.

Stohastički modeli registracije i georeferenciranja oblaka tačaka dati su u radovima (Lichti i Gordon, 2004; Reshetyuk, 2006; Scaioni, 2005).

Prvi istraživački radovi na kalibraciji TLS su objavljeni tokom 2000. godine (Lichti i dr., 2000a; Lichti i dr., 2000b). Procedure kalibracije sistema i ocene dodatnih parametara su date kroz radove (Chow i dr., 2011; Gielsdorf i dr., 2004; González-Aguilera i dr., 2011; Lichti i dr., 2000; Lichti i Skaloud, 2010; Lichti, 2007; Reshetyuk, 2006; Reshetyuk, 2009; Reshetyuk, 2010; Schneider, 2009; Staiger, 2005). Kalibracija komponenti sistema TLS je predstavljena u Schulz (2007).

## 1.4 Doprinos doktorske disertacije

Imajući u vidu prethodne radove i rezultate relevantnih autora, poseban istraživački doprinos doktorske disertacije može se sublimirati kroz:

- Doprinos definisanju *teorijskog modela grešaka* modeliranja oblaka tačaka na osnovu *direktnog georeferenciranja*. Predstavljen je model koji uključuje deklarisanu preciznost rezultata TLS merenja, uticaje datih veličina kontrolne geodetske mreže, greške centrisanja, horizontiranja i merenja visine TLS i greške centrisanja i viziranja signala. Model je formiran na osnovu uticaja pojedinačnih izvora grešaka na vektor translacije i rotacije sistema oko  $z$ -ose;
- Doprinos *optimizaciji eksperimenta TLS*, posebno pri skeniranju objekata izduženog oblika (cevovodi, tuneli, podzemni hodnici, itd.), koji predstavljaju nepovoljan slučaj u smislu mogućnosti ostvarivanja potrebne tačnosti geodetskog eksperimenta. Definisanje metodologije optimizacije mesta stajališta TLS i maksimalne dužine vizure, na osnovu veličine upadnog ugla laserskog zraka, teorijskog doprinosa upadnog ugla intenzitetu povratnog zračenja i principa zanemarljivosti komponenti varijansi rezultata merenja rastojanja;
- Doprinos *metodologiji georeferenciranja* podataka skeniranja. Predložen je način kontrolisanja multiplikacije grešaka registracije scena uvođenjem *arbitrarnog pristupa* pri indirektnom georeferenciranju oblaka tačaka u dva koraka. Na osnovu podataka skeniranja dugačkog tunela pokazana je efikasnost arbitrarnog pristupa u postizanju zahtevanih veličina reziduala prostorne transformacije, u odnosu na klasičan pristup. Time je ostvarena mogućnost postizanja visoke apsolutne tačnosti modela inženjerskog objekta i u uslovima nepovoljne geometrije za sprovođenje skeniranja.

Obzirom na skoro dosegnuti potencijal TLS u geodetskom inženjerstvu, opšti doprinos doktorske disertacije je u formiranju sistematizovanog materijala na srpskom jeziku,

radi prihvatanja tehnologije TLS od domaće stručne javnosti i njeno značajnije uvođenje u geodetsku praksu.

## 1.5 Pregled sadržaja teze

Rad je organizovan u 8 poglavlja, uključujući uvodno i zaključno poglavlje. Poglavlja od 2 do 6, pored opštih teorijskih razmatranja, sadrže i najvažnije rezultate i zaključke istraživanja relevantnih autora. Poglavlje 7 sadrži eksperimentalne rezultate istraživanja autora, koja se u značajnoj meri oslanjaju na prethodna poglavlja u smislu referenci na metodologiju, matematički aparat i različita istraživanja ključnih autora u ovoj oblasti.

U poglavlju 2 su date teorijske i tehnološke osnove TLS u inženjerskoj geodeziji. Analizirana je metoda merenja TLS i njeni aspekti primene u inženjerstvu u odnosu na tradicionalne metode. Dati su osnovni pojmovi o elektromagnetnim talasima i laserima. Analizirane su glavne komponente TLS, kao što su sistem za merenje dužina i sistem divergencije i merenja vrednosti pravca laserskog zraka. Najviše pažnje je posvećeno impulsnim TOF merenjima i faznim AMCW tehnikama određivanja dužina, obzirom da se one najviše primenjuju u inženjerstvu.

Osnovne jednačine opažanja i metoda obrade podataka skeniranja date su u poglavlju 3. Predstavljene su veličine koje su rezultat TLS merenja, odnos između rezultata merenja i izvornog oblaka tačaka. Detaljno je dat funkcionalni model registracije i georeferenciranja oblaka tačaka. Analizirani su različiti pristupi registraciji i georeferenciranju, poput registracije korišćenjem tipskih skenerskih signala, preko identifikacije karakterističnih morfoloških detalja, registracije najboljim uklapanjem površi i pomoću pravilnih geometrijskih figura. Karakteristike, metodologija i prednosti i nedostaci direktnog i indirektnog georeferenciranja oblaka tačaka su takođe detaljno razmatrani.

Poglavlje 4 tretira izvore grešaka sistema TLS. Obzirom na kompleksnost elektromehaničkog sklopa skenera i složenost fizičkih zakonitosti prostiranja i refleksije laserskog zraka, razmatranja ovih fenomena su data u generalnom maniru, bez detaljne analize svake komponente sistema ponaosob. Uspostavljena je osnovna klasifikacija

izvora grešaka. Kao instrumentalne greške, posebno su analizirane greške merenja rastojanja (preciznost laserskog daljinomera, adiciona i multiplikaciona greška, uticaj obima laserskog snopa na efekat izmešanih piksela, itd.). Greške rezultata merenja horizontalnih i vertikalnih pravaca su razmatrane preko njihove deklarirane instrumentalne preciznosti, njihove adicione i multiplikacione komponente i uticaja obima laserskog zraka na nesigurnost rezultata merenja pravca. Posebno su razmatrani i ostali instrumentalni uticaji, i to: greške sinhronizacije senzora, greške položaja glavnih osa, ekscentriciteti i efekti klaćenja TLS prilikom skeniranja. Greške usled okoline prostiranja zraka su tretirane sa stanovišta atmosferskih uticaja, uticaja vremenskih prilika, iluminacije i nestabilnosti TLS usled delovanja spoljašnjih sila. Greške koje potiču od objekta skeniranja su svrstane i objašnjene preko fenomena reflektivnosti materijala. Analizirani su zajednički uticaji boje površi i talasne dužine lasera; zatim uticaj hrapavosti, vlažnosti, visoke temperature površi i upadnog ugla laserskog zraka na intenzitet povratnog signala, odnosno na nesigurnost rezultata merenja rastojanja. Greške metodološkog pristupa obrade podataka, odnosno greške registracije i georeferenciranja su detaljno predstavljene kroz stohastičke modele MNK transformacije koordinata iz skenerskog koordinatnog sistema u koordinatni sistem kontrolne geodetske mreže objekta. Posebno je dat stohastički model indirektnog georeferenciranja u jednom i u dva koraka. Takođe, definisan je prošireni model grešaka direktnog georeferenciranja korišćenjem procedure poznate stanice i orijentacije i procedure presecanja nazad.

U poglavlju 5 predstavljena su trenutna dostignuća u definisanju modela sistematskih uticaja i kalibracije TLS. Razmatrane su odlike kalibracije sistema i kalibracije komponenti TLS. Obzirom da se radi o disciplini koja je u začetku, razmatranja u ovom poglavlju treba da ukažu na trend u kome se ide kada je u pitanju jedna mlada metrološka disciplina. Veliko ograničenje ovih istraživanja je u činjenici da u praksi još uvek nedostaju: standardi koji obavezuju proizvođače TLS, standardizovane rutine metrološkog ispitivanja TLS kao kod ostalih geodetskih instrumenata, nemogućnost implementacije korekcija direktno na osnovne rezultate opažanja, itd.

Poglavlje 6 predstavlja metode 3D modeliranja oblaka tačaka. Ovde su razmatrani isključivo 3D modeli objekta i ukazano je na njihove prednosti u odnosu na 2D i kvazi

3D modele koji se tradicionalno koriste u geodeziji i srodnim naukama. Predstavljene su osnove modeliranja površi na osnovu funkcionalnih zavisnosti i MNK uklapanja prostornih primitiva. Prostorna triangulacija i zapreminske tehnike modeliranja oblaka tačaka su predstavljene u kratkim crtama.

Eksperimentalna istraživanja su prikazana u poglavlju 7 koje se sastoji iz dve celine.

Potpoglavlje 7.1 predstavlja metodologiju laboratorijskog ispitivanja tačnosti TLS, na osnovu uspostavljene referentne mreže skenerskih signala. Predložena je pojednostavljena procedura za ispitivanje, analizu i ocenu tačnosti TLS u laboratorijskim uslovima na osnovu standarda ISO17123. Metrološka laboratorija Građevinskog fakulteta u Beogradu je prilagođena za ispitivanje TLS instalacijom mreže skenerskih signala.

Potpoglavlje 7.2, kao najvažniji deo doktorske disertacije, bavi se metodologijom projektovanja i optimizacije eksperimenta TLS i obrade podataka skeniranja specifičnog inženjerskog objekta, kojeg generalno odlikuju nepovoljni uslovi za ostvarivanje visoke tačnosti geodetskog eksperimenta. Dva pomenuta posebna doprinosa ovog rada su data u okviru ovog potpoglavlja. U skladu sa dominantnim izvorima grešaka TLS, predstavljena je metodologija optimizovanja parametara skeniranja i kontrolne geodetske mreže u tunelima. Takođe je predložena metodologija georeferenciranja podataka skeniranja koja omogućuje postizanje visoke apsolutne tačnosti modela objekta, i rešava poznati problem velike geometrijske distorzije globalne registracije prilikom skeniranja linijskih objekata. Test objekat predstavlja 12 tunela na pruzi Nikšić - Podgorica, ukupne dužine 3.5 km.

U poslednjem poglavlju 8 izneta su zaključna razmatranja.



## **2 Osnove tehnologije terestričkog laserskog skeniranja objekata u geodetskom inženjerstvu**

U ovom poglavlju daju se osnove tehnologije TLS, zasnovane na teorijskim aspektima i objavljenim radovima relevantnih autora. Razmatranja će biti uopštena, odnosno neće se odnositi na konkretni komercijalni model TLS.

Terestrički laserski skener predstavlja instrument koji kao rezultat skeniranja daje skup 3D tačaka, koji se naziva *oblak tačaka*. Za svaku tačku vezuje se podatak u vidu tri prostorne koordinate i dodatna informacija o intenzitetu povratnog zračenja koja predstavlja četvrtu dimenziju podatka. Samo pojedini modeli TLS su konstruisani za potrebe visokopreciznih merenja i primene u oblastima inženjerske geodezije, gde je obično zahtev za tačnost 3D položaja oblaka tačaka veća od 1 cm.

Uloga TLS u inženjerskoj geodeziji je da se na osnovu modeliranja objekata 3D tačkama visoke prostorne rezolucije može sprovesti kontrola geometrije objekata. Ukoliko se skeniranje sprovodi u više epoha, takvim deformacionim merenjima kontroliše se geometrija objekta, odnosno sprovodi se deformaciono osmatranje ili geometrijski monitoring objekta. Upotrebom savremenih skenera, više miliona tačaka na objektu se snimi u veoma kratkom vremenu, odnosno prikupe se 3D informacije u vidu  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  koordinata i podaci o intenzitetu povratnog zračenja  $I$ .

Na tržištu se nalazi veliki broj TLS uređaja. Od pojave prvih TLS devedesetih godina dvadesetog veka, razvijeni su različiti modeli koji se po svojim funkcionalnim karakteristikama značajno razlikuju. Vodeći svetski proizvođači geodetske opreme su se vremenom orijentisali i na proizvodnju TLS, za primene u geodetskom inženjerstvu.

Glavne karakteristike TLS instrumenata na osnovu kojih se diferenciraju različiti modeli su: princip laserskog merenja rastojanja koji direktno utiče na domet i preciznost merenja, rezolucija skeniranja, vidno polje i brzina skeniranja (Tabela 2-1). Dodatne karakteristike se ogledaju u dimenzijama, težini, funkcionalnosti i softverskoj podršci proizvođača.

Tabela 2-1 Karakteristike pojedinih komercijalnih TLS koji se koriste u inženjerskoj geodeziji (novembar 2011)

Proizvođač / Model		Preciznost	Rezolucija	Brzina [tač./s]	Vidno polje [°]	Do-met [m]
Leica Geosystems Scan Station C10		Pozicija: 6 mm/50 m Rastojanje: 4 mm/50 m H/V pravac: 12" Model: 2 mm Tipske markice: 2mm	1 mm	50000	360/270	300
Riegl VZ-400		Pozicija: 5 mm/100 m	1.8"	42000 122000	360/200	600
Zoller+Fröhlich IMAGER 5010		Rastojanje: 1.2 mm/50 m, 3.8 mm/100 m H/V pravac: 25" Model: 2 mm	V: 1.4" H: 0.7"	1.016 $\times 10^6$	360/320	187
Trimble CX 3D		Pozicija: 4.5 mm/30 m, 7.3 mm/50 m Rastojanje: 1.2 mm/30 m, 2 mm/50 m H/V pravac: 15"/25" Model: 3 mm	7"	54000	360/300	80
FARO Focus3D		Rastojanje: 2 mm/25 m	30"	0.976 $\times 10^6$	360/305	120
Optech ILRIS-3D		Rastojanje: 4 mm/100 m H/V pravac: 16.5"	4"	-	40/40	1200

TLS je visokotehnoški uređaj koji u sebi sadrži veliki broj komponenti, a najvažniji su sistem za određivanje rastojanja i reflektivnosti površi i sistem za skretanje laserskog snopa i merenje pravaca. U praksi su prisutna različita tehnička rešenja TLS uslovljena ciljanim funkcionalnim karakteristikama. Svi uređaji imaju sličnu elektro-mehaničku koncepciju, gde pojedinačne komponente čine delove složenog mernog sistema.

## 2.1 Mesto TLS metode u inženjerskoj geodeziji

### 2.1.1 Metode merenja u inženjerskoj geodeziji

Geodetske metode merenja, poput tahimetrije, GNSS, terestričke fotogrametrije i preciznog nivelmana su tradicionalno široko zastupljene metode u oblastima geodetskog inženjerstva. Precizni nivelman se široko koristi za potrebe prenosa visina i na dalje se neće razmatrati u kontekstu TLS.

U inženjerskim primenama, tahimetrija, fotogrametrija i GNSS se mogu smatrati kao kompatibilne metode u odnosu na TLS. Ove metode mogu obezbediti 3D modeliranje složenih objekata. Takođe, radarska interferometrija zauzima značajno mesto u savremenoj inženjerskoj geodeziji, pri određivanju digitalnog modela visina, skeniranju ili u deformacionom monitoringu sa velikih rastojanja do objekta osmatranja (Zogg, 2008). Najnovija RIM (*Range IMaging*) tehnologija 3D merenja ovde je pomenuta iako još nije ustanovljena u geodetskom inženjerstvu, obzirom na kratak domet i za sada nedovoljnu tačnost za većinu primena.

Tahimetrija je polarna metoda određivanja 3D koordinata prethodno definisane tačke na objektu, upotrebom totalne stanice (TS). Tačnost merenja je obično visoka, dok je frekvencija merenja niska. Tipičan domet TS u inženjerstvu varira u rasponu od nekoliko centimetara do više stotina metara. Tahimetrija omogućuje obeležavanje objekta.

Satelitske metode merenja u geodeziji kao rezultat daju 3D poziciju, vreme i brzinu kretanja prijemnika. U inženjerstvu se ovom metodom mere izabrane tačke na objektu i vektori između dva ili više prijemnika u postupcima relativnog pozicioniranja.

Terestrička fotogrametrija je metoda koja obezbeđuje da se na osnovu jednog ili više snimaka odredi pozicija tačaka na objektu. Radi se o indirektnoj mernoj metodi, a izvorno se pomoću pasivnog senzora (kamere) prikupljaju podaci o intenzitetu zračenja objekta, najčešće u vidljivom delu spektra. Osnovni podatak je piksel, a zapis digitalni snimak. Tačnost je od ispod jednog milimetra do nekoliko decimetara, a domet u rasponu od nekoliko centimetara do više stotina metara (Zogg, 2008).

RIM je metoda 3D merenja pomoću koje se meri rastojanje u vidnom polju specijalne kamere. Rastojanje se pridružuje svakom pikselu digitalnog snimka (Kahlmann, 2007). Oblak tačaka se generiše na osnovu jedne ekspozicije. Domet se kreće u rasponu od nekoliko decimetara do 50 metara, zavisno od tipa kamere. Tačnost je decimetarska.

Terestrička radarska interferometrija (*ground-based synthetic aperture radar interferometer - SGB-InSAR*) je savremena polarna metoda merenja zasnovana na radarskoj tehnologiji. Radi se o merenju rastojanja na osnovu elektromagnetnog talasa u delu spektra koji pripada mikrotalasima. Merenja se ostvaruju po gridu ili po profilu, linearnim pomeranjem radarskog interferometra po šini i/ili rotiranjem oko vertikalne ose. Primenjuje se u deformacionom monitoringu terena. Vremenska rezolucija se meri u minutima, što čini ovaj metod pogodnim za sisteme za rana upozorenja. Domet je do nekoliko kilometara, a preciznost milimetarska (Casagli, 2010). Mana radarske interferometrije je relativno loša prostorna rezolucija u odnosu na sisteme TLS.

### **2.1.2 Metoda TLS u geodetskom inženjerstvu**

Metoda TLS ne pripada potpuno polarnim metodama merenja niti metodama terestričkog fotogrametrijskog merenja, niti bilo kojoj drugoj metodi. Može se reći da je to posebna metoda geodetskog merenja, a TLS posebna disciplina u okviru geodetske nauke.

Fotogrametrija i lasersko skeniranje imaju zajedničke karakteristike u vidu visoke detaljnosti (masovnosti) prikupljenih podataka geometrijskog karaktera i dodatnih informacija o intenzitetu povratnog zračenja. Intenzitet povratnog zračenja, ukoliko je posledica sopstvene refleksivnosti objekta, može figurisati kao parametar u procesima klasifikacije sadržaja. Često se skeniranoj tački, radi olakšane interpretacije sadržaja, može pridružiti i RGB (*Red Green Blue*) vrednost. Ta informacija je prikupljena digitalnom kamerom koja je integrisani ili dodatni deo većine TLS, ali nije izvorno deo TLS tehnologije. Postupak slikanja prostora se sprovodi nezavisno od skeniranja u posebnoj operaciji koja prethodi ili sledi nakon skeniranja. Najčešće se ovom slikovnom podatku ne pristupa radi potrebe merenja, već se ova informacija uglavnom koristi radi vizuelne interpretacije oblaka tačaka. Otuda se u skenere ne ugrađuju skupe merne

kamere, a kod pojedinih proizvođača postoji mogućnost korišćenja standardnih digitalnih aparata uz njihovu prethodnu kalibraciju (fuzija Riegl skenera i Nikon digitalnih aparata).

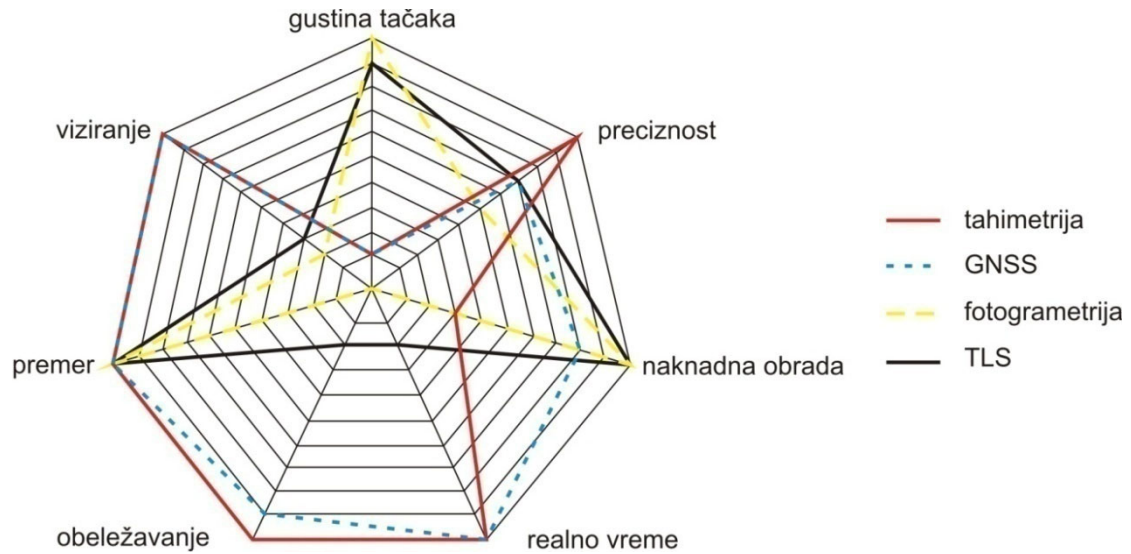
Sa tahimetrijom, odnosno sa totalnom stanicom TLS, ima slično tehničko rešenje pojedinih komponenata, odnos glavnih instrumentalnih osa, kolimacije, kompenzatore i slično. Osnovni princip određivanja koordinata korišćenjem tehnologije TLS se ne razlikuje od principa koji se veoma dugo koristi u geodeziji zahvaljujući klasičnom instrumentariju. Koordinate se određuju polarnom metodom, izvornim merenjem kose dužine, horizontalnog i vertikalnog pravca pojedinačne tačke na objektu.

Dalje razmatranje mesta metode TLS, u svetlu tradicionalno ustanovljenih metoda u inženjerskoj geodeziji, se može vršiti u odnosu na nekoliko različitih aspekata i pogleda relevantnih autora.

Ako se kao kriterijum uzme broj tačaka koji se meri, odnosno gustina tačaka, TLS se tada zajedno sa RIM i terestričkim radarom svrstava odmah iza fotogrametrije, a ispred GNSS i tahimetrije (Wunderlich, 2006).

Luhmann (2002) predlaže klasifikaciju metoda merenja u inženjerskoj geodeziji na osnovu tačnosti i veličine objekta. Različiti TLS uređaji zadovoljavaju različite kriterijume u smislu dometa i tačnosti. Osnovni parametar koji utiče na tačnost i domet skeniranja je metod određivanja rastojanja (poglavlje 2.2).

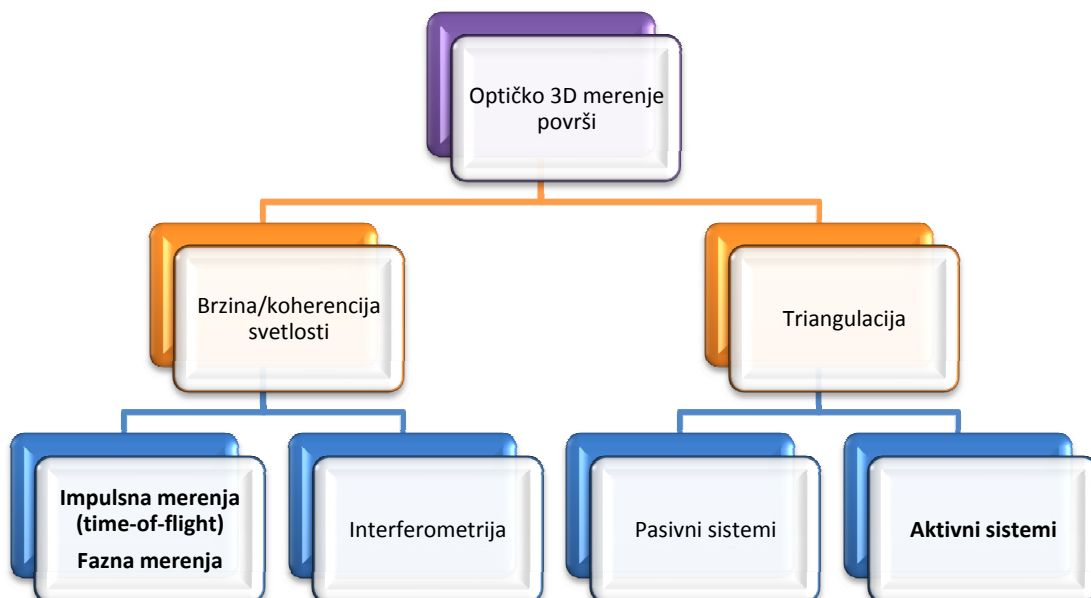
Klasifikacija i potencijal određene metode merenja se može ustanoviti i na osnovu nekoliko važnih parametara, odnosno mogućnosti u vidu: preciznosti, naknadne obrade, dobijanja rezultata u realnom vremenu, obeležavanja, premera, viziranja i gustine tačaka (Slika 2-1). Tako TLS, fotogrametrija, radarska interferometrija i RIM, predstavljaju metode naknadne obrade, odnosno rezultati merenja moraju biti obrađeni i interpretirani nakon realizacije merenja. Ove metode se takođe nazivaju indirektnim metodama za razliku od direktnih, tahimetrije ili GNSS, koje mogu dati rezultate u realnom vremenu i bez obavezne potrebe za naknadnom obradom podataka. Direktne metode merenja imaju i funkcionalnosti poput mogućnosti obeležavanja (Zogg, 2008).



Slika 2-1 Karakteristike metoda merenja u geodetskom inženjerstvu (prema Zogg, 2008)

## 2.2 Osnovni principi laserskog određivanja rastojanja

Sistemi za optičko merenje trodimenzionalne površi se generalno mogu klasifikovati prema metodi merenja, i to na sisteme zasnovane na metodi triangulacije i metode na osnovu brzine ili koherencije svetlosnih talasa (Slika 2-2).



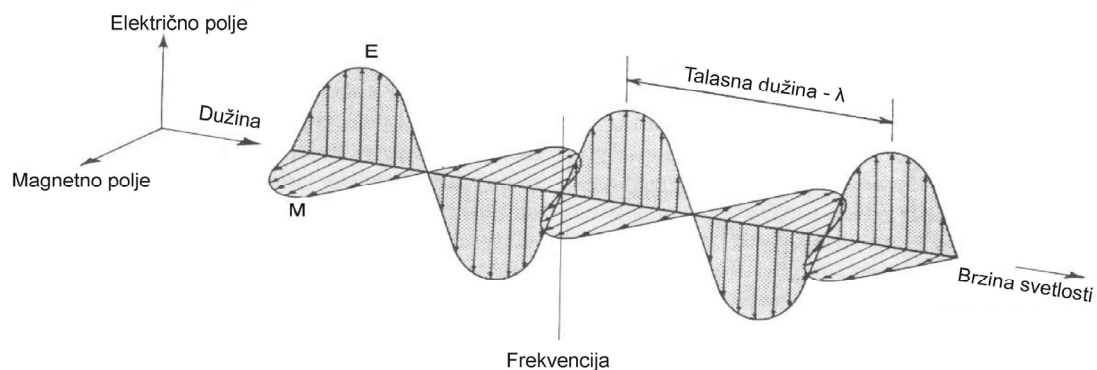
Slika 2-2 Klasifikacija optičkih trodimenzionalnih mernih sistema

Tri osnovna tipa laserskih daljinomera se koriste kod terestričkog laserskog skeniranja. Klasifikacija je uspostavljena na osnovu metoda određivanja rastojanja, a to su metode impulsnog merenja (*DTOF – Direct Time Of Flight*), faznih merenja (*ITOF – Indirect Time Of Flight*) i aktivni sistemi triangulacije. U geodetskom inženjerstvu aktivni sistemi triangulacije se ne koriste zbog veoma malog dometa (do 1 m), tako da dalje nisu razmatrani.

### 2.2.1 Elektromagnetni talasi

Da bi se pravilno razumela svojstva laserskog zraka potrebno je početi od definicije i karakteristika elektromagnetnih (EM) talasa.

Elektromagnetno zračenje se može shvatiti kao energija koja se širi kroz prostor ili materiju u obliku brzih izmena električnog i magnetskog polja koji obrazuju jedan EM talas (Slika 2-3).



Slika 2-3 Komponente elektromagnetne energije (<http://www.geo.mtu.edu>)

EM energija je sadržana u harmonijskim izmenama električnog i magnetnog polja talasa koje se javljaju u jednakim vremenskim intervalima. Njihova klasifikacija se vrši prema talasnim dužinama, frekvencijama ili prema spektralnom opsegu kome pripadaju. Za kretanje EM talasa kroz prostor važi opšti zakon talasnog kretanja:

$$C = \lambda \cdot f, \quad [2.1]$$

pri čemu je:

$C$  – brzina svetlosti ( $2.988 \times 10^8$  m/s u vakuumu),

$\lambda$  – talasna dužina, definisana kao rastojanje između susednih maksimuma ili minimuma talasa  $i$

$f$  – učestalost ili frekvencija talasa, određena kao broj celih oscilacija talasa u sekundi.

Talasne dužine EM talasa variraju u velikom rasponu. Skup zračenja determinisanih svojim talasnim dužinama naziva se spektar. Spektar EM energije se deli na više područja sličnih karakteristika. Tabela 2-2 prikazuje delove spektra EM zračenja sa odgovarajućim vrednostima talasnih dužina ( $\lambda$ ).

**Tabela 2-2 Spektar EM zračenja**

DEO SPEKTRA		$\lambda(\mu\text{m})$
$\gamma$ i $\chi$ zraci		< 0,00001
Ultraljubičasti (UV)	Daleki	0.01-0.2
	Srednji	0.2-0.3
	Bliski	0.3-0.4
Vidljivi deo		0.4-0.7
Infracrveni (IC)	Bliski	0.7-3
	Srednji	3-50
	Daleki	50-1000
Mikrotalasi		> 1000

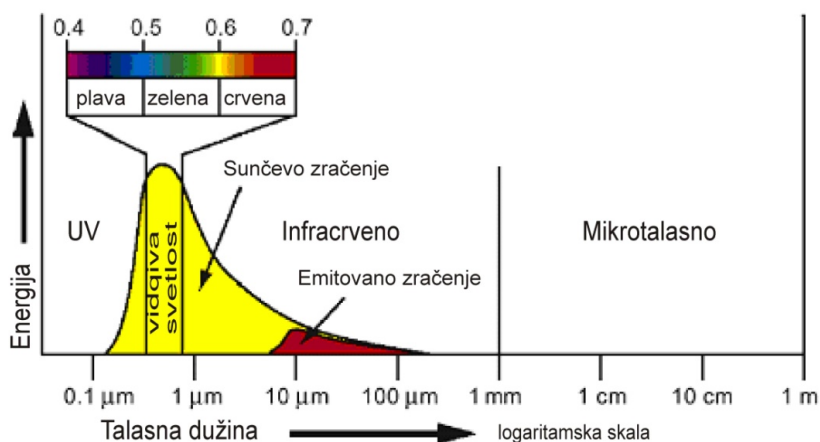
Zraci iz područja  $\gamma$  i  $\chi$  zračenja imaju malu prodornost kroz atmosferu pa su neupotrebljivi za tehnologiju TLS. Ultraljubičasti ili ultravioletni (UV) zraci, talasnih dužina od 0.01 do 0.4  $\mu\text{m}$ , takođe nemaju veći značaj jer je njihovo prodiranje kroz atmosferu nepostojeće, sem u bliskom delu UV spektra, gde se sprovode eksperimenti, za sada bez značajnijih rezultata.

Vidljiva svetlost je takođe oblik EM energije. U ovom delu spektra, poznatom kao bela svetlost, razlikuje se više boja, od ljubičaste do crvene, a osnovne boje čine plava, crvena i zelena. Granice ovog spektra su uspostavljene na osnovu osetljivosti ljudskog oka na ovo zračenje. Izvor EM energije vidljivih zraka potiče direktno od Sunca ili je izazvan veštačkim putem. Regstruje se optičkim sensorima. Njihova prodornost kroz atmosferu je visoka (Slika 2-4), zbog čega za geodetske potrebe uopšte, a naročito u



tehnologiji TLS, ovo predstavlja najprimenjeniji opseg spektralnog zračenja. TLS u najvećem broju slučajeva emituju laserski zrak u granicama zelenog ili blisko infracrvenog opsega.

Područje infracrvenog zračenja (IC) obuhvata bliski, srednji i daleki deo. Prema izvoru zračenja može biti emitovano i reflektovano. Prodornost IC zračenja kroz atmosferu je visoka za talasne dužine od 8-14  $\mu\text{m}$ . Za TLS tehnologiju IC zračenje ima praktični značaj i ogleda se i u konstrukciji specijalnih IC skenera sa sensorima osetljivim na toplotu. Pri registraciji termalnog IC zračenja objekata, reflektovano IC zračenje Sunca u izvesnoj meri ometa registraciju sopstvenog zračenja (Slika 2-4), što je činjenica koja se mora uzimati u obzir naročito prilikom sunčanih dana.



Slika 2-4 Spektar elektromagnetne energije u prirodi ([www.nrcan.gc.ca](http://www.nrcan.gc.ca))

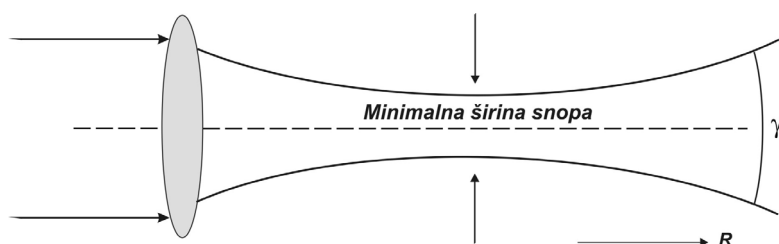
Mikrotalasno zračenje može biti prirodno (emitovano sa tela) koje se detektuje radiometrom ili emitovano veštački koje se registruje pomoću radara. Prodornost ovih talasa kroz atmosferu je veoma visoka, veća i od vidljive svetlosti. Mikrotalasni zraci mogu prodirati kroz krošnje drveća i kroz plitke naslage na površi terena. Ova pogodnost radara je u izvesnoj meri ograničena usled registrovanja nejasnih kontura objekata snimanja. Mikrotalasna tehnika snimanja objekata ima veliku perspektivu.

### 2.2.2 Laser

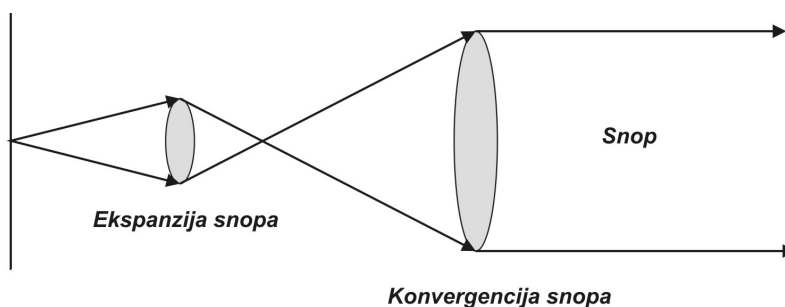
Signali pomoću kojih se određuje rastojanje, koji mogu biti u vidu impulsa ili harmonika, utisnuti su u EM talase modulacijom njihovog intenziteta. Laser (*Light*

*Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) emituje vrlo intenzivnu monohromatsku radijaciju koja se kreće u okviru vrlo uskog EM opsega talasnih dužina. U tehnologiji TLS talasne dužine variraju od 500 nm (zelena) do 800 nm (bliska infracrvena) (Beraldin i dr., 2010).

Emitovani laserski snop na svom putu do objekta ne zadržava konstantnu širinu. Najpre, snop konvergira ka svom minimalnom obimu (*beam waist*). To mesto je obično locirano na određenom kraćem rastojanju od emitera (Slika 2-5). Nakon toga snop divergira inverzno proporcionalno svom minimalnom obimu, odnosno što je manji minimalni obim, veća je divergencija snopa. Zbog toga se obim snopa najpre povećava u proširivaču snopa koji u stvari predstavlja inverzni teleskop koji se sastoji od sočiva kratke žižne daljine. Zatim, snop konvergira pomoću sočiva velike žižne daljine (Slika 2-6).



Slika 2-5 Minimalna širina i ugao divergencije laserskog snopa  $\gamma$  (prema Schulz, 2007)



Slika 2-6 Ekspanzija i konvergencija laserskog snopa (prema Reshetyuk., 2009)

Neproširen poluprečnik laserskog snopa  $\omega(R)$  pri rastojanju od emitera (skenera)  $R$  može se predstaviti na osnovu izraza (Beraldin i dr., 2010):

$$\omega(R) = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda R}{\pi \omega_0^2} \right)^2}, \quad [2.2]$$

pri čemu je  $\omega_0$  poluprečnik minimalne širine snopa. Poluprečnik proširenog snopa  $\omega_p$  iznosi (Beraldin i dr., 2010):

$$\omega_p(R) = \frac{f_1}{f_2} \omega(R), \quad [2.3]$$

dok su  $f_1$  i  $f_2$  žižne daljine divergentnog i konvergentnog sočiva (Slika 2-6). Prečnik laserskog snopa na objektu skeniranja  $D$  može se izvesti na osnovu jednačine [2.2], ili iz pojednostavljene relacije (Baltsavias, 1999):

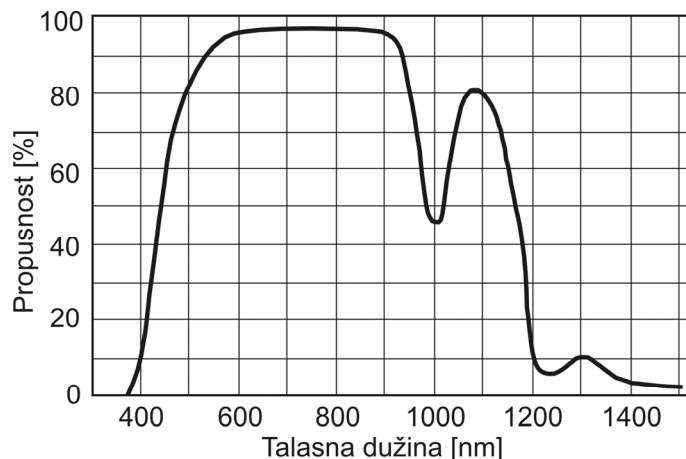
$$D = 2R \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \approx R\gamma, \quad [2.4]$$

pri čemu je  $\gamma$  ugao divergencije laserskog snopa (Slika 2-5). Kod TLS ugao divergencije je uglavnom manji od vrednosti 1 mrad.

Veličina obima laserskog zraka na objektu skeniranja je jedna od važnijih karakteristika TLS. U tehničkim specifikacijama pojedinih skenera, ponekad se ne može doći do tog podatka. Skener Leica Scan Station C10 ima obim laserskog snopa od 6 mm/50 m, Riegl LMS-Z420i od 13 mm/50 m, I-SiTE 4400 od 120 mm/50 m i Riegl LMS-Z210i od 150 mm/50 m.

### **2.2.2.1 Bezbednost laserskog zraka**

Veoma važan aspekt korišćenja laserskog uređaja je njegova potencijalna štetnost. Usled svoje snage, laseri mogu biti štetni za ljudske oči, a u ekstremnim slučajevima i za kožu i druge organe. Zavisno od talasne dužine lasera, različite strukture oka mogu biti izložene štetnom zračenju. Kod geodetskih instrumenata i sličnih mernih uređaja, na osnovu štetnosti po ljudsko oko, laseri su kategorisani u četiri osnovne grupe. Za vidljivi deo i mali deo infracrvenog spektra oko ima gotovo 100 % karakteristike transmisije (Slika 2-7).



Slika 2-7 Propusnost ljudskog oka za EM talase (prema Schulz, 2007)

Procedura klasifikacije lasera je definisana i ustanovljena preporukama Američke Internacionalne elektrotehničke komisije (International Electrotechnical Commission – IEC). U narednoj tabeli su prikazane različite klase lasera i njihove opisne karakteristike (IEC, 2007).

Tabela 2-3 Klasifikacija lasera u skladu sa IEC 60825-1 standardom

Klasa	Opis
1	Bezbedno po oči pri svim uslovima eksploatacije.
1M	Sigurno za direktno gledanje golim okom, ali može biti štetno za gledanje uz pomoć mikroskopa i teleskopa. Laseri iz ove klase proizvode široke ili divergirajuće snopove. Ukoliko se zrak refokusira uz pomoć optike može se desiti da se poveća opasnost po oči i da se klasa lasera promeni u višu. Laseri se mogu klasifikovati kao 1M ako je maksimalna snaga ispod one koja važi za klasu 3B.
2	Ovde spadaju vidljivi laseri. Ova klasa je sigurna za slučajno gledanje pod svim uslovima eksploatacije. Ipak, moguće je da nije sigurna za namerno izlaganje oka laseru u periodu dužem od 0.25 s, ukoliko se prenebregne prirodna osobina očnog refleksa na veoma jak izvor svetlosti.
2M	Ovde spadaju vidljivi laseri. Ova klasa je sigurna za slučajno gledanje golim okom sve dok se ne zanemaruje njegova prirodna averzija, kao kod klase 2. Oštećenja mogu nastati čak i prilikom slučajnog pogleda ako se koriste optički instrumenti, kao kod klase 1M.
3R	Radijacija kod ove klase je kategorisana kao manje rizična, ali sa mogućnošću oštećenja. Vidljivi kontinualni laseri su ograničeni snagom od 5 mW.
3B	Laseri iz ove klase lako mogu biti opasni po vid. Vidljivi kontinualni laseri od 315 nm pa naviše, u ovoj klasi su ograničeni snagom od 5 mW. Pulsni laseri talasne dužine između 400 nm i 700 nm su ograničeni na 30 mW. Zračenje može biti opasno i po kožu. Difuzno reflektovano zračenje ne predstavlja opasnost.
4	Ovo je najviša klasa po opasnosti po oštećenja organa. Zračenje je vrlo opasno, a gledanje i u difuzno zračenje može biti opasno. Zrak lasera iz klase 4 može dovesti do zapaljenja materijala na koji se projektuje.

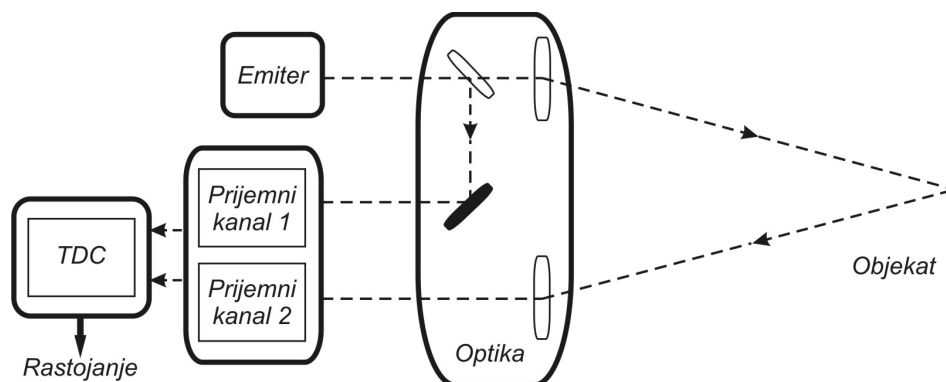
Većina laserskih skenera pripadaju klasi 3, kao npr. HDS Leica Geosystems (Švajcarska), Trimble (SAD), Zoller+Fröhlich GmbH (Nemačka), FARO Technologies Inc. (SAD), I-Site Pty Ltd. (Australija), 3rd Tech Inc. (SAD). Laserski skeneri Callidus Precision Systems GmbH (Nemačka), Optech Inc. (Kanada) i Riegl Laser Measurement Systems GmbH (Austrija) i Leica Scanstation P20 su svrstani u klasu 1.

Za TLS novije generacije, usled velike brzine skeniranja, laserski zrak, ma koliko bio štetan, ne može dovoljno dugo da ima interakciju sa očima da bi izazvao oštećenja. Međutim, u pojedinim fazama skeniranja, poput detaljnog skeniranja skenerskih signala, treba biti oprezan.

### 2.2.3 Impulsna “time of flight” merenja

U geodetskim primenama, terestrički i avio laserski skeneri najčešće koriste impulsne lasere ili DTOF optičke 3D uređaje za određivanje rastojanja do objekta. Krajnji domet lasera kreće se od 400 m do 1500 m. Šum pojedinačnog merenja se kreće u rasponu od 2 mm do 5 mm na 50 m dužine.

Tipičan uređaj se sastoji od odašiljača, optike, dva prijemna kanala i pretvarača vremena u digitalni oblik (*Time to Digital Converter – TDC*) (Slika 2-8).



Slika 2-8 Princip određivanja rastojanja kod „time-of-flight“ daljinomera

Fundamentalna eksperimentalna istraživanja je obavio Heinrich Hertz krajem 19. veka koristeći radio talase. Danas postoje mnogi sistemi, naročito satelitski, koji skeniranje vrše po principu radara. Tek 50-ih godina dvadesetog veka konstruisani su prvi laseri koji su koristili svetlost, uz značajno poboljšanje rezolucije skeniranja u odnosu na

radarske sisteme. Teorijski princip je identičan kod oba sistema koja koriste različite opsege elektromagnetne energije, uz različite funkcionalne karakteristike, a samim tim i različite primene.

Osnovna karakteristika svetlosnog talasa je konstantna brzina prostiranja kroz određenu homogenu sredinu. Osnovna merna veličina je vreme putovanja laserskog impulsa, odnosno vremenskog kašnjenja signala. Impuls se emituje sa poznatom brzinom prostiranja, reflektuje se od objekta i detektuje. Na osnovu određenog vremenskog intervala  $\tau$  od emitovanja do detekcije određuje se rastojanje  $\rho$  (Beraldin i dr., 2010):

$$\rho = \frac{c \tau}{n 2}. \quad [2.5]$$

Brzina prostiranja svetlosti  $c$  u vakuumu iznosi 299 792 458 m/s. Obzirom da se svetlost kreće kroz atmosferu, potrebno je uzeti u obzir faktor korekcije koji je jednak indeksu prelamanja koji zavisi od temperature, pritiska i vlažnosti. Taj indeks  $n$  je približno jednak vrednosti 1.00025 (Beraldin i dr., 2010).

U realnim uslovima terenskog merenja često se registruje više od jednog povratnog signala. Intenzitet ove pojave zavisi od karakteristika radilišta, a posebno je izražen pri skeniranju vegetacije, providnih objekata ili kada zrak padne na ivicu objekta. Stoga sistemi za terestričko lasersko skeniranje mogu biti opremljeni za registrovanje višestrukih signala (*multiple echo*), što omogućuje kreiranje algoritama za određivanje najverovatnijeg rastojanja do objekta.

Osnovne karakteristike emitovanog impulsa su širina impulsa  $t_s$ , vreme rasta impulsa  $t_r$ , vreme opadanja intenziteta  $t_o$  i amplituda  $A$  ( Slika 2-9a.). Na primer, ako širina impulsa iznosi oko  $t_s = 5$  ns, to pri poznatoj brzini svetlosti odgovara dužini od oko 1.5 m. Vreme rasta i opadanja impulsa tada iznosi oko 1 ns, što je ekvivalentno dužini od oko 0.3 m.

Odnos između rastojanja  $\rho$  od skenera do tačke na objektu i vremena putovanja laserskog zraka  $\tau$ , može se izvesti na osnovu izraza [2.5]:

$$\tau = n \frac{2\rho}{c}. \quad [2.6]$$

Ako se pretpostavi da se od jednog emitovanog impulsa  $I_1$  mogu generisati dva ili više eha  $E$  pri dužini  $\rho$ , različite dužine  $\rho$  mogu biti određene samo ako su eho  $E_{11}$  i  $E_{22}$  razdvojeni, odnosno da nema preklapanja (Slika 2-9). Ovo takođe znači da je:

$$\tau^{12} \geq \tau^{11} + t_s. \quad [2.7]$$

Iz prethodnih odnosa između  $\tau$  i  $\rho$  može se napisati izraz u kome figuriše dužina impulsa  $l_p$ :

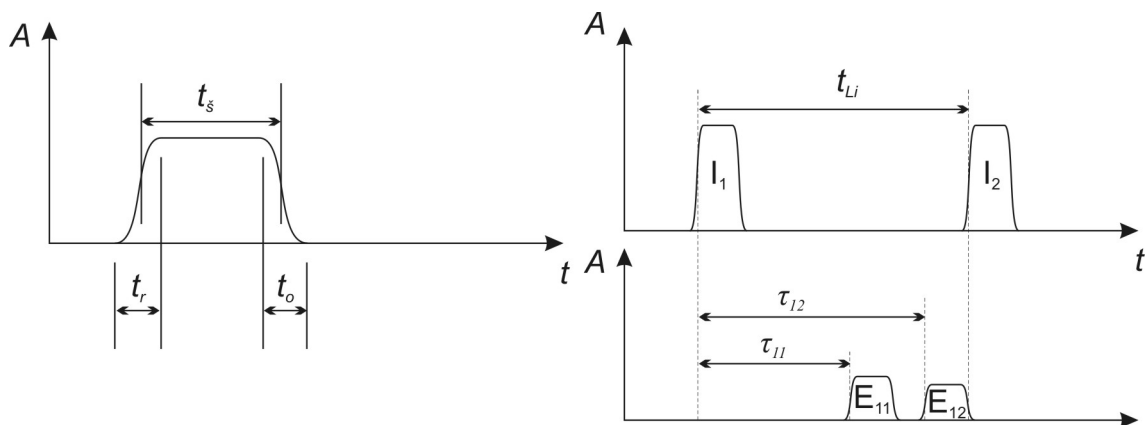
$$t_p = \frac{n}{c} l_p. \quad [2.8]$$

Na osnovu izraza [2.7] i [2.8], može se napisati:

$$2 \frac{n}{c} \rho^{12} - 2 \frac{n}{c} \rho^{11} \geq \frac{n}{c} l_p, \quad [2.9]$$

$$\rho^{12} - \rho^{11} \geq \frac{1}{2} l_p.$$

Dva eha koji potiču od jednog impulsa mogu biti detektovani samo ako je njihova razdaljina veća od polovine dužine impulsa  $l_p$ , odnosno u ovom primeru za  $t_s = 5$  ns to iznosi 0.75 m. Ova činjenica ima značajan uticaj na kvalitet podataka, a posebno na efekat izmešanih piksela (poglavlje 4.1.1.3)



Slika 2-9 Karakteristike laserskog impulsa i princip određivanja rastojanja (prema Beraldin i dr., 2010)

Veoma važan aspekt TOF merenja je metod registracije povratnog signala na osnovu koga se određuje vreme za koje se laserski zrak vrati do detektora i određuje rastojanje. Razlika u metodama detekcije je u načinu registrovanja određenih karaktera impulsa, i to (Beraldin i dr., 2010):

- Detekcija maksimuma. Podrazumeva registrovanje vremenskog trenutka kada amplituda eho signala dostigne svoju maksimalnu vrednost - pik. TOF je određen kao razlika trenutaka kada emitovani impuls dostigne pik i trenutka kada registrovani eho dostigne pik. Problem se može javiti u slučaju da jedan povratni eho poseduje više maksimuma, i tada se javlja šum.
- Metoda praga eho signala. Impuls detektora se generiše u onom trenutku kada rast jačine eho signala dostigne određenu predefinisanu vrednost. Nedostatak ove metode je u tome što određivanje TOF značajno zavisi od amplitude eho signala.
- Detekcija konstantne frakcije signala. Podrazumeva generisanje impulsa u onom trenutku kada eho signal dostigne unapred određeni prag u odnosu na očekivanu maksimalnu vrednost amplitude (obično 50%). Nedostatak ove metode je u činjenici da je on nezavisan od realne eho amplitude.

Detekcija konstantne frakcije signala predstavlja kompromis i najviše je zastupljena kod TLS. Standardno odstupanje rastojanja za svaki generisani impuls je razmatrano u poglavlju 4.1, koje tretira instrumentalne izvore grešaka TLS.

#### **2.2.4 Fazne metode laserskog merenja**

Pored tehnike određivanja rastojanja na osnovu generisanja više kratkih impulsa, rastojanje se može odrediti modulacijom amplitude kontinualnog talasa (*AMCW – Amplitude-Modulated Continuous Wave*) i modulacijom frekvencije kontinualnog talasa (*FMCW – Frequency-Modulated Continuous Wave*). Glavna prednost ovih sistema u odnosu na impulsne je u većim brzinama skeniranja, ali uz manji maksimalni domet.

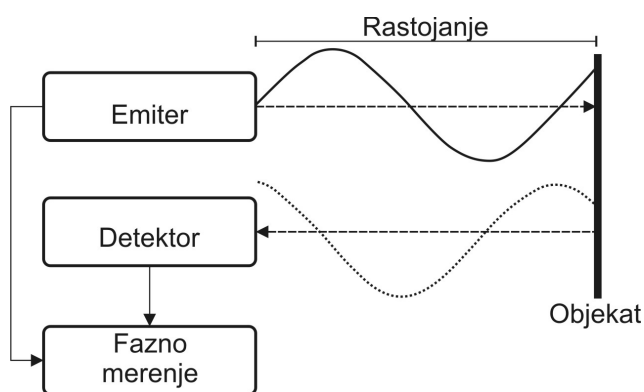


### 2.2.4.1 AMCW tehnika određivanja rastojanja

Ako se moduliše sinusoidni ili pravougli signal na noseći kontinualni signal laserske svetlosti, onda je vreme putovanja direktno proporcionalno faznom pomeraju između detektovanog i emitovanog signala. Dužina između emitera i objekta ( $d$ ) se može sračunati na osnovu relacije (Beraldin i dr., 2010):

$$d = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \cdot T, \quad [2.10]$$

pri čemu je:  $T$  – period modulisanog signala,  $c$  – brzina svetlosti kroz datu sredinu i  $\varphi$  – fazna razlika između detektovanog i emitovanog signala.



Slika 2-10 AMCW određivanje rastojanja – detekcija fazne razlike (prema Schulz, 2007)

Jednoznačnost određivanja rastojanja na osnovu izraza [2.10] je moguća samo ako je rastojanje do objekta manje od polovine talasne dužine modulisanog signala. Obzirom da u realnosti to nije slučaj javlja se neodređenost celobrojnih talasnih dužina  $N$ , a stvarno rastojanje  $s$  se određuje na osnovu (Beraldin i dr., 2010):

$$s = \frac{1}{2} \left( N\lambda + \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right), \quad [2.11]$$

pri:

$$\lambda = c \cdot T. \quad [2.12]$$

Rezolucija merenja rastojanja  $\Delta d$  na osnovu AMCW tehnike je data izrazom (Beraldin i dr., 2010):

$$\Delta d = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{c}{f} \cdot \Delta\varphi. \quad [2.13]$$

Ova rezolucija zavisi od preciznog utvrđivanja fazne razlike  $\Delta\varphi$  i od frekvencije  $f$  modulisanog signala. Pouzdanost određivanja rastojanja zavisi od frekvencije signala. Za određivanje većih rastojanja koristi se nekoliko frekvencija. Kod tehnologije TLS ovom tehnikom se mogu relativno pouzdano meriti dužine do 100 m, obzirom da intenzitet modulisanog signala opada do momenta kada se fazni pomeraj  $\Delta\varphi$  ne može sa sigurnošću utvrditi.

Tipične frekvencije TLS sa AMCW metodom određivanja rastojanja se kreću od 10 kHz do 625 kHz. Nedostatak je to što svako fazno merenje daje jedan rezultat, za razliku od impulsnih merenja gde se može analizirati prvi i poslednji impuls.

Standardno odstupanje rastojanja određenog AMCW metodom je razmatrano u poglavlju 4.1, koje se bavi instrumentalnim izvorima grešaka TLS.

#### **2.2.4.2 FMCW tehnika određivanja rastojanja**

Modulacija frekvencije kontinualnog talasa je zasnovana na moduliranju signala variranjem frekvencije. Emitovani signal je moduliran sinusnim talasom, a variranjem frekvencije on se meša sa reflektovanim signalom. Rastojanje se određuje merenjem rezultujuće frekvencije  $B$  (*beat frequency*) koja predstavlja broj tzv. udara u sekundi sa periodom  $T$ . Rastojanje je proporcionalno maksimalnoj frekvenciji  $B$ , a obrnuto proporcionalno razlici frekvencija emitovanog i reflektovanog signala  $\Delta f$  (Beraldin i dr., 2010):

$$s = \frac{c}{2} \cdot \frac{BT}{2\Delta f}. \quad [2.14]$$

Standardno odstupanje merenja rastojanja FMCW metodom se razmatra u poglavlju 4.1.

### **2.2.5 Kombinacija impulsnih i faznih merenja**

Svaka od opisanih tehnika laserskog merenja rastojanja ima svoje prednosti i nedostatke. U novije vreme, kombinovanjem metoda elektrooptičkog merenja nastoji se da se poboljšaju operativne karakteristike u okviru jednog TLS uređaja. Na primer, kod Trimble CX TLS kombinuju se metode impulsnog i faznog merenja. Ovakav sistem može da omogući veći domet ili bolju preciznost. Takođe, merenja do čvrstih objekata izvode se impulsnim DTOF merenjima, a u uslovima magle, kiše ili snega pomoću faznih merenja. Ova kombinacija mernih tehnika rastojanja je tradicionalno primenjena u elektrooptičkim daljinomerima na totalnim stanicama. Predstavlja smer u kojem će se budući geodetski TLS najverovatnije razvijati.

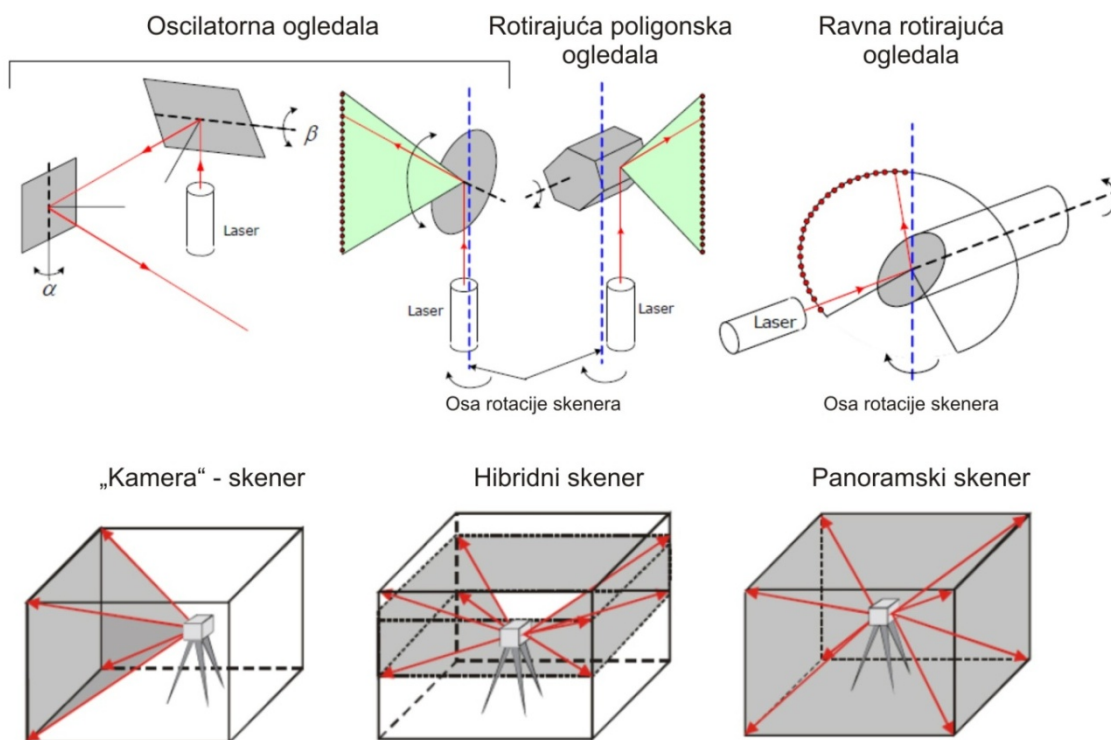
## **2.3 Sistem za divergenciju laserskog snopa i merenje vrednosti pravaca**

Za dobijanje potpune 3D informacije o objektu, pored izmerenog rastojanja potrebno je registrovati i uglovne vrednosti dva pravca. Dakle, potreban je sistem koji će da obezbedi skeniranje površi, odnosno sistem koji će divergirati (skretati) laserski zrak za određenu uglovnu vrednost po dve upravne ose (horizontalne i vertikalne).

### **2.3.1 Uređaj za divergenciju laserskog snopa**

Postoje različita rešenja sistema za skretanje laserskog snopa (*beam deflection unit*), a u tehnologiji TLS najčešće se javljaju tri osnovna tipa: oscilatorna ogledala, rotirajuća poligona ogledala i ravna rotirajuća ogledala (Slika 2-11). Od tipa ogledala zavisi i vidno polje skeniranja.

TLS kod koga se sistem oscilatornih (galvanometrijskih) ogledala sastoji od dva ravna ogledala koja osciliraju oko horizontalne i vertikalne ose skenera, često se zove i „kamera“ skener (Slika 2-11). Svako ogledalo oscilira konstantnom frekvencijom između svoje maksimalne i minimalne uglovne pozicije. Glava skenera (laser) je nepomična u toku skeniranja. Vidno polje je relativno ograničeno. Na primer kod TLS Leica HDS2500 na opseg  $40^{\circ} \times 40^{\circ}$ .



Slika 2-11 Gore: Tipovi uređaja za divergenciju laserskog snopa kod TLS. Dole: Odgovarajući tipovi vidnog polja TLS (prema Reshetyuk, 2009)

Hibridni skeneri, za skretanje snopa u vertikalnom smislu, koriste ili oscilirajuća ravna ili rotirajuća poligonska (prizma) ogledala (Slika 2-11). Za otklon laserskog zraka u horizontalnom smislu, pomoću servo motora glava skenera se okreće oko vertikalne ose. Skeniranje se vrši sukcesivno. Pomoću ogledala se skenira linija na vertikalnom pravcu, a zatim glava skenera izvrši unapred definisani zaokret oko vertikalne ose, nakon čega se skenira naredna linija, itd. Na ovaj način moguće je obuhvatiti svih  $360^\circ$  vidnog polja u horizontalnoj ravni. Vertikalno vidno polje kod ovih skenera je oko  $60^\circ$  (Reshetyuk, 2009).

Oscilatorna ogledala se koriste kod „hibridnih“ i „kamera“ skenera. Ravna su i osciliraju konstantnom brzinom. Komparativno posmatrano, ova ogledala su spora i omogućuju ograničeno vidno polje. Obično se koriste kod impulsnih TOF skenera manje brzine, odnosno brzina skeniranja je tada ograničena i frekvencijom generisanja ponovnog laserskog impulsa. Tipični predstavnici su dva uređaja različite generacije: Leica HDS3000 i Leica ScanStation 2 (Tabela 2-1).

Rotirajuća poligona ogledala su veoma brza, i mogu obezbediti vertikalno vidno polje i do  $90^\circ$ . Na primer, impulsni TLS Riegl VZ-400 (Tabela 2-1) koristi ovaj tip ogledala sa maksimalnim vertikalnim vidnim poljem od  $100^\circ$  i brzinom skeniranja i do 122.000 tačaka u sekundi.

Panoramski skener karakteriše vertikalni otklon laserskog zraka pomoću ravnog rotirajućeg ogledala (monogon ogledalo), a horizontalni pomoću servo motora u malim pomerajima, kao kod hibridnog skenera (Slika 2-11). Nazivaju se panoramskim obzirom da mogu obuhvatiti skoro celo vidno polje ( $360^\circ$  horizontalno i skoro  $360^\circ$  vertikalno), a ograničenje podrazumeva samo oblast postolja i nogara instrumenta. Ovakvo rešenje omogućuje veoma velike brzine skeniranja i koristi se najčešće kod faznih TLS zbog odgovarajuće brzine merenja rastojanja na osnovu kontinualnog talasa.

Važno je napomenuti da se na osnovu specifikacije proizvođača ne može sa sigurnošću uvek utvrditi koji je sistem skretanja snopa primenjen. Impulsni TLS Leica ScanStation C10 koristi „vertikalno rotirajuća ogledala na horizontalnoj rotirajućoj osnovi“, ostvaruje brzinu od 50 000 tačaka u sekundi uz vertikalno vidno polje od  $270^\circ$ . Iz specifikacije proizvođača nije jasno o kom se sistemu konkretno radi, odnosno nije jasno da li su u pitanju poligona ili ravna ogledala, odnosno da li je u pitanju panoramski ili hibridni skener.

### **2.3.2 Sistem za merenje vrednosti pravca**

Vrednost horizontalnog i vertikalnog pravca laserskog zraka se meri elektrooptički pomoću enkodera. Kod TLS se primenjuju slični enkoderi kao kod totalnih stanica. Stakleni luk se kodira po obrascu naizmenične providne i neprovidne oblasti. Upadna svetlost lasera sa unutrašnjeg izvora pada na luk, zatim foto dioda pretvara reflektovanu ili propuštenu svetlosnu energiju u električni signal. Ovaj analogni signal se zatim pretvara u digitalni koji se čita kao decimalni zapis (Shulz, 2008).

Generalno, u geodetskim instrumentima koristi se princip apsolutnog (binarnog) i relativnog (inkrementalnog) pretvaranja. Binarno pretvaranje je široko zastupljen metod u tehnologiji TLS, ali je ograničeno rezolucijom do desetak lučnih sekundi. Iz ovog

razloga, za skenere koji se koriste za visokoprecizna merenja u inženjerskoj geodeziji, potrebno je primeniti princip inkrementalnog pretvaranja. Referentna pozicija nije označena na luku, pa tako mogu biti merene samo relativne pozicije. Svetlost sa izvora pada na providne ili neprovidne sekcije na luku. Količina registrovane svetlosti zavisi od rotacije, a promene su skoro sinusoidne. Periodi sinusoide se broje, pa se može utvrditi brzina rotacije. Ova vrsta pretvaranja zahteva inicijalizaciju sistema. Kod binarnog pretvaranja, vrednost pravca se određuje apsolutno u odnosu na fizički označenu poziciju na staklenom luku. Svetlost prolazi kroz označene delove koji su obeleženi brojem binarnog koda.

Sistem za skretanje laserskog zraka i sistem za registrovanje te vrednosti posredno odlikavaju prostornu rezoluciju oblaka tačaka. Ograničena je već pomenutim sistemima za skretanje laserskog snopa i metodama merenja te vrednosti.

Praktično ograničenje ovog sistema je i u odnosu na jednu naizgled potpuno nevezanu karakteristiku TLS. Naime, radi se o veličini obima laserskog zraka na objektu, koji obično iznosi od nekoliko milimetara na 50 m, pa i do 150 mm/50 m za TLS dalekog dometa. Očigledno je da i korelacija između ovih veličina mora postojati prilikom konstrukcije sistema TLS, odnosno figuriše kao karakteristika pojedinog TLS.

### 3 Matematički model skeniranja i modeli registracije i georeferenciranja

Terestrički laserski skeneri funkcionišu na sličan način kao totalne stanice. TLS metoda snimanja je po osnovnim jednačinama opažanja praktično identična polarnoj (tahimetrijskoj) metodi snimanja detalja. Rezultati merenja rastojanja pomoću TLS odgovaraju rastojanjima kod totalne stanice, dok horizontalni i vertikalni otklon laserskog zraka odgovara horizontalnom i vertikalnom uglu vizure kod teodolita. Generalno, u procesu prikupljanja podataka ono što predstavlja razliku između ova dva instrumenta je veoma velika brzina prikupljanja podataka TLS, i sa druge strane visoka tačnost pojedinih totalnih stanica (standardno odstupanje rezultata merenja dužine, horizontalnog pravca i vertikalnog ugla).

#### 3.1 Osnovne matematičke relacije opažanja

Rezultati merenja kod TLS su kosa dužina  $\rho$ , horizontalni pravac  $\theta$ , vertikalni ugao  $\alpha$  i intenzitet registrovanog zračenja  $I$ . U geometrijskom smislu, skeniranjem objekta nastaje skup tačaka velike gustine i pravilnog rasporeda koji se naziva *oblak tačaka*. Stoga svaka tačka u oblaku tačaka je jednoznačno definisana trima sfernim koordinatama  $\rho$ ,  $\theta$  i  $\alpha$ . Principijelno gledano, to je izvorni rezultat opažanja odnosno tzv. „sirov podatak“. Međutim, u praksi kod komercijalnih TLS sistema rezultatima se smatraju pravouglo koordinata  $(x, y, z)$  i intenzitet registrovanog zračenja  $I$ .

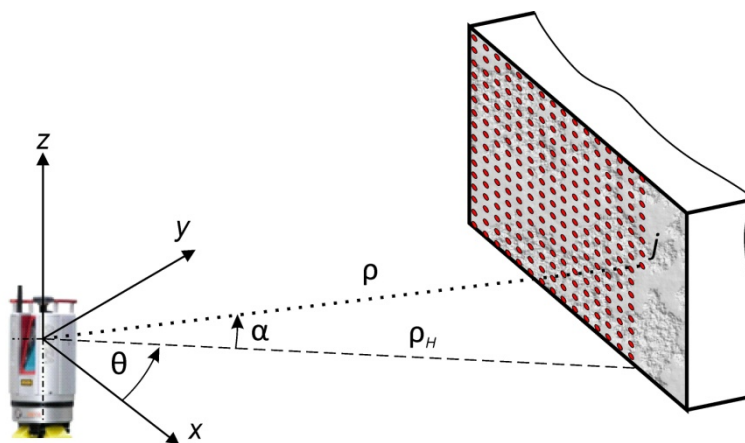
Poznati odnos između sfernih i pravougljih koordinata glasi:

$$\begin{aligned}x_j &= \rho_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij}, \\y_j &= \rho_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij}, \\z_j &= \rho_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij},\end{aligned}\tag{3.1}$$

ili obratno:

$$\begin{aligned}\rho_{ij} &= \Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2, \\ \alpha_{ij} &= \arcsin \frac{\Delta z_{ij}}{\rho_{ij}}, \\ \theta_{ij} &= \arctan \frac{\Delta z_{ij}}{\Delta x_{ij}},\end{aligned}\tag{3.2}$$

pri čemu se indeks  $i$  odnosi na skener, a indeks  $j$  na tačku na objektu.



Slika 3-1 Princip skeniranja i rezultati merenja kod terestričkog laserskog skeniranja

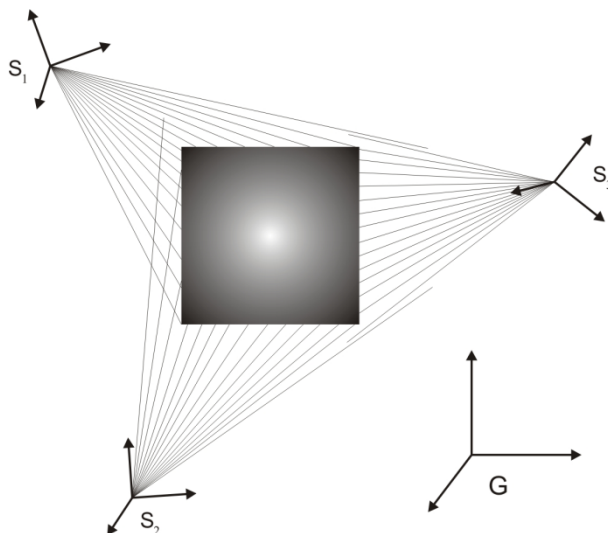
Na ovaj način dobija se model objekta u vidu oblaka tačaka u koordinatnom sistemu (KS) skenera, sa geometrijskim ishodištem u elektrooptičkom centru skenera. Kod stacionarnih TLS, tokom procesa prikupljanja podataka, objekat i TLS se smatraju fiksnim u prostoru. KS skenera je potpuno definisan ako je definisano da se  $z$ -osa poklapa sa vertikalnom obrtnom osom skenera, da se  $x$ -osa poklapa sa instrumentalnom optičkom osom u horizontalnoj ravni sa vrednošću inicijalnog direkcionog ugla, a da je  $y$ -osa uprava na prethodne dve ose, tako da se formira tzv. sistem desne ruke.

### 3.2 Registracija i georeferenciranje oblaka tačaka

Postupci registracije i/ili georeferenciranja oblaka tačaka su značajan korak u obradi podataka terestričkog laserskog skeniranja. U kontekstu zadovoljavajuće geometrije podataka skeniranja, odnosno 3D pozicione tačnosti oblaka tačaka, ovi postupci, osim karakteristika instrumenta, igraju presudnu ulogu, te im se stoga mora posvetiti posebna pažnja, naročito u radovima u geodetskom inženjerstvu.



U realnoj situaciji, objekat se zbog prepreka i svojih dimenzija skenira sa više stajanih tačaka. Takođe, u inženjerskoj geodeziji je obavezno uspostaviti kontrolnu mrežu objekta. Stoga KS objekta treba da bude u određenom, prethodno definisanom KS.



Slika 3-2 Odnos KS skenera ( $S_1$ ,  $S_2$  ili  $S_3$ ) i KS kontrolne mreže  $G$  (Eling, 2009)

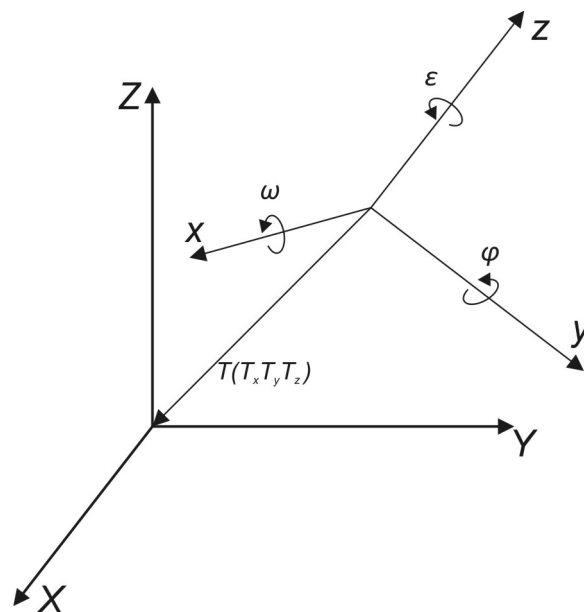
Ukoliko se sprovodi skeniranje objekta sa više različitih stajališta ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , ...,  $S_i$ ), u procesu naknadne obrade je potrebno da svaki pojedinačni oblak tačaka bude transformisan u jedinstveni KS  $G$  (Slika 3-2). Zavisno od namene skeniranja i specifičnosti objekta, ovaj postupak se sprovodi na više načina. Generalno, pod pojmom registracije se podrazumeva 3D transformacija više oblaka tačaka u jedinstveni KS, odnosno njihovo spajanje u jedan jedinstveni oblak tačaka. Za ovaj zajednički ili *globalni* KS može se izabrati definicija KS ma kog oblaka tačaka ( $S_i$ ) ili KS u odnosu na osovinu inženjerskog objekta. Postupak kojim se takav zajednički oblak tačaka prevodi u državni KS ili KS lokalne geodetske mreže naziva se georeferenciranje oblaka tačaka. Georeferenciranje pojedinačnog oblaka tačaka može se sprovoditi i direktno, uz uslov da svaki oblak tačaka nezavisno poseduje dovoljan broj parametara za takav postupak.

### 3.2.1 Funkcionalni model registracije i georeferenciranja

Da bi se izvršila transformacija oblaka tačaka u rezultujući koordinatni sistem neophodno je odrediti parametre transformacije. U gotovo svim komercijalnim

algoritmima koji su namenjeni obradi podataka skeniranja primenjuje se šestoparameterska Helmertova (*rigid body*) transformacija, obzirom da kod skeniranja najčešće ne postoji potreba za uvođenjem faktora razmere kao sedmog parametra. Međutim, ukoliko postoji nesaglasnost razmere između, npr. epoha merenja, korišćenih skenera ili postoji potreba za kalibracijom razmere oblaka tačaka na tačke kontrolne geodetske mreže, potrebno je uvesti kao nepoznati parametar i faktor razmere. Takva 3D transformacija se najčešće zove Helmertova ili konformna transformacija koordinata. I pored potrebe za kalibracijom razmere oblaka tačaka u specifičnim inženjerskim primenama, po autorovom saznanju, gotovo ni u jednom komercijalnom softveru se ne koristi sedmoparameterska transformacija tačaka u postupcima registracije ili georeferenciranja, već isključivo šestoparameterska. Dalje će se razmatrati slučaj sedmoparameterske transformacije, čiji je specijalni slučaj šestoparameterska transformacija.

Trodimenzionalna konformna transformacija koordinata spada u parameterske transformacije sličnosti. Njom se transformišu koordinate tačaka iz jednog pravouglog trodimenzionalnog KS ( $x, y, z$ ) u drugi KS ( $X, Y, Z$ ) (Slika 3-3). Značajna je njegoova primena u fotogrametriji i GNSS. Parametri transformacije su: tri translacije, tri rotacije i jedan faktor razmere (Božić, 2010b).



Slika 3-3 Transformacija koordinata (tri translacije  $T_x, T_y, T_z$  i tri rotacije  $\omega, \varphi, \epsilon$ )

Vektor rotacije  $\omega$  oko  $x$  ose, u matričnom obliku glasi:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{R}_1 \mathbf{X}', \quad [3.3]$$

pri čemu je:

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad [3.4]$$

Vektor rotacije  $\varphi$  oko  $y$  ose, matrično glasi:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{R}_2 \mathbf{X}_1, \quad [3.5]$$

pri čemu je:

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad [3.6]$$

Vektor rotacije  $\varepsilon$  oko  $z$  ose, matrično glasi:

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_3 \mathbf{X}_2, \quad [3.7]$$

pri čemu je:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon & 0 \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [3.8]$$

ili, jedinstveno:

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 \mathbf{X}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}', \quad [3.9]$$

pri čemu je:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon & \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varepsilon + \cos \omega \cdot \sin \varepsilon & -\cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varepsilon + \sin \omega \cdot \sin \varepsilon \\ -\cos \varphi \cdot \sin \varepsilon & -\sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon + \cos \omega \cdot \cos \varepsilon & \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon + \sin \omega \cdot \cos \varepsilon \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad [3.10]$$

Matrica rotacije  $\mathbf{R}$  je ortogonalna, što znači da je  $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ , pa koristeći tu njenu osobinu, sledi da je:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}^T \mathbf{X}. \quad [3.11]$$

Množenjem [3.11] sa faktorom razmere  $S$  i dodavanjem parametara translacije  $T_x, T_y, T_z$  dobija se matematički model transformacije oblika:

$$\begin{aligned} X &= S(m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z) + T_x \\ Y &= S(m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z) + T_y, \\ Z &= S(m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z) + T_z \end{aligned} \quad [3.12]$$

pri čemu su  $m_{ij}$  odgovarajući elementi matrice  $\mathbf{R}$ . Izrazi [3.12] sadrže sedam nepoznatih ( $S, \omega, \varphi, \varepsilon, T_x, T_y, T_z$ ).

Generalna forma transformacije, data u matičnom obliku može se napisati na osnovu [3.12]:

$$\mathbf{X} = S \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{T}. \quad [3.13]$$

Da bi se dobilo jedinstveno rešenje neophodno je definisati sedam jednačina oblika [3.12], što podrazumeva poznavanje, na primer, dve tačke po položaju i tri tačke po visini, u oba koordinatna sistema. Ukoliko je broj datih tačaka veći moguća je primena MNK. Izrazi [3.12] su nelinearni i moraju se linearizovati. Za svaku datu tačku linearizovani izrazi glase (Božić, 2010b):

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \omega}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial X}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\partial Y}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \omega}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial Y}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 0 & 1 & 0 \\ \left(\frac{\partial Z}{\partial S}\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial \omega}\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial \varphi}\right)_0 & \left(\frac{\partial Z}{\partial \varepsilon}\right)_0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dS \\ d\omega \\ d\varphi \\ d\varepsilon \\ dT_x \\ dT_y \\ dT_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad [3.14]$$

Dodatni parametri, koji mogu unaprediti kvalitet trodimenzionalne transformacije koordinata, su poznata standardna odstupanja identičnih tačaka u oba KS. Radi se o

uopštenoj MNK transformaciji koordinata. Pojedini autori to još nazivaju generalizovani MNK 3D transformacije koordinata (Ghilani, 2006) ili kombinovani MNK (Niemeier, 2008).

Ukoliko se radi o dva oblaka tačaka koji se registruju na osnovu uopštenog MNK, opažanjima se smatraju koordinate identičnih tačaka u oba KS sa odgovarajućim varijansama. Za svaku identičnu tačku matematički model je određen trima jednačinama, na osnovu [3.12]:

$$\begin{aligned} f_1 &= T_x + S(m_{11}x + m_{21}y + m_{31}z) - X \\ f_2 &= T_y + S(m_{12}x + m_{22}y + m_{32}z) - Y \\ f_3 &= T_z + S(m_{13}x + m_{23}y + m_{33}z) - Z \end{aligned} \quad [3.15]$$

Uopšten MNK model glasi:

$$f(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{x}}) = 0, \quad [3.16]$$

pri čemu je:  $\hat{\mathbf{l}}$  vektor izravnatih opažanja i  $\hat{\mathbf{x}}$  vektor izravnatih transformacionih parametara modela.

Model se sada generalizuje (uopštava) uvođenjem stohastičkog modela ili kovarijacione matrice sledeće forme (Niemeier, 2008):

$$\mathbf{C}_{ll} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ll} \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_X^2 \end{bmatrix}, \quad [3.17]$$

pri čemu su  $\sigma_x^2$  i  $\sigma_X^2$  varijanse opažanja i varijanse datih koordinata.

Matrica težina opažanja ima formu:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_x^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_X^{-1} \end{bmatrix}. \quad [3.18]$$

Ako se pretpostavi da se transformacija jednog oblaka tačaka vrši na tačke kontrolne geodetske mreže (georeferenciranje), čije se varijanse mogu smatrati zanemarljivim u

odnosu na odgovarajuće tačke iz oblaka tačaka, onda se primenjuje parametarski model MNK koji glasi:

$$\hat{\mathbf{I}} = f(\hat{\mathbf{x}}). \quad [3.19]$$

Stohastički model kovarijacione matrice uključuje samo opažanja iz oblaka tačaka, pa će sada matrica težina opažanja imati uprošćenu formu (Niemeier, 2008):

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{//}^{-1} = \left[ \mathbf{Q}_x^{-1} \right]. \quad [3.20]$$

U oba modela MNK transformacije koordinata potrebno je raspolagati sa približnim vrednostima nepoznatih parametara modela, obzirom da se radi o nelinearnom sistemu jednačina opažanja. Određivanje ovih vrednosti predstavlja potencijalni problem obzirom na kompleksnost modela 3D transformacije. Različiti algoritmi za sračunavanje ovih vrednosti se mogu naći u literaturi. Najpoznatiji su metode bazirane na vektorskoj algebri (Dewitt, 1996), kvaternionu (Sanso, 1973) ili ortogonalnoj „prokrustes“ analizi (Beinat, 2001).

### 3.2.2 Metode registracije podataka skeniranja

Da bi se izvršila registracija dva oblaka tačaka neophodno je da među njima postoji preklapanje podataka skeniranja na objektu. To praktično znači da je jedan zajednički deo objekta skeniran u okviru oba stajališta. Često je u praksi slučaj da postoji preklapanje podataka skeniranja između više od dva stajališta skenera.

Za određivanje parametara 3D transformacije koordinata na osnovu podataka skeniranja postoji nekoliko osnovnih metoda, i to (Reshetyuk, 2009):

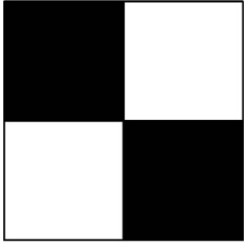




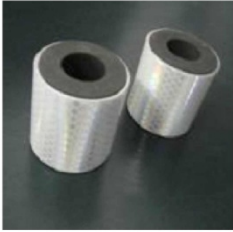
- na osnovu specijalnih algoritama za prepoznavanje identičnih tipskih signala (*target recognition*) koji su specifični za svaki tip skenera;
- identifikacija morfoloških detalja u obe scene;
- pomoću algoritama za uklapanje površi (*surface matching*);

- na osnovu pravilnih geometrijskih oblika (ravan, cilindar, sfera); i
- kombinacijom prethodnih metoda.

### 3.2.2.1 Registracija tipskim signalima

Ovo je najčešći i zasad najpouzdaniji način registracije oblaka tačaka u geodetskom inženjerstvu. Korišćenje tipskih signala pretpostavlja da se pre izvođenja skeniranja objekat signališe. Svi vodeći proizvođači TLS, u okviru pratećih programa za obradu podataka skeniranja, poseduju algoritme za prepoznavanje i određivanje tipskih signala.

Tabela 3-1 Neke od vrsta tipskih skenerskih signala

Ravni signali			
			
Leica, Zoller+Fröhlich	Leica	Trimble	Riegl
Trodimenzionalni signali			
			
Leica, Trimbe, itd.		Riegl	

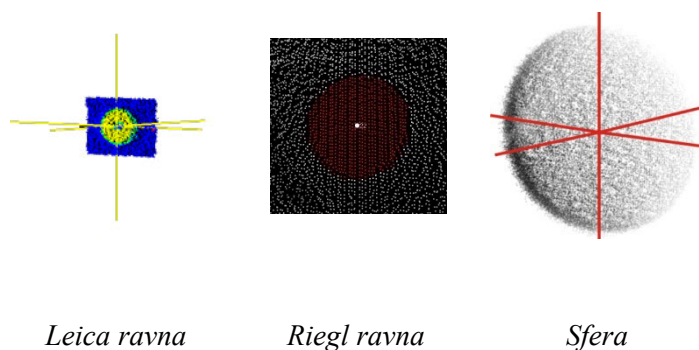
U okviru posebne operacije detaljnog skeniranja signala, obično nakon skeniranja objekta, određuje se centar signala koji figuriše kao data veličina u postupku registracije. Različiti tipovi signala se koriste, i generalno se dele na:

- Markice ili ravne signale. Ovo je najčešći tip signala. Međutim, mana je da nisu pogodni za upotrebu u slučajevima velike udaljenosti od skenera i u

slučajevima kada je ugao laserskog zraka veliki u odnosu na normalu površi skeniranja.

- Trodimenzionalne signale. Najčešće se koriste sfere različitih prečnika. Funkcionalnom zavisnošću i primenom MNK uklapanja određuje se centar sfere koji predstavlja datu veličinu u postupku registracije. Riegl skeneri koriste reflektivne cilindrične signale. Ovaj metod registracije je za razliku od ravnih signala pogodan za registrovanje iz različitih smerova skeniranja.
- Kombinacija ravnih i trodimenzionalnih signala. U upotrebi su najčešće polu sfere, ili signali koji su vidljivi iz dva smera na  $180^\circ$ .

U postupku prepoznavanja tipskog signala i određivanja njegove pozicije važno je odrediti centar signala sa zadovoljavajućom preciznošću. Oblast signala se softverski prepoznaje i skenira u tzv. finom modu visoke rezolucije. Obzirom da je kod TLS nemoguće viziranje, centar se određuje visokom redundantnošću podataka na osnovu kojih se zavisno od tipa signala matematički određuje centar signala. Preciznost određivanja centra je direktno proporcionalna gustini tačaka na signalu.



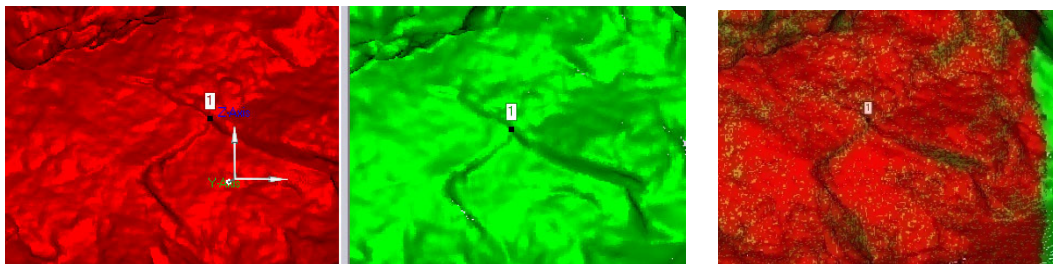
Slika 3-4 Detaljno skeniranje signala i pozicija referentnog položaja

### ***3.2.2.2 Registracija po morfološkim detaljima***

Prilikom skeniranja nepristupačnih objekata kao što su nestabilne kosine (Abolmasov i dr., 2011a) ili visoke zgrade, često je nemoguće postaviti dovoljno tipskih signala (Slika 3-5). U tom slučaju moguće je u procesu registracije manuelno identifikovati morfološke tačke detalja iz dva susedna oblaka tačaka. Konceptcija registracije je ista



kao kod tipskih skenerskih signala, s tim što je identifikacija identičnih tačaka teorijski nemoguća, jer se ne može desiti da bude merena ista tačka na objektu u obe scene. U ovom procesu subjektivnost operatora igra značajnu ulogu. Posledica toga je manja preciznost registracije. Ova preciznost se može unaprediti detaljnijim skeniranjem karakterističnih detalja na objektu.



*Oblak tačaka 1*

*Oblak tačaka 2*

*Registrovani oblak tačaka*

**Slika 3-5 Primer registracije identifikacijom karakterističnih mesta na nestabilnoj kosini „Letnja pozornica“ u Beogradu**

Ukoliko se registracija izvodi pomoću signala ili tačaka detalja, njihov raspored treba da bude pravilan i da varira po dubini objekta (Tait i dr., 2004). Minimalan broj tačaka koje učestvuju u trodimenzionalnoj transformaciji je tri. Međutim, u inženjerskim primenama često je potrebno da taj broj bude i veći. Veći broj stepeni slobode u MNK modelu transformacije koordinata doprinosi postizanju boljih rezultata transformacije i većoj pouzdanosti modela. U specifičnim inženjerskim primenama takođe se preporučuje uvođenje nezavisnih kontrolnih tačaka koje ne učestvuju u određivanju parametara transformacije, već služe isključivo za nezavisnu ocenu tačnosti transformacije. Optimalan broj tačaka koje učestvuju u oceni transformacionih parametara je 4. Povećanje broja tačaka ne doprinosi značajnom poboljšanju tačnosti transformacije, uz preduslov da su te 4 tačke pravilno raspoređene. Takođe, na osnovu empirijskih istraživanja, došlo se do zaključka da ukoliko je preklap između dva susedna oblaka tačaka oko 30%, tačnost registracije je na nivou tačnosti merenja rastojanja (Bornaz i dr., 2003).

### 3.2.2.3 Registracija najboljim uklapanjem površi

Za registraciju dva susedna oblaka tačaka ne mora se koristiti standardna procedura pomoću veznih tačaka. Metoda registracije uklapanjem površi (*surface matching*) je novija metoda koja zahvaljujući unapređenju hardvera i razvoju algoritama ima veliku perspektivu, ali i određena ograničenja. Ova metoda je implementirana u softvere proizvođača skenera, i to u kao npr. u modul „*Multi Station Adjustmen*“ (Riegl RISCAN PRO) ili „*Cloud Registration*“ (Leica Cyclone).

Osnovni algoritam uklapanja površi baziran je na „*Iterative Closest Point*“ (ICP) metodi na osnovu koje se oblak tačaka, ili njegov model površi, transformiše na osnovu analize odstupanja od referentnog oblaka tačaka ili referentne modelovane površi. Faktor razmere ne postoji, odnosno radi se o šestoparametarskoj registraciji. Registracija se sprovodi iterativno, a prethodno je potrebno izvršiti grubu registraciju oblaka tačaka. U nastavku je predstavljen osnovni ICP algoritam, obzirom na sve veću zastupljenost ove metode u obradi podataka TLS.

Ukoliko postoje dva skupa tačaka,  $\mathbf{x}_i$  i  $\mathbf{y}_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), koje je potrebno registrovati:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{R}\mathbf{x}_i + \mathbf{y}_0, \quad [3.21]$$

pri čemu je  $\mathbf{R}$  matrica rotacije, a  $\mathbf{y}_0$  vektor translacije. Osnovni princip ICP metode je da se traži rešenje sa minimalnom sumom kvadrata Euklidskog rastojanja između ova dva skupa tačaka, odnosno:

$$e^2 = \sum_i \|\mathbf{R}\mathbf{x}_i + \mathbf{y}_0 - \mathbf{y}_i\|^2 \rightarrow \min. \quad [3.22]$$

Sumiranje se vrši nad celokupnim presekom dva skupa tačaka, odnosno nad prostornim preklapom dva susedna oblaka tačaka.

Ocena transformacionih parametara je glavni cilj. Jedan od načina na koji je to moguće oceniti sledi (Horn, 1987). Radi stabilnosti modela, oba skupa tačaka se redukuju:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_i &= \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_m \\ \mathbf{y}'_i &= \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_m \end{aligned} \quad [3.23]$$

pri čemu je centroid definisan na osnovu:

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{1}{n_x} \sum_{i=1}^{n_x} x_i \\ y_m &= \frac{1}{n_x} \sum_{i=1}^{n_x} y_i \end{aligned} \quad [3.24]$$

Ovaj postupak redukcije omogućuje nezavisnu ocenu parametara translacije i rotacije. U prvom koraku se ocenjuju parametri rotacije, pa tako na osnovu [3.22] i [3.23] funkcija  $e^2$  glasi:

$$e^2 = \sum_i \|\mathbf{R}\mathbf{x}'_i - \mathbf{y}'_i\|^2 = \sum_i (x_i'^T x_i' + y_i'^T y_i' - y_i'^T \mathbf{R}\mathbf{x}'_i) \rightarrow \min. \quad [3.25]$$

Obzirom da su u [3.25] prva dva člana sume kvadrata koordinata tačaka,  $e^2$  je minimizirano kada je treći član maksimiziran. Da bi se izvršilo maksimiziranje trećeg člana, rotacija je parametarizovana pomoću jedinice kvaterniona,  $q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$ , pa tako i ovaj član prelazi u formu:

$$\sum_i y_i'^T \mathbf{R}\mathbf{x}'_i = q^o \mathbf{N} q^o, \quad [3.26]$$

pri čemu je:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} & S_{yz} - S_{zy} & S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} - S_{yx} \\ S_{yz} - S_{zy} & S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} \\ S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} + S_{yx} & -S_{xx} + S_{yy} - S_{zz} & S_{yz} - S_{zy} \\ S_{xy} - S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} & S_{yz} - S_{zy} & -S_{xx} - S_{yy} + S_{zz} \end{pmatrix}. \quad [3.27]$$

Članovi matrice  $\mathbf{N}$  su funkcije elemenata kovarijacione matrice koordinata tačaka,  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1} x_i' y_i'^T = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix}. \quad [3.28]$$

Jedinica kvaterniona koja maksimizira  $q^T N q$  je karakterističan vektor (*eigenvector*) koji se odnosi na najveću pozitivnu karakterističnu vrednost (*eigenvalue*) matrice  $N$  (Horn, 1987). Težište koordinata (centroid) i ocenjena matrica rotacije se zatim uvrste u izraz [3.21] radi računanja vektora translacije:

$$y_0 = y_m - R x_m. \quad [3.29]$$

Ovo rešenje, predloženo od američkog naučnika i pronalazača Bertholda K.P. Horna, je MNK rešenje, međutim bez stohastičkog modela. Ono danas predstavlja osnovu koju su mnogi autori unapređivali. Na primer, MNK 3D uklapanje površi – LS3D (Akca i Gruen, 2005) predstavlja jedno od poboljšanja osnovnog ICP algoritma, a razvijen je za potrebe registracije podataka skeniranja. Za razliku od originalnog modela ovde se uvodi parametarski MNK koji podrazumeva uvođenje težine opažanja i otkrivanje grubih grešaka. Takođe je potrebna prethodna gruba registracija. Rešenje brže konvergira od originalnog (nakon 5 do 8 iteracija). Više o ovom može se naći u (Akca i Gruen, 2005) i (Akca, 2007).

Generalno, metoda uklapanja površi u određenim situacijama može da rezultira vrlo dobrom registracijom zahvaljujući velikom broju tačaka koje učestvuju u postupku registracije. Naročito dobri rezultati se postižu ukoliko preklop između scena sadrži modelirane trouglove različitih 3D orijentacija, na primer ukoliko se radi o pravilnim objektima poput industrijskih postrojenja sa mnoštvom objekata, cevi i sl., ili se registruju oblaci tačaka stenskih masa, valovit teren, itd. U slučajevima skeniranja objekata poput platoa, ravnih zidova, saobraćajnica ili npr. tunela ravne unutrašnje oplata, ova metoda, ukoliko se koristi bez veznih tačaka, ne daje zadovoljavajuće rezultate. Prednost ove metode je u tome što se objekat pre skeniranja ne mora prethodno signalisati, odnosno pogodno je njeno korišćenje za registraciju podataka skeniranja kod nepristupačnih objekata.

#### 3.2.2.4 Registracija pravilnim geometrijskim figurama

Ova metoda podrazumeva prethodno modeliranje odabranih zajedničkih pravilnih geometrijskih figura, kao što su ravni, sfere, cilindri itd. Slično kao i kod prethodne metode, na osnovu najboljeg uklapanja figura vrši se registracija. I ovde postoje

određena pravila dobre geometrije koja dovode do dobrih rezultata registracije. Figure treba da budu pojedinačno orijentisane u sva tri trodimenzionalna ortogonalna pravca. Dobra ilustracija povoljne registracije je presecanje tri zida u uglu prostorije ili industrijska postrojenja sa mnoštvom pravilnih figura. Za registraciju ovom metodom potrebno je posedovati zajedničke identične figure u oba KS.

### **3.2.2.5 Kombinacija metoda**

Često se u registraciji mogu primenjivati istovremeno različiti tipovi signala, manuelna identifikacija skeniranog detalja i uklapanje površi. U ovom slučaju limitirajući faktor predstavljaju konkretna softverska ograničenja. Kombinovanje metoda se uglavnom vrši kada se želi unaprediti tačnost ili ubrzati postupak registracije.

## **3.2.3 Metode georeferenciranja podataka skeniranja**

Metod georeferenciranja oblaka tačaka se određuje na osnovu prethodno definisane metodologije eksperimenta. U skladu sa tim postoji indirektan i direktan pristup georeferenciranju oblaka tačaka. Rezultujući KS u geodetskom inženjerstvu je najčešće definicija KS kontrolne geodetske mreže oslobođene uticaja grešaka datih veličina. Postojanje ovakve mreže prilikom skeniranja inženjerskog objekta omogućuje između ostalog i sprovođenje nezavisne kontrole ostvarene 3D tačnosti prikupljenih podataka skeniranja.

### **3.2.3.1 Direktna metoda**

Ovaj način georeferenciranja je zasnovan na klasičnom pristupu, poput npr. tahimetrijske metode geodetskog premera. Podrazumeva da se skener centriše i horizontira nad tačkom poznatih koordinata i visine, da se meri visina skenera nad tom tačkom i da se uzima orijentacija na drugu „poznatu“ tačku. Najčešće se ti podaci pre početka skeniranja unose u softver skenera, pa je otuda skenirani oblak tačaka u koordinatnom sistemu tačaka geodetske mreže, a ovaj postupak se tada naziva direktnim georeferenciranjem. Preduslov za primenu ove metode je da TLS poseduje uređaje kao jedna totalna stanica, odnosno: optički ili digitalni visak, centričnu, cevastu ili digitalnu libelu, kompenzator, kao i mogućnost merenja visine instrumenta i prateći softver.

U poslednje vreme skoro svi najznačajniji proizvođači TLS poseduju ovaj potencijal, što do pre samo nekoliko godina nije bio slučaj. Na primer, skener Leica HDS3000, koji je proizvođen do 2006. godine, poseduje samo centričnu libelu instaliranu na klasično postolje geodetskog instrumenta kojoj je tipična osetljivost oko 8 lučnih minuta. Uz to, nepostojanje dvoosnog kompenzatora dovodi do značajne denivelacije oblaka tačaka, ali isto tako i do greške centrisanja koja dostiže vrednosti i do nekoliko milimetara ukoliko je TLS postavljen na stub (Delčev i dr., 2011).

Pozicija i orijentacija skenera može biti određena GNSS prijemnikom koji se pomoću adaptera montira na skener uz poznato konstantno rastojanje od elektrooptičkog ishodišta skenera (Trimble CX, Leica ScanStationC10, Riegl Z i VZ serija). Takođe, umesto GNSS prijemnika može biti montirana i reflektivna prizma za posredno određivanje pozicije skenera totalnom stanicom. Pojedini skeneri poseduju durbin kojim je moguće izvršiti viziranje na orijentacionu tačku (Callidus), dok većina koristi tipske skenerske signale i algoritme za automatsko prepoznavanje i određivanja centra signala.

Pod pretpostavkom da skener poseduje pun potencijal za direktno georeferenciranje, model transformacije KS skenera u KS kontrolne geodetske mreže glasi:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{R}_{s(\varepsilon)} \mathbf{X}_s + \mathbf{T}_{sk}, \quad [3.30]$$

pri čemu se indeks  $k$  odnosi na KS kontrolne geodetske mreže, a indeks  $s$  na KS skenera.

Model transformacije [3.30] je uprošćen u odnosu na onaj prikazan u poglavlju 3.2.1, u izrazima [3.12] i [3.13]. Obzirom da je oblak tačaka nivelisan u postupku horizontiranja instrumenta (postojanjem kompenzatora), parametri rotacije  $\varphi$  i  $\omega$  su približno jednaki nuli. Onda je matrica rotacije  $\mathbf{R}_s(\varepsilon)$  u funkciji od samo jednog parametra rotacije oko z-ose. Parametar  $\varepsilon$  se određuje orijentacijom TLS na drugu tačku kontrolne geodetske mreže, što je u ovom slučaju bio preduslov. Takođe, u TLS primenama u modelu transformacije se po pravilu izuzima faktor razmere  $S$ .

Ograničavajući faktor primene direktnog georeferenciranja u geodetskom inženjerstvu je u činjenici da u ukupnoj grešci skeniranih podataka značajno učestvuje greška

merjenja visine instrumenta, greška centrisanja, horizontiranja i greška orijentacije na poznatu tačku (detaljnije u poglavlju 4.4.2). Ovde je prisutna potpuna analogija sa merenjima totalnom stanicom u slučaju kada se vrši polarno snimanje detalja.

Pod pojmom metode direktnog georeferenciranja može se podrazumevati i korišćenje procedure „presecanja nazad“.

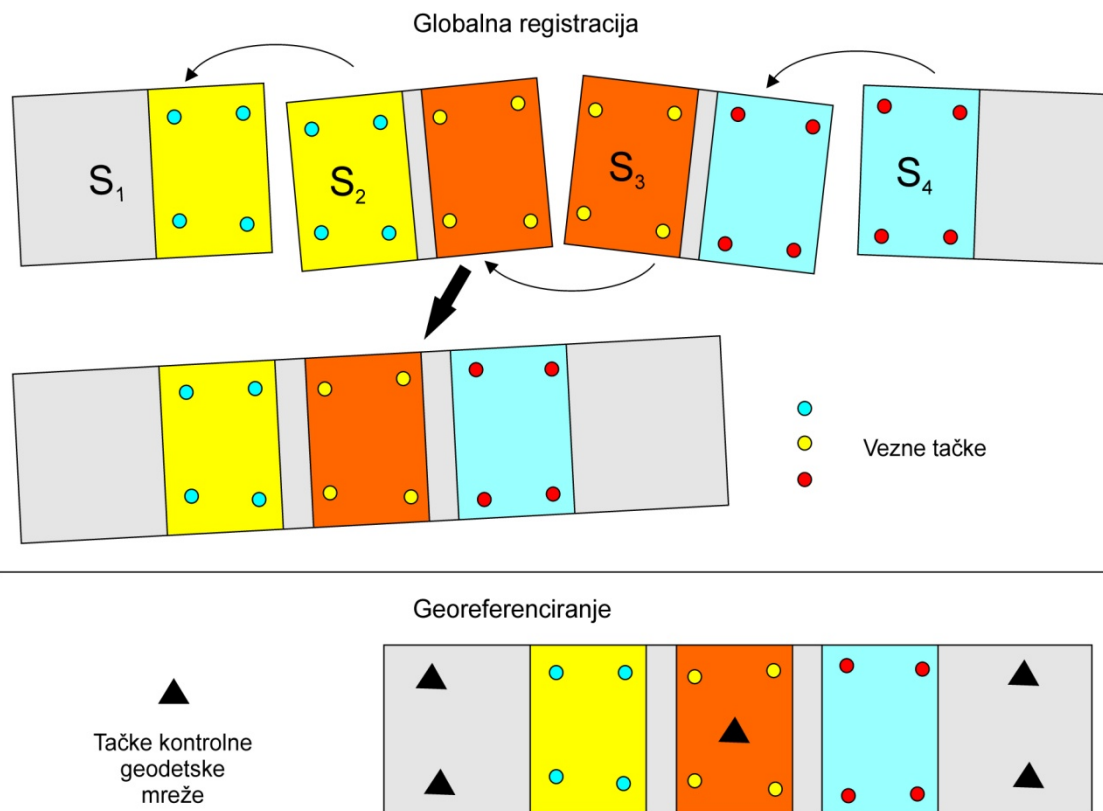
Metoda direktnog georeferenciranja u geodetskom inženjerstvu je pogodna u slučajevima kada se vrši skeniranje dugačkih objekata poput puteva ili tunela, i to kada je dovoljna centimetarska tačnost prikupljenih podataka.

### *3.2.3.2 Indirektna metoda*

Indirektno georeferenciranje podrazumeva postojanje dva skupa koordinata identičnih tačaka u KS jedne od scena i u KS kontrolne geodetske mreže. Objekat je potrebno prethodno signalisati i sa kontrolne geodetske mreže odrediti koordinate signala u koordinatnom sistemu inženjerskog objekta. Ovde se treba držati principa značajnosti položajnih grešaka tačaka kontrolne geodetske mreže u odnosu na tačnost registracije i georeferenciranja oblaka tačaka. Prethodno projektovanje kontrolne geodetske mreže sa aspektima prethodne ocene tačnosti i doprinosa redundantnosti (pouzdanosti) merenih veličina je obavezno u radovima u inženjerskim oblastima.

Kod pojedinih TLS i njihovih pratećih softvera za inicijalnu obradu podataka skeniranja inženjerski problem može predstavljati signalisanje tačaka geodetske mreže u svrhu georeferenciranja. Koordinate kontrolnih tačaka se najčešće dobijaju na osnovu merjenja totalnom stanicom, koje su prethodno markirane pomoću reflektivnih signala (prizma ili reflektivna traka). U isto vreme potrebno je te signale registrovati skenerom. Većina sistema TLS nije projektovana tako da se mogu tipski registrovati reflektivni objekti, a samim tim nemoguće je automatsko prepoznavanje i visoka tačnost identifikacije signala. Izuzetak od ovog je Riegl serija skenera i softver RiScan koji reflektivne tipske signale uspešno automatski prepoznaje. (Tabela 3-1 i Slika 3-4). Stoga su ovakvi algoritmi veoma pogodni za primene u inženjerstvu. U ostalim slučajevima objekat se najmanje dva puta signalise, što može predstavljati problem naročito kod nepristupačnih objekata.

Sam proces georeferenciranja obavlja se nakon skeniranja. Može se izvršiti u jednom ili dva koraka.



Slika 3-6 Indirektno georeferenciranje u dva koraka (prema Reshetyuk, 2009)

Indirektno georeferenciranje oblaka tačaka u dva koraka podrazumeva:

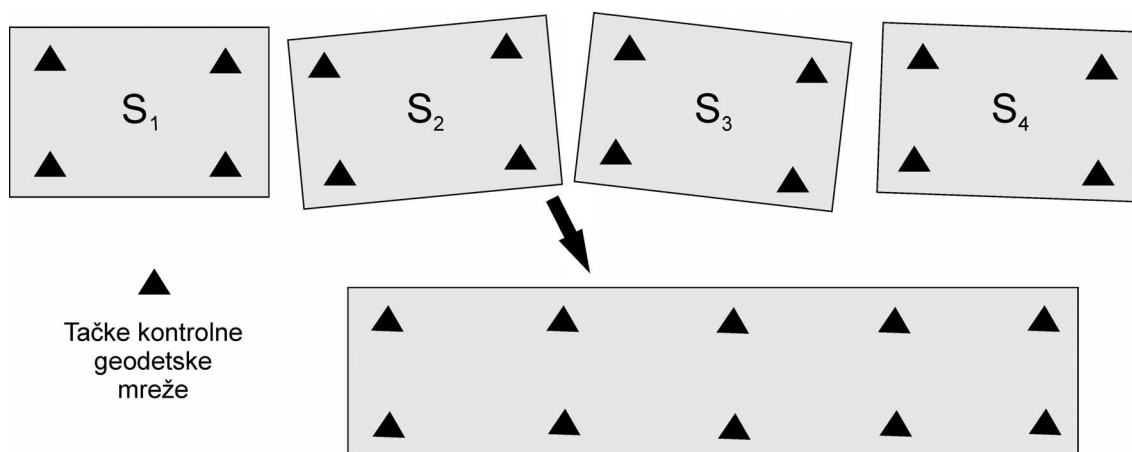
- Korak 1. Registracija scena nastalih sa različitih stajališta. Registracija se vrši na osnovu odabranog modela registracije opisanih u poglavlju 3.2.1 i 3.2.2. Termin globalna registracija se koristi u pojedinim softverskim alatima i podrazumeva automatizovan proces registracije više scena. U konkretnom primeru (Slika 3-6), registracija se sprovodi pomoću veznih tačaka čije koordinate su poznate u KS susednih scena. Rezultat registracije je jedinstveni oblak tačaka u KS sistemu scene  $S_1$ .
- Korak 2. Georeferenciranje ili prevođenje globalno registrovanog oblaka tačaka, iz KS izabrane scene  $S_1$  u KS inženjerskog objekta (Slika 3-6). Model transformacije je detaljno opisan u poglavlju 3.2.1. Umesto veznih



tačaka, u postupku registracije se koriste signalisane tačke na objektu koje predstavljaju deo kontrolne geodetske mreže. Naravno, sam metod transformacije koordinata je isti kao kod registracije i zasniva se uglavnom na šestoparametarskom modelu. Georeferenciranje se može sprovoditi i na osnovu identifikacije tačaka morfoloških detalja i metodom uklapanja površi.

*Indirektno georeferenciranje oblaka tačaka u jednom koraku* pretpostavlja da je moguće i/ili svrsishodno da se u okviru svake scene signališu bar tri tačke geodetske mreže. Tada se u jednom koraku vrši i registracija scena i georeferenciranje (Slika 3-7) i ne mora obavezno postojati određen preklop između scena. Sa druge strane, ovaj postupak zahteva više tačaka geodetske mreže, a samim tim i više merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži, što može značajno poskupeti eksperiment. Takođe, važno je napomenuti da registrovani oblak tačaka može biti manje konzistentan ukoliko je tačnost geodetske osnove manja.

Iako je postupak indirektnog georeferenciranja uz pomoć signalisanja zastupljeniji u inženjerstvu, dobri rezultati se mogu postići i registracijom i georeferenciranjem koristeći algoritme uklapanja površi. Pri tome treba voditi računa o ograničenjima ove metode, koja su razmatrana u poglavlju 3.2.2.3.



Slika 3-7 Indirektno georeferenciranje u jednom koraku na osnovu tačaka kontrolne geodetske mreže (prema Reshetyuk, 2009.)

U nekim primenama, u cilju unapređenja tačnosti i/ili efektivnosti, dobro rešenje može biti kombinacija direktnog i indirektnog georeferenciranja. Na primer, moguće je centrisati skener i meriti visinu nad geodetskom tačkom poznatih koordinata, i umesto orijentacije koristiti tipske skenerske signale, a georeferenciranje izvršiti naknadno. Takođe, u tom slučaju moguće je umesto tipskih skenerskih signala koristiti algoritme uklapanja površi da bi se odredio samo jedan nepoznat parametar rotacije oko z-ose. Ukoliko skener ne poseduje dvoosni kompenzator, centrisanjem instrumenta i merenjem visine određuje se vektor translacije sistema, dok je tri parametra rotacije potrebno odrediti indirektnim pristupom preko datih tačaka ili uklapanjem površi. Translaciju sistema moguće je na terenu definisati i upotrebom GNSS prijemnika. U svim ovim slučajevima glavni ograničavajući faktor predstavljaju raspoloživi softverski algoritmi proizvođača skenera.

### *3.2.3.3 Prednosti i nedostaci direktne i indirektno metode georeferenciranja*

Zavisno od karakteristika radilišta, zahtevane tačnosti skeniranja, kao i od ekonomskih, tehničkih i operativnih aspekata eksperimenta bira se način registracije i georeferenciranja. Ovde su razmatrane prednosti i nedostaci dva pristupa isključivo sa aspekta inženjerske geodezije, gde je tačnost podatka jedan od važnijih kriterijuma.

*Prednosti indirektno metode georeferenciranja:*

- Potencijalno visoka tačnost georeferenciranja, reda veličine nekoliko milimetara.
- Stajna tačka ne mora biti poznata u smislu određenosti u prostoru. To omogućava slobodu u izboru stajališta.
- Nema potrebe za centrisanjem, merenjem visine i horizontiranjem skenera. Horizontiranje se može obaviti samo pomoću centrične libele instalirane na postolje skenera, ili se uopšte ne mora sprovesti.
- Uvođenjem dodatnih tačaka, više od minimalnih tri, moguće je unaprediti pouzdanost i tačnost transformacionog modela i imati punu kontrolu nad rezultatima georeferenciranja.

*Nedostaci indirektna metode georeferenciranja:*

- Potreba za planiranjem prostorne konfiguracije skenerskih signala i projektovanjem geodetske osnove georeferenciranja. Potrebno je uvođenje preciznijeg instrumenta i dodatne terenske ekipe, izuzev u slučajevima georeferenciranja uklapanjem površi.
- Komplikovano signalisanje inženjerskih objekata poput brana, visokih zgrada, nestabilnih kosina, itd. Često se objekat u istoj epohi dva puta signališe, markicama za skener i totalnu stanicu. Ovo ne važi u slučajevima georeferenciranja uklapanjem površi.
- Potreban je preklop između susednih scena.
- Poteškoće kod skeniranja linijskih objekata. Javlja se efekat multiplikacije grešaka registracije idući dalje od inicijalnog stajališta.
- Potreba za georeferenciranjem nakon terenskih radova, u kancelariji.

*Prednosti direktna metode georeferenciranja:*

- Jednostavnije planiranje i realizacija geodetske osnove georeferenciranja. Moguće je osloniti se na postojeću geodetsku osnovu i/ili koristiti GNSS tehnologiju pozicioniranja stajališta i orijentacije, ukoliko postignuta tačnost zadovoljava kriterijume tačnosti eksperimenta.
- Nema potrebe za preklopom između susednih scena.
- Nema potrebe za dodatnom kancelarijskom obradom. Još na terenu su podaci skeniranja georeferencirani.
- Analogija sa tahimetrijskom metodom snimanja detalja obezbeđuje lakšu implementaciju u tradicionalnu geodetsku praksu.

*Nedostaci direktna metode georeferenciranja:*

- Manja tačnost georeferenciranja u odnosu na indirektan pristup. Tipična tačnost je centimetarska. U inženjerstvu je zbog toga manje zastupljena.

- Skener se mora centrisati, horizontirati, orijentisati i mora se meriti visina nad tačkom geodetske osnove. To komplikuje i produžava terensku proceduru pre samog početka skeniranja.
- Nije moguće koristiti GNSS pozicioniranje stajališta skenera i orijentacije u zatvorenom prostoru i u prisustvu izvora jakog elektromagnetnog zračenja, odnosno ukoliko se vrši skeniranje inženjerskih objekata poput tunela, magistralnih cevovoda, podzemnih iskopa i specifičnih industrijskih postrojenja.
- Primenljivost u inženjerstvu je uslovljena, između ostalog i korišćenjem skenera koji poseduju dvoosni kompenzator i pouzdano horizontiranje instrumenta. To sužava praktičnu evaluaciju ove metode ukoliko se koriste pojedini tipovi skenera, naročito oni starije proizvodnje.
- Mala pouzdanost georeferenciranja oblaka tačaka. Nemoguće je naknadno uticati na rezultate georeferenciranja. Moguće je da eventualna gruba greška, npr. u postupku orijentisanja skenera, ne bude primećena na terenu. U takvim slučajevima vrlo verovatan je ponovni izlazak na teren.

Na osnovu prethodno iznetog, a posebno sa aspekta korišćenja skenera u inženjerskim radovima visoke tačnosti, može se reći da bez obzira na tendenciju usavršavanja hardvera i različitih korekcionih algoritama, metoda direktnog georeferenciranja će uvek biti nižeg ranga tačnosti u odnosu na indirektnu metodu. Analogija orijentisanju skenera je orijentisanje totalnom stanicom u premeru, i to u jednom položaju durbina. Skener naravno nije moguće koristiti analogijom dva položaja durbina, što ostavlja značajan skup sistematskih grešaka prilikom orijentisanja na datu tačku koje se ne mogu metodom rada neutralisati (efekat horizontalne i vertikalne kolimacije). Takođe, merenje visine skenera ima sve negativne implikacije kao merenje visine totalne stanice u trigonometrijskom nivelmanu. Centrisanje i horizontiranje dodatno opterećuju uzorak merenja. Ukoliko se koristi indirektan pristup georeferenciranju, praktično ove greške ne postoje uz očiglednu analogiju sa prisilnim centrisanjem totalne stanice.

Takođe važan aspekt diferencijacije ove dve metode, pored postignute tačnosti, je konceptualne prirode. Tradicionalno, u projektovanju eksperimenta u inženjerskoj geodeziji se mora obezbediti pouzdanost rezultata, sprovođenje kontrole i dokazivanja adekvatnosti rezultata.

## 4 Izvori grešaka TLS

Svako merenje određene fizičke veličine sadrži neizbežne greške. Slično kao kod ostalih mernih metoda i instrumenata u geodeziji, sistem TLS nije idealan i podložan je različitim uticajima na rezultate merenja.

Godine 1984. Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) je objavila Internacionalni metrološki rečnik (ISO, 2008). Standard ISO 5725-1 ustanovljava generalne principe i metrološke definicije, od kojih su ovde od značaja (Cuartero i dr., 2010):

### *Preciznost*

Predstavlja stepen bliskosti između nezavisnih rezultata merenja, dobijenih u određenim utvrđenim uslovima i zavisi samo od slučajnih uticaja. Mera preciznosti se obično obračunava kao standardno odstupanje rezultata merenja izvršenih pod određenim uslovima. Preciznost zavisi samo od distribucije slučajnih grešaka i ne odnosi se na istinite ili na date vrednosti. Mera preciznosti se obično izražava kao nepreciznost i izračunava se kao standardna devijacija rezultata merenja. Preciznost 3D položaja tačaka u KS inženjerskog objekta je razmatrana u poglavlju 4.4.

### *Tačnost*

Predstavlja stepen bliskosti između rezultata merenja i prihvaćene referentne vrednosti. Kada se primenjuje na uzorak rezultata merenja, tačnost podrazumeva kombinaciju slučajnih i sistematskih komponenti grešaka, odnosno uzima se u obzir i statistička pomenost rezultata merenja. Sistematski uticaji na rezultate opažanja TLS su razmatrani u poglavlju 5.

### *Nesigurnost*

Označava nenegativni parametar povezan sa rezultatom merenja, koji karakteriše disperziju vrednosti koja se nedvosmisleno može pripisati merenoj veličini. Nesigurnost može biti, na primer, standardno odstupanje (ili njegova multiplikacija), ili polovina širine intervala pri određenom nivou poverenja.

Kod tehnologije TLS potrebno je razlikovati tačnost i preciznost pojedinačnog podatka merenja (rastojanje i uglovi), pojedinačne tačke ( $x, y, z$ ), registracije tipskog skenerskog signala i modeliranog oblaka tačaka.

Termin *kvalitet* podataka pored pozicione tačnosti skeniranja uvodi i parametar rezolucije oblaka tačaka. Pod terminom *rezolucija* skeniranja podrazumeva se vrednost najmanjeg ugaonog otklona laserskog zraka po horizontalnoj i vertikalnoj osi TLS. Kada se uzme u obzir i parametar rastojanja objekta od stajališta skenera dobija se rezolucija (gustina) oblaka tačaka. U praksi, rezolucija oblaka tačaka se često poistovećuje sa tačnošću oblaka tačaka. Položajna tačnost oblaka tačaka i rezolucija utiču na tačnost modela objekta.

Kvalitet oblaka tačaka ne zavisi isključivo od instrumentalne preciznosti TLS i rezolucije skeniranja. Uticaj okoline kroz koju se prostire laserski zrak, uticaj karakteristika objekta od kojeg se on odbija, uticaj konfiguracije eksperimenta i metodologije obrade podataka su faktori koji značajno utiču na kvalitet oblaka tačaka, odnosno na geometrijsku tačnost modela objekta.

Modeliranje oblaka tačaka objekta unapređuje njegovu upotrebnu vrednost i preciznost zbog visoke redundantnosti opažanja. Visoku tačnost 3D modela objekta je nemoguće postići koristeći oblak tačaka niskog nivoa tačnosti i male prostorne rezolucije bez obzira na vrstu algoritama za modeliranje objekta. Dodatno, algoritmi za modeliranje oblaka tačaka su često tzv. „crna kutija“ alati, koji se teško analiziraju (Reshetyuk, 2009). U poglavlju 6, biće razmatrane metode modeliranja oblaka tačaka, obzirom da se ta faza podrazumeva u jednom praktičnom zadatku upotrebe TLS sistema u inženjerskoj geodeziji.

Ovde su težišno razmatrati uticaji koji doprinose ukupnom budžetu grešaka merenja i obrade podataka TLS, čiji rezultat treba da bude upotrebljiva informacija, odnosno geometrijski korektan oblak tačaka objekta.

Sistem za merenje TLS sadrži četiri objektivne komponente koje utiču na kvalitet oblaka tačaka (Zogg, 2008):

- TLS;

- Sredina;
- Objekat;
- Konfiguracija eksperimenta.

Na osnovu (Eling, 2009) i (Zogg, 2008) i izvesnih metodoloških modifikacija, konfiguracija sistema TLS podrazumeva različite uticaje na ukupan budžet položajnih grešaka sistema TLS, koje potiču od:

- Instrumenta:
  - merenje rastojanja,
  - merenje vrednosti divergencije laserskog snopa,
  - sinhronizacija senzora,
  - obim laserskog snopa i
  - položaj i ekscentricitet glavnih osa TLS.
- Sredine:
  - meteo uslovi (temperatura, pritisak, relativna vlažnost vazduha),
  - treperenje atmosfere,
  - refrakcija,
  - iluminacija,
  - prepreke,
  - pozadina objekta i
  - stabilnost TLS.
- Objekta skeniranja:



- veličina,
  - prostorna konfiguracija (upadni ugao laserskog zraka),
  - površ (hrapavost, reflektivnost, prodornost zraka) i
  - zakrivljenost objekta (upadni ugao laserskog zraka).
- Metodologije registracije i georeferenciranja.

Drugačije klasifikacije izvora grešaka sistema TLS takođe se mogu naći u literaturi. Lichti i Gordon (2004) klasifikuju izvore grešaka na:

- unutrašnje i
- spoljašnje.

Pod pojmom unutrašnje greške podrazumevaju se greške TLS instrumenta. Pod pojmom spoljašnje analiziraju se uticaji okoline, objekta i greške registracije i georeferenciranja.

Reshetyuk (2006), greške sistema TLS klasifikuje na:

- instrumentalne greške;
- objektno uslovljene greške;
- greške okoline i
- greške georeferenciranja.

#### **4.1 Instrumentalne greške**

U instrumentalne greške TLS ubrajaju se greške koje potiču od unutrašnjih uticaja instrumenta na rezultate merenja. Potiču od nesavršenosti sistema za merenje rastojanja, uređaja za divergenciju laserskog snopa i enkodera (horizontalni i vertikalni pravac), sinhronizacije senzora, obima laserskog snopa i stabilnosti glavnih osa TLS. Generalno

one se mogu pripisati tehničko-tehnološkom rešenju, odnosno tehničkim karakteristikama pojedinačnog TLS.

#### 4.1.1 Greške merenja rastojanja

U greške merenja rastojanja spadaju izvori koji zavise od instrumentalne preciznosti laserskog daljinomera, konstrukcije TLS i interakcije veličine obima laserskog snopa sa površi objekta.

##### 4.1.1.1 Preciznost laserskog daljinomera

Preciznost merenja rastojanja je karakteristika tehničkog rešenja laserskog daljinomera TLS. Uglavnom je uslovljena fizičkim ograničenjima samog uređaja. Korisnik na preciznost merenja pojedinačnog rastojanja ne može uticati. Tehnologija merenja rastojanja je razmatrana u poglavljima 2.2.3 i 2.2.4. Tabela 2-1 sadrži podatke o preciznost rezultata merenja rastojanja pojedinih TLS koji se koriste u geodetskom inženjerstvu.

Za TOF impulsne daljinomere (poglavlje 2.2.3), standardno odstupanje rastojanja za svaki generisani impuls (pojedinačne tačke na objektu) može se približno izraziti kao (Beraldin i dr., 2010):

$$\sigma_r \approx \frac{c}{2} \frac{t_r}{\sqrt{SNR}}, \quad [4.1]$$

pri čemu je:  $c$  – brzina svetlosti i  $SNR$  – odnos signala i šuma (*Signal To Noise Ratio*). Na primer ako se uzme da je  $SNR = 100$ , a vreme rasta laserskog impulsa  $t_r = 1$  ns, onda će standardno odstupanje rastojanja biti oko 15 mm. Više o faktorima koji utiču na vrednost  $SNR$  u [4.1] može se naći u (Reshetyuk, 2009).

Impulsni TLS skeneri uglavnom poseduju mernu nesigurnost pojedinačne dužine od 4 mm do 10 mm (pri rastojanjima do 50 m), dokle god je zadržan odgovarajući odnos signala i šuma. Standardno odstupanje rastojanja do jedne tačke na objektu se može smanjiti ponavljanjem merenja, odnosno pomoću više nekorelisanih 3D uzoraka, a zatim osrednjavanjem  $n$  nezavisnih opažanja za faktor koji je proporcionalan

kvadratnom korenu od  $n$ . Međutim, ova tehnika očigledno za posledicu ima smanjenje brzine skeniranja i obično predstavlja korisničku opciju kod pojedinih proizvođača TLS.

Za faznu AMCW tehniku merenja rastojanja (poglavlje 2.2.4.1), standardno odstupanje rastojanja približno se može izraziti kao (Beraldin i dr., 2010):

$$\sigma_{rAMCW} \approx \frac{1}{4\pi} \frac{\lambda}{\sqrt{SNR}}, \quad [4.2]$$

pri čemu je  $\lambda$  talasna dužina laserskog zraka.

Nesigurnost rezultata merenja rastojanja faznom AMCW tehnikom za primene u geodetskom inženjerstvu može biti u klasi impulsnih skenera, dok se kod određenih modela može postići tačnost i do desetog dela milimetra uz posledično manji domet, ali u isto vreme veoma velike brzine skeniranja (preko milion tačaka u sekundi).

Za faznu FMCW tehniku merenja rastojanja (poglavlje 2.2.4.2), standardno odstupanje rastojanja može se odrediti na osnovu:

$$\sigma_{rFMCW} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{c}{\Delta f} \cdot \frac{1}{\sqrt{SNR}}, \quad [4.3]$$

pri čemu je  $\Delta f$  razlika frekvencija emitovanog i reflektovanog signala.

Ova tehnika merenja nije široko zastupljena u TLS sistemima, a generalno se radi o radarskim sistemima za merenje velikih rastojanja (Beraldin i dr., 2010).

#### 4.1.1.2 Adiciona i multiplikaciona greška laserskog daljinomera TLS

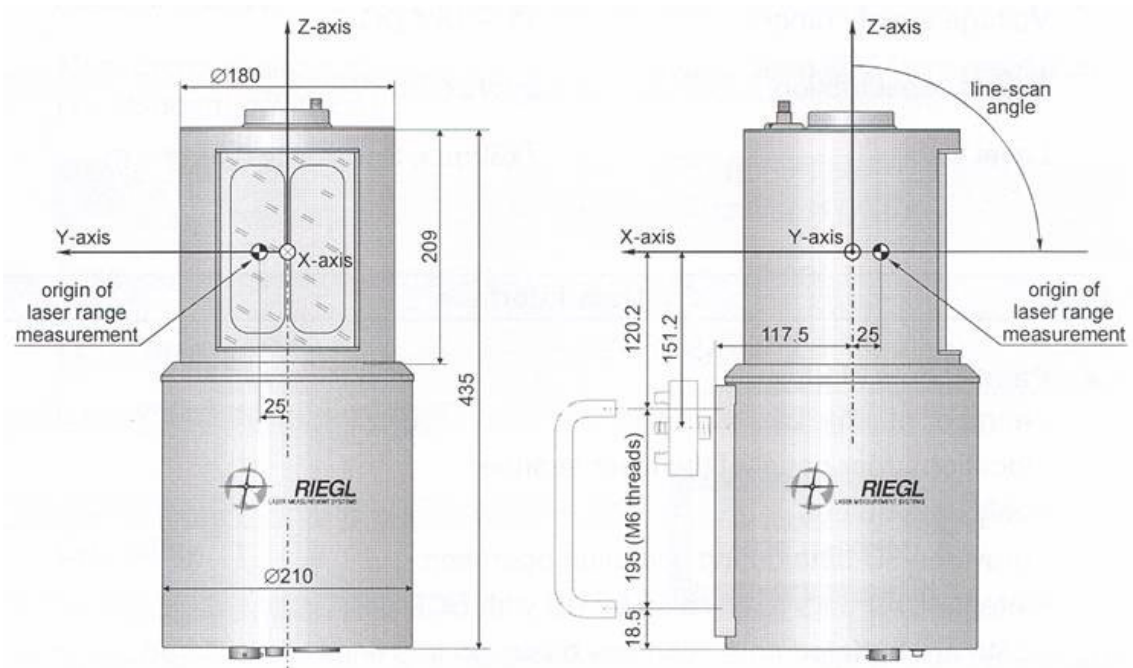
Uticao adicione i multiplikacione konstante može biti značajan na rezultate merenja rastojanja. Fizički i mehanički razlozi postojanja ovih uticaja slede potpunu analogiju sa TS, obzirom da je tehnologija merenja rastojanja TLS i TS kompatibilna.

Ukoliko je rezultat merenja rastojanja  $\rho$  opterećen postojanjem adicione  $a_0$  i multiplikacione greške  $m$ , onda greška rezultata merenja rastojanja  $\Delta\rho$  glasi:

$$\Delta\rho = a_0 + m \cdot \rho. \quad [4.4]$$

Obzirom na relativno kratke dužine skeniranja u inženjerskoj geodeziji posebno se mora obratiti pažnja na adicijonu grešku. U primenama koje uključuju merenja većih rastojanja uticaj multiplikacione greške može postati značajan.

Adiciona greška i adicijona konstanta su posledica nepoklapanja mehaničke „nule“ TLS i električne nulte pozicije daljinomera (Slika 4-1). Prilikom konstruisanja i izrade TLS, ove dve pozicije se ne poklapaju idealno, te se u okviru fabričke kalibracije određuje adicijona konstanta i implementira u kalibracioni model skenera. I pored kalibracije, ova konstantna veličina teorijski je uvek prisutna i opterećuje uzorak merenja rastojanja adicijonom greškom. Značajan uticaj na uzorak merenja može imati usled posledica eksploatacije TLS. Vrednost adicione greške je različita i zavisi od konkretnog TLS instrumenta. Za skenere koji se koriste u inženjerskog geodeziji očekivana i korektna vrednost adicione greške je u rangu od 1 mm do 2 mm, pri standardnom odstupanju pojedinačnog rastojanja ranga oko 5 mm do 6 mm (jedna trećina ukupne greške).



Slika 4-1 Adiciona greška TLS daljinomera. Dvodimenzionalno nepoklapanje mehaničke nulte pozicije daljinomera TLS i elektrooptičke „nule“ (Riegl, 2001)

Efekat neinstrumentalne prirode na veličinu ove konstante ima i reflektivnost površi objekta. Metodološki gledano, ovaj uticaj ne spada u instrumentalne izvore grešaka

opažanja, ali objektivno ima značaj jer je njegov uticaj teško izdvojiti u realnom uzorku terenskih merenja.

Multiplikaciona greška je, kao što je očigledno iz [4.4], proporcionalno zavisna od veličine rastojanja koje se meri. Fizička interpretacija ove greške je u nestabilnosti inicijalne frekvencije laserskog daljinomera i nekorigovanih doprinosa promenljivih vrednosti temperature, pritiska i vlažnosti vazduha.

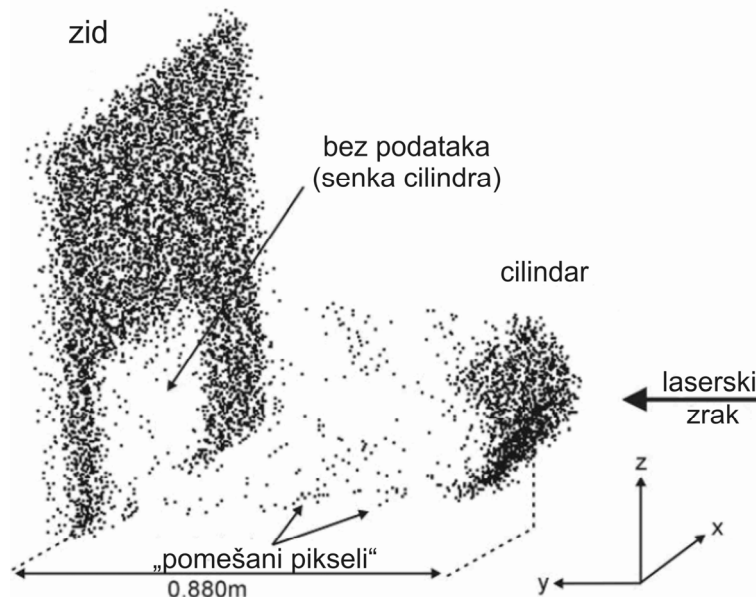
#### ***4.1.1.3 Uticaj obima laserskog snopa na nesigurnost rezultata merenja rastojanja - efekat „izmešanih piksela“***

Obim laserskog snopa na objektu (*spot size*) je karakteristika lasera razmatrana u poglavlju 2.2.2. Veličina ovog obima je važna instrumentalna karakteristika pojedinačnog tipa TLS.

U interakciji sa objektom, parametar obima lasera  $\delta$  ima uticaj na rezultat merenja rastojanja, ali takođe i na vrednost pravaca (poglavlje 4.1.2.3). Ulazni ugao laserskog zraka, ukoliko nije u pravcu normale na površ, doprinosi da obim laserskog zraka ima formu elipse. To rezultira variranjem vremena puta lasera, odnosno rastojanja do objekta. Takođe, sličan efekat se javlja ukoliko postoji značajna hrapavost površi. Hrapavost i uticaj upadnog ugla laserskog zraka su razmatrani u okviru poglavlja 4.3.

Možda najznačajniji efekat interakcije laserskog zraka sa objektom usled uticaja veličine obima lasera je efekat „repa komete“ (*tail of comet*) ili „izmešanih piksela“ (*mixed pixels*). Javlja se ukoliko laserski zrak delovima svog obima zahvati dve površi na objektu koje su razdvojene u pravcu prostiranja laserskog zraka, odnosno ukoliko se vrši skeniranje ivice površi objekta.

Ukoliko impulsni merni sistem nije konstruisan da razdvoji signale prvog i poslednjeg impulsa (*full waveform* sistem), onda se kod impulsnog TLS u podacima merenja rastojanja javlja šum, i to ukoliko je rastojanje između dve skenirane površi manje od jedne polovine dužine impulsa  $l_p$ , definisanog izrazima [2.8] i [2.9]. U toj situaciji, jednostavno rečeno, kao posledica osrednjavanja vremena putovanja do objekta i nazad do prijemnika jeste da je skenirana tačka negde između ova dva mesta (Slika 4-2).



Slika 4-2 Efekat izmešanih piksela podataka skeniranog cilindra i zida na rastojanju manjem od polovine dužine impulsa  $l_p$  kod impulsnog TLS - Riegl LMS-Z210. (prema Lichti i Skaloud, 2010)

Kod faznih AMCW skenera, efekat izmešanih piksela se ne može u potpunosti otkloniti i oni su značajno osetljiviji na ovu pojavu. U slučaju da se jedna površ nalazi iza druge i ako zrak zahvati ivicu prednje površi, lokacija registrovane rezultujuće tačke dobija se kao kompleksan broj, sa komponentama vektora (Hebert i Krotkov, 1992):

$$v = I + \varphi i, \quad [4.5]$$

pri čemu  $\varphi$  figuriše kao faza proporcionalna rastojanju, a  $I$  predstavlja intenzitet povratnog signala koji zavisi od rastojanja, reflektivnosti površi, upadnog ugla zraka na objektu, itd. Rezultujući elementi izmešanih piksela nastalih na osnovu dve refleksije  $v_1$  i  $v_2$ , računaju se na sledeći način:

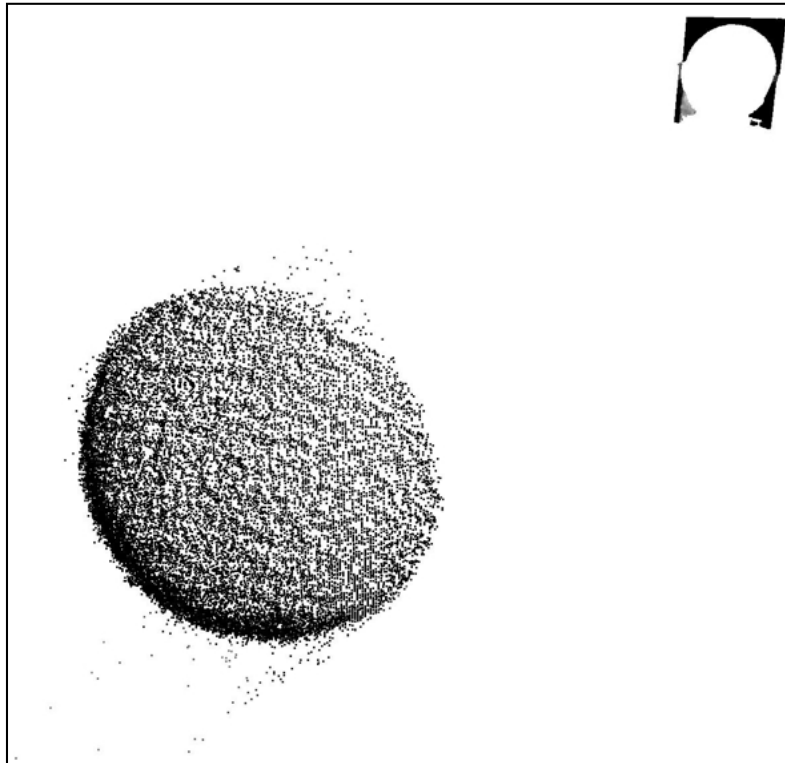
$$v = v_1 + v_2 = I_1 + I_2 + (\varphi_1 + \varphi_2)i. \quad [4.6]$$

Uzimajući u obzir faznu razliku  $\Delta\varphi$ , mogu nastupiti dva slučaja:

$$\begin{aligned} 1. \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \leq \pi \\ 2. \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 > \pi \end{aligned} \quad [4.7]$$

Posledica [4.7] je da se loše tačke mogu javiti ispred ili iza objekta (Slika 4-3).

U ovom kontekstu, poželjno je da obim lasera bude što manji čime je i manja verovatnoća pojave efekta izmešanih piksela. Sa druge strane, mala veličina laserskog obima ima i negativne implikacije na performanse laserskog sistema merenja rastojanja.



Slika 4-3 Efekat izmešanih piksela. Sfera skenirana ispred zida. Izmešani pikseli su ispred i iza sfere kao rezultat primene fazne AMCW tehnike merenja rastojanja (prema Schulz, 2007)

## 4.1.2 Greške merenja vrednosti horizontalnog i vertikalnog pravca

### 4.1.2.1 Preciznost merenja pravaca

Kao i kod rastojanja, preciznost merenja pravaca laserskog snopa je karakteristika tehničkog rešenja uređaja za skretanje laserskog snopa TLS i enkodera koji registruju tu vrednost. Uslovljena je tehničkim ograničenjima uređaja, i različito je koncipirana za poligone i galvanometrijske TLS (detaljnije u Reshetyuk, 2009). Tehnologija divergencije laserskog snopa i merenja te vrednosti je razmatrana u poglavlju 2.3.

Korisnik na instrumentalnu preciznost merenja pravaca ne može uticati. Tabela 2-1 sadrži podatke o preciznost rezultata merenja horizontalnog i vertikalnog pravca pojedinih komercijalnih TLS.

#### *4.1.2.2 Adiciona i multiplikaciona greška u rezultatima merenja pravaca*

Vertikalni pravac je opterećen uticajem sopstvene adicione greške koja odgovara greški vertikalnog indeksa kod TS. Uzrokovana je mehaničkim nepoklapanjem ogledala i vertikalnog enkodera. Takođe, prisutan je i uticaj greške razmere (multiplikaciona greška) na vrednosti rezultata merenja pravaca. Uglovne pozicije ogledala se uzorkuju enkoderom u fiksnim razmacima. Vrednost ugla se dobija kao suma registrovanih pomaka. Ukoliko se nominalni pomeraji razlikuju od registrovanih, u sumi se javlja multiplicirajući efekat (Reshetyuk, 2009).

#### *4.1.2.3 Greška merenja vrednosti pravaca usled uticaja obima laserskog snopa*

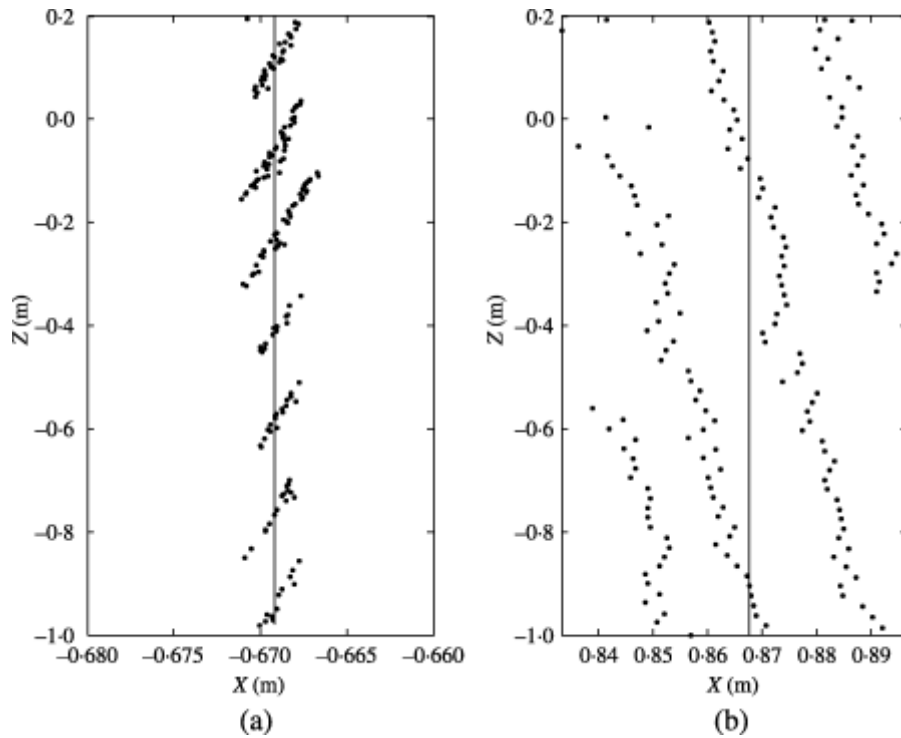
Uticaj obima laserskog snopa na vrednosti rezultata merenja pravaca je parametar koji se ne može zanemariti. Linija na objektu se materijalizuje ekspozicijama lasera tokom skeniranja i često je vidljiva golim okom u toku skeniranja ukoliko je talasna dužina lasera u vidljivom delu spektra i ako je u pitanju sporiji skener (npr. Leica HDS 3000). Rezultat merenja rastojanja se odnosi na tu vertikalnu liniju na objektu. Međutim, pozicije tačaka se ne mogu predvideti jer mogu ležati bilo gde u okviru pojedinačnih obima laserskog snopa na objektu. Dobra ilustracija ove pojave je uzorak skeniranih tačaka jedne vertikalne linije (Slika 4-4). Obzirom da se prava lokacija ove linije na objektu ne može egzaktno utvrditi, njena pozicija se utvrđuje na osnovu najboljeg MNK uklapanja (Lichti i Gordon, 2004).

Uglovno standardno odstupanje laserskog snopa, usled uticaja veličine njegovog prečnika, ima uticaj na ukupno standardno odstupanje merenja uglova i modelira se na sledeći način (Lichti i Gordon, 2004):

$$\sigma_{ls} = \frac{\delta}{4}, \quad [4.8]$$

pri čemu je  $\delta$  širina laserskog snopa u uglovnim jedinicama.





Slika 4-4 Uticaj veličine obima laserskog zraka na uglovno odstupanje. Oblak tačaka skenirane vertikalne linije i ocenjena MNK prava. (a) Leica HDS 2500 - obim zraka: 6 mm/50 m); (b) Riegl LMS-Z210 - obim zraka: 150 mm/50 m (Lichti i Jamtsho, 2006)

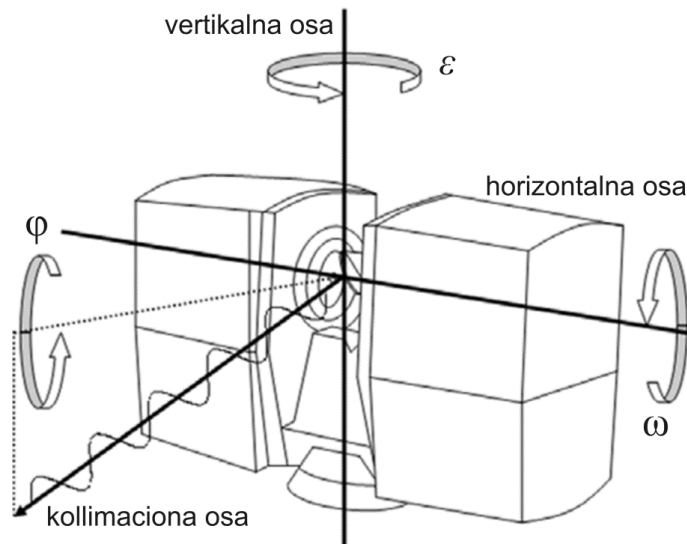
### 4.1.3 Greške sinhronizacije senzora

Problem sinhronizacije senzora je prisutan obzirom na velike brzine prikupljanja podataka pomoću TLS.

Tri sistema (laserski daljinomer, horizontalna i vertikalna ogledala) moraju biti skoro idealno sinhronizovana. Mala greška u sinhronizaciji pokreta ogledala u odnosu na daljinomer rezultira greškom ugla  $\theta$  ili  $\varphi$ , zavisno od toga koje ogledalo nije sinhronizovano. Greška se prostire ortogonalno u odnosu na pravac prostiranja laserskog zraka i teško ju je kvantifikovati. Međutim, distribucija grešaka nesinhronizacije senzora na greške oblaka tačaka je predvidljiva ukoliko je TLS stacionaran. Ovaj uticaj je predmet fabričke kalibracije (Hebert and Krotkov, 1992).

#### 4.1.4 Greške glavnih osa TLS

Svi sistemi za polarno merenje koordinata tačaka, pa time i sistem TLS, su opterećeni uticajem nesavršenosti međusobnog položaja glavnih instrumentalnih osa. Slika 4-5 ilustruje položaj glavnih osa TLS.



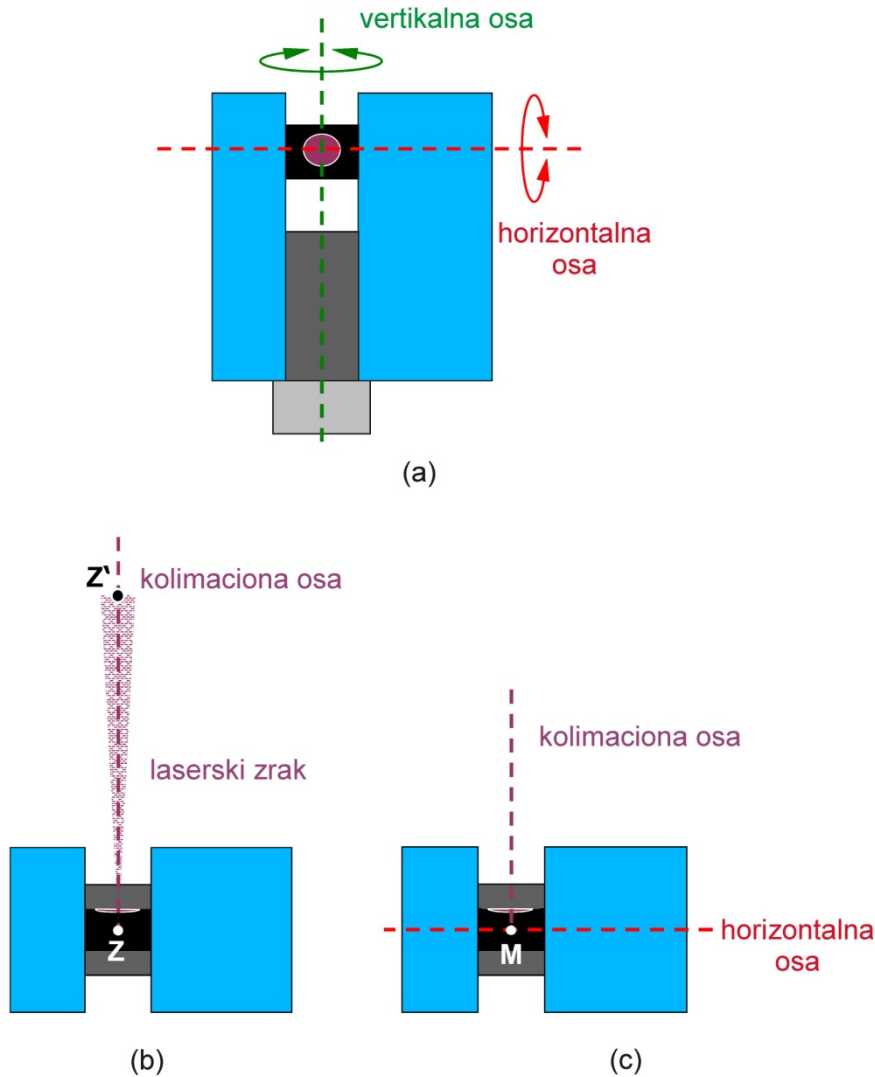
Slika 4-5 Glavne ose TLS (Lichti, 2010)

##### 4.1.4.1 Definicija glavnih osa TLS

*Vertikalna osa* TLS kod panoramskih skenera predstavlja osu oko koje rotira skener. Ukoliko je TLS horizontiran, ova osa leži u vertikalnoj ravni. Za kamera-skener TLS (LeicaHDS3000, Scan Station 2) ova osa se definiše kao osa koja je ortogonalna dvema međusobno ortogonalnim osama oscilatornog ogledala. U literaturi ova osa se naziva i *rotacionom osom*.

*Kolimaciona osa* TLS predstavlja osu koja prolazi kroz centar skenerskog ogledala i kroz centar laserskog snopa na objektu. Kolimaciona osa TLS, dakle, koincidira sa laserskim zrakom. U klasičnoj geodetskoj literaturi ova osa se naziva *osom vizure*.

*Horizontalna osa* TLS predstavlja obrtnu osu rotacije skenerskog ogledala. U stranoj literaturi se mogu naći i termini *tilting axis* (Neitzel, 2007) ili *trunnion axis* (Abmayr i dr., 2005; Lichti i Skaloud, 2010; Schulz, 2007; Hodge, 2010), a tradicionalno kod teodolita ova osa se naziva *obrtnom osom durbina*.



Slika 4-6 Dvodimenzionalne projekcije položaja glavnih osa TLS. (a) pogled odozgo po z-osi; (b) pogled levo po y-osi i (c) pogled napred po x-osi (Neitzel, 2007)

#### 4.1.4.2 Karakteristične greške osa TLS i ekscentriciteti

Vertikalna osa, horizontalna osa i kolimaciona osa u realnosti nisu u savršenom, međusobno ortogonalnom odnosu, i ne seku se idealno u jednoj karakterističnoj tački. U slučaju teodolita i TS, problem postojanja kolimacione greške  $c$  i greške vertikalnog indeksa  $i$  efikasno se rešava metodom rada, odnosno merenjem u oba položaja durbina. Iako postoji nekoliko modela TLS koji poseduju durbin (samo za viziranje tipskog skenerekog signala prilikom orijentacije), TLS sistemi uglavnom nemaju mogućnost viziranja. Stoga nesavršenost položaja glavnih osa ima direktni uticaj na rezultate merenja. Potpuna analogija je prisutna u slučaju merenja TS u jednom položaju durbina.

Ovi uticaji se mogu odrediti unapred i mogu se uvesti korekcije opažanja. Kod TS, u proceduri pre snimanja detalja u jednom položaju durbina, operater može uvesti korekciju vertikalnog ugla (za veličinu određene greške vertikalnog indeksa) i horizontalnog pravca (za veličinu prethodno određene vrednosti kolimacione greške). Kod TLS razlika je u tome što korisniku po pravilu nije omogućena implementacija korekcija u softveru skenera te se ne mogu direktno dobiti popravljena opažanja. Opširnije o kalibraciji TLS i njenim aktuelnim ograničenjima u poglavlju 5.

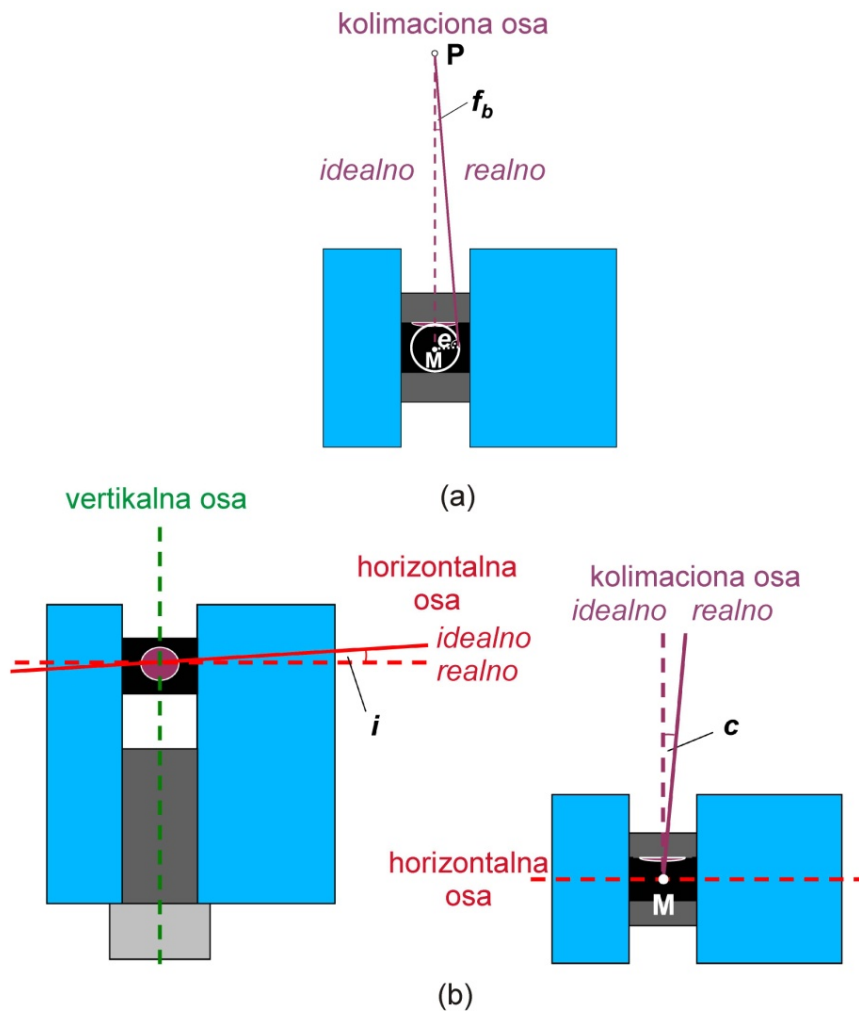
Najznačajniji uticaj na rezultate opažanja TLS imaju kolimaciona greška  $c$ , greška vertikalnog indeksa (*tilting axes error*) i greška ekscentriciteta kolimacione ose  $e$ . Greška vertikalnog indeksa je prisutna ukoliko horizontalna osa nije normalna na vertikalnu osu. Kolimaciona greška se javlja kao posledica neortogonalnosti kolimacione i horizontalne ose, a ekscentricitet kolimacione ose postoji ukoliko se kolimaciona osa i vertikalna osa ne seku u jednoj tački. Slika 4-7 ilustruje tri dominantne greške položaja glavnih osa.

Bliže određenje ovih grešaka se može dati kroz definicije (Neitzel, 2007):

- Greška vertikalnog indeksa  $i$ : Ugao između obrtne ose ogledala (horizontalna osa) i normale na rotacionu osu skenera (vertikalna osa) meren u ravni ose rotacije skenera i obrtne ose ogledala.
- Kolimaciona greška  $c$ : Ugao između ose kolimacije i normale na obrtnu osu ogledala meren u horizontalnoj ravni koju definišu osa kolimacije i obrtna osa ogledala.
- Ekscentricitet kolimacione ose  $e$ : Poluprečnik kružnice oko tačke M (Slika 4-7) na vertikalnoj osi, koju obrazuje kolimaciona osa (kao tangenta kružnice) prilikom rotacije gornjeg dela instrumenta.

Schulz (2007) razmatra uticaje nesavršenosti glavnih osa TLS sa aspekta inženjerske geodezije. Opravdano, ekscentricitet centra skenera se analizira u odnosu na referentnu geodetsku osnovu, a ne samo međusobni odnos glavnih osa. Pravo je pitanje gde se realni centar TLS nalazi u odnosu na centralnu tačku geodetskog stuba nad kojom je centrisan. Poštujući taj pristup, ekcentricitet centra skenera je definisan u tri pravca,

odnosno po tri glavne ose ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). U tom smislu, vertikalni ekscentricitet predstavlja visinsku razliku između instrumentalnog i referentnog (mesto u odnosu na koje se meri visina TLS) centra skenera. Horizontalni ekscentricitet predstavlja dve horizontalne razlike između instrumentalnog centra i referentne (kontrolne) tačke.



Slika 4-7 Dvodimenzionalna projekcija najznačajnijih grešaka usled uticaja položaja glavnih osa TLS. (a) greška ekscentriciteta kolimacione ose  $e$ ; (b) kolimaciona greška  $c$  i greška vertikalnog indeksa  $i$  (Neitzel, 2007)

Određivanje horizontalne vrednosti ekscentriciteta centra TLS je sprovedeno u Metrološkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu tokom 2010. godine. Ispitivan je skener Leica HDS 3000 koji ne poseduje dvoosni kompenzator, te se ekscentricitet centra signala u horizontalnoj ravni kretala od 0.1 mm do 3.4 mm, zavisno

od stepena horizontiranosti instrumenta pri različitim i međusobno nezavisnim horizontiranjima instrumenta (detaljnije u poglavlju 7.1).

#### **4.1.4.3 Efekat klaćenja osa TLS**

Značajan uticaj može predstavljati nesigurnost položaja osa TLS tokom rotacije instrumenta (klaćenje). Idealan slučaj je da osa tokom rotacije ima konstantnu orijentaciju, međutim u praksi to nije slučaj. Razlog za to je nesavršenost izrade sklopa mehaničkih komponenti i ležajeva. Ovaj uticaj se uvećava ukoliko je TLS postavljen na postolje (*tribrach*). Takođe, tokom eksploatacije TLS može doći do istrošenosti mehaničkih komponenti i dodatnog efekta klaćenja. Zbog velike težine TLS, efekat klaćenja vertikalne ose je značajniji od onog kod TS. Ova pojava je istraživana za skener Imager 5003 (Schulz i Ingensand, 2004b; Schulz, 2007) i MENSİ GS 100/GS 200 (Kersten i dr., 2005).

Schulz (2007), je ispitivao klaćenje vertikalne ose postavljanjem inklinacionog senzora Leica Nivel 20 na vrh TLS. Utvrđeno je da klaćenje vertikalne ose postoji sa amplitudom od 0.1 mrad do 0.2 mrad, odnosno značajan uticaj od 1 mm/10 m do 2 mm/10 m za Imager 5003 Zoller+Fröhlich GmbH.

Kersten i dr. (2005), za TLS MENSİ GS 100/GS 200, koristeći sličnu metodologiju kao Schulz (2007), utvrdili su klaćenje vertikalne ose u rasponu amplitude od 0.2 mm/m do 0.6 mm/m, zavisno od vrste postolja instrumenta.

Važno je napomenuti da se pored klaćenja vertikalne ose TLS, ono može javiti i kod horizontalne ose TLS usled rotacije ogledala, ali zbog male težine ovog sklopa uticaj je značajno manji.

## **4.2 Greške koje potiču od uticaja sredine**

Činjenica da se EM energija prostire kroz nehomogenu atmosferu u vidu različite temperature, pritiska i vlažnosti vazduha, uz postojanje uticaja iluminacije i vibracija, za posledicu ima poremećaje u geometriji i/ili intenzitetu laserskog zraka.

Variranje geometrije zraka je poznato kao uticaj refrakcije koja dovodi do iskrivljenja zraka, za razliku od idealne sredine odnosno vakuuma, u kojem se talas kreće pravolinijski.

#### **4.2.1 Atmosferski uticaji**

Varijacija intenziteta laserskog zraka uslovljena atmosferom, naziva se scintilacija ili svetlucanje. Posledica je rasipanja i apsorpcije laserskog zraka. Stepem slabljenja intenziteta laserskog zraka zavisi od faktora kao što su: talasna dužina laserskog zraka, rastojanje do objekta, temperatura, pritisak, sastav vazduha, vremenski uslovi i stepen prisustva mikroskopskih čestica u vazduhu. Detaljnije o ovom se može naći u Reshetyuk (2006) i Reshetyuk (2009).

Takođe, fluktuacije intenziteta su uzrokovane i optičkim turbulencijama koje zavise od vrednosti indeksa refrakcije. Kod sistema za određivanje rastojanja na osnovu brzine svetlosti korekcija je reda veličine oko 300 mm/km u odnosu na vakuum i uglavnom je primenjena u okviru fabričke kalibracije TLS (Beraldin i dr., 2010).

Disperzija je efekat koji se definiše kao međusobna zavisnost brzine prostiranja laserskog zraka i vrednosti talasne dužine lasera. Svaki laser poseduje dovoljno uzak spektar EM zračenja da se može okarakterisati kao monohromatski. Brzina prostiranja je određena grupnom brzinom koja poseduje karakterističnu frekvenciju i talasnu dužinu, odnosno grupni indeks refrakcije koji se mora uzeti u obzir. Zavisno od koeficijenta refrakcije određene grupe, dužina koja se meri mora se korigovati, a to je poznato kao prva korekcija brzine.

Temperatura, atmosferski pritisak i vlažnost vazduha imaju uticaj na gustinu vazduha, a samim tim i na indeks refrakcije i brzinu prostiranja EM talasa. U geodetskom inženjerstvu gde je položajna tačnost jedan od prioriteta, temperatura i vazdušni pritisak se uzimaju u obzir prilikom merenja. Najčešće su podrazumevane vrednosti temperature i pritiska kod geodetskih instrumenata prema ISO standardu podešene na 15 °C i 1013.25 hPa (Coşarcă, 2009). Ukoliko je temperatura značajno različita od standardne potrebno je primeniti dodatne korekcije. Na primer, ukoliko se temperaturna razlika od 10 °C ne uzme u obzir, uticaj na rezultat merenja rastojanja je 10 mm/km. Uticaj

vazdušnog pritiska je komparativno manji od uticaja temperature. Promena vrednosti vazdušnog pritiska od 35 hPa rezultira uticajem na rezultat rastojanja od 1mm/100 m. Ukoliko se skeniranje objekta vrši sa malih i srednjih rastojanja, ili ukoliko su dimenzije objekta relativno male, ovi uticaji se mogu zanemariti. Vlažnost vazduha se uglavnom može zanemariti, sem ukoliko se merenja vrše u uslovima magle kada nastaje značajan šum (grube greške) u podacima.

Unutrašnja temperatura TLS može biti značajno različita u odnosu na temperaturu sredine, usled zagrevanja komponenti TLS prilikom rada ili usled eksternih uticaja sunčevih zraka na TLS ili stativ. U tim slučajevima, poznate procedure temperiranja TLS i zaštite od direktnog sunčevog zračenja mogu svesti ove uticaje na manju meru.

TLS uglavnom mogu raditi u određenom temperaturnom opsegu, najčešće u rasponu od -10 °C ili 0 °C do 40 °C ili 50 °C, zavisno od tipa TLS. Van ovog raspona TLS najverovatnije neće funkcionisati pouzdano.

#### **4.2.2 Uticaji vremenskih prilika**

Poremećajni faktori na skeniranje su prisutni zahvaljujući i uticaju vremenskih prilika, odnosno prisustvu izmaglice, magle, kiše ili snega u atmosferi (Hejbudzka i dr., 2010). Sneg je manje značajan za razmatranje obzirom da je kod većine TLS (izuzev pojedinih modela Riegl TLS i novog Leica ScanStation P20) radna temperatura iznad tačke smrzavanja vode.

U uslovima padavina, magle i izmaglice glavni uzrok slabljenja intenziteta laserskog zraka je efekat rasipanja. U slučaju magle i izmaglice, zahvaljujući manjoj veličini čestica vode (oko 500 nm), stepen rasipanja zavisi od talasne dužine laserskog zraka. Značajniji efekat rasipanja je prisutan ukoliko je zrak u vidljivom delu spektra EM zračenja. Prodornost laserskog zraka je manja za gustu maglu nego za jaku kišu, što znači da je magla ozbiljniji problem od kiše. Rasipanje nije prisutno u slučaju kiše i snega zahvaljujući većoj veličini čestica.

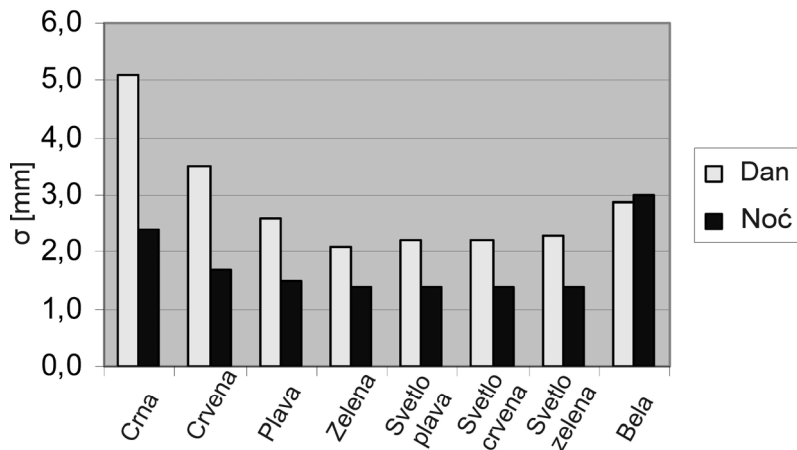
Pored efekta slabljenja laserskog zraka, može se javiti i lažni povratni efekat ili efekat „zavese“. Prisutan je ukoliko su čestice (kiše, snega, aerosola i druge) na putu laserskog



zraka dovoljno velike da aktiviraju prijemnik. Deo emitovane energije se tada odbija od čestice/čestica a deo od objekta, što rezultuje višestrukim povratnim impulsima. Ukoliko se skeniranje sprovodi u uslovima jakih padavina posledica je pojava velikog šuma u podacima, što posledično smanjuje moć detekcije objekta. Sličan fenomen nazvan višestrukim efektom (*multipath effect*) prisutan je u slučaju kontaminacije atmosfere prašinom i dimom, kada dolazi do odbijanja zraka od prepreka na putu do objekta.

### 4.2.3 Uticaj iluminacije

Prirodni i veštački izvori svetlosti takođe mogu imati uticaj na rezultat merenja (Voisin i dr., 2007), odnosno na parametar odnosa signala i šuma *SNR* (poglavlje 4.1.1.1), usled interferencije EM talasa lasera i drugog izvora svetlosti. Značajnost ove pojave je prisutna ukoliko je energija sekundarnog izvora svetlosti komparativno veća u odnosu na energiju laserskog zraka. Može biti smanjena ugradnjom specijalnih filtera. Stoga je očigledno da skeniranje noću ima prednosti u odnosu na skeniranje danju.



Slika 4-8 Preciznost modeliranja ravni na osnovu podataka skeniranja u uslovima noći i dana. TLS Trimble GX. Zeleni laser. (Voegtler i dr., 2008)

Voegtler i dr. (2008), za impulsni TLS Trimble GX ( $\lambda=532$  nm - zelena), pri rastojanju skeniranja od 14 m, izveštavaju prisustvo ovog uticaja na crnim površima objekta gde je preciznost modelirane ravni na osnovu skeniranja uvećana gotovo 2 puta (sa  $\sigma = 5$  mm danju na  $\sigma = 2.4$  mm noću), dok je za svetle nijanse boja površi i zelenu boju (boja

lasera) uticaj iluminacije manji (sa  $\sigma = 2.2$  mm danju na  $\sigma = 1.4$  mm noću). Za bele površi uticaj iluminacije na preciznost merenja nije značajan (Slika 4-8).

#### **4.2.4 Uticaj vibracija i nestabilnosti TLS**

Kao poseban uticaj sredine, Reshetyuk (2009) razmatra i uticaje vibracija i nestabilnosti skenera. Izvori ovih nestabilnosti mogu biti kretanja (ljudi, vozila) oko TLS, nestabilnost oslonca stativa, uticaj vetra i drugi. TLS je u većoj meri osetljiv na ove uticaje u odnosu na klasične geodetske instrumente zbog svoje složene konstrukcije. Posebno je osetljiv sistem za divergenciju laserskog snopa i merenje vrednosti pravaca. Posledica nestabilnosti je distorzija oblaka tačaka. Zbog ove osetljivosti i veće težine TLS instrumenata, potrebno je TLS postavljati na robusniji stativ u odnosu na onaj na koji se postavlja TS ili nivelir.

### **4.3 Greške koje potiču od karakteristika objekta skeniranja**

Pored do sada nabrojanih izvora grešaka koje utiču na tačnost TLS sistema, uticaj na skeniranje ima i objekat skeniranja.

U prvu grupu uticaja se mogu svrstati prostorni faktori, odnosno veličina objekta skeniranja i njegova prostorna konfiguracija (orijentacija u prostoru). Ovi faktori utiču na planiranje eksperimenta, odnosno na izbor lokacije mesta stajališta TLS (Soudarissanane i dr., 2008; Soudarissanane i dr. 2011) i na veličinu prostorne rezolucije skeniranja (Lindenbergh i dr., 2005), odnosno deo je konfiguracije eksperimenta.

Druga grupa uticaja karakteristika objekta na nesigurnost podataka TLS sistema može se pripisati fizičkim ograničenjima zakona refleksije i optičkim svojstvima površi objekta. Jačina detektovanog povratnog signala zavisi od rastojanja do objekta, atmosferskih uslova, veličine upadnog ugla laserskog zraka i stepena reflektivnosti površi (*albedo*).

### **4.3.1 Reflektivnost površi objekta**

Jačina povratnog signala u optimalnim uslovima atmosfere i pri kratkim rastojanjima do objekta u najvećoj meri zavisi od reflektivnosti površi objekta. Reflektivnost se definiše kao odnos između reflektovane jačine zračenja i inicijalne jačine zračenja, neposredno pre kontakta sa objektom (Ingensand i dr., 2003; Schaepman-Strub i dr., 2006). Skenirani oblak tačkica se može tumačiti i kao monohromatski prikaz relativne reflektivnosti objekta. Sistem TLS nakon emitovanja beleži amplitudu (intenzitet) svakog registrovanog eha kao vrednost u definisanom domenu od 8 bita ili 16 bita.

Reflektivnost površi objekta skeniranja predstavlja funkciju sledećih faktora (Reshetyuk, 2006):

- Osobine materijala objekta, kao što su električna i magnetna provodljivost (više u Lichti i Harvey, 2002);
- Boja površi;
- Talasna dužina lasera;
- Hrapavost površi;
- Temperatura površi i
- Vlažnost površi.

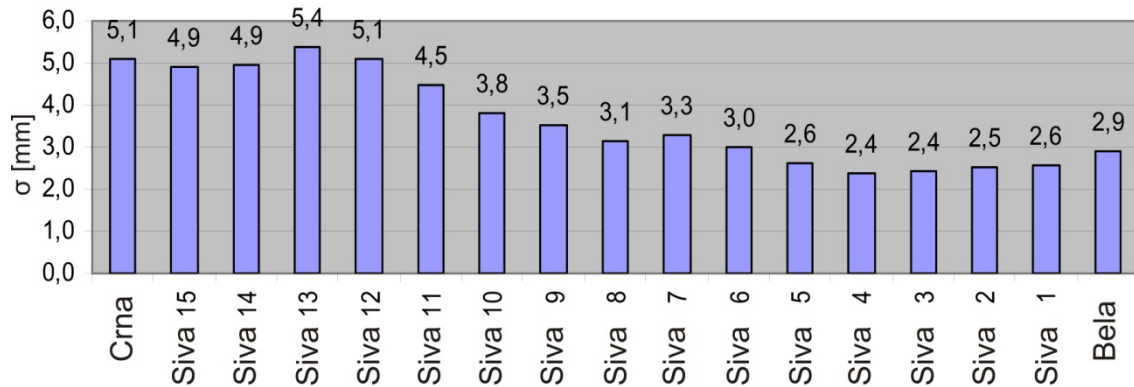
#### **4.3.1.1 Boja površi i talasna dužina lasera**

Bele površi rezultuju jakim refleksijama zraka, dok je kod crnih refleksija mala. U slučaju obojenih površi stepen reflektivnosti zavisi od talasne dužine lasera, odnosno od uskog monohromatskog opsega kojem svetlost lasera pripada. TLS uglavnom koriste talasne dužine u opsegu zelene, crvene ili infracrvene vrednosti. Tranzicija laserske svetlosti na objektu u toplotu predstavlja apsorpciju, dok remisija kvantifikuje apsorpciju (Bucksch i dr., 2007). Ukoliko vrednost remisije iznosi 100% sva svetlost je apsorbovana. Reflektivnost materijala varira od 0% (crna guma, ugalj) do 100% za sneg u vidljivom delu spektra EM zračenja (Beraldin i dr., 2010).

Tabela 4-1 Reflektivnost različitih materijala pri  $\lambda=0,9\mu\text{m}$  - blisko IC područje (Riegl, 2006)

Materijal	Reflektivnost
Retroreflektivna folija (tip 3M2000X)	1250 %
Glatka bela plastika	110%
Glatka crna plastika	110%
Beli papir	do 100%
Rezana građa (bor, čist i suv)	94%
Sneg	80-90%
Pivska pena	88%
Bela građevina	85%
Krečnjak, glina	do 75%
Štampane novine	69%
Toaletni papir, dva sloja	60%
Lišćari	60%
Četinari	30%
Karbonitni pesak (suv)	57%
Karbonitni pesak (vlažan)	41%
Pesak morski, pustinjski	50%
Grubo drvo, paleta	25%
Beton, gladak	24%
Asfalt sa šljunkom	17%
Lava	8%
Crna veštačka guma	5%
Crna guma	2%

Reflektivnost površi se odražava na preciznost i tačnost merenja rastojanja. Tačnost merenja rastojanja se razlikuje zavisno od boje površi objekta. Ovaj efekat se može eksperimentalno utvrditi. Na primer, ukoliko su delovi jedne ravni obojeni različitim nijansama boja i nijansama sivog tona (od 1 do 15), preciznost rastojanja se odražava na nesigurnost modeliranja te ravni (Hanke i dr., 2006; Voegtle i dr., 2008). U eksperimentalnim istraživanjima (Voegtle i dr., 2008) za impulsni skener Trimble GX (zeleni laser), ustanovljeno je da je standardno odstupanje MNK modelirane ravni za tamnije nijanse sivog tona oko  $\sigma = 5 \text{ mm}$  i oko  $\sigma = 2.5 \text{ mm}$  za svetlije nijanse pri optimalnoj iluminaciji i rastojanju skeniranja oko 14 m (Slika 4-9). Sličan red veličine postignute preciznosti je za nijanse crvene, zelene i plave boje (Slika 4-8).

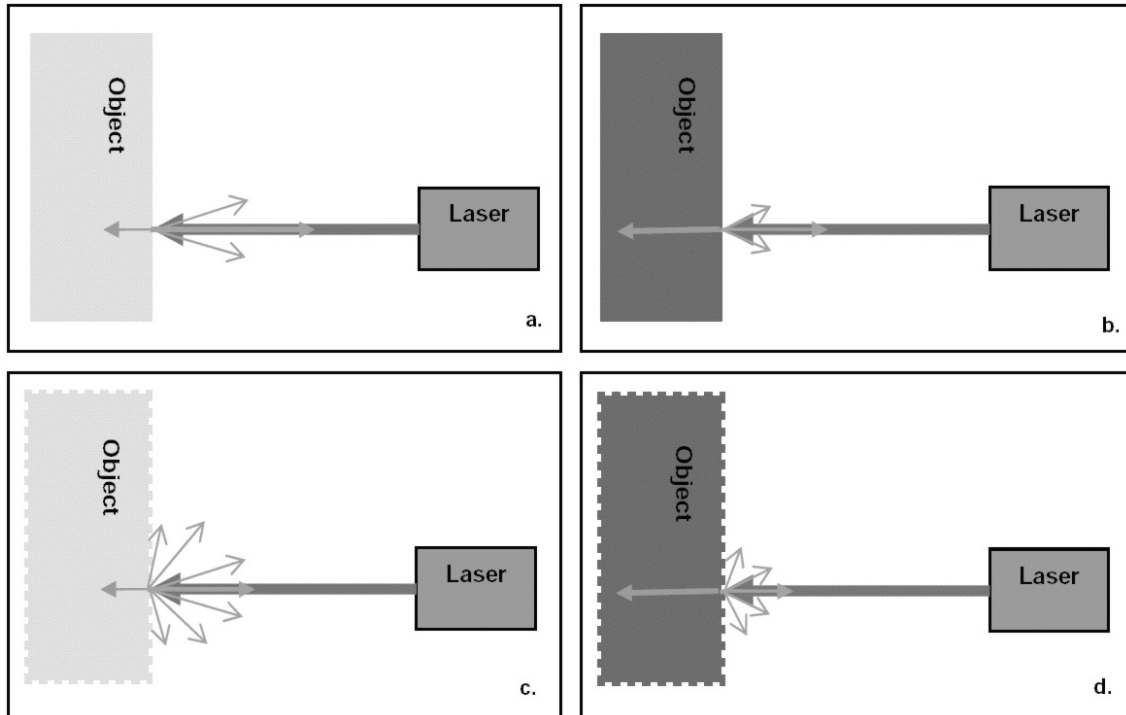


Slika 4-9 Zavisnost preciznosti modeliranja ravni na osnovu podataka skeniranja objekta različitih nijansi sivog tona. TLS Trimble GX, zeleni laser -  $\lambda=532$  nm. (Voegtle i dr., 2008)

Reflektovani eho od tačke male reflektivnosti ima malu amplitudu u odnosu na tačku visoke reflektivnosti. Posledica ovog je da se javlja pomerenost ocene rastojanja. Na primer, apsolutno bela površ u odnosu na apsolutno crnu površ, koje se nalaze u istoj ravni će se detektovati iza crne. Za materijale ekstremnih vrednosti refleksije, greške mogu dostići i nekoliko puta veću vrednost od deklarisanog standardnog odstupanja pojedinačnog merenja rastojanja (Boehler i dr., 2003).

#### 4.3.1.2 Hrapavost površi

Uticaj hrapavosti na refleksiju laserskog zraka takođe može biti značajan. Efekat rasipanja zraka zavisi od stepena hrapavosti površi. Ukoliko se laserski zrak odbije od dovoljno glatke površi poput vode, stakla ili ogledala, detektor neće registrovati signal ukoliko površ objekta nije normalna na pravac zraka (Slika 4-10a i Slika 4-10b). Isijavajuće površi i objekti veoma visoke reflektivnosti (npr. prizme) doprinose visokom šumu u podacima. Drugi ekstrem predstavlja idealno hrapava površ, kada se dešava efekat „Lambertian“ rasipanja, odnosno dolazeća svetlost se rasipa podjednako u svim pravcima (Slika 4-10c. i Slika 4-10d.). Rasipanje opisuje redistribuciju svetlosti kada ona pogodi površ objekta (Bucksch i dr., 2007).



Slika 4-10 Rasipanje i apsorpcija laserskog zraka. Svetla i glatka površ (a.). Tamna i glatka površ (b.). Svetla i hrapava površ (c.). Tamna i hrapava površ (d.). (Bucksch i dr., 2007)

#### 4.3.1.3 Temperatura i vlažnost površi

Negativni uticaj na rezultate merenja rastojanja može imati površ koja ima visoku temperaturu. Prilikom skeniranja industrijskih postrojenja, pri čemu objekat predstavlja vruću površ, dolazi do značajnog smanjenja odnosa  $SNR$  u rezultatima merenja rastojanja (opširnije u Määttä, 1993). Vlažnost površi takođe može doprineti visokom šumu, ukoliko postoji visoka refleksija laserskog zraka usled efekta isijavanja.

#### 4.3.2 Upadni ugao laserskog zraka

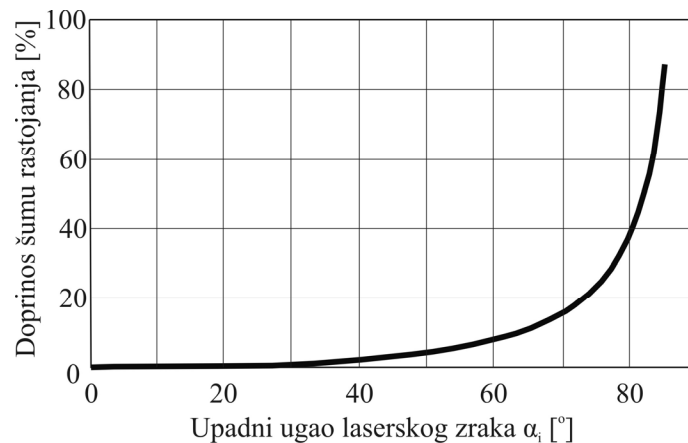
U procesu planiranja TLS eksperimenta, faktor upadnog ugla laserskog zraka na normalu površi objekta može biti ključan ograničavajući faktor. Neka je vektor  $\mathbf{P}_i$  definisan kao vektor od TLS do površi objekta u pravcu prostiranja emitovanog laserskog zraka:

$$\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i], \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad [4.9]$$

Upadni ugao laserskog zraka predstavlja ugao između vektora  $\mathbf{P}_i$  i normalnog vektora površi  $\mathbf{N}$ . Vektor  $\mathbf{N}$  se definiše kao vektor upravnan na tangentu površi objekta u tački  $i$ . Vrednost upadnog ugla laserskog zraka  $\alpha_i$  na objektu se može dobiti na osnovu relacije (Soudarissanane i dr., 2011):

$$\alpha_i = \arccos \left( \frac{\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{P}_i| \cdot |\mathbf{N}|} \right). \quad [4.10]$$

Vrednost ugla  $\alpha_i$  je uvek u intervalu  $[0 < \alpha_i < 2\pi]$ . Laserski zrak nakon emitovanja se širi u skladu sa vrednošću ugla divergencije laserskog snopa  $\gamma$  (poglavlje 2.2.2). Ukoliko laser pogodi površ pod pravim uglom, obim otiska laserskog zraka ima oblik kružnice. Međutim, ukoliko laser pogodi površ pod proizvoljnom vrednošću ugla  $\alpha_i$ , obim otiska laserskog zraka poprima oblik elipse, odnosno dobija izduženu formu. Posledica toga je slabiji intenzitet povratnog signala i smanjenje *SNR* odnosa, odnosno povećanje nesigurnosti rezultata merenja rastojanja. Pri visokim vrednostima ugla  $\alpha_i$  detekcija signala postaje otežana, čak i nemoguća, slično kao i kod velikih rastojanja skeniranja.



Slika 4-11 Doprinos upadnog ugla laserskog zraka nesigurnosti laserskog određivanja rastojanja (Soudarissanane i dr., 2009)

Ukoliko se pretpostavi da površ pogodena laserskim zrakom proizvodi „Lambertian“ rasipanje, onda je snaga energije koja je detektovana (Soudarissanane i dr., 2009):

$$P_r = kP_t \cos \alpha_i, \quad [4.11]$$

pri čemu je  $P_t$  emitovana jačina signala, dok je  $k$  konstanta uslovljena rastojanjem, reflektivnošću površi i određenim faktorima propustljivosti atmosfere. Iz izraza [4.11] je jasno da  $SNR$  opada povećanjem vrednosti ugla  $\alpha_i$  sledeći kosinusni trend. Slika 4-11 ilustruje teoretsku vrednost doprinosa vrednosti upadnog ugla laserskog zraka slabljenju signala na osnovu [4.11].

#### 4.4 Greške registracije i georeferenciranja

U ovom poglavlju definisan je stohastički model georeferenciranja indirektnom i direktnom metodom. Polazna pretpostavka je da na preciznost georeferenciranja utiču slučajne instrumentalne greške TLS i preciznost određivanja transformacionih parametara.

Ovde nisu uzete u obzir greške usled reflektivnosti objekta, različitih poremećajnih uticaja sredine, objekta, uticaja upadnog ugla laserskog zraka, itd. U geodetskom inženjerstvu, pretpostavka je da se te dodatne greške planiranjem eksperimenta i izvođenjem eksperimenta u optimalnim uslovima atmosfere mogu svesti na zanemarljivu veličinu. Ako to nije slučaj i one se mogu implementirati u model grešaka konačno georeferenciranog oblaka tačaka, odnosno u kovarijacioni model opažanja rastojanja i pravaca  $\mathbf{C}_{op}$ .

U poglavlju 4.1 su razmatrani generalni modeli sistematskih grešaka opažanja koje potiču od instrumenta. Sistematski uticaji su predmet, uglavnom, fabričke kalibracije TLS. Radi metodološke doslednosti, ovde se smatra da je njihov uticaj zanemarljiv na rezultate opažanja.

##### 4.4.1 Greške indirektnih metode georeferenciranja

Scaioni (2005) u instrumentalne (zove ih unutrašnje) izvore grešaka TLS svrstava greške izvornih opažanja (rezultati merenja uglova i dužina) i greške nastale od veličine obima laserskog snopa na objektu, odnosno odgovarajuće kovarijacione matrice



respektivno:  $\mathbf{C}_{op}$  i  $\mathbf{C}_{ls}$ . Kovarijaciona matrica unutrašnjih izvora grešaka TLS ima oblik:

$$\mathbf{C}_{unt} = \mathbf{C}_{op} + \mathbf{C}_{ls}, \quad [4.12]$$

pri čemu su dijagonalni članovi kovarijacione matrice opažanja varijanse rezultata merenja rastojanja, horizontalnog i vertikalnog ugla:

$$\mathbf{C}_{op} = \text{diag}(\sigma_\rho^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\alpha^2), \quad [4.13]$$

ili ukoliko se definitivni oblak tačaka dobija osrednjavanjem više serija merenja, što je opcija kod pojedinih TLS sistema:

$$\mathbf{C}_{op} = \frac{1}{m} \text{diag}(\sigma_\rho^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\alpha^2), \quad [4.14]$$

pri čemu je  $m$  broj ponovljenih skeniranja iste scene.

Uglovno standardno odstupanje laserskog snopa usled uticaja veličine njegovog prečnika ima uticaj na ukupno standardno odstupanje uglova i dato je izrazom [4.8]. Kovarijaciona matrica usled ovog uticaja  $\mathbf{C}_{ls}$  ima oblik:

$$\mathbf{C}_{ls} = \text{diag}(0, \sigma_{ls}^2, \sigma_{ls}^2). \quad [4.15]$$

Na osnovu izraza [4.12], [4.14] i [4.15] sledi:

$$\mathbf{C}_{unt} = \text{diag}\left(\frac{\sigma_\rho^2}{m}, \frac{\sigma_\theta^2}{m} + \sigma_{ls}^2, \frac{\sigma_\alpha^2}{m} + \sigma_{ls}^2\right). \quad [4.16]$$

Standardna odstupanja merenja uglova i dužina, kao i širina laserskog snopa spadaju u važnije karakteristike određenog tipa TLS. Proizvođači deklarišu ove veličine, pa se one mogu smatrati teorijskim varijansama.

Ukoliko je  $\mathbf{X}_s$  vektor koordinata tačke  $j$  u KS skenera, na osnovu izraza [3.1], on glasi:

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \rho_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \\ \rho_{ij} \cdot \sin \alpha_{ij} \end{bmatrix}. \quad [4.17]$$

Kovarijaciona matrica ocene vektora koordinata u KS skenera  $\mathbf{C}_{\mathbf{X}_s}$  glasi:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{X}_s} = \mathbf{A}_{op} \mathbf{C}_{unt} \mathbf{A}_{op}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \alpha_{ij}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 + \sigma_{ls}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 + \sigma_{ls}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial x_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial y_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial y_j}{\partial \alpha_{ij}} \\ \frac{\partial z_j}{\partial \rho_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_{ij}} & \frac{\partial z_j}{\partial \alpha_{ij}} \end{bmatrix}^T, \quad [4.18]$$

odnosno:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{X}_s} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_j}^2 & K_{x_j y_j} & K_{x_j z_j} \\ K_{y_j x_j} & \sigma_{y_j}^2 & K_{y_j z_j} \\ K_{z_j x_j} & K_{z_j y_j} & \sigma_{z_j}^2 \end{bmatrix}. \quad [4.19]$$

Pored ovih grešaka, u model se u daljem razmatranju uključuju i greške transformacionog modela koje zavise od geometrije skeniranog objekta i broja kontrolnih tačaka.

#### 4.4.1.1 Greške indirektnog georeferenciranja u dva koraka

Ovde je praćena metodologija indirektnog georeferenciranja u dva koraka (Slika 3-6 i poglavlje 3.2.3.2), odnosno transformacija koordinata iz skenerskog KS u KS globalne registracije, i najzad u KS kontrolne geodetske mreže.

Registracija scena transformacijom koordinata iz KS skenera  $\mathbf{X}_s$  u KS globalne registracije scena  $\mathbf{X}_g$  vrši se na osnovu prostorne rotacije  $\mathbf{R}_s$  oko koordinatnih osa vektora  $\mathbf{X}_s$  i translacijom  $\Delta \mathbf{X}_{sg}$  između  $\mathbf{X}_s$  i  $\mathbf{X}_g$  po ugledu na [3.13]:

$$\mathbf{X}_g = \mathbf{R}_s \mathbf{X}_s + \Delta \mathbf{X}_{sg}. \quad [4.20]$$

Kovarijaciona matrica koordinata  $\mathbf{C}_{\mathbf{x}_g}$  ima formu:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}_g} = \mathbf{A}_p^{sg} \mathbf{C}_p^{sg} (\mathbf{A}_p^{sg})^T + \mathbf{R}_s \mathbf{C}_{\mathbf{x}_s} \mathbf{R}_s^T, \quad [4.21]$$

pri čemu je  $\mathbf{C}_p^{sg}$  kovarijaciona matrica transformacionih parametara između skenerskog i globalnog KS po ugledu na [3.17]. Matricu dizajna  $\mathbf{A}_p^{sg}$  čine koeficijenti, odnosno parcijalni izvodi koordinata  $\mathbf{X}_g$  po transformacionim parametrima:

$$\mathbf{A}_p^{sg} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_g}{\partial \Delta X_{sg}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Y_{sg}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Z_{sg}} & \frac{\partial X_g}{\partial \omega_s} & \frac{\partial X_g}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial X_g}{\partial \varepsilon_s} \\ \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta X_{sg}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Y_{sg}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Z_{sg}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \omega_s} & \frac{\partial Y_g}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial Y_g}{\partial \varepsilon_s} \\ \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta X_{sg}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Y_{sg}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Z_{sg}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \omega_s} & \frac{\partial Z_g}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial Z_g}{\partial \varepsilon_s} \end{bmatrix}. \quad [4.22]$$

Drugi i poslednji korak je georeferenciranje oblaka tačaka u KS kontrolne geodetske mreže, odnosno šestoparametarska Helmertova transformacija iz  $\mathbf{X}_g$  u  $\mathbf{X}_k$ . Vršiti se na osnovu prostorne rotacije  $\mathbf{R}_g$  i translacije  $\Delta \mathbf{X}_{gk}$  sledećom relacijom:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{R}_g \mathbf{X}_g + \Delta \mathbf{X}_{gk}, \quad [4.23]$$

odnosno, imajući u vidu izraze [4.20] i [4.23]:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{R}_g (\mathbf{R}_s \mathbf{X}_s + \Delta \mathbf{X}_{sg}) + \Delta \mathbf{X}_{gk}. \quad [4.24]$$

Ukoliko je potrebno uzeti u obzir faktor razmere  $S_{gk}$  u slučaju da je razmera različita za skener i kontrolnu geodetsku mrežu, izraz [4.24] ima oblik:

$$\mathbf{X}_k = S_{gk} \cdot \mathbf{R}_g (\mathbf{R}_s \mathbf{X}_s + \Delta \mathbf{X}_{sg}) + \Delta \mathbf{X}_{gk}, \quad [4.25]$$

Kovarijaciona matrica koordinata  $\mathbf{C}_{\mathbf{x}_k}$  ima formu:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}_k} = \mathbf{A}_p^{gk} \mathbf{C}_p^{gk} (\mathbf{A}_p^{gk})^T + \mathbf{R}_g \mathbf{C}_{\mathbf{x}_g} \mathbf{R}_g^T. \quad [4.26]$$

Na osnovu [4.21] i [4.26] konačan oblik kovarijacione matrice glasi:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{X}_k} = \mathbf{A}_p^{gk} \mathbf{C}_p^{gk} (\mathbf{A}_p^{gk})^T + \mathbf{R}_g \left( \mathbf{A}_p^{sg} \mathbf{C}_p^{sg} (\mathbf{A}_p^{sg})^T + \mathbf{R}_s \mathbf{C}_{\mathbf{X}_s} \mathbf{R}_s^T \right) \mathbf{R}_g^T. \quad [4.27]$$

Ako se faktor razmere  $S_{gk}$  uzima kao parametar, onda je:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{X}_k} = \mathbf{A}_p^{gk} \mathbf{C}_p^{gk} (\mathbf{A}_p^{gk})^T + S_{gk}^2 \cdot \mathbf{R}_g \left( \mathbf{A}_p^{sg} \mathbf{C}_p^{sg} (\mathbf{A}_p^{sg})^T + \mathbf{R}_s \mathbf{C}_{\mathbf{X}_s} \mathbf{R}_s^T \right) \mathbf{R}_g^T. \quad [4.28]$$

$\mathbf{C}_p^{gk}$  je kovarijaciona matrica transformacionih parametara između KS globalne registracije i KS kontrolne geodetske mreže. Matrica  $\mathbf{A}_p^{gk}$  je matrica parcijalnih izvoda koordinata  $\mathbf{X}_k$  po tim transformacionim parametrima:

$$\mathbf{A}_p^{gk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_k}{\partial \Delta X_{gk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Y_{gk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Z_{gk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \omega_g} & \frac{\partial X_k}{\partial \varphi_g} & \frac{\partial X_k}{\partial \varepsilon_g} \\ \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta X_{gk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Y_{gk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Z_{gk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \omega_g} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varphi_g} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varepsilon_g} \\ \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta X_{gk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Y_{gk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Z_{gk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \omega_g} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varphi_g} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varepsilon_g} \end{bmatrix}. \quad [4.29]$$

Ukoliko se uzima i faktor razmere kao relevantan, matrica dizajna [4.29] ima još jednu kolonu za  $\frac{\partial \mathbf{X}_k}{\partial S_{gk}}$ .

#### 4.4.1.2 Greške indirektnog georeferenciranja u jednom koraku

Metodologija indirektnog georeferenciranja u jednom koraku (poglavlje 3.2.3.2 i Slika 3-7) podrazumeva izuzimanje globalne registracije scena iz postupka, odnosno vrši se direktna transformacija koordinata iz  $\mathbf{X}_s$  u  $\mathbf{X}_k$ . Sprovodi se na osnovu prostorne rotacije  $\mathbf{R}_{s'}$  oko koordinatnih osa vektora  $\mathbf{X}_s$  i translacije  $\Delta \mathbf{X}_{sk}$  između  $\mathbf{X}_s$  i  $\mathbf{X}_k$ .

Uzimajući u obzir i faktor razmere, vektor koordinata u KS geodetske mreže glasi:

$$\mathbf{X}_k = S_{sk} \cdot \mathbf{R}_{s'} \mathbf{X}_s + \Delta \mathbf{X}_{sk}. \quad [4.30]$$

Kovarijaciona matrica koordinata  $\mathbf{C}_{\mathbf{x}_k}$  glasi:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}_k} = \mathbf{A}_p^{sk} \mathbf{C}_p^{sk} (\mathbf{A}_p^{sk})^T + S_{sk}^2 \cdot \mathbf{R}_{s'} \mathbf{C}_{\mathbf{x}_s} \mathbf{R}_{s'}^T. \quad [4.31]$$

$\mathbf{C}_p^{sk}$  je kovarijaciona matrica transformacionih parametara između KS skenera i KS kontrolne geodetske mreže. Matrica  $\mathbf{A}_p^{sk}$  je matrica parcijalnih izvoda koordinata  $\mathbf{X}_k$  po transformacionim parametrima iz  $\mathbf{X}_s$  u  $\mathbf{X}_k$ :

$$\mathbf{A}_p^{sk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \omega_{s'}} & \frac{\partial X_k}{\partial \varphi_{s'}} & \frac{\partial X_k}{\partial \varepsilon_{s'}} \\ \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \omega_{s'}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varphi_{s'}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varepsilon_{s'}} \\ \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \omega_{s'}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varphi_{s'}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varepsilon_{s'}} \end{bmatrix}. \quad [4.32]$$

#### 4.4.1.3 *Mogućnosti unapređenja preciznosti indirektnog georeferenciranja*

Radi poboljšanja preciznosti indirektnog georeferenciranja potrebno je obezbediti:

- da poziciona tačnost kontrolnih tačaka određenih u okviru kontrolne geodetske mreže bude takva da se greške datih veličina mogu zanemariti u transformacionom modelu;
- da broj kontrolnih tačaka bude veći od minimalnih tri, kako bi se unapredila preciznost i pouzdanost transformacije. Više od četiri kontrolne tačke ne doprinosi značajno preciznosti modela (Reshetyuk, 2006);
- minimalno 30% preklopa između susednih scena prilikom registracije (Bornaz i dr., 2003);
- dobar prostorni raspored kontrolnih tačaka sa varijacijom po dubini, uz uslov da kontrolne tačke nisu kolinearne u pravcu laserskog zraka (Tait i dr. 2004);
- da se kod georeferenciranja i registracije podataka skeniranja izduženih objekata obezbede tačke za georeferenciranje minimalno nakon svakog

trećeg stajališta (Bornaz i dr., 2003) i da se koristi arbitrarni postupak georeferenciranja kako bi se smanjio efekat multiplikacije grešaka registracije (poglavlje 7.2);

- da tipski skenerski signali budu, ukoliko je moguće, locirani što bliže poziciji TLS, i da, ako se koriste ravni signali, ulazni ugao laserskog zraka bude približno ortogonalan u odnosu na ravan signala (Alba i dr., 2008);

Preciznost određivanja pozicije tipskog skenerskog signala je parametar koji može značajno uticati na preciznost georeferenciranja. Proizvođači uglavnom daju ovaj parametar kao karakteristiku TLS sistema. Na primer, za seriju impulsnih skenera Leica Geosystems preciznost određivanja centra signala je 2 mm/50 m.

#### 4.4.2 Greške direktne metode georeferenciranja

Ukoliko se koristi metoda direktnog georeferenciranja oblaka tačaka (poglavlje 3.2.3), uzorak podataka skeniranja je opterećen dodatnim slučajnim izvorima grešaka u odnosu na indirektnu metodu. Metodologija i klasifikacija ovih izvora grešaka data je od strane malog broja autora koji su referentni u oblasti TLS. Originalan rad je predstavljen u Lichti i Gordon (2004). Scaioni (2005) je proširio model, dok je Reshetyuk (2006) i Reshetyuk (2009) uglavnom citirao prethodna dva autora. Ovaj stohastički model sadrži određene nedoslednosti. Ovde je predstavljen sistematizovan i generalizovan kovarijacioni model grešaka georeferenciranja direktnom metodom.

Model transformacije koordinata iz lokalnog KS skenera u KS kontrolne geodetske mreže je dat generalnom formom [3.13]. U slučaju direktnog georeferenciranja, model je uprošćen zahvaljujući manjem broju nepoznatih parametara modela, odnosno preostala je nepoznata rotacija oko  $z$ -ose (ugao  $\varepsilon$ ), pri čemu ovde treba zanemariti parametar razmere, odnosno on je jednak 1. Koristi se forma vektora koordinata u sistemu kontrolne geodetske mreže, prethodno data u [3.30]:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{R}_{s(\varepsilon)} \mathbf{X}_s + \mathbf{T}_{sk}. \quad [4.33]$$

Direktno georeferenciranje se može sprovesti centrisanjem nad poznatom tačkom i uzimanjem orijentacije na drugu datu tačku. Pojedini modeli TLS poseduju i algoritme za direktno georeferenciranje presecanjem nazad, te je ovde razmatran i ovaj skup grešaka.

#### 4.4.2.1 Greške procedure poznate stanice i orijentacije TLS

Pored instrumentalnih grešaka TLS [4.16], koje su zajedničke i za indirektno georeferenciranje, prisutni su i dodatni izvori grešaka transformacionih parametara usled procedure centrisanja i orijentisanja TLS.

Ovde ustanovljena koncepcija grešaka direktnog georeferenciranja, procedurom centrisanja i orijentisanja TLS, obuhvata:

- nesigurnosti određivanja centra skenera, što se direktno odražava na greške translacije sistema (uticaji datih tačaka geodetske mreže, centrisanja i merenja visine TLS),
- nesigurnosti određivanja parametra horizontalne rotacije  $\varepsilon$ , odnosno vrednosti orijentacionog ugla (uticaji datih tačaka geodetske mreže, centrisanje TLS i signala, viziranje signala - samo za horizontalnu komponentu) i
- instrumentalne greške opažanja i uticaja širine laserskog snopa na objektu, kojima se ovde pridodaje komponenta uticaja grešaka horizontiranja TLS. Rotacija sistema se vrši samo oko z-ose, pa se taj uticaj direktno odražava na rezultujući vektor koordinata tačaka.

Imajući u vidu nabrojane uticaje izvora grešaka na ove tri komponente, kovarijaciona matrica koordinata u KS (kontrolne) geodetske mreže  $\mathbf{X}_k$ , na osnovu direktnog georeferenciranja oblaka tačaka procedurom centrisanja i orijentisanja TLS, ima oblik:

$$\mathbf{C}_{\mathbf{X}_k} = \mathbf{C}_0 + \left( \mathbf{R}_{s(\varepsilon)} \mathbf{A}_{op} (\mathbf{C}_{unt} + \mathbf{C}_{ini}) \mathbf{A}_{op}^T \mathbf{R}_{s(\varepsilon)}^T \right) + \frac{\partial \mathbf{X}_k}{\partial \varepsilon} \left( \frac{\partial \mathbf{X}_k}{\partial \varepsilon} \right)^T \sigma_\varepsilon^2. \quad [4.34]$$

Forma  $\mathbf{A}_{op}$  i  $\mathbf{C}_{unt}$  je data respektivno u [4.18] i [4.16], dok je matrica rotacije  $\mathbf{R}_{s(\varepsilon)}$  u funkciji parametra rotacije  $\varepsilon$  oko  $z$ -ose KS skenera (ovde je  $\varepsilon$  poistovećen sa vrednošću orijentacionog ugla) data u [3.8].

Nesigurnost translacije sistema se ogleda u kovarijacionoj matrici  $\mathbf{C}_0$  koja se odnosi na nesigurnost pozicije optičko-mehaničkog centra skenera, i može se izraziti kao suma dva uticaja, u obliku:

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_{k_i} + \mathbf{C}_{m_i}. \quad [4.35]$$

Kovarijaciona matrica  $\mathbf{C}_{k_i}$  predstavlja nesigurnost referentne osnove (kontrolne mreže -  $k$ ), konkretno tačke  $i$  nad kojom je TLS centrisan. Ukoliko je geodetska mreža uspostavljena kao kontrolna geodetska mreža u inženjerstvu, ovu matricu dimenzija 3x3 predstavljaju elementi kovarijacije koordinata stajne tačke  $i$  iz izravnjanja.

Scaioni (2005) i Reshetyuk (2009) definišu kovarijacionu matricu  $\mathbf{C}_{m_i}$  koja predstavlja dijagonalnu matricu varijansi merenja „samo“ visine TLS i označena je sa  $\mathbf{C}_{h_i}$ :

$$\mathbf{C}_{h_i} = \text{diag}(0, 0, \sigma_{h_i}^2). \quad [4.36]$$

Analizirajući izraze [4.33], [4.34] i [4.36], jasno je da je potrebno uzeti u obzir i standardno odstupanje centrisanja signala  $\sigma_{CentTls}$  na nesigurnost pozicije optičko-mehaničkog centra skenera, koje u proceduri centrisanja nad poznatom tačkom objektivno ima svoj uticaj na translaciju sistema. Tako kovarijaciona matrica  $\mathbf{C}_{m_i}$  ima oblik:

$$\mathbf{C}_{m_i} = \text{diag}(\sigma_{X_i}^2, \sigma_{Y_i}^2, \sigma_{h_i}^2), \quad [4.37]$$

pri čemu su  $\sigma_{X_i}$  i  $\sigma_{Y_i}$  standardna odstupanja položaja po koordinatnim osama usled uticaja greške centrisanja TLS. Standardno odstupanje centrisanja TLS -  $\sigma_{CentTls}$  je deklarirano slično kao za TS i uzima u obzir nesigurnost optičkog ili digitalnog viska. Kreće se u rang u veličine 1 mm/m za standardnu geodetsku opremu.



Tako, uzevši u obzir kovarijancije  $K$  iz izravnjanja kontrolne geodetske mreže, modifikacija konačne forme  $\mathbf{C}_0$  glasi:

$$\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{ki}}^2 + \sigma_{X_i}^2 & K_{X_{ki}Y_{ki}} & K_{X_{ki}Z_{ki}} \\ K_{Y_{ki}X_{ki}} & \sigma_{Y_{ki}}^2 + \sigma_{Y_i}^2 & K_{Y_{ki}Z_{ki}} \\ K_{Z_{ki}X_{ki}} & K_{Z_{ki}Y_{ki}} & \sigma_{Z_{ki}}^2 + \sigma_{h_i}^2 \end{bmatrix}. \quad [4.38]$$

Imajući u vidu opšti izraz [4.34], kovarijaciona matrica  $\mathbf{C}_{ini}$  predstavlja uticaje inicijalizacije TLS na rezultate opažanja uglova. Lichti i Gordon (2004) i Reshetyuk (2009) ovu matricu označavaju sa  $\mathbf{C}_{set}$  i definišu je kao:

$$\mathbf{C}_{set} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{h\theta}^2 + \sigma_{cent\theta}^2 + \sigma_{viz\theta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{h\alpha}^2 \end{bmatrix}. \quad [4.39]$$

Kovarijaciona matrica uticaja inicijalizacije TLS  $\mathbf{C}_{ini}$  ( $\mathbf{C}_{set}$ ) ima uticaj na rezultate opažanja uglova  $\theta$  i  $\alpha$ , a ne na rezultat opažanja rastojanja  $\rho$  (Lichti i Gordon, 2004), što je u skladu sa procedurom centrisanja TLS nad poznatom tačkom i "uzimanja" orijentacije.

Standardno odstupanje horizontiranja TLS utiče na greške merenja horizontalnog i vertikalnog ugla, pri čemu je:

$$\sigma_{h\alpha} = 0.2\nu, \quad [4.40]$$

standardno odstupanje vertikalnog ugla  $\alpha$  usled nesigurnosti horizontiranja TLS, gde  $\nu$  figuriše kao nesigurnost kompenzacije ili osetljivost libele. TLS novije generacije poseduju dvoosni kompenzator sa tačnošću kompenzacije od nekoliko lučnih sekundi. Ukoliko TLS nema kompenzator, horizontiranje se vrši pomoću centrične ili cevaste libele instalirane na standardno postolje instrumenta. Tipična osetljivost cevaste libele je oko 30", a centrične libele i do 8' kada horizontiranje TLS značajno doprinosi ukupnom zbiru grešaka direktnog georeferenciranja.

Standardno odstupanje horizontalnog ugla  $\sigma_{h\theta}$  usled nesigurnosti horizontiranja TLS može se izraziti kao:

$$\sigma_{h\theta} = \sigma_{h\alpha} \tan \alpha . \quad [4.41]$$

Lichti i Gordon (2004) zbirno tretiraju varijanse ukupnog uticaja centrisanja TLS i centrisanja signala (signalisanja)  $\sigma_{cent}^2$  na grešku horizontalnog ugla. Ovaj uticaj je implementiran u [4.39] kao  $\sigma_{cent\theta}^2$  i predstavljen je kao:

$$\sigma_{cent\theta} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{cent}}{d_{ij}} . \quad [4.42]$$

Međutim, ako se analiziraju izrazi [4.33], [4.34] i [4.39], očigledno je da uticaj greške centrisanja TLS i signalisanja nema direktan uticaj na izvorna opažanja, već se on odražava na translaciju sistema i rotaciju sistema oko  $z$ -ose. Takođe je jasno da preciznost viziranja signala  $\sigma_{viz\theta}$  nije komponenta matrice  $\mathbf{C}_{ini}$  ( $\mathbf{C}_{set}$ ) jer nema direktan uticaj na oblak tačaka na objektu, odnosno u postupku skeniranja objekta ne vrši se viziranje. Standardno odstupanje viziranja signala ima uticaj na varijansu orijentacionog ugla i deo je rotacije sistema u izrazu [4.44].

Tako, korektna matrica uticaja inicijalizacije TLS na rezultate opažanja tačaka na objektu  $\mathbf{C}_{ini}$ , u odnosu na Lichti i Gordon (2004), Reshetyuk (2009) i Scaioni (2005) i izraz [4.39], obuhvata samo uticaje nesigurnosti horizontiranja TLS, zbog činjenice da su tim uticajem trajno opterećene vrednosti pravaca jer se rotacija ne vrši oko  $x$  i  $y$  ose. Stoga, može se reći da je:

$$\mathbf{C}_{ini} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{h\theta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{h\alpha}^2 \end{bmatrix} . \quad [4.43]$$

Poslednji član zbira u generalnom izrazu [4.34] modeluje uticaj varijanse orijentacije (direkcionog ugla) sa stajne na datu tačku geodetske osnove na vektor koordinata  $\mathbf{X}_k$ . Varijansa direkcionog ugla  $\sigma_\epsilon^2$  podrazumeva uticaj grešaka datih koordinata kontrolne

geodetske mreže stanice i signala (Lichti i Gordon, 2004; Reshetyuk 2009; Scaioni, 2005), ali neizbežno i grešku viziranja signala, grešku centrisanja TLS i grešku signalisanja date tačke:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{\varepsilon k_i}^2 + \sigma_{\varepsilon k_j}^2 + \sigma_{\varepsilon CentTls}^2 + \sigma_{\varepsilon Sig}^2 + \sigma_{\varepsilon viz}^2. \quad [4.44]$$

Ukoliko su koordinate kontrolne geodetske mreže stanice i signala  $(X_k, Y_k)$  međusobno nezavisne i homogene tačnosti  $\sigma_{X_k Y_k}$ , i ako nema međusobne korelacije, standardno odstupanje direkcionog ugla  $\sigma_{\varepsilon k_{ij}}$  usled uticaja nesigurnosti koordinata stanice i signala je direktno proporcijalno rastojanju između te dve tačke  $d_{ij}$  (Lichti i Gordon, 2004):

$$\sigma_{\varepsilon k_{ij}} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{X_k Y_k}}{d_{ij}}, \quad [4.45]$$

Međutim, ukoliko tačnost geodetske mreže nije homogena, a to je u geodetskom inženjerstvu čest slučaj, uticaji datih veličina koordinata stanice i signala na rotaciju sistema se moraju razdvojiti. Uticaj stajne tačke je:

$$\sigma_{\varepsilon k_i} = \frac{\sigma_{X_i Y_i}}{d_{ij}}, \quad [4.46]$$

a vizurne tačke:

$$\sigma_{\varepsilon k_j} = \frac{\sigma_{X_j Y_j}}{d_{ij}}. \quad [4.47]$$

Ukoliko je geodetska mreža uspostavljena kao kontrolna geodetska mreža, mogu se uvesti elementi kovarijacije koordinata za stajnu tačku  $i$  i orijentacionu tačku  $j$  iz izravnjanja.

Uticaj greške centrisanja na orijentacioni ugao  $\varepsilon$  može se predstaviti kao:

$$\sigma_{\varepsilon CentTls} = \frac{\sigma_{centTls}}{d_{ij}}, \quad [4.48]$$

dok uticaj greške signalisanja na ugao  $\varepsilon$  ima sličnu formu i glasi:

$$\sigma_{\varepsilon Sig} = \frac{\sigma_{sig}}{d_{ij}}. \quad [4.49]$$

Standardno odstupanje viziranja signala se ovde deklariše zavisno od metodologije koja se koristi u pojedinim sistemima TLS. Daje se u uglovnim jedinicama. Ukoliko TLS poseduje durbin (pojedini modeli Callidus i Riegl TLS), greška viziranja zavisi od veličine njegovog uvećanja ( $M$ ) i od atmosferskih uslova. Standardni model ove greške koji uzima samo predvidljiv uticaj uvećanja  $M$  je:

$$\sigma_{viz} = \frac{60''}{M}. \quad [4.50]$$

Metodologija određivanja pozicije signala kod većine TLS podrazumeva određivanje centra signala na osnovu detaljnog skeniranja tipskih skenerskih signala. Standardno odstupanje ovako određene pozicije zavisi od uglovne rezolucije skeniranja  $\Delta$ , pri čemu se podrazumeva da je ona jednaka po  $\theta$  i  $\alpha$ . Za tip ravnog kružnog signala (Tabela 3-1), standardno odstupanje vizure je dato sledećom relacijom (Lichti i Gordon, 2004):

$$\sigma_{viz} = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}. \quad [4.51]$$

Na osnovu izraza [4.51], očigledna je zavisnost greške viziranja  $\sigma_{viz}$  od uglovne rezolucije skeniranja. Velikom redundantnošću ovaj uticaj se u najvećem broju slučajeva svodi na zanemarljivu meru. Za slučaj drugih tipova signala (ravnih i trodimenzionalnih), uz odgovarajuće rutine za određivanje centra signala, važi sličan red veličine za  $\sigma_{viz}$ .

#### 4.4.2.2 Greške procedure presecanja nazad

Tradicionalno, manje zastupljen način određivanja sopstvene pozicije instrumenta (TS ili TLS) u realnom vremenu je metoda „presecanja nazad“. Zahvaljujući razvoju softvera implementiranih u TS i TLS novije generacije, u realnom vremenu se dobijaju parametri MNK transformacije koordinata, odnosno najverovatnije koordinate stajne

tačke u prostoru, sa ocenom reziduala transformacionih parametara i koordinata stajališta.

Standardno odstupanje ocene MNK parametara transformacije tokom procedure „presecanja nazad“ definiše kovarijaciona matrica  $\mathbf{C}_{ppn}^{sk}$ . Veličina ovih odstupanja zavisi od varijansi određivanja koordinata skenerskih signala u KS skenera, varijansi datih koordinata tačaka u KS kontrolne geodetske mreže [3.17] i od geometrije kontrolnih tačaka. Konačna forma pozicione nesigurnosti oblaka tačaka u KS kontrolne geodetske mreže može se sračunati na osnovu zakona prostiranja grešaka u odnosu na funkciju:

$$\mathbf{X}_k = S_{sk} \cdot \mathbf{R}_s \mathbf{X}_s + \Delta \mathbf{X}_{sk}. \quad [4.52]$$

Stohastički model, odnosno kovarijaciona matrica direktnog georeferenciranja primenom procedure „presecanja nazad“  $\mathbf{C}_{X_k}$  ima oblik:

$$\mathbf{C}_{X_k} = \mathbf{A}_{ppn}^{sk} \mathbf{C}_{ppn}^{sk} \left( \mathbf{A}_{ppn}^{sk} \right)^T + S_{sk}^2 \cdot \mathbf{R}_s \mathbf{C}_{X_s} \mathbf{R}_s^T, \quad [4.53]$$

pri čemu matrica  $\mathbf{A}_{ppn}^{sk}$  predstavlja matricu parcijalnih izvoda po parametrima transformacije, uključujući i faktor razmere između KS skenera i KS kontrolne geodetske mreže -  $S_{sk}$ :

$$\mathbf{A}_{ppn}^{sk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial X_k}{\partial \omega_s} & \frac{\partial X_k}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial X_k}{\partial \varepsilon_s} \\ \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial Y_k}{\partial \omega_s} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial Y_k}{\partial \varepsilon_s} \\ \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta X_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Y_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \Delta Z_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial S_{sk}} & \frac{\partial Z_k}{\partial \omega_s} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varphi_s} & \frac{\partial Z_k}{\partial \varepsilon_s} \end{bmatrix}. \quad [4.54]$$

Kovarijaciona matrica koordinata u KS skenera -  $\mathbf{C}_{X_s}$  data je u [4.19] dok je matrica rotacije  $\mathbf{R}_s$  u KS skenera data u [3.10].

Kao što se može primetiti, funkcionalni i stohastički model transformacije je praktično identičan indirektnom georeferenciranju u jednom koraku preko [4.30] i [4.31]. Razlika je u tome što se procedura obavlja direktno na terenu. Tom prilikom je moguće

analizirati veličine reziduala transformacije i otkloniti eventualne grube greške. Procedura zahteva dodatno vreme tokom terenskih merenja, što je ujedno i njen najvažniji nedostatak.

Sa druge strane, u odnosu na proceduru centrisanja i orijentisanja TLS, direktna metoda georeferenciranja korišćenjem procedure presecanja nazad ima brojne prednosti obzirom da je obim grešaka manji, te je pogodnija za inženjerske primene. Naime, ne postoje dodatni uticaji poput grešaka centrisanja, horizontiranja i merenja visine TLS. Takođe, kvalitet georeferenciranja se može unaprediti „presecanjem nazad“ sa više kontrolnih tačaka.

## **5 Modeli sistematskih uticaja i kalibracija TLS**

Sistematske greške prilikom skeniranja su prisutne kao i kod drugih instrumenata i mernih metoda u geodeziji. Uglavnom se fizički mogu interpretirati, odnosno prisutne su zahvaljujući nesavršenosti u izradi i postojanju različitih poremećajnih uticaja tokom rada TLS. Na primer, obrtna osa skenera (vertikalna osa), obrtna osa ogledala (horizontalna osa) i osa kolimacije (osa laserskog snopa) nisu u savršenom, međusobno ortogonalnom odnosu, i ne seku se idealno u jednoj tački (poglavlje 4.1.4). Takođe su prisutni i drugi uticaji usled kompleksnosti TLS koji pokazuju sistematski trend u rezultatima opažanja, a u isto vreme se ne mogu pouzdano interpretirati. Za razliku od klasičnih geodetskih instrumenata, TLS trenutno predstavlja tzv. „crnu kutiju“, koja se ne može „rektifikovati“ od strane korisnika korišćenjem standardnih postupaka.

Sistematski uticaji se ne mogu eliminisati povećanjem broja opažanja. Sa druge strane, povoljna okolnost je da se mogu svesti na zanemarljivu meru metodom merenja, metodom obrade rezultata merenja, ili implementacijom korekcionih modela opažanja, tj. kalibracijom skenera. Očigledna prednost skenera kao metode je da se prikuplja veoma veliki broj podataka u jedinici vremena, te se ovoj problematici mora posvetiti naročita pažnja.

Generalno gledano, postoje dva pristupa u kalibraciji TLS. To je kalibracija komponenti TLS ili kalibracija sistema TLS (samokalibracija).

Razmatranja i matematički modeli iz ovog poglavlja treba da ilustruju trenutna dostignuća i pravac u kojem se ide kada je u pitanju metodologija kalibracije sistema TLS i jedna mlada disciplina u geodetskoj metrologiji.

### **5.1 Generalni modeli sistematskih grešaka TLS i kalibracija sistema**

Kalibracija sistema TLS, istorijski gledano, ima pozadinu u fotogrametrijskoj literaturi i oslanja se na postupke koje se tradicionalno koriste prilikom određivanja kalibracionih parametara merne foto kamere. Pri tome, izvori grešaka se ne analiziraju pojedinačno na način da se utvrdi njihov instrumentalni izvor (Staiger, 2005), već se modeliranje

grešaka ili korekzione funkcije dobijaju simultano, primenom MNK izravnjanja. Prilikom postupaka ispitivanja i kalibracije koriste se različiti tipovi skenerskih signala (videti poglavlje 3.2.2.1). Kalibracija sistema se često naziva i samokalibracijom TLS i definiše se kao: „Samokalibracija je simultano određivanje svih sistematskih grešaka TLS uključujući i sve ostale parametre sistema“ (Reshetyuk, 2010). Postoje dva važna aspekta prilikom samokalibracije: modeliranje senzora i dizajn mreže. Modeliranje senzora podrazumeva definisanje koeficijenata u jednačinama korekcija rastojanja i uglova. Problem različitog modela sistematskih grešaka za različite tipove TLS je prisutan. Samokalibracija zahteva odgovarajuću geometriju mreže i relativno veliki broj skenerskih signala (više u Reshetyuk, 2009).

Uobičajeni pristup tretiranja sistematskih grešaka TLS je da se one smatraju poremećajnim uticajima na jednačine opažanja, idealno kao adicione korekcije. Dalje, potrebno je sprovesti odgovarajuće kalibracione procedure u cilju određivanja koeficijenata modela, što je implementirano u radovima različitih autora (Chow i dr., 2011; Gielsdorf i dr., 2004; González-Aguilera i dr., 2011; Lichti i Skaloud, 2010; Lichti, 2007; Reshetyuk, 2010; Schneider, 2009; Staiger, 2005).

### **5.1.1 Modeli sistematskih uticaja izvornih opažanja TLS**

Postojeći opšti modeli sistematskih grešaka TLS u osnovi se zasnivaju na metodološkom pristupu i radovima naučnika Dereka Lihtija, koji je jedan od vodećih istraživača u oblasti kalibracije TLS. Ovde je prikazan osnovni model sistematskih uticaja za AMCW skener Faro 880 koji se ne može strogo uzeti u opštem slučaju, ali se uz izvesne korekcije može primeniti na druge tipove faznih TLS. Impulsni TOF skeneri zahtevaju u većoj meri modifikaciju prezentovanog modela sistematskih uticaja, što je takođe razmatrano.

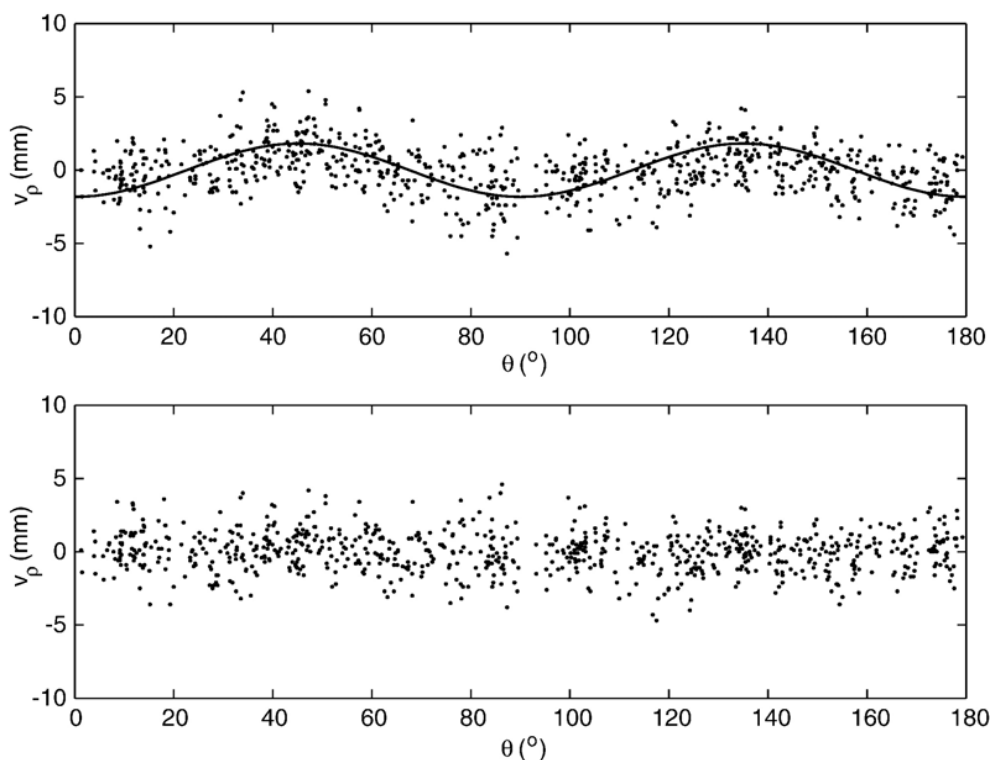
#### **5.1.1.1 Rastojanje**

Model korekcije rastojanja  $\Delta\rho$  je dat sledećom relacijom (Lichti i Skaloud, 2010):

$$\Delta\rho = A_0 + A_1\rho + A_2 \sin \alpha + \sum_{k=1}^n \left( A_{2k+1} \sin \left( \frac{2\pi k \rho}{U_1} \right) + A_{2k+2} \cos \left( \frac{2\pi k \rho}{U_1} \right) \right) + ET. \quad [5.1]$$



Prva dva člana u izrazu [5.1] su adicione konstanta  $A_0$  i multiplikaciona konstanta  $A_1$  skenera, po potpunoj analogiji sa daljinomerom totalne stanice. Treći koeficijent  $A_2$  modeluje vertikalno rastojanje od ose laserskog zraka do obrtne ose ogledala i empirijski se može oceniti. Ciklične je prirode i prati sinusoidnu funkciju koja svoj maksimum dostiže kada je vertikalni ugao u zenitu, a vrednost nule je kada je osa zraka u horizontalnoj ravni (Lichti, 2006). Optičke ili električne interferencije se modeliraju sinusnim zakonom koji u izrazu [5.1] predstavlja članove pod sumom. Član  $U_1$  predstavlja najkraću detektovanu jedinicu dužine koja je jednaka polovini najkraće modulirane talasne dužine, i relevantan je samo za metodu faznih merenja rastojanja.  $ET$  predstavlja empirijski trend koji se ne može fizički interpretirati. Lichti (2007) takođe detektuje empirijsku funkcionalnu zavisnost vrednosti horizontalnog ugla i sinusni period od  $90^\circ$  za Faro 880 TLS (Slika 5-1).



Slika 5-1 Reziduali rastojanja  $v_p$  u funkciji horizontalnog pravca  $\theta$ . Gore: nekorigovani i dole: korigovani. Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007)

Za TOF impulsni skener, Riegl LMS-Z420i, iz [5.1] uzima se u obzir samo uticaj adicione korekcije preko konstante  $A_0$  i uticaj korekcije razmere preko multiplikacione

konstante  $A_1$ . Schneider (2009) dodatno modeluje kvadratni deo adicione korekcije preko koeficijenta  $A_3$ , tako da za impulsni TLS model korekcije rastojanja ima formu:

$$\Delta\rho = A_0 + A_1\rho + A_3\rho^2. \quad [5.2]$$

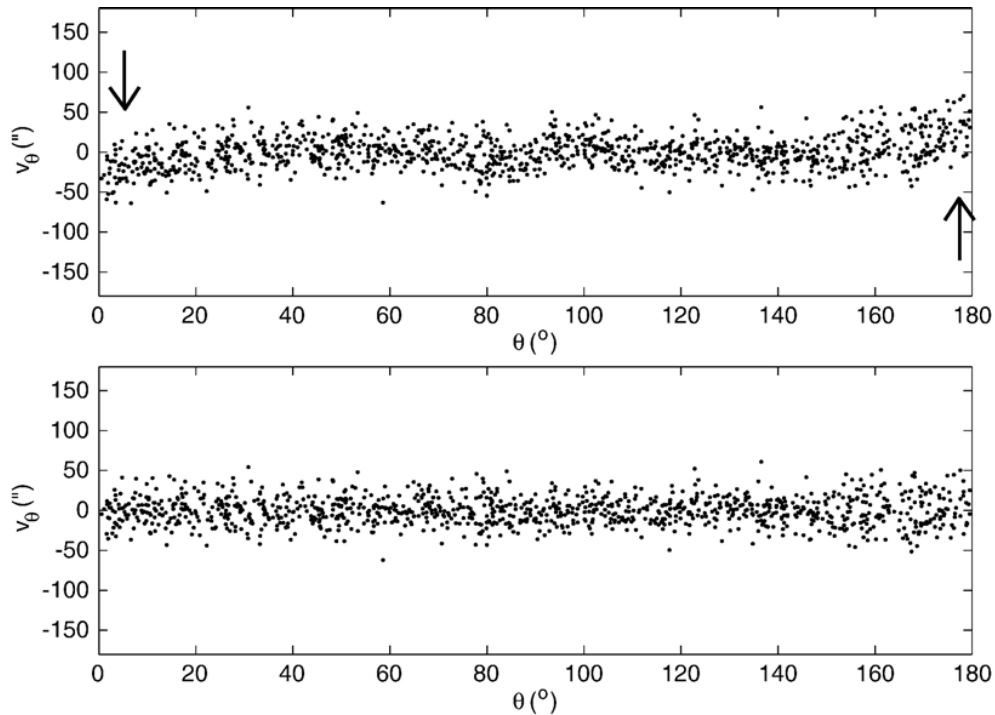
U slučaju hibridnog impulsnog skenera Trimble GX, Chow i dr. (2011) ukazuju na prisutnost adicione konstante i vertikalnog rastojanja ose laserskog zraka do obrtne ose ogledala, odnosno koeficijente  $A_0$  i  $A_2$  iz izraza [5.1].

### 5.1.1.2 Horizontalni ugao

Opšti korekcionni model za greške horizontalnog ugla  $\Delta\theta$  Lichti i Skaloud (2010) prikazuju kao:

$$\begin{aligned} \Delta\theta = & B_1\theta + B_2 \sin \theta + B_3 \cos \theta + B_4 \sin 2\theta + B_5 \cos 2\theta + B_6 \sec \alpha + \\ & + B_7 \tan \alpha + B_8\rho^{-1} + \sum_{k=1}^n (B_{2k+7} \sin(k\alpha) + B_{2k+8} \cos(k\alpha)) + ET \end{aligned} \quad [5.3]$$

Prvi član  $B_1$  u izrazu [5.3] je greška razmere horizontalnog enkodera (kruga) čiji je efekat prikazan na narednoj slici (Slika 5-2).  $B_2$  i  $B_3$  modeluju dve komponente ekscentriciteta horizontalnog kruga, a  $B_4$  i  $B_5$  opisuju neortogonalnost ravni koja sadrži horizontalni enkoder i vertikalnu osu (osa obrtanja) skenera. Neupravnost ose lasera i horizontalne ose, poznata kao kolimaciona greška, je opisana koeficijentom  $B_6$ , dok je neupravnost horizontalne obrtne ose i vertikalne ose opisana sa  $B_7$ . Koeficijent  $B_8$  predstavlja ekscentricitet ose kolimacije u odnosu na vertikalnu osu koji ima najveći uticaj na horizontalni pravac pri kratkim rastojanjima. Članovi pod sumom predstavljaju Furijerove redove koji modeluju nesigurnost horizontalne ose prilikom rotacije skenera i definisani su kao kod teodolita (Lichti i Skaloud, 2010).  $ET$  ponovo predstavlja empirijski trend. U ovom korekcionom modelu nedostaje parametar  $B_0$  koji modeluje grešku horizontalnog indeksa obzirom na apsolutnu korelaciju sa parametrom rotacije skenera oko vertikalne ose u transformacionom modelu.



Slika 5-2 Reziduali horizontalnog pravca  $v_\theta$  u funkciji od vrednosti  $\theta$ . Gore: bez implementirane korekcije  $B_1$  i dole: sa korekcijom  $B_1$ . Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007)

Schneider (2009) za TOF impulsni skener Riegl LMS-Z420i određuje koeficijente  $B_4$  i  $B_5$  i uticaj koji modeluje nesigurnost horizontalne ose prilikom rotacije skenera -  $B_{14} \cdot \cos(3\theta)$  iz izraza [5.3]. Za Trimble GX Chow i dr. (2011) detektuju značajnost koeficijenata  $B_3$ ,  $B_4$  i  $B_5$  iz izraza [5.3].

### 5.1.1.3 Vertikalni ugao

Model korekcije vertikalnog ugla je dat sledećom relacijom (Lichti i Skaloud, 2010):

$$\begin{aligned} \Delta\alpha = C_0 + C_1\alpha + C_2 \sin \alpha + C_3 \sin 2\alpha + C_4 \cos 2\alpha \\ + C_5\rho^{-1} + C_6 \sin 3\theta + C_7 \cos 3\theta + ET \end{aligned} \quad [5.4]$$

Koeficijent  $C_0$  se odnosi na grešku indeksa vertikalnog kruga, a  $C_1$  na grešku njegove razmere. Ekscentricitet vertikalnog kruga se modelira koeficijentom  $C_2$ .  $C_3$  i  $C_4$  modeluju neortogonalnost vertikalnog kruga i obrtne ose ogledala, dok  $C_5$  predstavlja horizontalnu kolimaciju. Poslednja dva koeficijenta,  $C_6$  i  $C_7$ , modeluju „klačenje“ vertikalne ose skenera tokom rotiranja (Slika 5-3). Period od  $120^\circ$  je u vezi sa

nesavršenošću izrade postolja skenera, odnosno zavisi od rasporeda položajnih zavrtneja (Lichti, 2007).  $ET$  predstavlja ostale empirijske izvore grešaka.

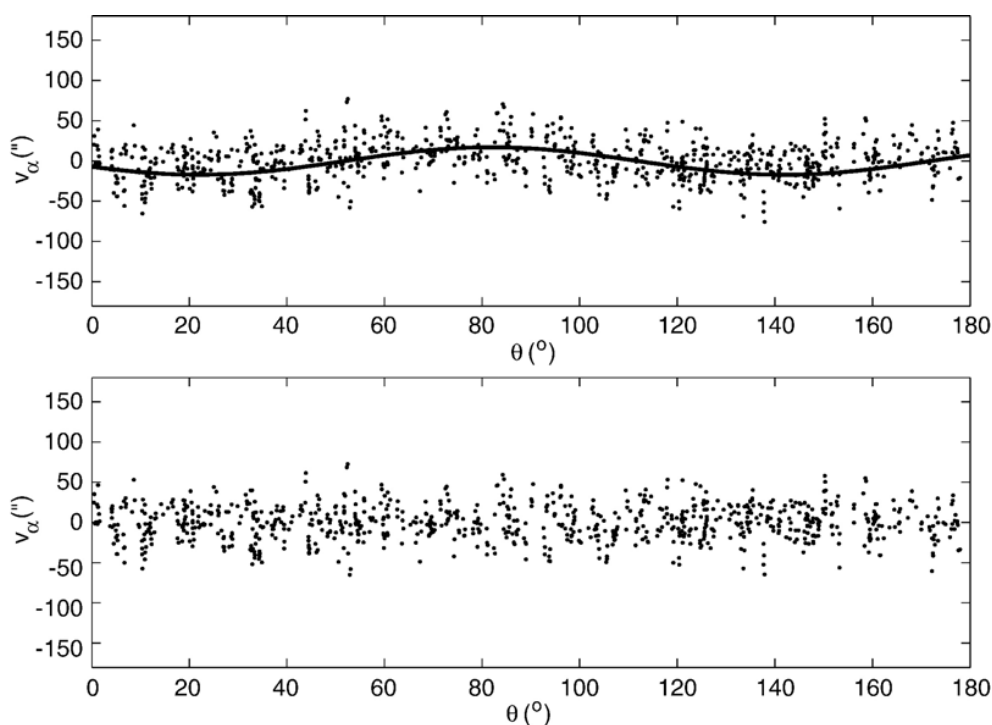
Model sistematskih uticaja kod impulsnog Riegl LMS-Z420i skenera ima formu:

$$\Delta\alpha = C_0 + C_1 \sin \alpha + C_2 \cos \alpha + \arcsin \frac{C_5}{D} + C_7 \cos(3\theta), \quad [5.5]$$

pri čemu i ovde kao u [5.4], koeficijent  $C_1$  predstavlja ekscentricitet vertikalnog kruga (Schneider, 2009).

Chow i dr. (2011) za Trimble GX otkrivaju empirijski sistematski trend u opažanjima verikalog ugla koji se jedino značajno može detektovati, a korekcionu funkciju definišu na sledeći način:

$$\Delta\alpha = ET_1 \cos(2\theta) + ET_2 \sin(2\theta). \quad [5.6]$$



Slika 5-3 Reziduali vertikalnog pravca  $v_{\alpha}$  u funkciji od vrednosti horizontalnog pravca  $\theta$ . Gore: bez implementirane korekcije  $C_6$  i  $C_7$  i dole: sa korekcijom  $C_6$  i  $C_7$ . Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007)

## 5.1.2 Kalibracija sistema

Obzirom na činjenicu da se kod većine skenera ne može vizirati markica u oba položaja durbina, kolimaciona greška se ne može odrediti klasičnim postupkom. Slično je sa ostalim nesavršenostima instrumenta koje se reflektuju kao npr. greške horizontiranja i greške vertikalnog indeksa. Prisustvo i veličina ovih grešaka mogu biti određeni putem postupaka samokalibracije TLS preko visoko redundantnih opažanja i mreže skenerskih signala.

Modeliranje mreže podrazumeva instalaciju većeg broja tipskih skenerskih signala (Slika 7-1) koji se detektuju sa više skenerskih stajališta pri različitim orijentacijama skenera. MNK izravnanje se sprovodi nad svim opažanjima, u više scena simultano, kako bi se odredile koordinate signala u sistemu kontrolne geodetske mreže, parametri transformacije svake scene i svi dodatni parametri, odnosno koeficijenti modela koji su razmatrani u poglavljima 5.1.1.1, 5.1.1.2 i 5.1.1.3. Tako se osnovni model opažanja, dat u izrazu [3.2], modifikuje izrazima [5.1], [5.3] i [5.4], respektivno:

$$\rho_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho . \quad [5.7]$$

$$\theta_{ij} = \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta\theta . \quad [5.8]$$

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha . \quad [5.9]$$

Matrična forma linearizovanih jednačina opažanja (Lichti i Skaloud, 2010) glasi:

$$\begin{bmatrix} A_{\rho e} & A_{\rho a} & A_{\rho o} \\ A_{\theta e} & A_{\theta a} & A_{\theta o} \\ A_{\alpha e} & A_{\alpha a} & A_{\alpha o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_e \\ \hat{\delta}_a \\ \hat{\delta}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_\rho \\ w_\theta \\ w_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\rho \\ \hat{v}_\theta \\ \hat{v}_\alpha \end{bmatrix}, \quad [5.10]$$

ili uprošćeno:

$$\mathbf{A}_{xy} \cdot \boldsymbol{\delta}_y + \mathbf{w}_x = \mathbf{v}_x, \quad [5.11]$$

pri čemu  $\mathbf{A}_{xy}$  predstavlja matricu dizajna grupe opažanja  $\mathbf{x}$ , odnosno parcijalnih izvoda po promenljivim  $(\rho, \theta, \alpha)$ , uzete u odnosu na grupu parametara  $\mathbf{y}$  (parametri spoljne orijentacije ili transformacioni parametri -  $e$ , dodatni parametri -  $a$  i koordinate tačaka u sistemu geodetske mreže -  $o$ ). Vektor  $\delta_{\mathbf{y}}$  je vektor priraštaja približnih vrednosti parametara grupe  $\mathbf{y}$ . Veličine  $\mathbf{w}_x$  i  $\mathbf{v}_x$  predstavljaju vektore slobodnih članova grupe opažanja  $\mathbf{x}$ , respektivno.

U ovaj model mogu biti uvedene i dodatne promenljive ili uslovi među nepoznatim. Lichti (2007) model proširuje sa dodatnim nepoznatim poput uglova horizontalne inklinacije  $\omega$  i  $\varphi$ , odnosno inklinacije skenera po  $x$  i  $y$  osi. Takođe, uslov može biti etalonska dužina ukoliko se dodatno utvrđuje multiplikaciona konstanta.

Ukupan broj opažanja  $n$  je tri puta veći od broja skeniranih tačaka. Ukoliko su inklinacije uključene u model, broj opažanja se dodatno uvećava, i to duplo od broja scena. Ukupan broj nepoznatih je dat kao:

$$u = u_e + u_a + u_o, \quad [5.12]$$

pri čemu  $u_e$  predstavlja broj parametara orijentacije skenera koji je 6 puta veći od broja scena (za šestoparametarski transformacioni model bez faktora razmere). Broj  $u_a$  je ukupan broj dodatnih parametara definisanih u izrazima [5.1], [5.3] i [5.4]. Broj  $u_o$  je broj parametara koordinata tačaka u sistemu geodetske mreže, odnosno tri puta veći od broja skeniranih tačaka. Broj stepeni slobode MNK tako iznosi:

$$f = n - u + d, \quad [5.13]$$

pri čemu je  $d$  defekt datuma. Ukoliko nema kompenzacije nagiba defekt iznosi 6, odnosno tri datumske translacije i tri datumske rotacije. Ukoliko se nagib oko  $x$  i  $y$  ose precizno kompenzuje, defekt iznosi 4. Razmera je implicitno definisana opažanjima rastojanja.

Ukoliko se definicija datuma geodetske mreže realizuje isključivo preko skenerskih signala funkcionalni oblik modela uslova glasi:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{G}_0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_e \\ \hat{\delta}_a \\ \hat{\delta}_o \end{bmatrix} = 0, \quad [5.14]$$

pri čemu je  $\mathbf{G}_0$  standardna analitička forma matrice datumskih uslova.

Težine opažanja imaju standardnu formu, i definišu se na osnovu karakteristika TLS:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_\rho & 0 & 0 \\ 0 & P_\theta & 0 \\ 0 & 0 & P_\alpha \end{bmatrix}. \quad [5.15]$$

Upotrebom Lagranžovih multiplikatora, MNK normalna jednačina glasi:

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} A_{\rho e}^T P_\rho A_{\rho e} \\ + A_{\theta e}^T P_\theta A_{\theta e} \\ + A_{\alpha e}^T P_\alpha A_{\alpha e} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho a}^T P_\rho A_{\rho a} \\ + A_{\theta a}^T P_\theta A_{\theta a} \\ + A_{\alpha a}^T P_\alpha A_{\alpha a} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho A_{\rho o} \\ + A_{\theta o}^T P_\theta A_{\theta o} \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha A_{\alpha o} \end{pmatrix} & 0 \\ \begin{pmatrix} A_{\rho a}^T P_\rho A_{\rho a} \\ + A_{\theta a}^T P_\theta A_{\theta a} \\ + A_{\alpha a}^T P_\alpha A_{\alpha a} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho a}^T P_\rho A_{\rho a} \\ + A_{\theta a}^T P_\theta A_{\theta a} \\ + A_{\alpha a}^T P_\alpha A_{\alpha a} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho A_{\rho o} \\ + A_{\theta o}^T P_\theta A_{\theta o} \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha A_{\alpha o} \end{pmatrix} & 0 \\ \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho A_{\rho o} \\ + A_{\theta o}^T P_\theta A_{\theta o} \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha A_{\alpha o} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho A_{\rho o} \\ + A_{\theta o}^T P_\theta A_{\theta o} \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha A_{\alpha o} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho A_{\rho o} \\ + A_{\theta o}^T P_\theta A_{\theta o} \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha A_{\alpha o} \end{pmatrix} & G_0 \\ \text{simetrično} & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_e \\ \hat{\delta}_a \\ \hat{\delta}_o \\ \hat{\mathbf{k}}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} A_{\rho e}^T P_\rho w_\rho \\ + A_{\theta e}^T P_\theta w_\theta \\ + A_{\alpha e}^T P_\alpha w_\alpha \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} A_{\rho a}^T P_\rho w_\rho \\ + A_{\theta a}^T P_\theta w_\theta \\ + A_{\alpha a}^T P_\alpha w_\alpha \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} A_{\rho o}^T P_\rho w_\rho \\ + A_{\theta o}^T P_\theta w_\theta \\ + A_{\alpha o}^T P_\alpha w_\alpha \end{pmatrix} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [5.16]$$

pri čemu je  $\hat{\mathbf{k}}_c$  vektor Lagranžovih multiplikatora.

Postoji nekoliko važnih aspekata koji omogućuju da se kalibracija sistema TLS uspešno obavi. Najpre, vezano za dizajn mreže skenerskih signala. Obzirom da je jedan od ciljeva samokalibracije da se minimalizuje korelacija između parametara spoljne orijentacije i dodatnih parametara, opažanja ispred i iza skenera treba da omogućuje određivanje vrednosti kolimacije skenera. Takođe, veliki raspon vrednosti vertikalnih uglova je neophodan kako bi se odredila greška neupravnosti obrtne ose ogledala, pa je potrebno projektovati raspored markica na plafonu i podu. Bar dva stajališta i

respektivan broj opažanja rastojanja je potreban kako bi se odredila adicione konstante skenera. Takođe, različita rastojanja su potrebna kako bi se odredila ciklična greška rastojanja (fazni skeneri). Takođe se preporučuje da se sa istog stajališta skeniraju međusobno ortogonalne scene kako bi se dekorelisali parametri spoljašnje orijentacije i dodatni parametri. Ukoliko se uključe i opažanja inklinacije skenera u model, to dovodi do potpune dekorelacije parametara rotacije  $\omega$  i  $\varphi$  u odnosu na dodatne parametre, a posebno na  $A_2$  iz modela [5.1] i  $C_0$  iz modela [5.4]. Visoka redundantnost sistema i veliki broj markica je takođe poželjan kako bi se pouzdano utvrdili trendovi reziduala, što omogućuje pravilnu analizu rezultata i modelovanje neotkrivenih izvora sistematskih grešaka (Lichti i Skaloud, 2010; Lichti, 2007). Dijagrami dodatnih parametara kalibracije pokazuju očigledne trendove distribucije reziduala opažanja, te se može reći da je valjanost ove metodologije kalibracije TLS očigledna (Slika 5-1, Slika 5-2 i Slika 5-3). Unapređenja samog numeričkog modela se mogu ostvariti primenom dekompozicije singularnih vrednosti (SVD) ukoliko je matrica normalnih jednačina loše uslovljena, odnosno ukoliko je njena inverzija singularna (González-Aguilera i dr., 2011).

Najzad, kao što je već napomenuto, prethodna metodologija kalibracije je uglavnom zasnovana na modelu kalibracije faznog AMCW skenera. Nekritično uzimanje modela dodatnih parametara nije preporučljivo čak i ako se koristi sličan model faznog skenera. Modeliranje dodatnih parametara kod impulsnih skenera nije moguće po istoj analogiji, najpre zbog različitog načina određivanja rastojanja. Takođe, činjenica da je preciznost ovih skenera na nižem nivou od faznih ukazuje na problem značajnosti određivanja dodatnih parametara pri sličnom dizajnu mreže i eksperimenta (Schneider, 2009; Chow i dr., 2011). Prisutan je i problem TLS kao „crne kutije“ u koji su od strane proizvođača primenjeni nepoznati kalibracioni modeli koji se ne mogu neutralisati od strane korisnika. Generalno gledano, kalibracija TLS može da unapredi tačnost opažanja i do 30% koristeći dodatne parametre, pod uslovom da nema ograničenja za korisnika i da se koriste neobrađena opažanja, bez prethodnih korekcija proizvođača (Schneider, 2009). U praksi to nije slučaj.

I još jedan problem praktične prirode. Na osnovu parametara kalibracije koriguju se izvorna opažanja TLS u vidu sfernih koordinata  $\theta$ ,  $\alpha$  i  $\rho$ . Korisnik ili istraživač koji ima



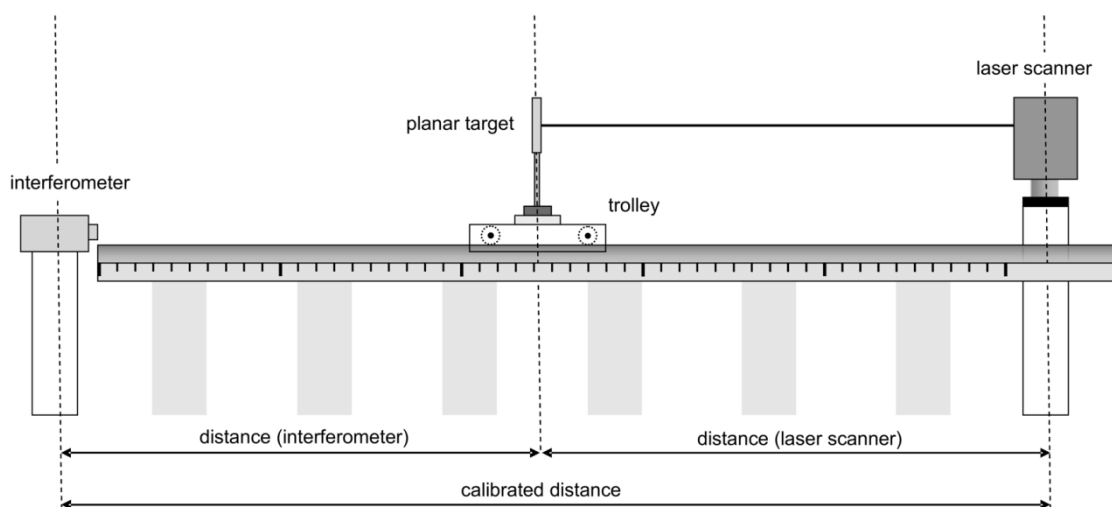
nameru da vrši kalibraciju, do tog podatka ne može doći direktno, nego dolazi posredno na osnovu relacije [3.2]. Korekcije opažanja sfernih koordinata se ne mogu implementirati direktno u instrument, nego posredno na uzorak merenja preko programskih rutina. Kada se tome doda činjenica da prosečan uzorak skeniranja jednog inženjerskog objekta sadrži više stotina miliona izvornih opažanja nailazi se na problem memorijske ograničenosti tipičnih programerskih alata i posledične nekonzistentnosti sa matičnim softverom proizvođača tokom dalje obrade. Dakle, kalibracija TLS ima praktičnog smisla samo onda kada se korekcije osnovnih opažanja mogu primeniti nad samim TLS, odnosno da „sirov“ oblak tačaka sadrži u sebi popravljena opažanja. To će biti moguće samo onda kada TLS prestane da bude „crna kutija“ i kada proizvođači omoguće takvu proceduru, odnosno kada se definišu unapred standardne procedure kalibracije, kao za digitalne kamere u fotogrametriji.

U toku završne faze pisanja ove disertacije, tokom meseca oktobra 2012. godine, kompanija Leica Geosystems je konačno predstavila novi TLS - impulsni skener Scanstation P20, koji poseduje opciju „Check and Adjust“. Na osnovu neposredne komunikacije sa predstavnicima proizvođača i dostupnih tehničkih dokumenata, može se reći da se radi o rutini koja omogućuje kalibraciju sistema TLS od strane korisnika (bez potrebe slanja instrumenta na fabričku kalibraciju). U skladu sa prethodnim razmatranjima u ovom poglavlju, to predstavlja veliki doprinos značajnijoj implementaciji TLS tehnologije u geodetsko inženjerstvo.

## **5.2 Kalibracija komponenti TLS**

Kalibracija komponenti TLS je zasnovana na analogiji sa kalibracionim postupcima kod totalne stanice i svoje korene povlači iz klasične geodetske literature i prakse. Svodi se na pojedinačno fizičko interpretiranje sistematskih uticaja koji potiču od pojedinačnih komponenti TLS. Posebno se analiziraju uticaji sistema za merenje rastojanja, merenje uglova i ostalih instrumentalnih i neinstrumentalnih grešaka. Rezultat ispitivanja je tačnost i/ili rezolucija pojedinačne komponente (Staiger, 2005). Za ovaj postupak neophodno je imati pristup specijalnoj laboratorijskoj infrastrukturi i opremi (Slika 5-4), kao što su npr. kalibracione baze dužina i uglova. U praksi se mogu javiti određeni problemi usled specifičnosti TLS. Na primer, kalibracija laserskog daljinomera

korišćenjem kalibracione osnove je standardna tehnika ispitivanja adicione i multiplikacione konstante elektrooptičkih daljinomera. Takva metoda kod ispitivanja TLS sa sobom nosi određene poteškoće, obzirom da se pojedini TLS ne mogu horizontirati ili centrisati. Takođe, postojeće osnove su konstruisane za potrebe ispitivanja totalnih stanica, tako da raspored stubova uglavnom ne odgovara ispitivanju TLS (Lichti i Skaloud, 2010). Slična situacija je sa ispitivanjem uglova, naročito u zatvorenom prostoru, obzirom na kratka rastojanja i nedostatak dvoosnog kompenzatora pojedinih TLS, kao npr. kod skenera Leica HDS3000 (Delčev i dr., 2011).



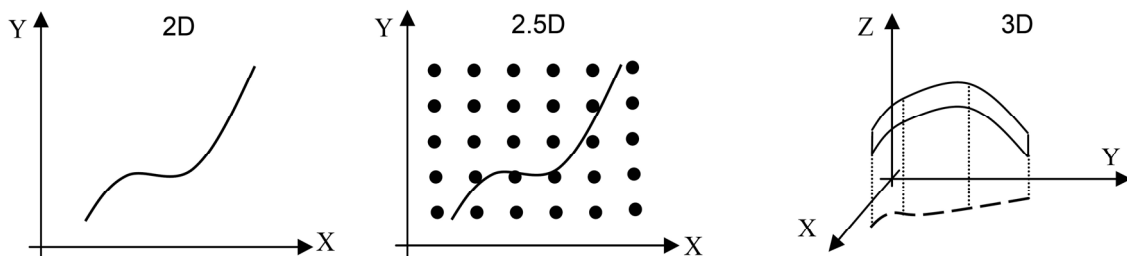
Slika 5-4 Laboratorijska konfiguracija za kalibraciju komponente rastojanje TLS (Schulz, 2007)

## 6 3D modeliranje oblaka tačkaka

U ovom poglavlju razmatrana je koncepcija modeliranja oblaka tačkaka sa stanovišta tehnologije TLS. Naglašen je značaj 3D modeliranja u inženjerstvu u odnosu na 2D i 2.5D modele.

Modeliranje oblaka tačkaka predstavlja naredni korak u obradi podataka TLS, nakon registracije i georeferenciranja. Istorijski gledano, u geodetskom inženjerstvu modeliranje tačkaka se najčešće vršilo u cilju izrade digitalnog modela terena (DMT), pri čemu se kao tehnologija prikupljanja podataka podrazumevala fotogrametrijska, tahimetrijska ili GNSS metoda.

3D modeliranje realnih objekata podrazumeva 3D prostor, pri čemu se i treća dimenzija (najčešće vertikalna komponenta -  $Z$ ) tretira kao nezavisna promenljiva na isti način kao što se  $X$  i  $Y$  promenljive tretiraju u 2D modeliranju (Cai, 2003). U ovoj definiciji je napravljena jasna distinkcija 3D modeliranja u odnosu na 2D modeliranje. Međutim značajno je napraviti i jasnu razliku u odnosu na 2.5D modele, koji se tradicionalno koriste za modeliranje terena u geodetskim i GIS softverskim alatima.



Slika 6-1 Razlike predstavljanja objekta u 2D, 2.5D i 3D prostoru (Cai, 2003)

U gotovo svim CAD i GIS orijentisanim alatima koji se tradicionalno koriste u geodeziji, modeliranje tačkaka podrazumeva postojanje referentne projekcije ravni (najčešće horizontalna ravan). Skupu koordinata tačkaka ( $X$ ,  $Y$ ) se pridružuje podatak visine  $H$ , koji predstavlja zavisnu promenljivu. Stoga, DMT u formi DMV (Digitalni Model Visina) ili TIN (*Triangulated Irregular Network*) u literaturi se nazivaju 2.5D modeli prostora ili kvazi 3D modeli (Cai, 2003; Li i dr., 2005; Pfeifer, 2002; Remondino, 2003; Vosselman i Klein, 2010; Zhou i dr., 2011).

Kvazi 3D modeli poseduju značajna ograničenja u modeliranju inženjerskih objekata. Naime, nemoguće je kontinualno izmodelirati oblak tačaka objekata poput mostova, tunela, cevi, brana itd., koristeći tradicionalne geodetske i GIS softverske alate. Ilustracija ovog problema je objekat (teren) sa više identičnih koordinata tačaka sa različitim visinama, ili efekat ukrštanja izohipsi, što je teorijski i praktično slučaj kod većine inženjerskih objekata. Za 2.5D modele postoji ograničenje samo jedne vrednosti atributa  $H$  za određen par koordinata  $(X, Y)$  što za 3D modele naravno ne važi (Slika 6-1). 3D modeliranje isključuje rasterske modele (Pfeifer, 2002).

Modeliranje realnog objekta funkcijama linije i površi i NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*) modelima ima parametarsko matematičko tumačenje. Radi se o 3D modelima, ukoliko funkcionalna zavisnost reprezentuje površ u 3D prostoru. Trenutno raspoložive procedure i algoritmi zahtevaju značajno učešće operatera, posebno u fazama identifikacije oblika, segmentacije, otkrivanja i eliminacije grubih grešaka u uzorku 3D merenja.

Za razliku od evidentnog napretka tehnologija prikupljanja 3D podataka u inženjerstvu, softverski algoritmi za 3D modeliranje nisu pratili ovaj trend. Opšte prihvaćena tvrdnja je da ne postoji sveobuhvatan softverski alat za potpuno automatizovani postupak 3D modeliranja realne 3D scene (Ahn, 2004).

Model objekta u vidu oblaka tačaka (*point cloud model*) se sve više diferencira u literaturi i praksi kao posebna vrsta 3D modela objekata (Arayici, 2008; Foix i dr., 2010; Hu i dr., 2008; Nebiker i dr., 2010), zahvaljujući veoma visokoj prostornoj rezoluciji i preciznosti skeniranja, te uglavnom ne postoji potreba za strukturiranjem oblaka tačaka karakterističnim prelomnim linijama. Zbog toga se sve češće postavlja pitanje potrebe 3D modeliranja oblaka tačaka. Sa druge strane, postoje značajni nedostaci modela objekta u vidu oblaka tačaka. U inženjerskim primenama tehnologije TLS razlozi za modeliranje oblaka tačaka su sledeći:

- Pобољшanje preciznosti modela;
- CAD kompatibilnost 3D modela;
- Manja količina podataka koja reprezentuje objekat;

- Mogućnost popunjavanja praznina i senki u izvornim podacima;
- Kontinualna forma modela objekta i mogućnost računanja površina i zapremina i
- Kontrola kvaliteta podataka u slučajevima skeniranja pravilnih geometrijskih površi (ravan, cilindar, sfera, konus, itd.) i funkcionalnog modeliranja.

Metode rekonstrukcije (3D modeliranja) površi na osnovu oblaka tačaka se generalno klasifikuju na (Bellocchio i dr., 2012):

- tehnike MNK uklapanja površi i
- zapreminske tehnike modeliranja.

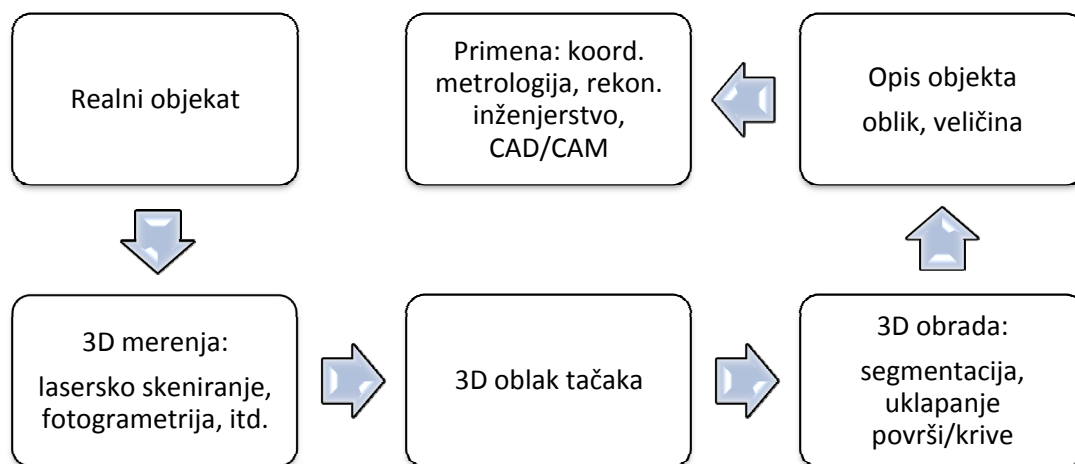
Vosselman i Klein (2010) strukturiranje (modeliranje) podataka laserskog skeniranja (avio i terestričkog) klasifikuju na modele koji su poznati kao:

- Delanijeva (*Delaunay*) triangulacija, i vezuju je isključivo za 2.5D prostor, odnosno vezana je uglavnom za modeliranje terena na osnovu avio snimanja.
- Oktanska hijerarhijska struktura (*octrees*), koja je zapreminska tehnika modeliranja, na osnovu 8 oktanata.
- $k$ -D hijerarhijska struktura, koja je takođe zapreminska tehnika modeliranja, pri čemu je svaka tačka  $k$ -dimenzionalna.

## 6.1 MNK modeli uklapanja linija i površi

Modeliranje oblaka tačaka najboljim uklapanjem (*best fit*) linija i površi se mogu posmatrati kao problem optimizacije, pri čemu se traže parametri datog 3D modela koji predstavlja najbolju saglasnost između uzorka tačaka i rezultujućeg 3D modela. Kriterijum saglasnosti može biti rastojanje tačke od rezultujućeg modela, ili npr. suma kvadrata rastojanja (MNK) svih tačaka od rezultujućeg modela. Manja vrednost sume kvadrata rastojanja ukazuje na bolju preciznost i/ili saglasnost 3D modela funkcionalne zavisnosti. U literaturi se mogu naći i termini poput MNR (*Metod Najmanjih*

Rastojanja) funkcionalnih zavisnosti među promenljivim (Perović, 2005). Celokupna procedura funkcionalne (parametarske) rekonstrukcije objekta se može podeliti na dve faze: fazu 3D merenja i fazu 3D obrade merenja (Slika 6-2).



Slika 6-2 Parametarska rekonstrukcija realnog objekta

### 6.1.1 Matematički oblici linija i površi

Krive i površi u 2D ili 3D prostoru mogu biti opisane u eksplicitnom, implicitnom ili parametarskom obliku (Tabela 6-1).

Tabela 6-1 Krive i površi u pravouglom koordinatnom sistemu (Ahn, 2004)

Oblik	Kriva u ravni	Kriva u prostoru	Površ
Eksplicitni	$Y = F(a, X)$	$\begin{pmatrix} Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(a, X) \\ G(b, X) \end{pmatrix}$	$Z = F(a, X, Y)$
Implicitni	$F(a, X, Y)$	$\begin{pmatrix} F(a, X, Y, Z) \\ G(b, X, Y, Z) \end{pmatrix} = 0$	$F(a, X, Y, Z) = 0$
Parametarski	$\begin{pmatrix} X(a, u) \\ Y(a, u) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} X(a, u) \\ Y(a, u) \\ Z(a, u) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} X(a, u, v) \\ Y(a, u, v) \\ Z(a, u, v) \end{pmatrix}$

U odnosu na implicitni ili parametarski oblik, upotreba eksplicitnog oblika 3D linija i površi je u velikoj meri ograničena. Geometrijske primitive u eksplicitnom obliku su osno zavisne i imaju jednoznačne  $Z$  vrednosti. To za posledicu ima da se npr. sfera u potpunosti ne može opisati u eksplicitnom obliku. Stoga je uobičajeno da se 3D primitive opisuju u implicitnoj ili parametarskoj formi.

### 6.1.2 Algebarska i geometrijska mera rastojanja

Suma kvadrata rastojanja koja se minimizira može se posmatrati kao algebarska ili geometrijska, odnosno uklapanje geometrijskih primitiva može biti algebarsko ili geometrijsko.

Algebarsko rastojanje tačke od površi je karakteristično za implicitni oblik funkcionalne zavisnosti i vezuje se za one primitive koji se mogu izraziti u implicitnom obliku. Polinomska jednakost sa algebarskim parametrom  $\mathbf{b}$  (koeficijent polinoma) za algebarski oblik krive u ravni, po definiciji, glasi:

$$F(\mathbf{b}, \mathbf{X}) \triangleq \sum_{j=1}^p b_j X^{k_j} Y^{l_j} = 0; \quad 0 \leq k_j + l_j \leq o; \quad \forall j, \quad [6.1]$$

a za algebarski oblik površi:

$$F(\mathbf{b}, \mathbf{X}) \triangleq \sum_{j=1}^p b_j X^{k_j} Y^{l_j} Z^{m_j} = 0; \quad 0 \leq k_j + l_j + m_j \leq o; \quad \forall j. \quad [6.2]$$

Pozitivna celobrojna vrednost ( $o$ ) predstavlja red polinoma i jednak je maksimalnom broju preseka između algebarske linije/površi i prave. Ukoliko je  $F(\mathbf{b}, \mathbf{X}_i) \neq 0$ , onda data tačka ne leži na modelu geometrijske primitive. Mera tog neuklapanja  $F(\mathbf{b}, \mathbf{X}_i)$  se u literaturi naziva algebarsko rastojanje. Jednostavan i brz metod uklapanja krive/površi u uzorak 3D tačaka  $\{\mathbf{X}_i\}_{i=1}^m$  podrazumeva određivanje algebarskih parametara  $\{b_j\}_{j=1}^p$  koji minimiziraju sumu kvadrata algebarskih rastojanja na svakoj datoj tački, i naziva se algebarsko uklapanje (Ahn, 2004):

$$\min_{\mathbf{b}} \sum_{i=1}^m F^2(\mathbf{b}, \mathbf{X}_i) \quad [6.3]$$

Obzirom da algebarsko rastojanje  $F(\mathbf{b}, \mathbf{X}_i)$  ima linearnu formu, u smislu algebarskih parametara  $\{b_j\}_{j=1}^p$ , algebarski problem uklapanja može biti rešen bez određivanja približnih vrednosti nepoznatih parametara i ne zahteva velike računarske resurse. Sa druge strane, algebarsko uklapanje ima manu u vidu manje preciznosti uklapanja u odnosu na geometrijsku. Ako se radi o posebnom slučaju algebarskog uklapanja linije ili ravni (*linearna regresija*) oblika:

$$\min_{a,b,c} \sum_{i=1}^m (z_i - aX_i - bY_i - c)^2, \quad [6.4]$$

algebarsko rastojanje predstavlja vertikalno rastojanje date tačke  $\mathbf{X}_i$  od rezultujuće linije/ravni. Ukoliko uzorak tačaka potiče od vertikalnog objekta, ova metoda očigledno daje loše rezultate (Ahn, 2004; Rabbani, 2007).

Geometrijsko uklapanje modela objekta se naziva i ortogonalno ili najbolje uklapanje. Ovde primena MNK podrazumeva minimiziranje sume kvadrata najkraćeg rastojanja između tačaka i rezultujućeg MNK modela parametarske površi:

$$\min_{\mathbf{b}, \{\mathbf{X}'_i\}_{i=1}^m \in F} \sum_{i=1}^m \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}'_i\|^2, \quad [6.5]$$

pri čemu su  $\{\mathbf{X}'_i\}_{i=1}^m$  tačke na rezultujućem modelu  $F$  najbliže odgovarajućim datim tačkama  $\{\mathbf{X}_i\}_{i=1}^m$ . Kriterijum  $\|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}'_i\|$  predstavlja dobru meru uklapanja primitiva u uzorak merenja, obzirom da se izmerena tačka najverovatnije odnosi na najbližu tačku na objektu (Ahn, 2004). Geometrijsko rastojanje predstavlja i invarijantnu veličinu u odnosu na definiciju datuma kontrolne mreže, pa to predstavlja komparativnu prednost u odnosu na korišćenje algebarskog rastojanja. Sa druge, strane implementacija geometrijskog rastojanja ima za posledicu nelinearnost modela u smislu nepoznatih parametara, a samim tim i u velikoj meri komplikovan računski aparat. Izuzetak su



primitive poput linije i ravni koji su po prirodi linearni modeli. Takođe, kružnica i sfera ne poseduju parametre rotacije, te posledična linearnost modela odražava jednostavniji postupak računanja, bez iterativnog postupka.

Zahvaljujući razvoju računarskih tehnologija, MNK ortogonalno uklapanje primitiva se inicijalno pojavljuje u literaturi kao prikaz realizacije prvog računarskog algoritma tek od 1987. godine kao: *MNK ortogonalna regresija primitiva u eksplcitnom obliku* (Boogs i dr., 1987; Ahn, 2004).

### 6.1.3 MNK uklapanje osnovnih geometrijskih primitiva

U ovom potpoglavlju predstavljen je nelinearni modeli MNK uklapanja osnovnih geometrijskih primitiva u implicitnom obliku (Tabela 6-1), i to: ravni, sfere i cilindra. Za računanje približnih vrednosti nepoznatih parametara MNK modela koristi se forma površi drugog reda i MNK linearni model na osnovu algebarskog rastojanja tačaka od izravnavajućeg modela površi.

Za ocenu približnih vrednosti nepoznatih parametara nelinearnog MNK modela geometrijskih primitiva, kao prvi korak može se upotrebiti dovoljno dobro rešenje na osnovu modeliranja tačaka linearnim modelom površi drugog reda, sledećeg implicitnog oblika (Rabbani, 2007):

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gzx + 2hxy + 2px + 2qy + 2rz + d = 0. \quad [6.6]$$

Model [6.6] je linearan po deset nepoznatih parametara ( $a, b, c, d, e, f, g, h, p, q, r$  i  $d$ ). Sa druge strane, postoji devet stepeni slobode (po tri za  $x, y$  i  $z$  respektivno). Ovaj problem se može prevazići uvođenjem uslova:

$$a^2 + b^2 + c^2 + f^2 + g^2 + h^2 + p^2 + q^2 + r^2 + d^2 = 1, \quad [6.7]$$

i poznatom implementacijom Lagranžovih multiplikatora. Ukoliko oblak tačaka ima  $n$  tačaka i ukoliko je  $n \geq 9$ , na osnovu parcijalnih izvoda po nepoznatim parametrima sledi da matrica dizajna  $\mathbf{A}$  ima oblik:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2y_1z_1 & 2z_1x_1 & 2x_1y_1 & 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & 2y_2z_2 & 2z_2x_2 & 2x_2y_2 & 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & 2y_nz_n & 2z_nx_n & 2x_ny_n & 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix}. \quad [6.8]$$

Vektor nepoznatih parametara  $\mathbf{x}$  glasi:

$$\mathbf{x} = [a \ b \ c \ f \ g \ h \ p \ q \ r \ d]^T. \quad [6.9]$$

Rešavanje problema nepotpunog ranga i loše uslovljenosti matrice normalnih jednačina  $\mathbf{N}$  se vrši preko njene pozitivne karakteristične vrednosti  $\lambda_i$  (*eigenvalue*), tako da je:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{E} \mathbf{\Lambda} \mathbf{E}^T. \quad [6.10]$$

Rešenje uslovnog MNK za vektor nepoznatih parametara  $\mathbf{x}$  je dato preko karakterističnog vektora od  $\mathbf{N}$  ( $i$ -ta kolona matrice  $\mathbf{E}$ ) koji odgovara njegovoj karakterističnoj vrednosti ( $i$ -ti dijagonalni element matrice  $\mathbf{\Lambda}$ ).

Tranzicija rešenja iz kvadratnog oblika u implicitni oblik, pored ocene nepoznatih parametara [6.9], podrazumeva određivanje parametara rotacije i translacije sistema. Rešava se kanonskom analizom kvadratne forme [6.10] (Rabbani, 2007).

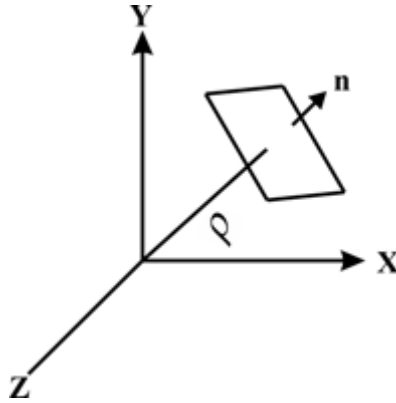
### 6.1.3.1 MNK uklapanje ravni

Ravan  $\Pi$  se definiše parametrima njenog normalnog vektora  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$  i na osnovu ortogonalnog rastojanja  $\rho$  od ishodišta KS (Slika 6-3).

Obzirom da ravan poseduje samo tri stepena slobode, potrebno je uvesti uslov dužine normalnog vektora, npr.  $\|\mathbf{n}\| = 1$ . Rastojanje između date tačke  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$  i ravni  $\Pi$  dato je formom:

$$d\Pi = \langle \mathbf{n}, \mathbf{p} \rangle - \rho, \quad [6.11]$$

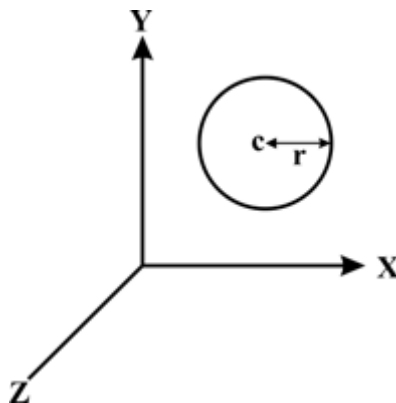
pri čemu forma  $\langle \mathbf{n}, \mathbf{p} \rangle$  definiše linearni raspon između tačke  $\mathbf{p}$  na normalnom vektoru  $\mathbf{n}$ . Realizacija MNK metode podrazumeva minimiziranje sume  $\sum d^2$  i parcijalne izvode rastojanja  $d$  po nepoznatim parametrima ravni  $(n_x, n_y, n_z, \rho)$ .



Slika 6-3 Parametri implicitnog oblika modela ravni (Rabbani, 2007)

#### 6.1.3.2 MNK uklapanje sfere

Sfera  $\mathbf{S}$  se definiše parametrima njenog centra  $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$  i radijusa  $r$  (Slika 6-4).



Slika 6-4 Parametri implicitnog oblika modela sfere (Rabbani, 2007)

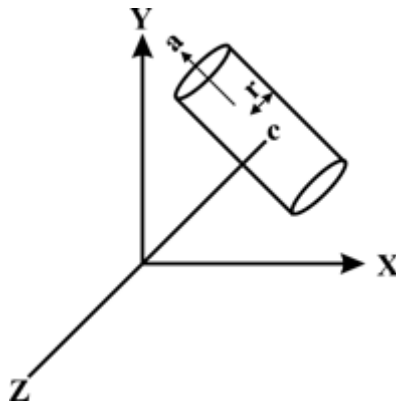
Rastojanje tačke  $\mathbf{p}$  od sfere  $\mathbf{S}$  definiše se na osnovu relacije:

$$ds = \|\mathbf{p} - \mathbf{c}\| - r = \sqrt{(\mathbf{p} - \mathbf{c})^T (\mathbf{p} - \mathbf{c})} - r. \quad [6.12]$$

Realizacija MNK metode podrazumeva minimiziranje sume  $\sum d^2 s$  i računanje parcijalnih izvoda funkcije rastojanja  $d$  po nepoznatim parametrima sfere  $(c_x, c_y, c_z, r)$ .

### 6.1.3.3 MNK uklapanje cilindra

Cilindar se može definisati njegovom osom  $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ , tačkom na toj osi  $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$  koja je najbliža ishodištu KS i radijusom  $r$  (Slika 6-5).



Slika 6-5 Parametri implicitnog oblika modela cilindra (Rabbani, 2007)

Ukoliko se uzima u razmatranje standardna pozicija cilindra sa uslovima njegove pozicije u ishodištu KS i osom duž Z-ose, onda implicitni oblik za cilindar glasi:

$$x^2 + y^2 - r^2 = 0. \quad [6.13]$$

Obzirom da postoji svega pet stepeni slobode za model cilindra [6.13], dva uslova se geometrijski definišu na sledeći način. Prvi uslov glasi:

$$\|\mathbf{a}\| = 1, \quad [6.14]$$

i drugi:

$$\mathbf{a} \perp \mathbf{c} \Rightarrow \langle \mathbf{a}, \mathbf{c} \rangle = 0, \quad [6.15]$$

pri čemu forma  $\langle \mathbf{a}, \mathbf{c} \rangle$  definiše linearni raspon između dva vektora.

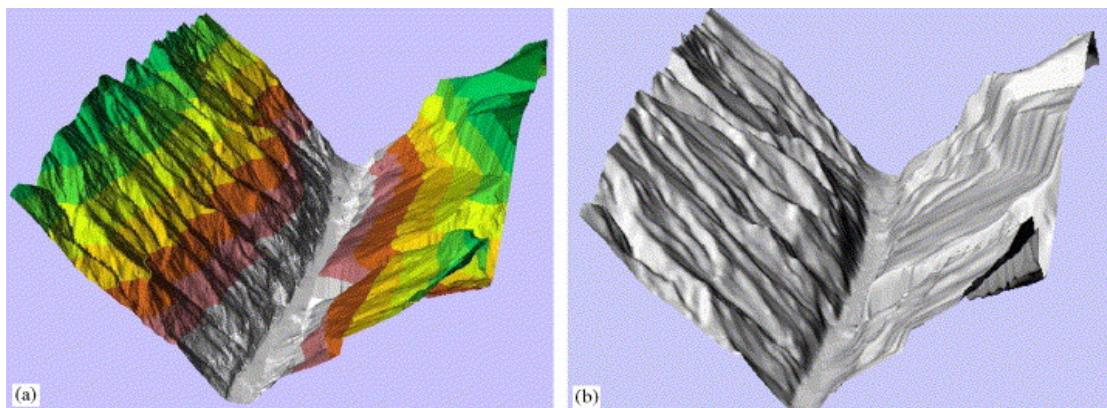
Ortogonalno rastojanje između tačke i površi se definiše na osnovu:

$$d = \|(\mathbf{p} - \mathbf{c}) \cdot \mathbf{a}\| - r. \quad [6.16]$$

Realizacija MNK metode podrazumeva minimiziranje sume  $\Sigma d^2$  i računanje parcijalnih izvoda funkcije rastojanja  $d$  po nepoznatim parametrima modela cilindra.

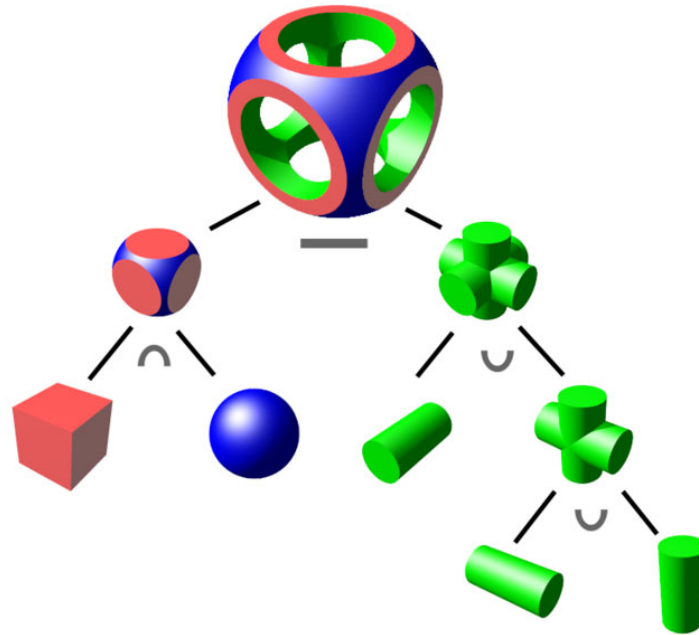
#### 6.1.4 B-rep i CSG modeli

Rezultat MNK uklapanja površi nije kompletno definisana površ objekta. Inženjerski objekat se može predstaviti na osnovu više različitih funkcionalnih zavisnosti koje definišu delove površi objekta koji su identifikovani procesom segmentacije. Da bi se dobila kontinualna forma objekta potrebno ih je objediniti. Industrija uglavnom koristi CAD standarde bazirane na B-rep (*Boundary Representation*) rutinama. Takođe, mogu biti primenjene B-Splines i NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*) „zakrpe“ (Slika 6-6). One se uglavnom koriste u rekonstruktivnom inženjerstvu i predstavljaju parametarske površi visoke nelinearnosti nepoznatih parametara. B-rep modeliranje zahteva visoki stepen manuelne angažovanosti u popunjavanju preostalih „rupa“ u modelu (Rabbani, 2007).



Slika 6-6 Poređenje 3D digitalnih modela terena mesta brane. (a) TIN i (b) NURBS 3D model (Zhong i dr., 2006)

CSG (*Constructive Solid Geometry*) modeliranje je još jedan pristup modeliranju objekata primenom Bulovih operatora: preseka, unije i razlike nad prethodno izmodeliranim osnovnim modelima sfera, toreksa, cilindara, konusa i kvadara (Slika 6-7). Primenu nalazi u modeliranju podataka skeniranja industrijskih postrojenja.



Slika 6-7 CSG modeliranje primenom Bulove algebre (<http://www.sensysmag.com>)

## 6.2 3D triangulacija i zapreminske tehnike modeliranja oblaka tačaka

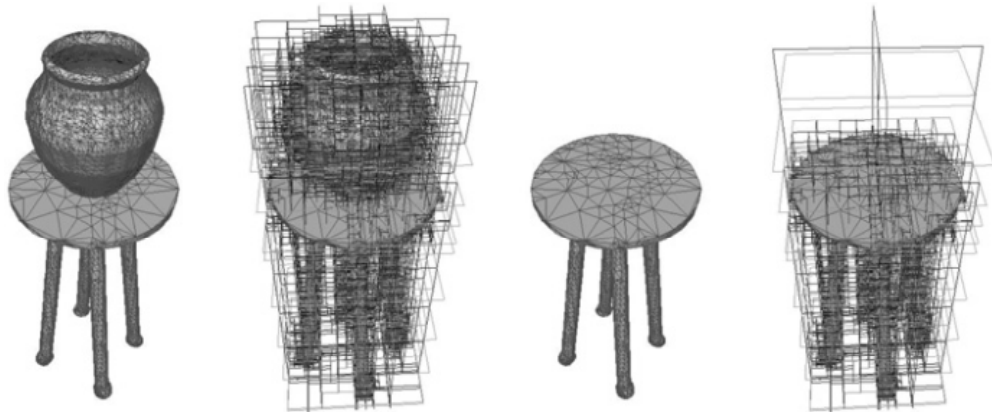
Modeliranje oblaka tačaka triangulacijom omogućuje modeliranje bilo koje površi, ma kako ona bila kompleksna. Ključno pitanje je kako doći do takvog modela.

Za 2.5D modele topologija se definiše samo u jednoj ravni (horizontalnoj). Algoritmi 2D triangulacije i optimizacije, npr. Delanijeva triangulacija (Cvijetinović, 2005; Vosselman i Klein, 2010), su tradicionalno zastupljeni u geodetskim, a posebno u GIS primenama.

Za 3D tačke triangulacija postaje značajno kompleksnija. Za dve tačke sličnih  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  koordinata ne mora obavezno važiti da su susedne, jer na primer mogu biti sa leve ili desne strane stenske mase podzemnog objekta. U tom slučaju njihovo rastojanje mereno

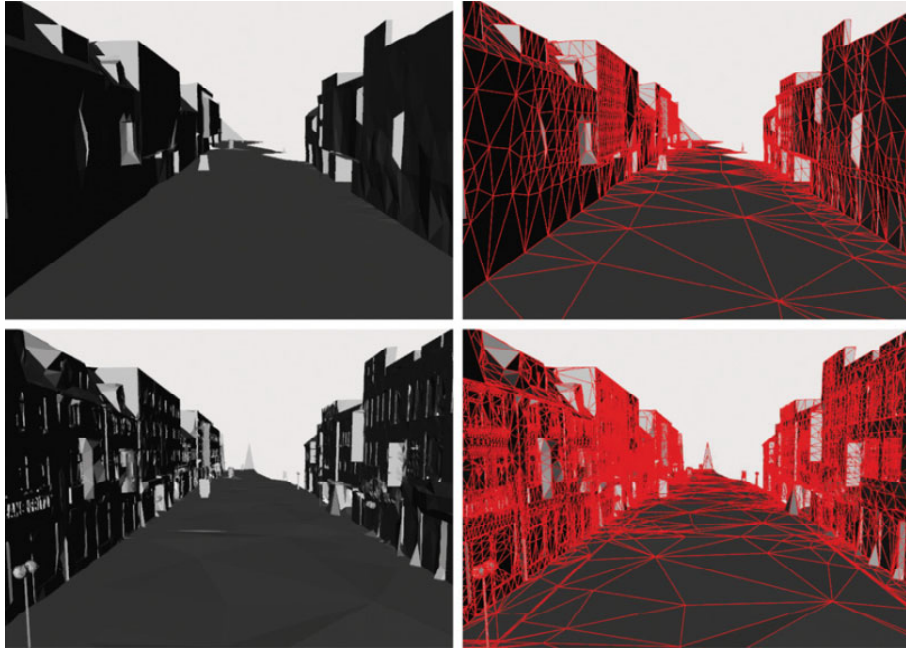
po površi može biti veliko. Važan aspekt je i generisanje glatke površi nakon triangulacije (Pfeifer, 2002).

Više o 3D modelima na osnovu triangulacije i zapreminskih tehnika modeliranja u Fang (1995), Gress i Klein (2004), Lo (2012), Lo (2013), Pfeifer (2002), Vosselman i Klein (2010).



Slika 6-8 Zapreminsko 3D modeliranje pomoću *k*-D hijerarhijske strukture (Gress i Klein, 2004)

Algoritmi za kreiranje 3D modela objekta su, za sada, van opšte prihvaćenih geodetskih i GIS alata. Uglavnom nalaze primenu u kompjuterskim igrama i animacijama. U inženjerskim primenama zastupljeni su u rekonstruktivnom inženjerstvu u mašinstvu, medicini, itd. Po autorovom saznanju, nijedan poznati GIS ili geodetski softverski brend (*Esri*, *Leica*, *Trimble*, itd.) u okviru standardnih alata za modeliranje terena i objekata za sada ne koristi 3D metode modeliranja tačaka. U isto vreme, komercijalni softveri proizvođača TLS, namenjeni za obradu podataka skeniranja, još uvek nemaju pouzdane i potpuno funkcionalne algoritme za 3D modeliranje i filtriranje podataka skeniranja. Korisnici su uglavnom orijentisani na posebne programe, npr. poput *Geomagic Wrap*. I pored činjenice da naziv ovog softvera može ukazivati na njegovu orijentisanost ka geonaukama, on je primarno razvijan za oblasti automobilizma, avio industrije, mašinstva i medicine (<http://www.geomagic.com>). Međutim, vrlo se efikasno može koristiti u modeliranju inženjerskih objekata. Trenutno aktuelni softveri za modeliranje oblaka tačaka su i *3D Reshaper*, *Polyworks*, *Rapidform*, *Meshlab*, *Deep Exploration*, itd.



Slika 6-9 Prikaz 3D modela. Gore: na osnovu oktanske hijerarhijske strukture i dole: na osnovu  $k$ -D hijerarhijske strukture (Gress i Klein, 2004)



## **7 Eksperimentalna istraživanja**

U ovom poglavlju predstavljena su eksperimentalna istraživanja mogućnosti tehnologije TLS sa aspekta njene primene u inženjerskim oblastima. Razmatranja su fokusirana na aspekte geometrijske tačnosti modeliranja objekata.

Prvi aspekt je definisanje procedura za laboratorijsko ispitivanje tačnosti TLS i analiza rezultata ispitivanja na osnovu konkretnih podataka. Ispitivanja su sprovedena u metrološkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Drugi aspekt geometrijske tačnosti modeliranja inženjerskog objekta je definisanje procedura u toku planiranja, merenja i obrade rezultata merenja koje je neophodno sprovesti da bi se ostvarila tražena tačnost. Na primeru specifičnog inženjerskog objekta izvršeno je projektovanje i optimizacija eksperimenta i obrade podataka, a zatim su analizirani postignuti rezultati.

### **7.1 Laboratorijsko ispitivanje tačnosti TLS**

Obzirom na relativno skorbu pojavu tehnologije TLS standardizovane procedure za ispitivanje tačnosti još uvek ne postoje. Standard ISO17123-2012 u 8 poglavlja opisuje procedure za ispitivanje geodetskih senzorskih sistema, kao što su niveliri, totalne stanice, GNSS sistemi, itd. Objavljen je u nekoliko verzija između 2001. i 2012. godine. Ni u jednoj verziji se ne spominje tehnologija TLS.

Da bi se došlo do praktično upotrebljivih postupaka za ispitivanje geodetske opreme, ISO17123 predviđa dve vrste procedura (Gottwald, 2008). To su:

- **Pojednostavljena procedura.** Ispituje se saglasnost sa deklarisanim odstupanjima uz minimalno potrebno vreme za izvođenje merenja i ocenu rezultata. Sračunata standardna odstupanja su na osnovu relativno malog i ograničenog uzorka merenja. Značajnost ovih vrednosti je ograničena.
- **Kompletna procedura.** Zahvaljujući relativno velikom uzorku merenja, sračunata standardna odstupanja su značajna za ocenu tačnosti rezultata

merjenja. Ekperimentalno standardno odstupanje se može testirati na saglasnost sa deklariranim vrednostima proizvođača. Procedure i kompletan računski aparat je definisan u 8 delova ISO 17123, za svaki tip geodetskog instrumenta ponaosob.

Sa uvođenjem novog dela ISO 17123-8 (GNSS terenski merni sistem - RTK) septembra 2007. godine, TLS je ostao jedini geodetski merni sistem bez standardizovanih procedura testiranja tačnosti (Cuartero i dr., 2010). Procedure za ispitivanje tačnosti TLS se trenutno razmatraju od strane Komisije 5 u saradnji sa Komisijom 6 ISO tehničkog komiteta – ISO TC172.

Nedostatak obavezujućih standarda za TLS uređaje je takođe rezultirao time što se opisne karakteristike komercijalnih TLS, u smislu relevantnih pokazatelja tačnosti i preciznosti konkretnih uređaja, ne mogu pouzdano tumačiti. Time je otežano poređenje različitih uređaja proizvođača, pa čak i modela istog proizvođača. Reklamne i tehničke brošure su često pune nejasnih specifikacija. U praksi je potvrđeno da se ovim specifikacijama često ne može sasvim verovati.

Ovde je takođe važno razlikovati procedure testiranja tačnosti i kalibracije TLS. Prvi termin se odnosi na ispitivanje tačnosti radi dobijanja konkretnih kvantitativnih pokazatelja nesigurnosti, dok drugi obuhvata i kalibraciju (popravljanje) rezultata merjenja za pojedine sistematske uticaje. U oktobru 2012. godine, predstavljen je TLS Leica ScanStation P20 koji se reklamira kao prvi komercijalni TLS sa omogućenim procedurama kalibracije od strane korisnika kroz opciju „*check and adjust*“, što ukazuje na očekivani trend uvođenja ovih procedura i kod ostalih proizvođača.

U ovom poglavlju predstavljena je procedura ispitivanja geometrijske tačnosti TLS u laboratorijskim uslovima na osnovu uspostavljene mreže skenerskih signala.

### **7.1.1 Značajniji radovi**

Prvi istraživački radovi na ispitivanju tačnosti i kalibraciji TLS su objavljeni tokom 2000. godine (Lichti i dr., 2000a; Lichti i dr., 2000b).

Doprinos metodologiji kalibracije TLS je dat kroz radove različitih autora. Procedure kalibracije sistema i ocene dodatnih parametara su date kroz radove (Chow i dr., 2011; Gielsdorf i dr., 2004; González-Aguilera i dr., 2011; Lichti i dr., 2000; Lichti i Skaloud, 2010; Lichti, 2007; Reshetyuk, 2006; Reshetyuk, 2009; Reshetyuk, 2010; Schneider, 2009; Staiger, 2005). Kalibracija komponenti sistema TLS je predstavljena u radu Schulz (2007). Procedure kalibracije i problemi praktične primene dodatnih parametara su detaljno razmatrani u poglavlju 5.

Ispitivanjem tačnosti TLS se bavio veliki broj autora. Pojedina istraživanja se fokusiraju na tačnost konkretnog TLS (Delčev i dr., 2011; Lindenbergh i dr., 2005; Kersten i dr., 2005), dok se druga bave upoređivanjem tačnosti različitih TLS (Kersten i dr., 2008; Reshetyuk, 2006a). Greške položaja glavnih osa TLS se analiziraju u radovima (Kersten i dr., 2005; Neitzel, 2007; Schulz, 2007). Uticaji pojedinih karakteristika sistema TLS, kao što su doprinos upadnog ugla laserskog zraka (Soudarissanane i dr., 2009; Soudarissanane i dr., 2011), karakteristike objekta skeniranja (Bucksch i dr., 2007; Hanke i dr., 2006; Hodge, 2010; Lichti i Harvey, 2002; Pesci i Teza, 2008; Voegtle i dr., 2008) i okoline prostiranja lasera (Hejbudzka i dr., 2010; Voisin i dr., 2007) na geometrijsku nesigurnost modeliranja objekata, su analizirani nad eksperimentalnim podacima. Cuartero i dr. (2010) analiziraju pozicione greške podataka TLS na osnovu sferne statistike i 3D grafika. Dizajn i okruženje eksperimenta zavisi od metodologije ispitivanja tačnosti TLS. Uglavnom se sprovodi na manje ili više prilagođenim poligonima koji su u zatvorenom ili na otvorenom prostoru. Detaljnije o izvorima grešaka TLS u poglavlju 4.

### **7.1.2 Metodologija ispitivanja TLS u laboratorijskim uslovima**

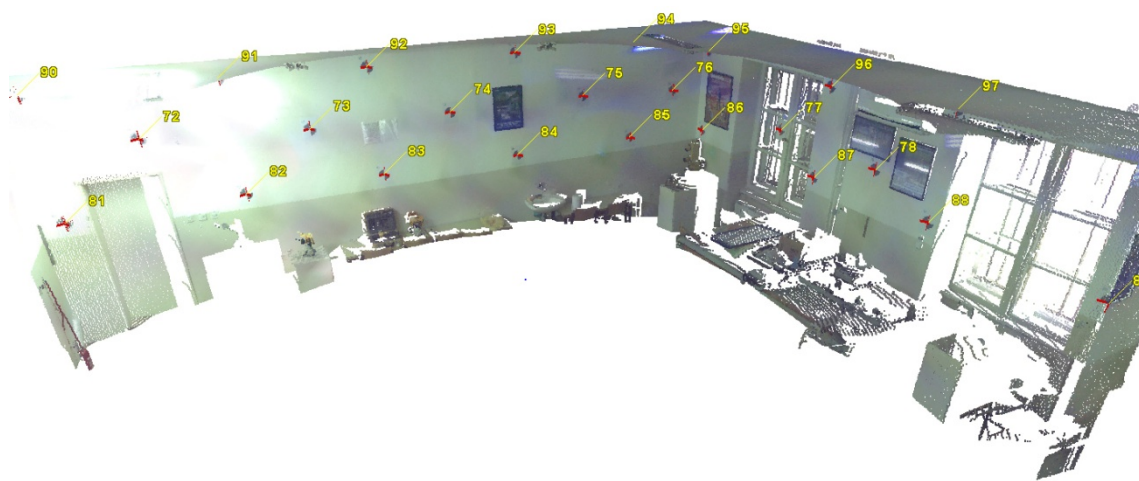
Osnovni cilj ovog ispitivanja je utvrđivanje tačnosti rezultata TLS opažanja, odnosno rezultujućeg oblaka tačaka, kojeg reprezentuju registrovani skenerski signali u koordinatnom sistemu skenera. Pored toga može se analizirati preciznost registracije skenerskih signala, kao i uticaj nehorizontalnosti TLS na grešku centrisanja.

### 7.1.2.1 Test poligon i konfiguracija mreže

Obzirom na nedostupnost specijalnih laboratorijskih poligona konstruisanih za ispitivanje komponenti TLS (poglavlje 5.1), korišćeni su već postojeći resursi Metrološke laboratorije Građevinskog fakulteta u Beogradu, koji mogu poslužiti za definisanje pojednostavljene procedure ispitivanja TLS. Laboratorija je akreditovana za etaloniranje uglova i dužina. Posедуje kontrolisane uslove sredine, odnosno stabilne parametre temperature i vlažnosti vazduha.

Odabrana je konfiguracija eksperimenta ispitivanja tačnosti TLS po ugledu na postupke kalibracije sistema i mreže skenerskih signala (poglavlje 5.2).

Preduslov za određivanje položajne nesigurnosti oblaka tačaka je postojanje referentne mreže skenerskih signala, čije su koordinate određene tačnijom metodom (Tabela 7-1) i na način da se ocenjene koordinate skenerskih signala mogu smatrati uslovno tačnim, odnosno da uticaj nesigurnosti datih veličina bude zanemarljiv prilikom ispitivanja TLS. Takođe, potrebno je obezbediti što veći broj skenerskih signala uz njihov dobar prostorni raspored (poglavlje 4.4.1.3).



Slika 7-1 Mreža skenerskih signala i geodetskih stubova u Metrološkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu

Do uporedivih vrednosti koordinata skenerskih signala se može doći prostornom transformacijom iz KS skenera u KS kontrolne mreže. Tada pojedinačni vektori grešaka zavise od parametara transformacije, odnosno izbora kontrolnih tačaka koje učestvuju u

oceni parametara transformacije, dok standardna greška realnije odslikava globalnu nesigurnost oblaka tačaka. Drugi način ocenjivanja tačnosti je analiza 3D dužina između skenerskih signala u oba sistema, pri čemu se posredno može doći do standardnih grešaka koordinata pojedinačnih tačaka. Vrednost ove ocene zavisi od izbora skenerskih signala na osnovu kojih se analiziraju vrednosti 3D dužina.

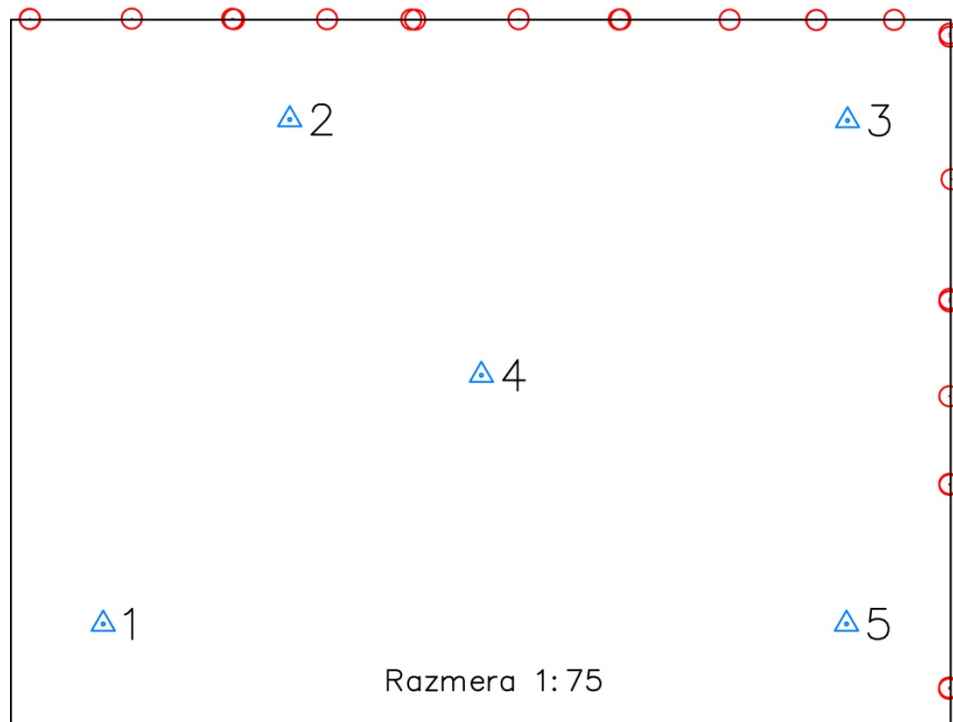
Ograničavajući faktori prilikom upotrebe raspoloživih resursa, koji su primarno konfigurisani za ispitivanje klasične geodetske opreme, su naravno prisutni. To se pre svega odnosi na gabarite prostorije u kojoj se ispituje TLS i na raspored stubova. Proizvođači deklarišu tačnost i preciznost rezultata skeniranja na određenom rastojanju: Leica Geosystems na 50 m, Faro na 25 m, Riegl i Zoller+Fröhlich na 50 m i 100 m, itd. Međutim, u praksi rastojanje do objekta skeniranja varira i kreće se u rasponu od nekoliko metara pa i do nekoliko stotina metara. Isključivo iz ovih razloga, ova procedura je kategorisana kao pojednostavljena procedura ispitivanja tačnosti TLS po ugledu na ISO17123.

Prostorija metrološke laboratorije (Slika 7-1) u kojoj je stabilizovana mreža skenerskih signala ima dužinu 9.3 m, širinu 7 m i visinu 3.3 m. Ukupan broj skenerskih signala iznosi 25. Oni su stabilizovani na dva susedna zida laboratorije uz pravilan prostorni raspored. Skenerski signal je u vidu Leica ravne crno-bele markice dimenzija 12 cm x 12 cm. Maksimalno rastojanje između dva skenerska signala iznosi 11.5 m, maksimalna dužina vizure ka skenerskom signalu oko 11 m, a minimalna oko 1.2 m.



Slika 7-2 Leica crno-bela ravna markica i njen model u vidu oblaka tačaka

U laboratoriji postoji ukupno 5 geodetskih stubova, od kojih je jedan lociran na sredini prostorije, a ostala četiri u njenim uglovima (Slika 7-3). Prilikom merenja u kontrolnoj mreži, na stubovima je centrisana TS, a skeniranje je izvršeno sa stubova 1, 4 i 5.



Slika 7-3 Raspored geodetskih stubova u Metrološkoj laboratoriji

### 7.1.2.2 Statistički ocenjivači i analiza tačnosti podataka skeniranja

Apsolutna ili istinita greška  $i$ -tog rezultata merenja ovde predstavlja razliku 3D položaja identičnih signala:

$$\Delta_i = (\mathbf{X}_i - \mathbf{A}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad [7.1]$$

pri čemu  $\mathbf{X}_i$  predstavlja rezultujući vektor koordinata  $i$ -tog signala:

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad [7.2]$$

dok istinita vrednost vektora  $i$ -tog signala  $\mathbf{A}_i$  glasi:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad [7.3]$$

Modul  $i$ -tog vektora grešaka na osnovu izraza [7.1], [7.2] i [7.3] ima oblik:

$$\Delta_i = \sqrt{(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2 + (z_i - Z_i)^2} = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2 + (\Delta z_i)^2}. \quad [7.4]$$

Osnovni statistički pokazatelji uzorka grešaka pri ispitivanju TLS su aritmetička sredina modula grešaka  $\bar{\Delta}$ , odnosno ocena sistematskih grešaka, minimalne i maksimalne vrednosti modula i koordinatnih razlika, standardna (srednja) greška i standardno odstupanje modula grešaka.

Ukoliko je poznata istinita vrednost rezultata, ocenjivač tačnosti rezultata je empirijska varijansa  $S_A^2$  ili pozitivni kvadratni koren iz empirijske varijanse u vidu srednje greške rezultata merenja -  $S_A$  ili *RMSE (Root Mean Square Error)*. Kao mera tačnosti koristi se izraz:

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad [7.5]$$

Mera disperzije ili rasturanja grešaka se može izraziti preko vrednosti standardnog odstupanja modula grešaka u odnosu na aritmetičku sredinu uzorka modula grešaka:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}, \quad [7.6]$$

pri čemu se pozitivna vrednost izraza [7.6] tumači kao mera preciznosti.

Ukoliko se vrednosti izraza [7.5] i [7.6] značajno razlikuju, odnosno ukoliko nije  $\bar{\Delta} \approx 0$ , može se reći da postoji pomerenost (*bias*) sistema, odnosno sistematski uticaji. Ova pomerenost predstavlja uticaj modela transformacije koordinata, odnosno proističe iz vrednosti ocenjenih parametara transformacije koji zavise od broja i izbora kontrolnih tačaka. Varijanse [7.5] i [7.6] se mogu testirati na jednakost, pri čemu se može posredno

utvrditi da li je  $\bar{\Delta} \approx 0$ . Sprovođenje statističkih testova pretpostavlja prvobitno testiranje uzorka vektora grešaka na saglasnost sa normalnom raspodelom.

Modularna komponenta vektora grešaka [7.4] i odgovarajuće mere tačnosti [7.5] i preciznosti [7.6] predstavljaju rezultate u vidu brojne vrednosti skalara. Vektori pored vrednosti modula poseduju još dva parametra u vidu horizontalnog i vertikalnog ugla. Vertikalni ugao vektora grešaka  $\theta$  se definiše kao ugao između pozitivnog smera Z-ose i tačke meren u smeru kretanja kazaljke na satu, sa domenom  $0 \leq \theta \leq \pi$ . Horizontalni ugao vektora grešaka  $\varphi$  je ugao meren u smeru suprotnom od smera kretanja kazaljke na satu, između pozitivnog smera X-ose i projekcije tačke na XY-ravan.

Dobar pokazatelj orijentacije vektora grešaka i njihovih modula predstavljaju rezultati sferne statističke analize (Cuartero i dr., 2010; Fisher i dr., 1987; Leong i Carlile, 1998).

Za svaki  $i$ -ti vektor mogu se sračunati parametri orijentacije (Fisher i dr., 1987):

$$\begin{aligned} cx_i &= \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ cy_i &= \sin \theta_i \sin \varphi_i . \\ cz_i &= \cos \theta_i \end{aligned} \quad [7.7]$$

Rezultanta sume vektora glasi (Leong i Carlile, 1998):

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n cx_i + \sum_{i=1}^n cy_i + \sum_{i=1}^n cz_i}, \quad 0 \leq R \leq n. \quad [7.8]$$

Srednji modul vektora grešaka dobija se na osnovu izraza:

$$\bar{R} = \frac{R}{n}, \quad 0 \leq \bar{R} \leq 1, \quad [7.9]$$

dok se srednje vrednosti orijentacije vektora grešaka računaju na osnovu:

$$\bar{\theta} = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{R}, \quad \bar{\varphi} = \arctan \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}. \quad [7.10]$$



### 7.1.3 Rezultati i diskusija laboratorijskog ispitivanja tačnosti skenera

#### 7.1.3.1 Kontrolna mreža skenerskih signala

Baze između 5 stabilizovanih stubova su prethodno određene laserskim interferometrom *HP 5528A* koji poseduje deklarisanu preciznost rezultata merenja dužina  $\sigma_d = 0.5 \mu\text{m}$ . Time je formirana dužinska osnovica koja daje veoma preciznu razmeru sistemu kontrolne mreže. Rezultati merenja dužina totalnom stanicom, tipične tačnosti  $\sigma_{dts} = 2 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km}$ , se mogu smatrati nedovoljno preciznim i ne mogu se zanemariti prilikom ispitivanja tačnosti TLS pri kratkim rastojanjima, obzirom da je tipična deklarirana tačnost registracije skenerskih signala oko 2 mm (Tabela 7-2).

Tabela 7-1 Ocena tačnosti rezultata MNK izravnjanja kontrolne laboratorijske mreže

Tačka	$S_Y$ [mm]	$S_X$ [mm]	$S_H$ [mm]	$S_{3D}$ [mm]	Tačka	$S_Y$ [mm]	$S_X$ [mm]	$S_H$ [mm]	$S_{3D}$ [mm]
<i>Stubovi</i>					<i>Skenerski signali</i>				
1	0.1	0.1	0.1	0.1	84	0.1	0.2	0.2	0.3
2	0.1	0.1	0.1	0.1	85	0.2	0.2	0.2	0.4
3	0.1	0.1	0.2	0.2	86	0.4	0.2	0.2	0.5
4	0.1	0.0	0.1	0.1	87	0.4	0.1	0.2	0.5
5	0.1	0.1	0.1	0.1	88	0.3	0.3	0.2	0.5
<i>Skenerski signali</i>					89	0.4	0.2	0.2	0.5
72	0.2	0.2	0.2	0.4	90	0.2	0.2	0.2	0.4
73	0.1	0.2	0.2	0.3	91	0.1	0.2	0.2	0.3
74	0.1	0.2	0.2	0.3	92	0.1	0.2	0.2	0.3
75	0.1	0.2	0.2	0.3	93	0.1	0.2	0.2	0.3
76	0.2	0.2	0.2	0.4	94	0.2	0.2	0.2	0.4
77	0.5	0.2	0.2	0.5	95	0.4	0.2	0.2	0.5
78	0.5	0.1	0.2	0.5	96	0.4	0.1	0.2	0.5
81	0.2	0.2	0.2	0.4	97	0.5	0.1	0.2	0.5
82	0.1	0.2	0.2	0.3	98	0.4	0.2	0.2	0.5
83	0.1	0.2	0.2	0.3					

Merenja u 1D i 2D mreži kontrolnih skenerskih signala su izvršena istovremeno totalnom stanicom uz procedure prisilnog centrisanja instrumenta i signala na geodetskim stubovima. Rezultati merenja predstavljaju vrednosti horizontalnih pravaca i zenitnih odstojanja. Obzirom na relativno kratke dužine vizura, prilikom merenja korišćena je totalna stanica preciznosti merenja horizontalnih pravaca i zenitnih odstojanja  $\sigma_p = 5''$ . Obzirom da dominantni uticaj na tačnost rezultata u 1D geodetskoj mreži imaju greške merenja visine instrumenta i signala (prizme) na geodetskom stubu,

prethodno je nivelirom podešeno da na svakom stubu visina instrumenta bude jednaka visini prizme. Procedurom prisilnog centrisanja obezbeđeno je da zajednički uticaj vrednosti visine instrumenta i prizme ne utiče na vrednost visinskih razlika.

*A posteriori* standardna odstupanja koordinata skenerskih signala (Tabela 7-1) se mogu smatrati uslovno tačnim, imajući u vidu da deklarirana tačnost određivanja položaja centra ravnog skenerskog signala za ispitivani impulsni skener Leica HDS3000 iznosi 2 mm. Ova tačnost je ista i za TLS novije generacije (Leica Scan Station, Leica Scan Station 2, Leica Scan Station C10 i Leica Scan Station P20) obzirom da se koriste identični ravni signali i isti algoritmi određivanja centra signala. Ostali proizvođači uglavnom ne deklariraju tačnost određivanja tipskih skenerskih signala.

### 7.1.3.2 Rezultati skeniranja i analiza tačnosti

Nakon realizacije kontrolne mreže, u istoj vremenskoj epohi pristupljeno je ispitivanju impulsnog skenera Leica HDS3000.

Tabela 7-2 Najvažnije deklarirane karakteristike TLS Leica HDS3000

Talasna dužina lasera	650 nm - 690 nm
Uređaj za skretanje laserskog snopa	Rotirajuće ogledalo + servo motor
Tačnost pojedinačne tačke: Pozicija Rastojanje Horiz./vert. ugao	6 mm/50 m 4 mm/50 m 12" / 12"
Tačnost registrovanja tipskih markica	2 mm
Rezolucija skeniranja	maks. horiz. / vert. 1"
Vidno polje, horiz. / vert.	360°/270°
Brzina skeniranja	4000 tač./s
Kompenzator nagiba	ne

Deklarirana tačnost rezultata merenja ovog skenera (Tabela 7-2) je identična onima novije generacije impulsnih Leica skenera, zaključno sa Leica Scan Station C10. Važno je napomenuti da ispitivani TLS nema dvoosni kompenzator, već samo centričnu libelu osetljivosti 8 lučnih minuta. Pored činjenice da oblak tačaka nije inicijalno nivelisan, važno je istražiti i ovaj uticaj na grešku pozicije elektrooptičkog centra skenera u odnosu na tačku na stubu usled nagiba instrumenta.

Skeniranje laboratorije je obavljeno sa stubova 1, 4 i 5. Skeniranje nije izvršeno sa stubova 2 i 3 usled nepovoljnog upadnog ugla laserskog zraka na većinu skenerskih markica. Pre skeniranja sa svakog stuba je izvršeno slikanje prostora integrisanom CCD kamerom rezolucije 1 megapixel (Mpix). Nakon izvršenog skeniranja laboratorije, u posebnoj operaciji, skenerske markice su detaljno skenirane sa maksimalnom rezolucijom radi određivanja centra signala.

#### 7.1.3.2.1 Preciznost određivanja centra markice

Detaljno skeniranje markica je obavljeno dva puta radi analize preciznosti određivanja centra markice. Rezultati ove analize su dati za slučaj povoljnih upadnih uglova laserskog zraka na markice, što predstavlja uzorak parova koordinata sa stuba 4, i za slučaj manje povoljnih uslova, odnosno sa stuba 5 (Slika 7-3 i Tabela 7-3). Sa stuba 5 ukupno 4 markice nije bilo moguće detaljno skenirati zbog ekstremnih vrednosti upadnih uglova, dok su 3 markice iz istog razloga imale velike razlike koordinata. Sa stuba 4 sve markice su pouzdano određene. Ocene ( $S_Y, S_X, S_Z$ ) su dobijene iz parova merenja identičnih koordinata markica, odnosno iz razlika koordinata identičnih signala ( $dY_i, dX_i, dZ_i$ ). Vrednosti  $S_{dY}$ ,  $S_{dX}$  i  $S_{dZ}$  predstavljaju standardna odstupanja razlika koordinata identičnih signala (Tabela 7-3).

**Tabela 7-3 Pokazatelji preciznosti određivanja pojedinačnog centra markice**

<i>Stub</i>	<i>n</i>	$S_{dY}$ [mm]	$S_Y$ [mm]	$S_{dX}$ [mm]	$S_X$ [mm]	$S_{dZ}$ [mm]	$S_Z$ [mm]	$S_{d3D}$ [mm]	$S_{3D}$ [mm]
4	25	0.46	0.32	0.46	0.33	0.26	0.19	0.70	<b>0.50</b>
5	18	1.09	0.77	0.79	0.56	0.27	0.19	1.37	<b>0.97</b>

Rezultati analize preciznosti određivanja centra markice ukazuju na činjenicu da prilikom skeniranja objekata, ravni skenerski signali treba da budu postavljeni tako da ne doprinose povećanju greške viziranja, odnosno da se izbegavaju oštri uglovi upadnog laserskog zraka.

7.1.3.2.2 Transformacija rezultata skeniranja, ocena i analiza grešaka

Nakon izvršene registracije skenerskih markica, proces skeniranja je završen. Na osnovu koordinata identičnih markica u KS skenera i KS kontrolne mreže, izvršena je prostorna transformacija oblaka tačaka u KS kontrolne mreže. Korišćena je šestoparameterska prostorna transformacija.

Tabela 7-4 Broj datih kontrolnih tačaka (*K*) i tačaka za verifikaciju (*V*) transformacionog modela

Varijanta	<i>I</i>		<i>II</i>		<i>III</i>		<i>IV</i>	
Stub	<i>K</i>	<i>V</i>	<i>K</i>	<i>V</i>	<i>K</i>	<i>V</i>	<i>K</i>	<i>V</i>
1	25	0	3	22	6	18	18	6
4	25	0	3	22	6	18	18	6
5	18	0	3	15	6	12	13	5

Interesantno je istražiti uticaj broja kontrolnih markica koje učestvuju u određivanju parametara transformacije. Sa sva tri stuba, transformacija je izvršena u četiri varijante (Tabela 7-4), varirajući broj kontrolnih tačaka transformacionog modela (*K*) i broj tačaka za nezavisnu verifikaciju modela (*V*). U prvoj varijanti koordinate svih markica su učestvovala u određivanju parametara MNK transformacije koordinata (tri rotacije i tri translacije), dok se u ostale tri varijante ovaj broj menjao. Na osnovu dobijenih rezultata (Tabela 7-5) može se reći da povećanje broja kontrolnih tačaka u odnosu na minimalne 3, značajno ne doprinosi boljim rezultatima transformacije koordinata. To je u skladu sa iskustvima pojedinih autora (Bornaz i dr., 2003; Reshetyuk, 2006) koji preporučuju da optimalan broj kontrolnih tačaka u praktičnim primenama bude 4, uz neophodan dobar prostorni raspored tačaka.

Tabela 7-5 Standardne greške vektora reziduala – modul standardnog vektora grešaka

Varijanta	<i>I</i>		<i>II</i>		<i>III</i>		<i>IV</i>	
Stub	$S_{AK}$ [mm]	$S_{AV}$ [mm]	$S_{AK}$ [mm]	$S_{AV}$ [mm]	$S_{AK}$ [mm]	$S_{AV}$ [mm]	$S_{AK}$ [mm]	$S_{AV}$ [mm]
1	0.5	/	0.8	0.6	0.7	0.5	0.6	<b>0.4</b>
4	0.9	/	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	<b>1.0</b>
5	0.7	/	0.4	0.8	0.7	0.7	0.7	<b>0.7</b>

Izvršeno je testiranje saglasnosti raspodele uzorka grešaka sa dve teorijske raspodele, i to sa normalnom i eksponencijalnom. Ovo je izvršeno pomoću testa Kolmogorova. Formulacija nulte i alternativne hipoteze glasi respektivno:

$$\begin{aligned} H_0 : F_n(x) &= F_0(x) \\ H_a : F_n(x) &\neq F_0(x) \end{aligned} \quad [7.11]$$

pri čemu je  $F_0(x)$  poznata teorijska raspodela, a  $F_n(x)$  funkcija raspodele uzorka rezultata  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , koja glasi:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & \text{za } x < x_1 \\ \frac{k}{n} & \text{za } x_k < x < x_{k+1} \\ 1 & \text{za } x > x_n \end{cases} \quad [7.12]$$

gde vrednost  $k$  po definiciji označava broj elemenata  $x_1, x_2, \dots, x_k$  manjih od  $x$  (više u Božić, 2010c).

Za uzorke po varijantama I, II, III i IV, sa sva tri stuba (Tabela 7-5), odbacuje se alternativna hipoteza u slučaju testiranja na saglasnost sa teorijskom normalnom raspodelom. Za eksponencijalnu raspodelu za pojedine uzorke se prihvata  $H_a$ . Imajući u vidu kritične vrednosti odbacivanja  $H_a$  (Tabela 7-6), može se reći da su sa visokom verovatnoćom uzorci grešaka saglasni sa teorijskom normalnom raspodelom.

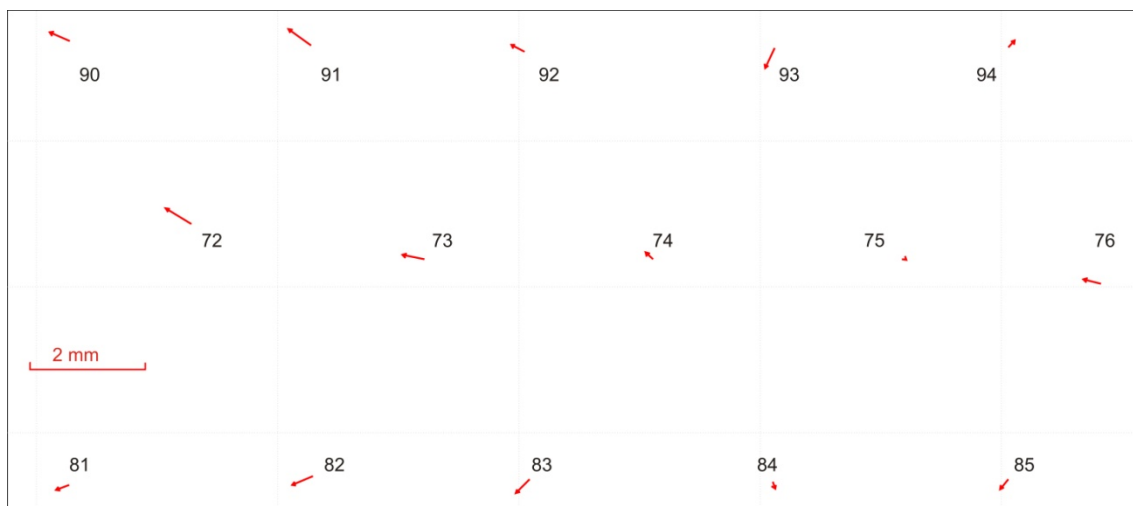
**Tabela 7-6 Testiranje uzoraka grešaka na saglasnost sa teorijskom normalnom i teorijskom eksponencijalnom raspodelom - skeniranje sa stuba 1**

Varijanta	Alternativna hipoteza ( $H_a$ )	Kritična vrednost za $\alpha$	Odluka pri $\alpha = 0.05$
I	Uzorak ne pripada normalnoj raspodeli	0.751	Odbacuje se $H_a$
	Uzorak ne pripada eksponencijalnoj raspodeli	0.167	Odbacuje se $H_a$
II	Uzorak ne pripada normalnoj raspodeli	0.651	Odbacuje se $H_a$
	Uzorak ne pripada eksponencijalnoj raspodeli	0.016	<b>Prihvata se <math>H_a</math></b>
III	Uzorak ne pripada normalnoj raspodeli	0.641	Odbacuje se $H_a$
	Uzorak ne pripada eksponencijalnoj raspodeli	0.015	<b>Prihvata se <math>H_a</math></b>
IV	Uzorak ne pripada normalnoj raspodeli	0.530	Odbacuje se $H_a$
	Uzorak ne pripada eksponencijalnoj raspodeli	0.148	Odbacuje se $H_a$

Na osnovu poznatog principa, da oko 30% datih tačaka učestvuje u verifikaciji modela, varijanta IV (Tabela 7-5) je uzeta kao optimalna za ocenu tačnosti ispitivanog TLS. Vrednosti standardnih grešaka georeferenciranja sa tri stuba su:  $S_{AV1} = 0.43 \text{ mm}$ ,  $S_{AV4} = 0.97 \text{ mm}$  i  $S_{AV5} = 0.68 \text{ mm}$ , koje su sračunate na osnovu izraza [7.5]. Ove vrednosti konačno reprezentuju geometrijsku tačnost rezultata skeniranja u laboratorijskim uslovima za ispitivani TLS Leica HDS3000.

Mere ostvarene preciznosti vektora, koje su sračunate na osnovu izraza [7.6] su:  $S_{V1} = 0.42 \text{ mm}$ ,  $S_{V4} = 1.17 \text{ mm}$  i  $S_{V5} = 0.73 \text{ mm}$ . Obavljeni testovi jednakosti varijansi uzorka, pri  $\alpha=0.05$ , ukazuju da sistematski uticaji nisu značajni, odnosno da je  $\bar{\Delta} \approx 0$  iz izraza [7.6].

Prostorni raspored vektora grešaka se može analizirati u 2D i 3D prostoru. Ovde je predstavljen jedan od mogućih prikaza prostorne distribucije reziduala transformacije na jednom zidu laboratorije u ravni XZ (Slika 7-4). Grafik je kreiran u otvorenom kodu statističkog programskog paketa **R** (R Core Team, 2012), na osnovu paketa *VecStatGraphs2D*.



Slika 7-4 Distribucija komponenti X i Z vektora grešaka na zidu laboratorije. Skeniranje sa stuba 4

Strogo gledano, jasno je da u datim uslovima postignuta eksperimentalna tačnost nije saglasna sa deklarisanom tačnošću registracije tipske skenerske markice –  $\sigma_m = 2 \text{ mm}$ , što se naravno može pokazati i testiranjem varijansi na saglasnost. Ona je zapravo

značajno veća od deklarisanane. Verovatno su razlog tome relativno kratka rastojanja. Međutim, iz specifikacija proizvođača ovog i niza drugih modela, ova nesigurnost nije data u funkciji dužine vizure. Pojedini proizvođači uopšte ne deklarišu ovaj standard. I ova činjenica govori u prilog potrebe definisanja jasnih specifikacija TLS uređaja kao kod tradicionalnih geodetskih instrumenata, što predstavlja trenutnu aktivnost Komisije 5 i Komisije 6 ISO tehničkog komiteta – ISO TC172.

#### 7.1.3.2.3 Uticaj nagiba i doprinos grešci centrisanja TLS

Ispitivani TLS ne poseduje uređaj za kompenzaciju nagiba, već samo centričnu libelu kojom se vrši horizontiranje. Stoga je očekivano da postoji značajna denivelacija oblaka tačaka i ekscentricitet elektrooptičkog centra skenera u odnosu na centralni zavrtnanj na geodetskom stubu. Ovde se to naziva dodatnim uticajem na grešku centrisanja. Inače, pod greškom centrisanja proizvođači deklarišu linearnu veličinu u *XY* ravni koja podrazumeva uticaj nesigurnosti optičke ose ili viska. Ova greška predstavlja slučajni uticaj horizontiranja položajnim zavrtnjevima postolja TLS.

Za oblake tačaka sa tri stuba izvršene su prostorne transformacije koordinate tačke (0,0,0) iz KS skenera u KS kontrolne mreže, i to na osnovu modela transformacije sa svim raspoloživim kontrolnim tačkama. Poređenjem vrednosti *Y* i *X* koordinate centra stuba i dobijenih transformisanih vrednosti, može se doći do vrednosti ovog ekscentriciteta (Tabela 7-7). Imajući u vidu veličine ovog ekscentriciteta, može se zaključiti da je ovaj uticaj značajan, te se ovaj instrument može isključivo koristiti primenjujući metodologiju indirektnog georeferenciranja.

**Tabela 7-7 Uticaj nehorizontalnosti TLS na grešku centrisanja**

<i>Stub</i>	<i>Greška centrisanja</i>
1	3.42 mm
4	1.79 mm
5	0.13 mm

#### 7.1.3.2.4 Analiza 3D dužina između skenerskih markica

Do ocene nesigurnosti podataka skeniranja može se doći posredno, analizom 3D (kosih) dužina između skenerskih signala u oba sistema. Vrednost ove ocene zavisi od izbora

skenerskih signala na osnovu kojih se analiziraju vrednosti 3D dužina. Ovaj postupak ne podrazumeva prostornu transformaciju podataka skeniranja u sistem kontrolne mreže, već se porede vrednosti 3D dužina između izabranih signala u oba sistema. Ovde značajan uticaj predstavlja izbor skenerskih signala koji formiraju pojedinačne dužine, odnosno može se reći da na ocene položaja u velikoj meri utiče način odabiranja pojedinačnih tačaka. Takođe, ne može se analizirati orijentacija vektora grešaka. Na osnovu zakona o prenosu grešaka, do greške 3D položaja pojedinačnog signala se dolazi posredno, deljenjem razlike dužina sa  $\sqrt{3}$ . Standardne greške 3D položaja ( $S_{A1}$ ,  $S_{A4}$  i  $S_{A5}$ ) su date za sva tri stuba (Tabela 7-8). Očigledna je korelisanost razlika sa vrednostima dužina.

Tabela 7-8 Pokazatelji tačnosti podataka skeniranja na osnovu statističke analize dužina

Od	Do	3D dužina [m]	Stub 1		Stub 4		Stub 5	
			razlika dužina [mm]	greška 3D položaja [mm]	razlika dužina [mm]	greška 3D položaja [mm]	razlika dužina [mm]	greška 3D položaja [mm]
90	89	11.351	-1.7	-1.0	-2.2	-1.3	-0.6	-0.4
81	98	11.350	-1.3	-0.8	-2.2	-1.2	-1.7	-1.0
72	78	8.928	-0.8	-0.5	-2.3	-1.3		
91	88	8.589	-0.4	-0.3	-2.1	-1.2	1.0	0.6
82	97	8.557	-0.8	-0.5	-1.6	-0.9		
92	87	6.179	-0.2	-0.1	-1.8	-1.1		
83	96	6.108	0.3	0.1	-1.0	-0.6		
73	76	5.612	0.0	0.0	-0.7	-0.4	0.7	0.4
93	86	3.585	0.4	0.3	-0.6	-0.4		
84	95	3.511	0.2	0.1	-0.1	0.0		
74	94	3.036	0.2	0.1	-0.7	-0.4	-0.1	0.0
75	85	1.145	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0
			$S_{A1} = 0.44$ mm		$S_{A4} = 0.88$ mm		$S_{A5} = 0.51$ mm	

Ukoliko se uporede rezultati dobijeni na osnovu transformacije podataka skeniranja u KS kontrolne mreže (Tabela 7-5) i rezultati dobijeni na osnovu statističke analize dužina (Tabela 7-8), mogu se analizirati njihove vrednosti. Može se tvrditi da su ocenjene vrednosti varijansi dobijene na osnovu ova dva metoda statistički jednake, pri  $\alpha=0.05$  (Tabela 7-9). Alternativna hipoteza ( $H_a$ ) predstavlja tvrdnju da su dve varijanse različite.



Tabela 7-9 Testiranje jednakosti ocena varijansi dobijenih transformacijom podataka skeniranja u KS kontrolne mreže i analizom dužina između markica

Stub	$S_A$ [mm]	$f$	$S_{A3D}$ [mm]	$f$	$F$	$F_{(1-\alpha/2, f_1, f_2)}$	$F_{(\alpha/2, f_1, f_2)}$	Odluka
1	0.43	5	0.44	23	0.94	0.16	3.18	Odbacuje se $H_0$
4	0.97	5	0.88	23	1.22	0.16	3.18	Odbacuje se $H_0$
5	0.68	4	0.51	11	1.81	0.11	4.28	Odbacuje se $H_0$

#### 7.1.3.2.5 Sferna statistika vektora grešaka

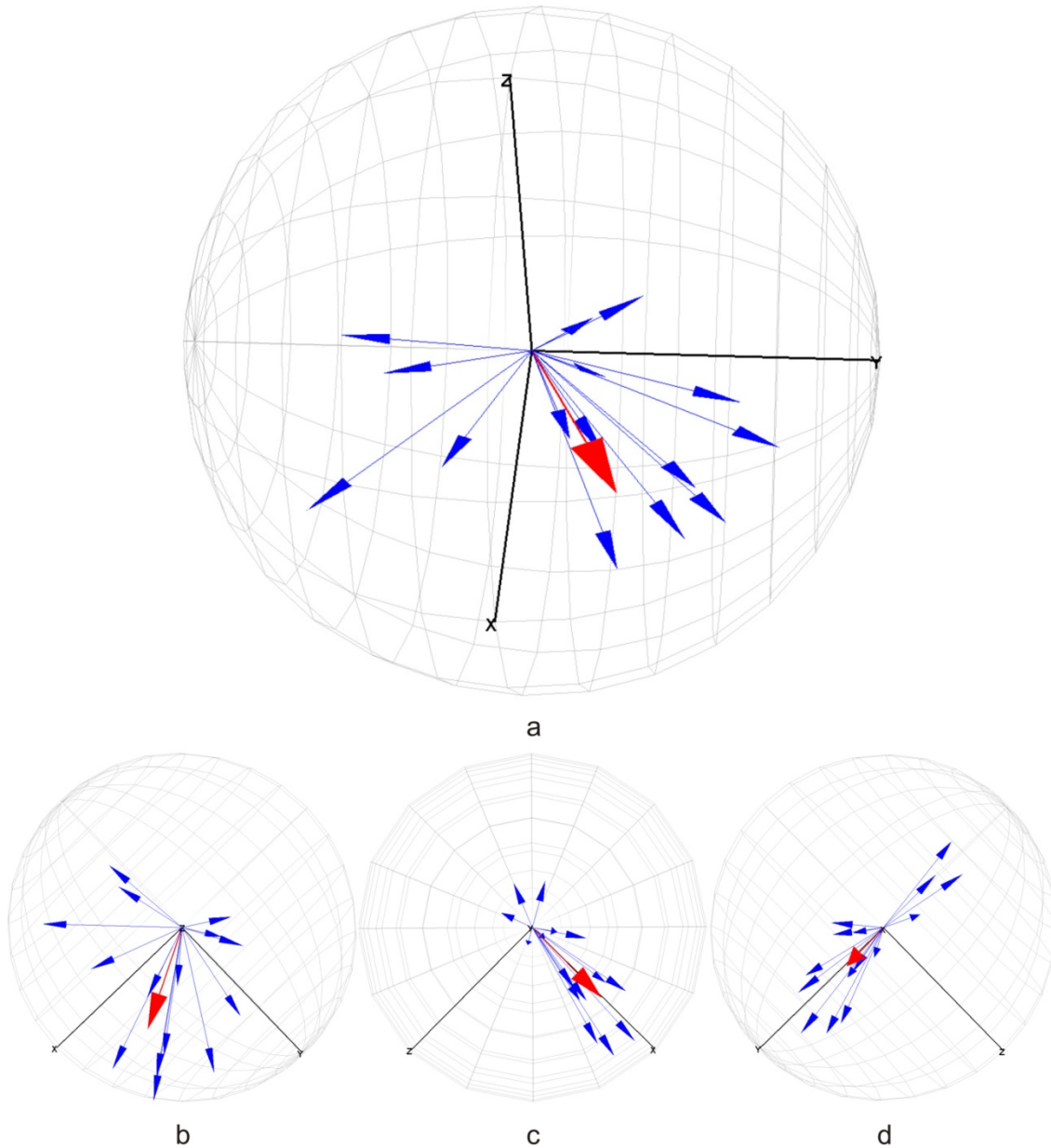
Moduli pojedinačnih vektora grešaka su sračunati na osnovu orijentacija pojedinačnih vektora grešaka [7.7]. Vrednosti horizontalnog i vertikalnog ugla jediničnih vektora grešaka su takođe određeni. Vrednosti su date za podatke skeniranja sa stuba 4 (Tabela 7-10).

Tabela 7-10 Elementi modula i sferne orijentacije vektora grešaka za uzorak podataka sa stuba 4

Markica	$\Delta_i$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$\varphi_i$ [°]	Markica	$\Delta_i$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$\varphi_i$ [°]
90	1.2	83.5811	58.632	84	1.15	95.5807	314.7526
91	1.24	77.0217	36.4709	85	0.44	109.4621	148.4732
92	0.64	79.9744	19.7336	77	0.25	95.374	193.2405
93	0.48	134.5022	123.2705	78	0.94	95.0183	211.29
94	0.78	79.8259	275.8218	86	0.67	100.179	259.6565
72	1.41	79.6937	36.8451	87	1.26	100.0915	228.4435
73	1.27	86.9828	20.0601	88	0.91	99.4905	201.6473
74	0.81	81.7421	340.7334	89	1.17	88.0941	197.7857
75	0.62	91.0213	283.4957	95	0.39	43.8213	206.6601
76	0.52	80.186	119.4548	96	0.53	75.2404	197.1524
81	0.88	96.9717	79.7303	97	0.65	106.1549	182.029
82	1.09	98.2488	38.1692	98	1.66	81.4564	196.7529
83	0.54	116.3185	41.8386				

Za uzorak podataka na zidu laboratorije u ravni  $XZ$  srednje vrednosti orijentacije [7.10] iznose  $\bar{\theta} = 89.4358^\circ$  i  $\bar{\varphi} = 27.5611^\circ$ . Vrednost srednjeg modula grešaka, na osnovu [7.9], iznosi  $\bar{R} = 0.52$ . Grafik (Slika 7-5) je kreiran u otvorenom kodu statističkog

programskog paketa **R** (R Core Team, 2012), na osnovu paketa *VecStatGraphs3D*. Iz grafika se može zaključiti da su globalne orijentacije vektora grešaka u pravcu vizure. Iz toga sledi da najveći uticaj na grešku modula vektora ima rezultat merenja rastojanja. To je i očekivano, obzirom na relativno kratke dužine.



Slika 7-5 Grafici orijentacije i vrednosti modula grešaka. Pojedinačni vektori u plavoj i srednji vektor u crvenoj boji. 3D grafik (a), grafik u *XY*-projekciji (b), *XZ*-projekciji (c) i *YZ*-projekciji (d)

## 7.2 Projektovanje i realizacija eksperimenta skeniranja tunela

Tehnologija TLS postaje značajno zastupljena geodetska metoda merenja u inženjerstvu. Poslednja unapređenja u smislu brzine, preciznosti, softvera i trenda opadanja cene TLS, ukazuju na značajne mogućnosti primene ove tehnologije i u zahtevnim inženjerskim zadacima. Svrha ovakvog premera je najčešće kontrola geometrije i izrada dokumentacije izvedenog stanja inženjerskog objekta. Ovde je predstavljena metodologija projektovanja eksperimenta skeniranja, registracije i georeferenciranja, realizacija merenja i modeliranja železničkih tunela radi kontrole geometrije izvedenog stanja.

Železnički tuneli, a naročito oni velike dužine, predstavljaju izazov za ostvarivanje korektno geometrije modela tunela. Zbog toga, naročita pažnja treba da se posveti ekonomičnom projektovanju elemenata opažanja i obrade podataka TLS. Predložena metodologija optimizacije tretira parametre skeniranja, registracije i georeferenciranja oblaka tačaka i projektovanja odgovarajuće kontrolne geodetske mreže za potrebe kontrole geometrije tunela na osnovu skeniranja. Maksimalno dozvoljeno rastojanje između dve susedne stanice TLS je primarno uslovljeno faktorima poput vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na površ tunela i prostornim rasporedom gustine tačaka. Arbitrarni pristup georeferenciranju je predložen kao jedan od načina da se u dugačkim tunelima distorzija geometrije modela tunela usled grešaka registracije zadrži u projektovanim okvirima. Optimalni plan opažanja u kontrolnoj geodetskoj mreži obezbeđuje zahtevanu pozicionu tačnost i pouzdanost merenja u odnosu na princip ekonomičnosti resursa. Predložena metodologija je praćena empirijskim rezultatima modeliranja i kontrole geometrije 12 tunela na železničkoj pruzi sa jednim kolosekom Nikšić - Podgorica. Dužina ovih tunela je u rasponu od 60 m do 1260 m, sa ukupnom dužinom svih tunela oko 3.5 km. U skladu sa gabaritima tunela, projektovana maksimalna vrednost upadnog ugla laserskog zraka iznosi  $78^\circ$ , odnosno rastojanje između susednih TLS stanica iznosi 26 m. Kontrolna geodetska mreža je projektovana tako da je vrednost parametara unutrašnje pouzdanosti u potrebnim okvirima za kontrolne mreže u inženjerskoj geodeziji. *A priori* ocene pozicione nesigurnosti i rezultati izravnjanja merenja pokazuju da je postignuta tačnost kontrolne geodetske mreže i do 5 puta veća od zahtevane apsolutne tačnosti modela tunela. Na primeru

najdužeg tunela je pokazano da arbitrarni pristup georeferenciranju doprinosi da se veličina greške registracije zadrži u dozvoljenim granicama, u odnosu na klasičan indirektni pristup kojim se to ne može ostvariti.

### **7.2.1 Širi kontekst skeniranja tunela i prethodni radovi**

Stvarna geometrija inženjerskog objekta, pa i izvedenog stanja tunela može biti različita od projektovane. Ona se može i vremenom menjati. Razumevanje prirode ovih promena je važno u smislu ekonomičnosti, sigurnosti i funkcionalnosti tunela. Ove promene se mogu odraziti na:

- Distorzije i promene dimenzija, prouzrokovane reorganizacijom poremećaja usled faza iskopavanja, tokom iskopavanja ili tokom pojedinih faza iskopavanja (Kontogianni i dr., 2004), ili relativno skoro nakon iskopavanja, čak i nakon stabilizacije (Kontogianni i Stiros, 2005). Ove promene se odnose na stensku masu i inicijalnu oblogu tunela.
- Epizodne deformacije (Kontogianni i Stiros, 2003), prouzrokovane zemljotresima, radovima na susednim tunelima, otvorenim iskopima ili različitim opterećenjima okolnog zemljišta tokom perioda eksploatacije tunela.
- Postepene deformacije starijih tunela zahvaljujući dužem periodu eksploatacije.

Različite kontaktne (sonde, ekstenziometri, optički kablovi, kontaktno profilisanje, itd.) i nekontaktne (teodolit, totalna stanica, fotogrametrija, optička triangulacija, itd.) merne metode i instrumenti su u prethodnom vremenu korišćeni za prikupljanje geometrijskih podataka o tunelima. Ovi podaci se koriste za procenu zazora, kontrolu elemenata osovine, šina i naponskih vodova, za praćenje i analizu deformacija, računanje količine iskopavanja i količine ugrađenog materijala, procenu grešaka u izvođenju, prikupljanje informacija za rekonstrukciju, kontrolu proboja tunela i praćenje napredovanja projekta (Clarke, 1992).

Standard ISO 1101 (2008) ili njegov ekvivalent ANSI Y14.5M (ASME, 1982) definiše sve tipove geometrijskih tolerancija u industriji kao: formu, profil, orijentaciju, lokaciju i debalans. Sve se one mogu odrediti tehnologijom TLS. Ovi standardi su originalno razvijeni za primenu u mašinskoj industriji, ali su usvojeni i za betonske i metalne konstrukcije (Lam, 2006).

U poslednje vreme potencijal TLS tehnologije u podzemnom prostoru se sve više prepoznaje. U odnosu na tradicionalne primene TLS tehnologije za skeniranje objekata poput brana mostova i zgrada, tunel kao inženjerski objekat je znatno zahtevniji. Tuneli zahtevaju sistem koji je efektan u vlažnom i mračnom prostoru (Fekete i dr., 2010) i u prostoru nepovoljnih uslova merenja u smislu zadovoljenja tražene tačnosti usled nepovoljne geometrije. U prošlosti, TLS se nije primenjivao u tunelima uglavnom zbog nedovoljne preciznosti, dugog procesa skeniranja, nedostatka važnih softverskih i hardverskih komponenti koje omogućuju sprovođenje geodetskih procedura, visoke cene, itd. Činjenica da je TLS u poslednjih nekoliko godina postao geodetski instrument sa svim potrebnim resursima i pristupačnijom cenom, omogućuje primenu ove tehnologije i u tunelima.

Tunel, kao inženjerski objekat, zahvaljujući svom izduženom obliku, a posebno ukoliko se radi o dugačkom tunelu sa jednim kolosekom, predstavlja vrlo nepovoljan slučaj u smislu ostvarivanja pouzdanih geodetskih merenja i dovoljne tačnosti rezultata, a time i ostvarivanja dobre geometrije modela tunela. Zahvaljujući ovakvoj geometriji, prilikom registracije niza susednih scena, ukupna greška globalne registracije može biti veoma velika. Ovo se dešava usled multiplikacije grešaka registracije počevši od prve scene ka narednim (Reshetyuk, 2009; Bornaz i dr., 2003). Što je duži tunel, ukupna greška georeferenciranja postaje veća, što posledično doprinosi lošoj geometriji 3D modela celog tunela. Zbog toga, visokoprecizno skeniranje tunela zahteva postojanje adekvatne kontrolne geodetske mreže sa dva osnovna cilja: da kalibriše i kontroliše rezultate skeniranja i da obezbedi odgovarajući geodetski datum 3D modelu tunela. Takođe, potrebno je obezbediti adekvatnu metodologiju projektovanja eksperimenta i odgovarajuću obradu podataka.

Generalno gledano, značajniji radovi koji tretiraju problematiku skeniranja tunela u inženjerstvu su veoma retki (Fekete i dr., 2010; Lam, 2006; Lindenbergh i dr., 2005;

Lindenbergh i dr., 2009). Oni koji tretiraju probleme TLS tehnologije u dugačkim tunelima i projektovanja inženjerskog eksperimenta skeniranja tunela ne postoje.

## **7.2.2 Metodologija projektovanja eksperimenta**

Zahtev za tačnošću 3D modela inženjerskog objekta se definiše unapred. Generalno gledano, ovaj zahtev dobija geodetski stručnjak i sa njim ulazi u projektovanje svojih merenja i načina obrade podataka. Tip i geometrija objekta, kao i raspoložive tehnologije merenja, predstavljaju dodatne parametre koje utiču na projektovanje merenja, obrade podataka i ostalih resursa. Rešenje mora da zadovolji zahteve funkcionalne potrebe projekta. U isto vreme, potrebno je da se poštuje princip ekonomičnosti, odnosno potrebno je pronaći optimalno rešenje.

### **7.2.2.1 Optimizacija parametara skeniranja**

Na preciznost i pouzdanost merenja rastojanja u tunelima, pored deklarisanе preciznosti TLS, primarno utiče zajednički efekat vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na površ tunela, uticaja sredine prostiranja zraka i karakteristika površi skeniranja. Uticaji sredine (temperatura, vlažnost i atmosferski pritisak) i objekta skeniranja (reflektivnost površi, hrapavost, itd.) su parametri koji se ne mogu kontrolisati, odnosno na njih se ne može uticati. Ipak, ove karakteristike se uzimaju u obzir prilikom projektovanja parametara TLS merenja. Materijali obloge tunela, kao što su beton, cigla i čvrsta stena imaju relativno dobre osobine u smislu reflektivnosti laserskog zraka, odnosno nema ekstremnih vrednosti refleksije. Stoga je dodatna nesigurnost rastojanja usled boje i/ili hrapavosti ovih materijala (poglavlje 4.3) na rezultat merenja relativno kratkog rastojanja u tunelima zanemarljiva. Temperatura, vlažnost vazduha i atmosferski pritisak mogu značajno uticati na vrednost multiplikacione konstante laserskog daljinomera. U radovima visoke tačnosti ovi uticaji se tradicionalno uzimaju u obzir tokom izvođenja merenja, tako što se primenjuju odgovarajuće korekcije na osnovu merenja ovih parametara.

Idealan slučaj skeniranja objekta je jedno stajalište TLS, pri čemu je laserski zrak približno ortogonalan na površ objekta. Zahvaljujući izduženoj geometriji tunela, različiti upadni uglovi lasera, različita rastojanja i moguće fizičke prepreke dovode do

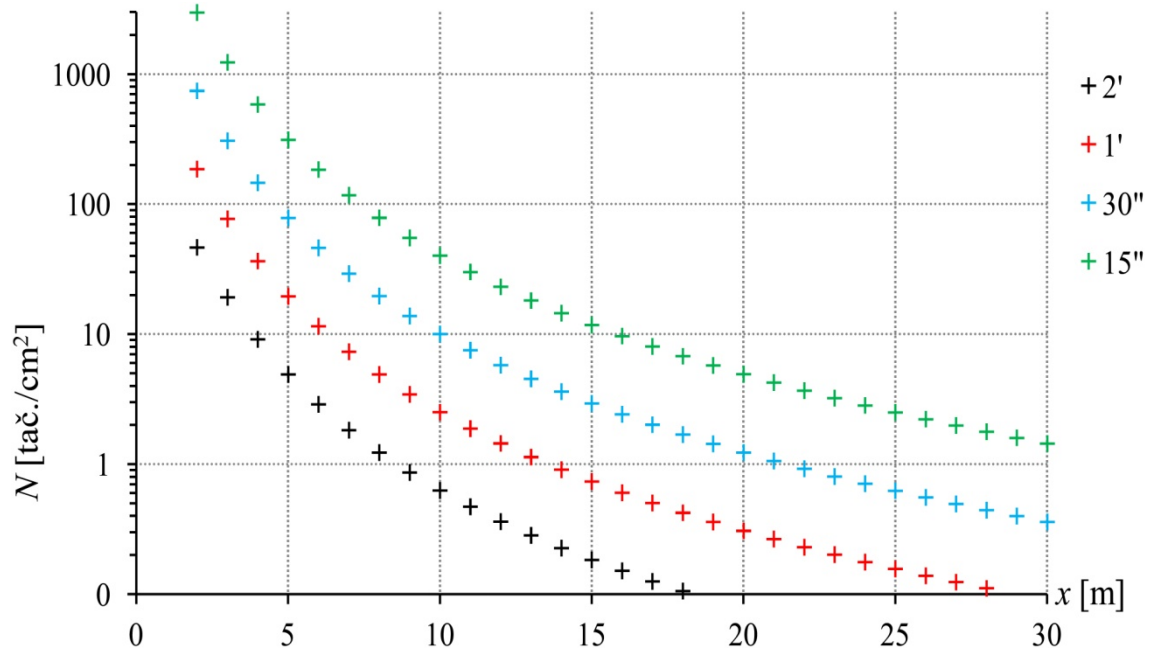
variranja kvaliteta prikupljenih podataka. Kada ovi parametri dostignu kritične vrednosti potrebno je premestiti TLS na sledeću lokaciju. Optimalne lokacije TLS stanica i odgovarajuće rezolucije skeniranja treba da budu izabrane tako da se obezbedi da se svaki deo tunela skenira sa dovoljno tačaka odgovarajućeg kvaliteta (Lindenbergh i dr., 2009). U opštem slučaju jednog inženjerskog objekta, ograničavajući faktori projektovanja TLS stajališta su i domet TLS, kao i uticaj dužine laserskog zraka na nesigurnost merenja rastojanja. Kada se ima u vidu činjenica da je maksimalno rastojanje skeniranja u tunelima ograničeno upravo faktorom upadnog ugla, glavni ograničavajući faktor u projektovanju eksperimenta TLS u tunelima predstavlja vrednost upadnog ugla laserskog zraka.

Ostali uticaji objekta i sredine na nesigurnost merenja rastojanja se mogu zanemariti uz preduslov poštovanja standardnih procedura prilikom laserskog merenja rastojanja. To podrazumeva unošenje korekcija za uslove atmosfere i sprovođenje merenja u povoljnim atmosferskim uslovima. Ograničavajući faktor npr. može predstavljati gusta magla u tunelu ili zasićenost vazduha različitim česticama kada merenja treba prekinuti. U svakom slučaju, ovi faktori nisu parametri od značaja za projektovanje eksperimenta, već se mogu samo posmatrati kao opšti uslovi za izvođenje merenja koji su standardni deo jednog projekta geodetskih opažanja.

#### 7.2.2.1.1 Faktor gustine tačaka

Faktor gustine tačaka ili rezolucije oblaka tačaka je značajan prilikom projektovanja skeniranja bilo kog objekta, pa i tunela. Potrebno je obezbediti da gustina tačaka ne utiče negativno na zahtevanu tačnost 3D modela tunela. Prostorna rezolucija treba da bude takva da se obezbedi kontinualno modeliranje objekta i da nedostaci različitih algoritama 3D modeliranja imaju mali uticaj na konačnu tačnost 3D modela tunela. U praktičnim primenama dobro je raspolagati velikim uzorkom terenskih merenja, koji se u fazama obrade može redukovati na potrebnu meru. Gustina tačaka zavisi od parametara skeniranja, kao što su vrednosti veličine skretanja laserskog zraka, rastojanje do objekta i vrednost upadnog ugla laserskog zraka, što rezultira činjenicom da oblak tačaka nema homogenu gustinu. U slučaju konkretnog objekta potrebno je optimizovati

vrednost uglovne rezolucije skeniranja u odnosu na maksimalnu dozvoljenu vrednost dužine laserskog zraka.



Slika 7-6 Gustina tačaka kao funkcija rastojanja do objekta i uglovne rezolucije skeniranja. Osa  $x$  predstavlja rastojanje od instrumenta, a  $N$ -osa logaritamsku skalu broja tačaka po kvadratnom centimetru

U osnovi, TLS metoda merenja podrazumeva registraciju vrednosti kose dužine ( $S$ ), horizontalnog ugla ( $H$ ) i vertikalnog ugla ( $V$ ) u odnosu na horizont. Pretpostavka je da je objekat skeniranja ravan tunel sa definisanom podužnom osom i horizontalnom osnovom. Pravougle lokalne koordinate su definisane pozitivnim smerom  $x$ -ose tunela, osom  $y$  koja je upravna na  $x$ -osu u horizontalnoj ravni, dok se preostala osa upravna na prethodne dve definiše kao  $z$ -osa sa pozitivnim smerom od osnove tunela ka njegovom plafonu. Ukoliko TLS emituje laserske impulse u definisanim uglovnim intervalima ( $\Delta H$ ,  $\Delta V$ ) osnova tunela će biti registrovana na osnovu određenog broja tačaka ( $N$ ) po kvadratnom centimetru (Lindenbergh i dr., 2005):

$$N = \frac{2 \arctan \frac{1}{2i} \cdot \left( \arcsin \frac{h}{\sqrt{i^2 + h^2}} - \arcsin \frac{h}{\sqrt{(i-1)^2 + h^2}} \right)}{\Delta H \Delta V}, \quad [7.13]$$



pri čemu parametar  $h$  figuriše kao visina TLS u odnosu na horizontalnu osnovu tunela, a parametar  $i$  kao horizontalna dužina od instrumenta do tačke na objektu u pozitivnom smeru  $x$ -ose. Ukoliko je visina instrumenta npr.  $h = 2$  m, broj tačaka na osnovi tunela  $N$  će biti eksponencijalno raspoređen u odnosu na poziciju skenera. Očigledno je da broj  $N$  značajno raste sa povećanjem dužine  $i$  (Slika 7-6).

#### 7.2.2.1.2 Faktor upadnog ugla laserskog zraka

Preciznost skeniranja značajno opada usled loše geometrije objekta skeniranja, odnosno usled povećanja vrednosti rastojanja do objekta i vrednosti upadnog ugla laserskog zraka. U tunelima, pored projektovanja odgovarajuće prostorne rezolucije oblaka tačaka, potrebno je uzeti u obzir i doprinos vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na nesigurnost merenja rastojanja. Upadni ugao laserskog zraka se definiše kao ugao između ose lasera i normale na površ objekta. U različitim teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima je pokazano da povećanje vrednosti upadnog ugla utiče na šum signala, usled izdužene forme laserskog snopa na objektu (opširnije u poglavlju 4.3.2). Ovaj uticaj predstavlja dominantni faktor na osnovu kojeg se moraju projektovati lokacije stajališta TLS.

Kao kriterijum optimizacije vrednosti upadnog ugla laserskog zraka, a time i definisanja lokacija stanica TLS, može se uzeti princip zanemarljivosti komponenti varijansi rezultata laserskog merenja rastojanja po ugledu na Činklović (1978) i Perović (1985).

Ukoliko je komponenta varijanse doprinosa upadnog ugla  $B^2$  ukupnoj vrednosti varijanse rezultata merenja rastojanja  $\sigma^2$ , i ako se ostali uticaji na varijansu rezultata merenja rastojanja grupišu kao komponenta  $A^2$ , tada važi relacija:

$$\sigma^2 = A^2 + B^2. \quad [7.14]$$

Uslov zanemarljivosti komponente B je da je  $\sigma \approx A$ , odnosno normirana nejednakost je oblika:

$$\frac{\sigma - A}{\sigma} \leq \alpha \sim N(0,1), \quad (\alpha > 0), \quad [7.15]$$

pri čemu je  $\alpha$  izabrani nivo značajnosti, koji se može projektovati u odnosu na strukturu površi obloge tunela. Ukoliko površ tunela nije glatka za vrednost  $\alpha$  se može uzeti i veća vrednost od standardne  $\alpha = 0.05$ .

Ukoliko se ima u vidu izraz [7.15], sledi da je:

$$(1 - \alpha)^2 \sigma^2 \leq A^2, \quad [7.16]$$

odnosno na osnovu izraza [7.14], dalje sledi:

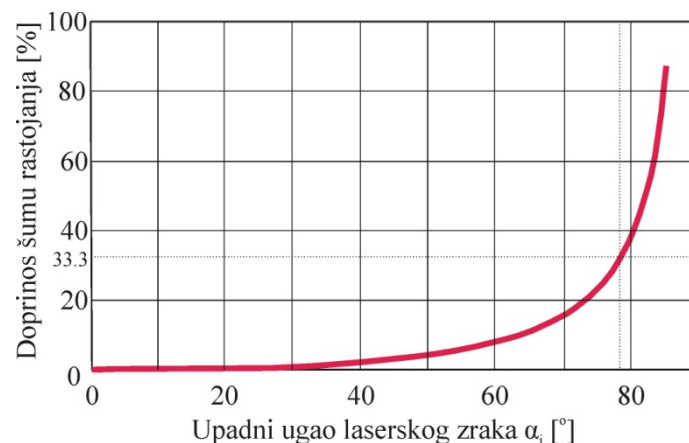
$$(1 - 2\alpha + \alpha^2)(A^2 + B^2) \leq A^2, \quad [7.17]$$

i konačno:

$$B^2 \leq \frac{2\alpha + \alpha^2}{(1 - \alpha)^2} A^2. \quad [7.18]$$

Ukoliko se izabere koeficijent zanemarljivosti  $\alpha = 0.05$ , sledi da doprinos upadnog ugla laserskog zraka ukupnoj standardnoj greški rastojanja  $\sigma$  nije značajan ako je približno:

$$B \leq \frac{1}{3} \cdot A \Leftrightarrow B^2 \leq \frac{1}{9} \cdot A^2. \quad [7.19]$$



Slika 7-7 Efekat povećanja vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na nesigurnost određivanja rastojanja, pri koeficijentu zanemarljivosti  $\alpha = 0.05$

Dalje, mora se odrediti koja granična vrednost upadnog ugla laserskog zraka zadovoljava nejednakost [7.18] ili [7.19] pri  $\alpha = 0.05$ . Za to se može iskoristiti teorijska relacija [4.11] i na osnovu nje Slika 7-7.

#### 7.2.2.1.3 Definisanje lokacija stajališta TLS

Ukoliko se pretpostavi da se radi o tunelu bez fizičkih prepreka i čija je unutrašnja obloga bez značajnijih ispupčenja koja mogu imati efekat senke u podacima, onda se optimalna veličina pomeranja stajališta TLS duž podužne ose tunela može projektovati na osnovu kriterijuma praga značajnosti uticaja upadnog ugla lasera na nesigurnost rezultata merenja rastojanja. Prilikom ovoga u obzir se uzimaju dimenzije, odnosno širina i visina tunela.

Strogo gledano, metodologija definisanja izbora stanice TLS važi za slučaj tunela u pravcu. Ipak, može se reći da se ovaj kriterijum može iskoristiti i u delovima u kojima je tunel u krivini. Nedoovoljeni upadni uglovi na površi tunela sa jedne stanice se kompenzuju skeniranjem sa sledeće stanice, kada su upadni uglovi na istu površ usled uticaja krivine manji od dozvoljenih. U procesu filtriranja podataka mogu se iz uzorka isključiti ova nepouzdana merenja. Takođe, elementi kružne krivine u železničkim tunelima imaju velike vrednosti poluprečnika, tako da je uticaj krivine relativno mali na pouzdanost rezultata merenja rastojanja.

#### 7.2.2.1.4 Izbor TLS

Kao deo projektovanja eksperimenta, nezaobilazan deo predstavlja izbor instrumenta kojim će se izvršiti merenja. Izbor instrumenta se vrši na osnovu potrebnih funkcionalnih karakteristika za realizaciju projekta. Obzirom na visoku cenu, ovaj izbor je često ograničen na dostupne TLS, te se projektni parametri, koliko je moguće, prilagođavaju postojećoj opremi.

Za izvođenje skeniranja inženjerskih objekata, gde poziciona tačnost predstavlja jedan od ključnih prioriteta, statički TLS je pogodniji od mobilnih TLS, obzirom na nedovoljnu tačnost pozicioniranja GNSS sistema i/ili inercijalnih navigacionih sistema. U tunelima je naravno prisutan i problem nedostupnosti signala GNSS.

Važne karakteristike TLS za primene u skeniranju tunela su: preciznost merenja rastojanja i uglova, preciznost registracije tipskih skenerskih signala, brzina skeniranja i veličina vidnog polja. Zavisno od projektnog rešenja georeferenciranja, značajne karakteristike mogu biti i mogućnost horizontiranja, centrisanja i orijentacije TLS. Većina savremenih geodetskih TLS, bilo da su primenjene TOF ili AMCW tehnike merenja rastojanja, predstavlja dobro rešenje. Generalno za ove instrumente, standardno odstupanje rezultata merenja rastojanja pojedinačne tačke na objektu ( $1\sigma$ ), kreće se u rasponu od 1 mm/50 m do 5 mm/50 m, modelirane površi ispod 3 mm i registracije tipskih skenerskih signala oko 2 mm. Brzina skeniranja predstavlja značajan parametar jer može značajno da smanji vreme merenja, a time i troškove. Brzine skeniranja TLS, koji su trenutno aktuelni, se kreću u rasponu od 30 000 tačaka u sekundi za impulsni GLS-1500, pa sve do 1 016 000 tačaka u sekundi, za fazni ZFImager5010 (Tabela 2-1). Maksimalni domet, iako predstavlja važnu karakteristiku TLS, nije interesantna karakteristika za primene u tunelima zbog ograničenih dozvoljenih rastojanja skeniranja usled nepovoljnih upadnih uglova laserskog zraka. Faktori poput fleksibilnosti softvera, tipova i algoritama registracije tipskih skenerskih signala predstavljaju dodatne karakteristike TLS sistema koje se moraju uzeti u obzir. Na primer, za skeniranje inženjerskih objekata, pri čemu se podrazumeva postojanje kontrolne geodetske mreže i signalisanje objekta tipskim skenerskim signalima, pogodnije rešenje je korišćenje retro reflektivnih markica u odnosu na druge vrste signala. Realizacija merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži se tada vrši na osnovu istih signala koji se koriste prilikom skeniranja. Takođe, veoma važna karakteristika TLS sistema može biti i mogućnost automatskog prepoznavanja signala, a zatim i postupka određivanja njegovog centra, što svodi manuelnu angažovanost operatera na minimalnu meru i obezbeđuje veliku uštedu u vremenu potrebnom za akviziciju signala.

#### ***7.2.2.2 Registracija i georeferenciranje***

U modeliranju podataka skeniranja u tunelima, obe metode georeferenciranja (direktnog i indirektnog) mogu biti primenjene. Metodologija i ograničenja metoda registracije i georeferenciranja su detaljno razmatrana u poglavlju 3.2. Generalno gledano, u tunelima se ne može koristiti metoda indirektnog georeferenciranja u jednom koraku, jer ona zahteva postojanje minimalno tri kontrolne tačke za svaku scenu, što je teško,

vremenski zahtevno i skupo ostvariti. Metode indirektnog georeferenciranja u dva koraka i sve metode direktnog georeferenciranja je moguće primeniti u tunelima.

Tačnost indirektno metode georeferenciranja u dva koraka zavisi od tačnosti kontrolne geodetske mreže i tačnosti registracije tipskih skenerskih signala. Pored toga, u dugačkim tunelima, zahvaljujući njihovoj izduženoj geometriji, korišćenje standardne metodologije indirektnog georeferenciranja u jednom koraku rezultuje velikim greškama globalne registracije scena. Prostiranje grešaka se multiplikuje idući od inicijalne scene. Na primeru najdužeg tunela od 1260 m koji je skeniran u okviru ovog eksperimenta, reziduali georeferenciranja registrovanih scena idu i do 1 m! Rešenje ovog problema je moguće uvođenjem arbitrarnog pristupa indirektnog georeferenciranja. Scene se grupišu u segmente. Kriterijum broja registrovanih scena u jednom segmentu je veličina reziduala georeferenciranja, koja treba da bude u skladu sa zahtevanom tačnošću oblaka tačaka i 3D modela tunela.

Direktno georeferenciranje podrazumeva da se svaka scena u tunelu registruje direktno u međusobno nezavisnim postupcima. Podrazumeva se da je skener opremljen viskom, libelom, dvoosnim kompenzatorom i da postoje softverske procedure centrisanja i orijentisanja na poznatu tačku kontrolne mreže ili procedure presecanja pravaca ili lučnog preseka i MNK transformacije rezultata i analize reziduala u slučaju viška merenja. Na tačnost metode direktnog georeferenciranja utiče veći broj parametara nego kod indirektnog georeferenciranja, zahvaljujući dodatnim izvorima grešaka usled centrisanja, signalisanja i merenja visine TLS. U poglavlju 4.4.2.1 predložen je stohastički model direktnog georeferenciranja korišćenjem procedure centrisanja i orijentisanja na poznatu tačku.

Prednost indirektno metodologije georeferenciranja u tunelima je manji budžet grešaka što može biti presudno ukoliko se zahteva visoka tačnost eksperimenta, kao i kraće vreme eksperimenta. Sa druge strane prednost direktne metode je da nema efekta multiplikacije grešaka idući od inicijalne scene, odnosno i pored činjenice da metodologija direktnog georeferenciranja ima dodatne izvore grešaka koje limitiraju tačnost, one imaju slučajni uticaj na ukupnu tačnost 3D modela tunela. Detaljno razmatrane prednosti i nedostaci metoda georeferenciranja podataka skeniranja u poglavlju 3.2.3.3, važe i u tunelima.

Metodologija georeferenciranja utiče na dizajn kontrolne geodetske mreže, tako da su ove dve projektne aktivnosti visoko korelisane.

### *7.2.2.3 Kontrolna geodetska mreža*

Projektovanje kontrolne geodetske mreže sledi nakon definisanja parametara skeniranja, metodologije georeferenciranja i izbora TLS instrumenta. Geodetska osnova mora biti projektovana tako da se uzmu u obzir ograničenja sistema TLS. Ma koja primenjena metoda georeferenciranja podrazumeva postojanje kontrolne geodetske mreže koja treba da obezbedi datum, tačnost i kontrolu podataka skeniranja. Projektovana mreža mora biti optimalno rešenje u smislu kvaliteta.

Kvalitet kontrolne geodetske mreže označava njenu preciznost, tačnost, pouzdanost i ekonomičnost. Preciznost mreže predstavlja meru karakteristike mreže u smislu prostiranja slučajnih grešaka, dok tačnost podrazumeva dodatno i uticaje sistematskih grešaka. Koncept pouzdanosti geodetskih mreža ukazuje na mogućnost šeme opažanja (redundantnost i geometrija mreže) da detektuje grube greške u rezultatima opažanja (Baarda, 1967; Caspary, 1988), dok se koncept ekonomičnosti ostvaruje preko programa opažanja (Seemkooei, 2001).

Geodetska osnova za skeniranje tunela treba da zadovolji poznati princip da bude značajno višeg nivoa tačnosti od zahtevane tačnosti modela georeferenciranja. Kreiranjem dobre geometrije mreže sa odgovarajućom redundantnošću merenja, pouzdanost rezultata merenja je osigurana. Za razliku od kontrolnih geodetskih mreža koje se projektuju za objekte poput brana, mostova, visokih konstrukcija itd., u slučaju tunela nema mnogo prostora za ostvarivanje dobre geometrije mreže i redundantnosti merenja. Stoga, najveći potencijalni problem u projektovanju kontrolne mreže tunela, za potrebe skeniranja, predstavlja ostvarivanje potrebne pouzdanosti rezultata merenja, te se ovom problemu mora ukazati posebna pažnja. U tunelima, konvencionalni pristup i najlagodnije rešenje je primena poligonometrije. Međutim, ako se pretpostavi da se merenja sprovode sa npr. neotkrivenom greškom frekvencije laserskog daljinomera, ili ako se usled nepažnje izabere pogrešna vrednost adicione konstante, onda će, ukoliko se ne dese druge značajne greške, merenja ukazivati na dobar rezultat iako su rezultati pomereni. Jedini način da se detektuje ovakva greška je da postoji nezavisna kontrola

rezultata merenja, odnosno da postoji dodatna informacija o razmeri mreže. Ukoliko plan opažanja nije projektovan tako da poseduje ovu informaciju, merenja se smatraju nepouzdanim (Caspary, 1988). Zbog ove činjenice, u geodetskim radovima visoke tačnosti u tunelima korišćenje samo stanica poligonskog vlaka je nedovoljno. Generalno rešenje je projektovanje tzv. duplog poligonskog vlaka koje zadovoljava kriterijume pouzdanosti (Zhang and Zhang, 2004), međutim ovo rešenje nije pogodno za eksperiment skeniranja kada se tipski skenerski signali postavljaju na unutrašnju oblogu tunela. Većina autora se slaže da projektno rešenje treba da obezbedi da faktori unutrašnje pouzdanosti u GMM modelu budu globalno veći od vrednosti  $r_i = 0.3$ , što je kriterijum koji važi za kontrolne geodetske mreže u inženjerstvu. Pokazatelji unutrašnje pouzdanosti merenja u poligonskom vlaku se kreću od vrednosti 0.1 do 0.2. Generalno gledano, prilikom dizajniranja mreže u tunelima treba izbeći postojanje samo uglova oko  $180^\circ$  i osigurati redundantnost opažanja.

### **7.2.3 Rezultati i diskusija**

Prezentovana metodologija projektovanja eksperimenta skeniranja i modeliranja železničkih tunela je primenjena na konkretnom inženjerskom objektu.

#### **7.2.3.1 Test područje i projektni zahtevi**

Optimizacija eksperimenta skeniranja je izvršena na primeru 12 železničkih tunela u centralnom delu Crne Gore, na pruzi Nikšić-Podgorica. Radi se o pruzi sa jednim kolosekom, ukupne dužine oko 56 km. Pojedinačne dužine 12 tunela se nalaze u rasponu od 60 m do 1260 m, a ukupna dužina svih 12 tunela iznosi 3.5 km. Tuneli su prosečno 5.5 m široki i 6.2 m visoki. Obloga tunela je prskani (torket) beton (Slika 7-8), ili u pojedinim delovima tunela, čvrsta stena.

Nakon 60 godina eksploatacije, sprovedena je kompletna rekonstrukcija pruge, prateće infrastrukture i svih 12 tunela. Građevinski radovi u tunelima su podrazumevali pored postavljanja novih šina i sanaciju inicijalne obloge tunela sa postavljanjem hidroizolacionog sloja. Nakon završetka radova potrebno je izraditi dokumentaciju izvedenog stanja. Jedan deo te dokumentacije tiče se upravo izvedene geometrije tunela i analize veličine zazora između proširenog poprečnog profila kompozicije (slobodnog



profila) i unutrašnje obloge tunela. Dimenzije slobodnog poprečnog profila su standardizovane i na osnovu njih, i u odnosu na tunel, se utvrđuje prohodnost kompozicije kroz tunel. U odnosu na tip pruge postoje profili tipa A, B i C. Dimenzije ovih tipova su veće u odnosu na aktuelne dimenzije kompozicije.



Slika 7-8 Fotografija unutrašnjosti železničkog tunela Budoš, dužine 1.26 km

U cilju analize geometrije izvedenog stanja zahtevana je izrada 3D modela tunela, 3D model proširenog voza i izrada poprečnih profila na 1 m. Zahtevana apsolutna tačnost 3D modela tunela je  $\sigma_m = 2 \text{ cm}$  ( $1\sigma$ ). Ovaj kriterijum tačnosti je takođe vezan za poprečne profile i konačne CAD priloge koji predstavljaju finalne proizvode laserskog skeniranja. Otežavajuća okolnost u konkretnom slučaju je nepostojanje geodetske osnove koja je uništena tokom izvođenja radova.



### 7.2.3.2 Optimizacija parametara skeniranja i izbor instrumenta

U ovom delu je predstavljeno projektno rešenje parametara laserskog skeniranja 12 tunela na pruži Nikšić-Podgorica. Ovo rešenje je zasnovano na opštoj metodologiji projektovanja eksperimenta koja je predstavljena u poglavlju 7.2.2.1.

Definisanje vrednosti dozvoljenog rastojanja između susednih stanica TLS, odnosno definisanje maksimalne dozvoljene vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na površ tunela je izvršeno sledeći metodološke postavke koje su date poglavljima 7.2.2.1.2 i 7.2.2.1.3. Imajući u vidu gabarite tunela opisane u poglavlju 7.2.3.1 i pri tome ako se uzme u obzir izraz [7.18], izraz [4.11] i Slika 7-7, sledi da maksimalna vrednost upadnog ugla laserskog zraka iznosi  $78^\circ$ , pri rastojanju skeniranja od 13 m. Pri ovoj vrednosti ugla, doprinos nesigurnosti određivanja rastojanja usled ovog efekta iznosi oko 30%, što se pri koeficijentu zanemarljivosti  $\alpha = 0.05$  može zanemariti prema [7.19]. Posledica ovoga je maksimalno dozvoljeno rastojanje između susednih stanica TLS koje iznosi 26 m.

Definisani kriterijum izbora rezolucije skeniranja je taj da rezolucija ne utiče na tačnost 3D modela. Sledeći i ostale metodološke kriterijume izbora rezolucije, odnosno ukoliko se želi da minimalna rezolucija oblaka tačaka bude 1 tačka/cm<sup>2</sup>, na maksimalno dozvoljenom rastojanju skeniranja od 13 m, onda se može na osnovu izraza [7.13] i na osnovu dijagrama (Slika 7-6) izračunati da je potrebna horizontalna i vertikalna rezolucija skeniranja 1'.

Sledeći metodologiju izbora instrumenta za potrebe laserskog skeniranja tunela (poglavlje 7.2.2.1.4), od nekoliko raspoloživih, izabran je instrument Riegl VZ-400. Radi se o impulsnom skeneru visokih performansi, čije ga karakteristike u smislu preciznosti i brzine skeniranja (Tabela 2-1) čine pogodnim za primene u geodetskom inženjerstvu. Ono što favorizuje ovaj TLS u odnosu na ostale komercijalne modele koji bi po osnovnim karakteristikama takođe bili dobro rešenje za primene u tunelima je:

- činjenica da izabrani TLS raspolaže mogućnošću upotrebe retro-reflektivnih signala. Ova komparativna prednost omogućuje korišćenje identičnih signala (markica) i prilikom merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži, što značajno

može uticati na kvalitet signalisanja i uštedu vremena sprovođenja celokupnog eksperimenta. Objekat nije potrebno dva puta signalisati i moguće je pouzdano i precizno meriti dužine totalnom stanicom, i

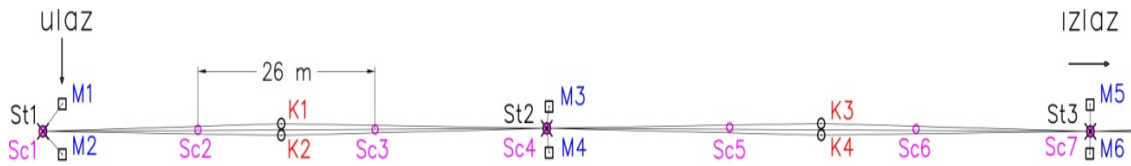
- mogućnost automatskog prepoznavanja signala, a zatim i određivanja njihovog centra. Učešće inženjera u manualnoj identifikaciji signala je isključeno. Usled toga značajno se ubrzava rad na terenu, a posebno u tunelima usled velikog broja skenerskih signala za registraciju scena i georeferenciranje.

### ***7.2.3.3 Projektno rešenje i realizacija kontrolne geodetske mreže i rezultati registracije i georeferenciranja***

Odabrani pristup georeferenciranju podataka skeniranja direktno utiče na dizajn kontrolne geodetske mreže tunela. Imajući u vidu sve činjenice navedene u poglavlju 7.2.2.2, izabrana je metoda indirektnog georeferenciranja u dva koraka. U konkretnom slučaju, osnovne prednosti u odnosu na direktnu metodu georeferenciranja su: značajno kraće vreme trajanja eksperimenta, potencijalno visoka tačnost i mogućnost kontrole rezultata i analize tačnosti.

U odnosu na prethodno definisane parametre skeniranja i maksimalno dozvoljeno rastojanje između TLS stanica od 26 m, kao i imajući u vidu sve iznete preporuke u poglavlju 4.4.1.3, definisana je postavka georeferenciranja i kontrolne geodetske mreže (Slika 7-9). Projektovano je da se na svakoj trećoj stanici skenera postave po dva skenerska signala (tačke  $M_1, M_2, \dots, M_n$ ), pri čemu je  $n$  ukupan broj skenerskih signala u tunelu. Signali se postavljaju na ulaznom i izlaznom portalu tunela ( $M_1, M_2, M_n, M_{n-1}$ ) i u njegovoj unutrašnjosti na zidovima tunela ( $M_3, M_4, \dots, M_{n-3}, M_{n-2}$ ). Na istom mestu je predviđeno i prisilno centrisanje totalne stanice, tako da u unutrašnjosti tunela ugao laserskog zraka na signalisane tačke  $M$  bude približno  $90^\circ$ , kako bi se maksimalno smanjio uticaj upadnog ugla laserskog zraka na određivanje koordinata kontrolnih skenerskih signala. Dodatno projektovane tačke, čija je glavna svrha podizanje pouzdanosti merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži, stabilizovane su na polovini rastojanja između susednih stajališta totalne stanice i označene sa  $K_1, K_2, \dots, K_n$ . U isto

vreme ove tačke mogu poslužiti i za nezavisnu vizuelnu kontrolu georeferenciranja (Slika 7-13).



Slika 7-9 Pozicija kontrolnih tačaka ( $S_t$ ,  $M$  i  $K$ ) i stanica skenera  $S_c$  na primeru dela tunela br. 1. Prisilno centrisanje TS na tačkama  $S_{t1}$ ,  $S_{t2}$ , ...,  $S_{tn}$ , skenerski signali na oblozi tunela  $M_1$ ,  $M_2$ , ...,  $M_n$  i kontrolne tačke na zavrtnjima šina  $K_1$ ,  $K_2$ , ...,  $K_n$

### 7.2.3.3.1 Optimizacija i realizacija kontrolne geodetske mreže tunela

Prethodna analiza sa ocenom tačnosti 2D i 1D kontrolne geodetske mreže izvršena je na simuliranom reprezentativnom uzorku objekta, odnosno na 300 m dugačkoj sekciji tunela. Ulazni podaci su približne vrednosti pravaca, dužina i visinskih razlika na osnovu projektovanih lokacija kontrolnih tačaka (Slika 7-9), deklarisanе preciznosti rezultata merenja i plana opažanja (Tabela 7-12). Preciznost merenja pravaca, dužina i visinskih razlika je sračunata na osnovu karakteristika totalne stanice koja je predviđena za merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži. U skladu sa standardom DIN18723, projektovana merenja poseduju standardno odstupanje merenja: pravaca u oba položaja durbina  $\sigma_p = 1''$ , dužina  $\sigma_{dp} = 2 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km}$  na reflektivnu prizmu i dužina  $\sigma_{dt} = 3 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km}$  na reflektivnu markicu.

Za test uzorak kontrolne geodetske mreže su sračunati reprezentativni parametri *a priori* preciznosti (Tabela 7-11) i faktori unutrašnje pouzdanosti sa vrednostima marginalnih grubih grešaka (Tabela 7-12).

Tabela 7-11 *A priori* pokazatelji preciznosti kontrolne geodetske mreže tunela

Tačka	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_H$ [mm]	$\sigma_{3D}$ [mm]	Tačka	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_H$ [mm]	$\sigma_{3D}$ [mm]
ST1	1.0	1.2	0.8	1.8	K9	0.7	2.0	1.0	2.4
ST2	0.5	1.1	0.7	1.4	K10	0.7	1.8	1.0	2.2
ST3	0.5	0.8	0.5	1.1	M1	1.6	2.8	1.3	3.5

<i>Tačka</i>	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_H$ [mm]	$\sigma_{3D}$ [mm]	<i>Tačka</i>	$\sigma_Y$ [mm]	$\sigma_X$ [mm]	$\sigma_H$ [mm]	$\sigma_{3D}$ [mm]
<i>ST4</i>	0.5	0.8	0.5	1.1	<i>M2</i>	1.6	2.8	1.3	3.5
<i>ST5</i>	0.6	1.1	0.7	1.4	<i>M3</i>	2.9	1.1	1.2	3.3
<i>ST6</i>	1.0	1.5	0.9	2.0	<i>M4</i>	2.8	1.3	1.2	3.3
<i>K1</i>	0.7	1.7	1.0	2.1	<i>M5</i>	2.9	0.9	1.1	3.3
<i>K2</i>	0.7	1.7	1.0	2.1	<i>M6</i>	2.8	1.2	1.1	3.3
<i>K3</i>	0.6	1.6	0.8	1.9	<i>M7</i>	2.9	0.8	1.1	3.3
<i>K4</i>	0.6	1.6	0.8	1.9	<i>M8</i>	2.9	0.8	1.1	3.3
<i>K5</i>	0.6	1.5	0.8	1.8	<i>M9</i>	1.9	1.2	1.2	2.6
<i>K6</i>	0.6	1.5	0.8	1.8	<i>M10</i>	2.4	2.0	1.2	3.3
<i>K7</i>	0.6	1.6	0.8	1.9	<i>M11</i>	1.9	2.8	1.4	3.6
<i>K8</i>	0.6	1.6	0.8	1.9	<i>M12</i>	1.9	2.7	1.4	3.6

Imajući u vidu zahtevanu apsolutnu tačnost 3D modela tunela  $\sigma_m = 2$  cm, projektovana tačnost 3D položaja tipskih skenerskih signala u sistemu kontrolne geodetske mreže je i do pet puta veća. Stoga, uticaj nesigurnosti datih veličina kontrolnih tačaka u postupku georeferenciranja se može zanemariti.

Optimalno rešenje kontrolne geodetske mreže je ostvareno preko parametara unutrašnje pouzdanosti rezultata merenja. Prosečne vrednosti unutrašnje pouzdanosti rezultata merenja ( $r_{ii}$ ) pravaca, dužina i visinskih razlika su iznad preporučene granice od 0.3 za kontrolne mreže u inženjerstvu. Faktori pouzdanosti merenja ukazuju na optimalno rešenje, obzirom da globalna mera za pravce iznosi tek nešto iznad 0.3. Takođe minimalne vrednosti lokalne mere su 0.28 i 0.29 za pravce i jedna 0.28 vrednost za dužine. Pri moći testa 0.80, minimalna vrednost marginalne grube greške ( $G_{ii}$ ) za pravce iznosi 4.3" a maksimalna 6.5", dok je za dužine minimalna iznosi 8.0 mm, a maksimalna 13.0 mm. U 1D kontrolnoj geodetskoj mreži, sve lokalne mere unutrašnje pouzdanosti su iznad vrednosti 0.37, dok maksimalna vrednost marginalne grube greške iznosi 5.7 mm, a minimalna 5.0 mm.

Tabela 7-12 Pokazatelji unutrašnje pouzdanosti kontrolne geodetske mreže tunela

Pravci				Dužine				Visinske razlike			
od	do	$r_{ii}$	$G_{ii}$ ["]	od	do	$r_{ii}$	$G_{ii}$ [mm]	od	do	$r_{ii}$	$G_{ii}$ [mm]
ST1	ST2	0.64	4.3	ST1	ST2	0.73	8.0	ST1	ST2	0.80	5.3
	K1	0.35	5.7		K1	0.46	10.1		K1	0.39	5.0
	K2	0.37	5.6		K2	0.43	10.4		K2	0.39	5.0
	ST3	0.44	5.2		ST3	0.61	8.9		ST3	0.68	5.7
ST2	ST1	0.49	4.9	ST2	ST1	0.73	8.0	ST2	ST1	0.80	5.3
	K1	0.28	6.4		K1	0.46	10.1		K1	0.39	5.0
	K2	0.30	6.3		K2	0.43	10.4		K2	0.39	5.0
	K3	0.34	5.9		K3	0.44	10.4		K3	0.39	5.0
	K4	0.33	5.9		K4	0.44	10.3		K4	0.39	5.0
	ST3	0.38	5.5		ST3	0.73	8.0		ST3	0.80	5.3
ST3	ST2	0.34	5.9	ST3	ST2	0.73	8.0	ST3	ST2	0.80	5.3
	K3	0.33	6.0		K3	0.44	10.4		K3	0.39	5.0
	K4	0.33	6.0		K4	0.44	10.3		K4	0.39	5.0
	K5	0.33	5.9		K5	0.42	10.6		K5	0.37	5.2
	K6	0.33	6.0		K6	0.42	10.5		K6	0.37	5.2
	ST4	0.33	5.9		ST4	0.67	8.4		ST4	0.76	5.4
ST4	ST3	0.33	6.0	ST4	ST3	0.67	8.4	ST4	ST3	0.76	5.4
	K5	0.33	6.0		K5	0.42	10.6		K5	0.37	5.2
	K6	0.32	6.0		K6	0.42	10.5		K6	0.37	5.2
	K7	0.28	6.5		K7	0.42	10.6		K7	0.37	5.2
	K8	0.28	6.5		K8	0.42	10.5		K8	0.37	5.2
	ST5	0.28	6.4		ST5	0.67	8.4		ST5	0.76	5.4
ST5	ST4	0.38	5.5	ST5	ST4	0.67	8.4	ST5	ST4	0.76	5.4
	K10	0.28	6.4		K10	0.42	10.6		K10	0.37	5.2
	K7	0.38	5.5		K7	0.42	10.6		K7	0.37	5.2
	K8	0.38	5.6		K8	0.42	10.5		K8	0.37	5.2
	K9	0.28	6.4		K9	0.62	13.0		K9	0.37	5.2
	ST6	0.29	6.4		ST6	0.64	8.6		ST6	0.76	5.4
ST6	ST5	0.38	5.6	ST6	ST5	0.64	8.6	ST6	ST5	0.76	5.4
	K10	0.37	5.6		K10	0.42	10.6		K10	0.37	5.2
	K9	0.37	5.6		K9	0.28	12.9		K9	0.37	5.2
max		0.64	6.5	max		0.73	13.0	max		0.80	5.7
min		0.28	4.3	min		0.28	8.0	min		0.37	5.0
global		0.35	5.8	global		0.52	9.9	global		0.52	5.2

Nakon realizacije opažanja za svih 12 tunela, izravnjanja i statističkog testiranja rezultata merenja u kontrolnoj geodetskoj mreži, *a posteriori* pokazatelji preciznosti su saglasni

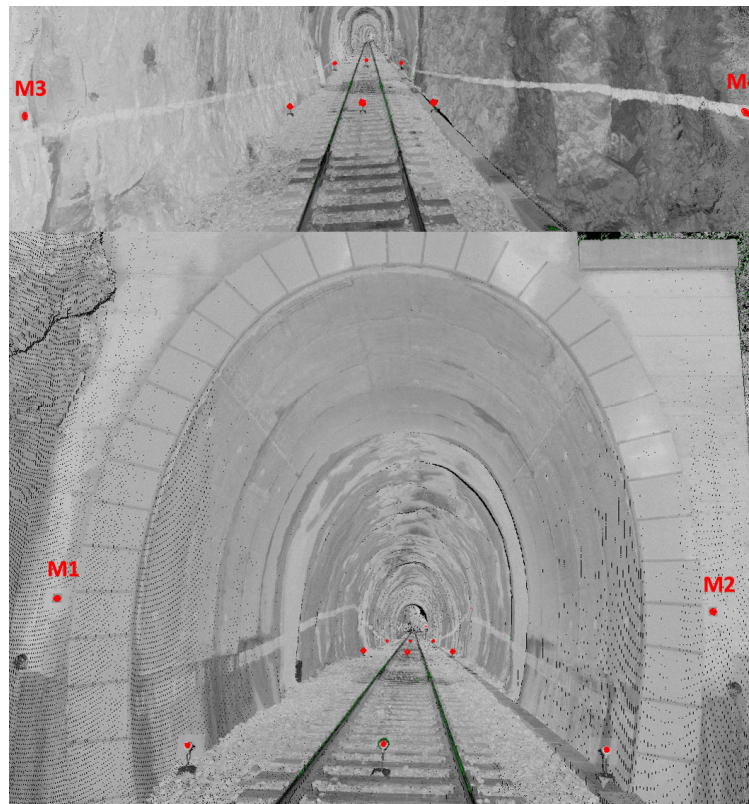
sa projektovanim vrednostima. Ovde su prikazane ocene koordinata kontrolne geodetske mreže za najduži tunel Budoš (1260 m), na osnovu MNK izravnjanja rezultata opažanja (Tabela 7-13). U ostalih 11 tunela ostvarena preciznost kontrolne geodetske mreže je istog reda veličine.

Tabela 7-13 *A posteriori* pokazatelji preciznosti kontrolne geodetske mreže tunela Budoš

<i>kontrolna tačka</i>	$S_Y$ [mm]	$S_X$ [mm]	$S_H$ [mm]	$S_{3D}$ [mm]	<i>kontrolna tačka</i>	$S_Y$ [mm]	$S_X$ [mm]	$S_H$ [mm]	$S_{3D}$ [mm]
ST1	1.3	1.4	1.5	2.4	K23	0.8	1.2	0.9	1.7
ST2	1.4	1.3	1.3	2.3	K24	0.8	1.2	0.9	1.7
ST3	1.3	1.2	1.2	2.1	K25	0.7	1.2	0.9	1.7
ST4	1.3	1.0	1.0	1.9	K26	0.7	1.2	0.9	1.7
ST5	1.2	0.9	0.9	1.7	K27	0.6	1.3	1.1	1.8
ST6	1.1	0.8	0.8	1.6	K28	0.6	1.3	1.1	1.8
ST7	1.0	0.9	0.9	1.6	M1	1.7	1.7	1.5	2.8
ST8	1.0	1.0	1.0	1.7	M2	1.6	1.8	1.5	2.8
ST9	1.6	1.2	1.2	2.3	M3	2.0	1.3	1.3	2.7
ST10	2.6	1.4	1.4	3.3	M4	2.0	1.3	1.3	2.7
ST11	0.5	1.0	1.0	1.5	M5	2.0	1.2	1.2	2.6
ST12	0.6	0.7	0.7	1.2	M6	2.0	1.2	1.2	2.6
ST13	0.6	0.6	0.7	1.1	M7	1.9	1.1	1.0	2.4
ST14	0.2	0.6	0.7	0.9	M8	1.9	1.1	1.0	2.4
ST15	1.1	1.1	1.2	2.0	M9	1.8	1.2	0.9	2.3
K1	1.4	1.5	1.5	2.5	M10	1.9	1.0	0.9	2.3
K2	1.4	1.5	1.5	2.5	M11	1.9	0.8	0.8	2.2
K3	1.4	1.5	1.4	2.5	M12	1.7	1.2	0.8	2.2
K4	1.4	1.5	1.4	2.5	M13	1.8	0.9	0.9	2.2
K5	1.3	1.4	1.3	2.3	M14	1.7	1.1	0.9	2.2
K6	1.3	1.4	1.3	2.3	M15	1.8	1.0	1.0	2.3
K7	1.3	1.3	1.1	2.1	M16	1.8	1.0	1.0	2.3
K8	1.3	1.3	1.1	2.1	M17	2.1	1.3	1.2	2.7
K9	1.3	1.3	1.1	2.1	M18	2.0	1.5	1.2	2.8
K10	1.3	1.3	1.1	2.1	M19	1.6	1.3	1.3	2.4
K11	1.2	1.3	1.1	2.1	M20	1.6	1.3	1.3	2.4
K12	1.2	1.3	1.1	2.1	M21	1.6	1.0	1.0	2.1
K13	1.1	1.4	1.2	2.1	M22	1.6	1.0	1.0	2.1
K14	1.1	1.4	1.2	2.1	M23	1.6	0.7	0.7	1.9
K15	1.3	1.5	1.3	2.4	M24	1.6	0.7	0.7	1.9
K16	1.3	1.5	1.3	2.4	M25	1.6	0.7	0.7	1.9
K17	1.1	1.7	1.6	2.6	M26	1.6	0.6	0.7	1.8
K18	1.1	1.7	1.6	2.6	M27	1.4	0.9	0.7	1.8
K19	0.7	1.5	1.3	2.1	M28	1.5	0.7	0.7	1.8
K20	0.7	1.5	1.3	2.1	M29	1.4	1.6	1.2	2.4
K21	0.8	1.3	1.1	1.9	M30	1.5	1.4	1.2	2.4
K22	0.8	1.3	1.1	1.9					

### 7.2.3.3.2 Rezultati registracije i georeferenciranja

Registracija susjednih scena je izvršena na osnovu prostorne šestoparametarske transformacije, korišćenjem Riegl retro-reflektivnih skenerskih signala. Alternativna mogućnost je registracija metodom najboljeg uklapanja površi, koja predstavlja komotnije rešenje. Međutim, u slučaju tunela ravne unutrašnje oplata ona ne može dati zadovoljavajuće rezultate, obzirom da modelirani trouglovi oboda tunela nemaju različite prostorne orijentacije, te je registracija nepouzdana. Ukupno 10 signala je tokom skeniranja premeštano po podu tunela, između susjednih scena. Na taj način je obezbeđen potreban višak veznih tačaka i veliki preklop između susjednih scena, odnosno garantovana pouzdanost i preciznost registracije (Slika 7-10). Izabrani datum globalne registracije je definicija skenerskog KS prve scene, na ulazu u tunel.



Slika 7-10 Oblak tačaka tunela sa detektovanim Riegl retro-reflektivnim signalima.  
Vezne tačke na podu tunela i kontrolne tačke na zidu tunela

U najdužem tunelu Budoš ukupan broj scena iznosi 46. Standardna greška globalne registracije, sračunata na osnovu uzorka od 357 vrednosti vektora 3D reziduala, iznosi 2.18 mm, pri čemu maksimalna vrednost iznosi 4.1 mm za signal  $R_{126}$  koji je



registrovan na izlasku iz tunela u 43, 44, 45 i 46 sceni (Tabela 7-14). Ovi pokazatelji mogu ukazati na visoku tačnost izvršene registracije. Međutim, ovi podaci se odnose na lokalnu nesigurnost identičnih veznih tačaka koje su registrovane u susjednim scenama. Informaciju o globalnoj nesigurnosti geometrije globalne registracije tunela, moguće je dobiti nakon georeferenciranja na kontrolne tačke geodetske mreže.

Tabela 7-14 Pokazatelji tačnosti registrovanih susjednih scena u tunelu Budoš

signal	broj scena	$\Delta_Y$ [mm]	$\Delta_X$ [mm]	$\Delta_H$ [mm]	$\Delta_{3D}$ [mm]	signal	broj scena	$\Delta_Y$ [mm]	$\Delta_X$ [mm]	$\Delta_H$ [mm]	$\Delta_{3D}$ [mm]
R_001	3	0.6	1.5	0.2	1.6	R_066	3	1.3	2.4	0.8	2.9
R_002	2	0.6	2.1	0.2	2.1	R_067	2	0.6	2.0	0.5	2.1
R_003	3	0.3	2.2	0.3	2.2	R_068	2	0.6	0.6	0.4	0.9
R_004	2	0.3	2.1	0.2	2.1	R_069	2	0.8	2.8	0.2	3.0
R_005	3	0.3	1.4	0.3	1.4	R_070	3	1.5	2.2	0.3	2.7
R_006	2	0.1	1.0	0.1	1.0	R_071	3	0.7	1.9	0.3	2.0
R_007	3	1.5	1.1	0.1	1.8	R_072	3	0.5	2.4	0.4	2.5
R_008	3	1.5	1.0	0.1	1.8	R_073	3	1.7	1.9	0.3	2.6
R_009	2	0.0	0.0	0.0	0.0	R_074	3	0.5	1.7	0.6	1.8
R_010	2	0.1	0.6	0.0	0.6	R_075	3	0.4	2.0	0.3	2.1
R_011	2	0.6	0.6	0.0	0.8	R_076	3	0.6	1.8	0.6	2.0
R_012	2	0.3	0.7	0.0	0.8	R_077	4	0.9	2.2	0.5	2.4
R_013	3	0.2	1.8	0.3	1.8	R_078	3	1.4	1.0	0.6	1.8
R_014	3	0.1	0.6	0.0	0.6	R_079	3	0.6	2.0	0.4	2.1
R_015	2	0.1	0.7	0.3	0.8	R_080	3	0.8	2.4	0.4	2.5
R_016	2	0.1	1.0	0.6	1.1	R_081	3	0.6	2.8	0.2	2.8
R_017	2	0.5	0.1	0.0	0.5	R_082	3	1.0	2.5	0.2	2.7
R_018	2	1.6	0.7	0.1	1.8	R_083	2	0.5	2.8	0.4	2.9
R_019	2	0.6	0.9	0.1	1.1	R_084	4	0.7	2.0	0.5	2.1
R_020	2	0.7	0.2	0.1	0.7	R_085	3	0.1	2.8	0.6	2.8
R_021	2	1.0	1.2	0.0	1.5	R_086	4	0.7	2.5	0.6	2.7
R_022	3	0.4	1.9	0.1	1.9	R_087	3	0.5	2.2	0.5	2.3
R_023	2	0.8	1.2	0.1	1.4	R_088	3	1.1	2.4	0.3	2.6
R_024	2	0.9	1.0	0.1	1.3	R_089	3	1.0	2.3	0.2	2.5
R_025	3	0.8	2.4	0.2	2.5	R_090	3	0.2	1.6	0.7	1.7
R_026	3	0.5	1.2	0.5	1.4	R_091	3	0.4	2.1	0.2	2.1
R_027	4	1.7	3.0	0.5	3.5	R_092	3	0.4	2.4	0.2	2.4
R_028	2	0.4	2.0	0.2	2.1	R_093	3	1.4	2.2	0.1	2.6
R_029	2	0.2	1.8	0.1	1.8	R_094	3	0.4	1.8	0.2	1.9
R_030	2	0.2	1.2	0.1	1.2	R_095	2	0.5	2.4	0.2	2.4
R_031	2	0.4	1.9	0.4	1.9	R_096	3	0.3	2.8	0.2	2.8
R_032	3	0.9	1.8	0.0	2.0	R_097	3	0.5	2.7	0.2	2.7
R_033	3	1.4	1.3	0.4	2.0	R_098	3	1.5	1.9	0.3	2.4
R_034	3	0.5	1.3	0.6	1.5	R_099	3	0.4	2.8	0.1	2.8
R_036	2	0.5	1.1	0.7	1.3	R_100	3	1.0	2.1	0.0	2.3



<i>signal</i>	<i>broj scena</i>	$\Delta_Y$ [mm]	$\Delta_X$ [mm]	$\Delta_H$ [mm]	$\Delta_{3D}$ [mm]	<i>signal</i>	<i>broj scena</i>	$\Delta_Y$ [mm]	$\Delta_X$ [mm]	$\Delta_H$ [mm]	$\Delta_{3D}$ [mm]
R_037	2	0.6	1.1	0.1	1.2	R_101	3	0.5	2.5	0.4	2.6
R_035	3	0.3	1.8	0.2	1.8	R_102	3	1.0	2.0	0.3	2.3
R_038	3	0.5	1.9	0.2	2.0	R_104	3	1.3	2.7	0.2	3.0
R_039	2	0.8	1.9	0.1	2.1	R_105	4	0.5	2.5	0.5	2.6
R_040	3	0.4	1.1	0.0	1.2	R_103	3	0.5	2.2	0.9	2.4
R_041	3	1.2	3.7	0.0	3.9	R_106	3	0.8	2.9	0.2	3.0
R_042	2	3.0	0.4	0.1	3.0	R_107	3	0.2	2.8	0.6	2.9
R_043	3	0.5	1.1	0.2	1.2	R_108	3	0.6	2.7	0.4	2.8
R_044	2	1.6	0.5	0.5	1.7	R_109	3	0.9	1.4	0.2	1.7
R_045	2	0.9	1.4	0.8	1.8	R_110	3	0.7	1.7	0.0	1.9
R_046	2	1.3	1.2	0.3	1.8	R_111	3	0.6	1.6	0.2	1.7
R_047	3	0.7	1.4	0.4	1.6	R_112	2	1.2	0.4	0.6	1.4
R_048	2	0.3	1.1	0.2	1.1	R_113	2	2.1	2.0	0.2	2.9
R_049	3	0.7	1.1	0.6	1.4	R_114	3	1.2	1.6	0.2	2.0
R_050	2	0.6	0.9	1.1	1.5	R_115	2	1.7	1.3	0.3	2.2
R_051	2	0.8	1.5	0.4	1.8	R_116	3	0.6	2.3	0.2	2.4
R_052	3	0.5	2.1	0.8	2.3	R_117	2	0.5	2.5	0.2	2.5
R_053	3	0.6	1.9	0.4	2.0	R_118	3	1.0	1.6	0.1	1.9
R_054	3	0.2	1.7	0.2	1.7	R_119	3	0.2	1.4	0.1	1.4
R_055	2	1.3	1.9	0.5	2.3	R_120	3	0.3	1.6	0.2	1.6
R_056	3	0.5	1.8	0.3	1.8	R_121	4	0.5	2.3	0.5	2.4
R_057	3	0.2	1.4	0.4	1.4	R_122	4	1.0	2.2	0.7	2.5
R_058	3	0.5	1.6	0.3	1.7	R_123	4	0.9	2.4	0.4	2.6
R_059	2	0.4	1.0	0.5	1.1	R_124	4	0.5	1.8	1.2	2.3
R_060	2	0.7	1.2	0.2	1.4	R_125	4	0.6	1.9	0.4	2.0
R_061	4	0.6	2.3	0.0	2.4	R_126	4	2.7	3.1	0.7	4.1
R_062	3	1.0	2.2	0.3	2.4	R_127	3	0.2	1.7	0.4	1.7
R_063	3	0.7	1.6	0.0	1.8	R_128	3	0.8	1.5	0.6	1.8
R_064	4	0.9	2.5	0.5	2.7	R_129	2	0.1	2.2	0.1	2.2
R_065	3	0.8	2.5	0.3	2.6						

max: **4.1 mm**

Standardna greška: **2.18 mm**

Georeferenciranje registrovanih scena je izvršeno korišćenjem arbitrarnog pristupa u svih 12 tunela. U primeru najdužeg tunela optimalni broj nezavisno georeferenciranih segmenata iznosi 8. U kraćim segmentima georeferenciranje je izvršeno na osnovu 4 identične tačke u oba KS i 4 registrovane susedne scene. Najduži segment 8 sadrži 10 scena i 8 kontrolnih tačaka. Standardna greška georeferenciranja celog tunela iznosi 1.06 cm. Maksimalna vrednost 3D vektora reziduala iznosi 2.3 cm za kontrolnu tačku M5 u segmentu 2 (Tabela 7-15).

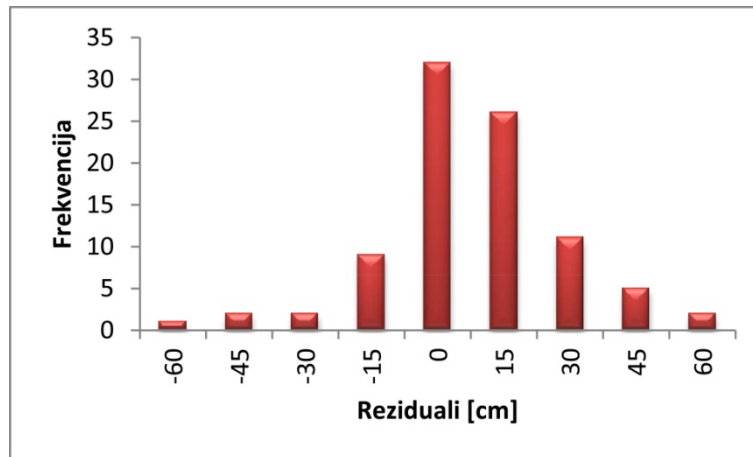
Tabela 7-15 Rezultati arbitrarnog georeferenciranja u tunelu Budoš

Markica	$\Delta_Y$ [mm]	$\Delta_X$ [mm]	$\Delta_H$ [mm]	$\Delta_{3D}$ [mm]	Segment	Scene	$\Delta_{3D}$ segmenta [mm]
M1	0.3	0.5	-0.7	0.9	1	02-06	4.8
M2	-0.1	-1.5	0.7	1.7			
M3	6.5	1.1	0.6	6.6			
M4	-6.7	0.0	-0.6	6.7			
M3	5.1	-0.6	-12.3	13.3	2	06-15	16.1
M4	-8.2	-1.6	-17.9	19.7			
M5	10.0	-0.1	20.9	23.2			
M6	-3.9	1.6	11.9	12.6			
M7	3.7	-0.6	8.0	8.8			
M8	-5.4	-1.9	15.9	16.9			
M9	4.8	2.9	-16.8	17.7			
M10	-6.0	0.3	-9.7	11.4	3	15-18	6.3
M9	5.6	-3.1	2.2	6.8			
M10	-4.7	-1.5	-2.2	5.4			
M11	4.9	4.0	-2.4	6.7			
M12	-5.8	0.6	2.4	6.3	4	18-21	6.5
M11	5.3	0.2	-2.0	5.7			
M12	-5.3	-0.2	2.0	5.7			
M13	7.1	-0.5	1.4	7.2			
M14	-7.1	0.5	-1.4	7.3	5	21-25	7.7
M13	6.8	-1.2	-0.2	6.9			
M14	-7.1	1.8	0.2	7.3			
M15	8.3	-0.1	0.2	8.3			
M16	-8.1	-0.6	-0.2	8.1	6	25-31	10.1
M15	10.8	-5.9	-2.8	12.6			
M16	-6.0	-4.3	1.4	7.5			
M17	7.3	-3.2	2.7	8.4			
M18	-13.7	4.4	0.5	14.4			
M19	6.9	5.3	0.2	8.7			
M20	-5.2	3.7	-2.0	6.7	7	31-37	9.1
M19	9.1	-5.5	-5.0	11.7			
M20	-3.1	-6.0	-2.0	7.1			
M21	-0.1	0.1	7.3	7.3			
M22	-7.2	-2.6	7.4	10.6			
M23	-1.7	5.5	-2.4	6.3			
M24	3.0	8.5	-5.2	10.4	8	37-46	11.6
M23	-2.3	-8.5	7.1	11.3			
M24	2.6	-5.6	10.7	12.4			
M25	2.5	-4.4	-14.3	15.1			
M26	3.6	-1.2	-11.9	12.4			
M27	-3.3	-4.7	0.0	5.8			
M28	1.4	-0.5	0.7	1.6			
M29	0.2	14.6	3.6	15.0			
M30	-4.7	10.3	4.0	12.0			

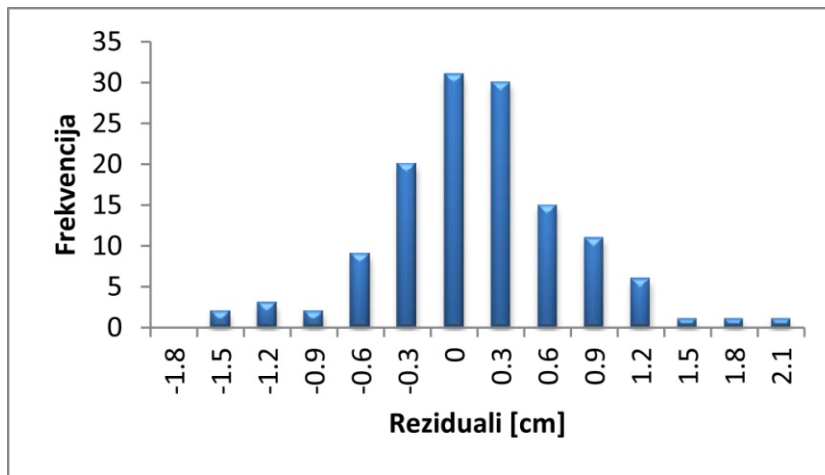
Standardna greška: **10.6 mm**

Opravdanost korišćenja arbitrarnog postupka georeferenciranja se može analizirati ukoliko se na primeru najdužeg test tunela sagleda histogram frekvencija vrednosti

rezidula georeferenciranja standardnom metodom indirektnog georeferenciranja u dva koraka (Slika 7-11) i histogram vrednosti rezidula arbitrarnog georeferenciranja (Slika 7-12). Jasno je da arbitrarni pristup georeferenciranju u dugačkim tunelima zadržava geometrijsku distorziju oblaka tačaka u projektovanim okvirima.



Slika 7-11 Histogram frekvencija vrednosti reziduala. Efekat multiplikacije grešaka registracije korišćenjem standardne metode indirektnog georeferenciranja u dva koraka. Pojedine vrednosti reziduala su veće od 60 cm



Slika 7-12 Histogram frekvencija vrednosti reziduala arbitrarnog georeferenciranja. Efekat kontrolisanih grešaka registracije. 97.7 % uzorka reziduala pripadaju teorijskom  $1\sigma$  (2cm) intervalu poverenja

Dodatna, nezavisna kontrola tačnosti modela georeferenciranja tunela može se ostvariti vizuelnim poređenjem konačnog modela oblaka tačaka sa tačkama kontrolne mreže  $K_i$  koje nisu učestvovala u procesu georeferenciranja i sa snimljenim pozicijama šina.

Pozicije šina i lokacije karakterističnih elemenata osovine pruge su snimljene totalnom stanicom sa kontrolne geodetske mreže.

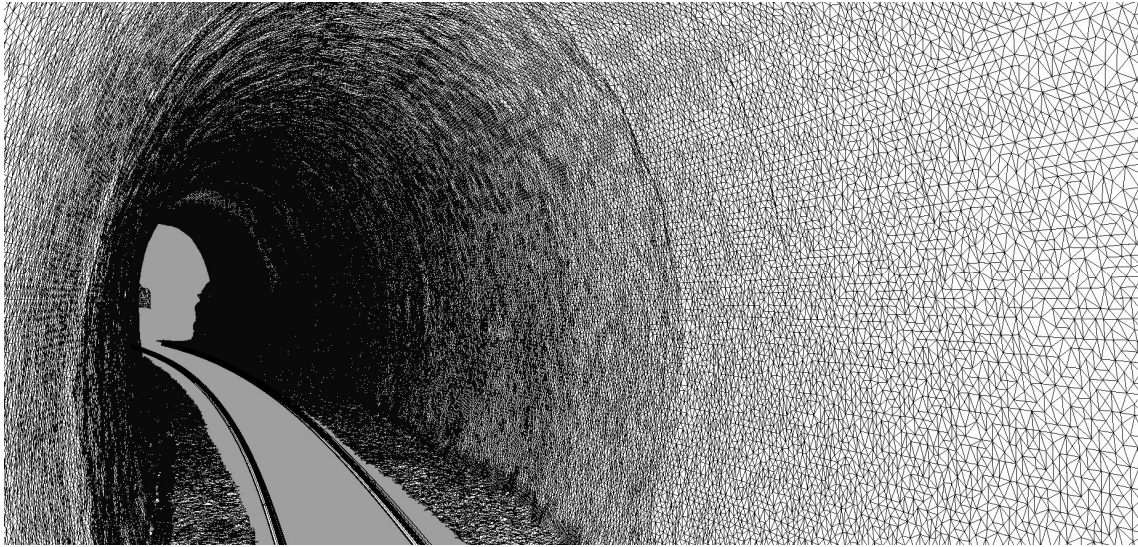


Slika 7-13 Dodatna kontrola georeferenciranja. Snimljene pozicije šina i signalisane tačke kontrolne geodetske mreže su kontrolisane vizuelno, nezavisno od modela prostorne transformacije

#### 7.2.3.4 3D modeliranje oblaka tačaka tunela i finalni CAD crteži

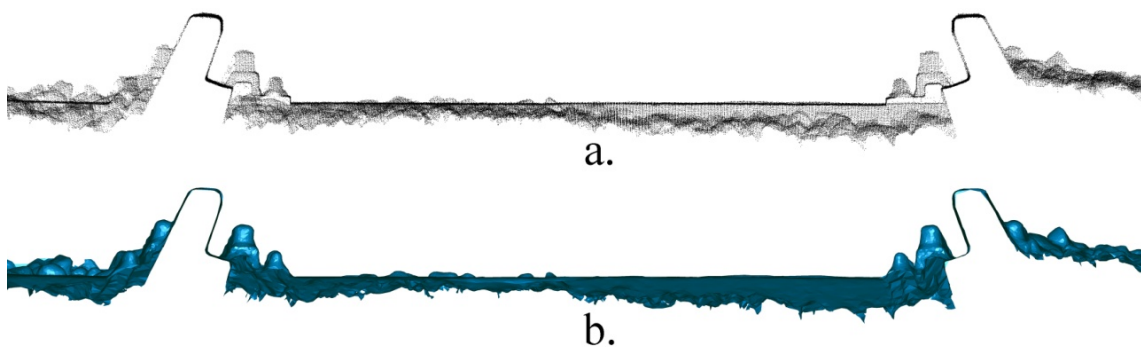
Modeliranje oblaka tačaka i izrada finalnih CAD proizvoda može biti realizovana kada je postignuta optimalna tačnost i odgovarajuća rezolucija kompletnog oblaka tačaka tunela. Konačni 3D model tunela je optimizovana 3D mreža trouglova (*triangulated mesh*). Optimizacija 3D modela je standardna procedura u softverima za 3D modeliranje. Kao što je ranije napomenuto, minimalna vrednost prostorne rezolucije od 1 tačke po kvadratnom centimetru je izabrana radi eliminisanja uticaja algoritma 3D modeliranja na preciznost konačnog 3D modela. Upravo korišćenjem svih tačaka u postupku 3D modeliranja i naknadnom optimizacijom 3D modela postiže se efekat optimalne preciznosti modela i manja količina podataka.





Slika 7-14 3D model tunela. Optimizovana 3D mreža trouglova na osnovu podataka TLS

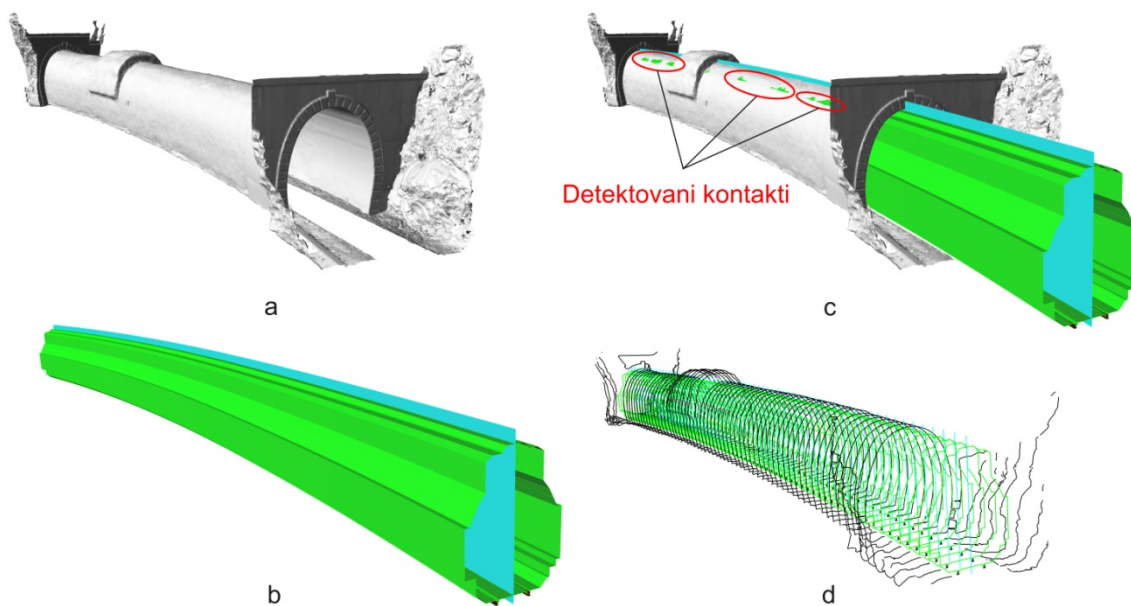
Kontrola geometrije tunela i analiza veličine zazora između proširenog poprečnog profila voza (slobodnog profila) i unutrašnje obloge tunela izvršena je na osnovu pozicije modela tunela i modela kompozicije voza (Slika 7-16c). Modeliranje kompozicije voza se vrši u odnosu na položaj šina i dimenzije slobodnog profila. Trajektorija kompozicije voza zavisi od horizontalne i vertikalne pozicije obe šine. To je posebno značajno u krivinama kada dolazi do naginjanja kompozicije. Greška visinske razlike između šina linearno multiplikuje grešku naginjanja modela voza. Standardi tačnosti sa kojima je potrebno odrediti pozicije šina su jedni od strožih u geodetskom inženjerstvu.



Slika 7-15 Loša geometrija skeniranih šina zahvaljujući šumu u podacima usled efekta izmešanih piksela. Pogrešna pozicija tačaka sa obe strane šine (a) i 3D model pozicije šina (b)

Obzirom na ovako stroge zahteve, ograničenja TLS tehnologije u ovom slučaju su očigledna. Dva glavna razloga koja utiču na kvalitet prikupljenih TLS podataka na lokacijama šina su efekat izmešanih piksela usled položaja TLS i šine i visoka reflektivnost gornje površi šine koja doprinosi značajnom šumu u podacima merenja rastojanja (Slika 7-15).

Elementi osovine pruge u tunelu su određeni na osnovu rezultata merenja lokacija materijalizovane osovine pruge, pozicije ose šina i označenih karakterističnih pozicija osnovnih elemenata osovine (elementi prelaznice i kružne krivine). Merenja su izvršena totalnom stanicom sa kontrolne geodetske mreže. Modeliranje elemenata osovine je izvršeno na osnovu MNK uklapanja 3D pravca i 3D krivina. Kao pokazatelj kvaliteta modeliranja ose šina poslužila je analiza MNK reziduala i analiza horizontalnog rastojanja između modeliranih osa dve šine koje u odnosu na teorijsku vrednost od 1.5 m, odstupa unutar intervala od  $\pm 1$  mm.



Slika 7-16 3D model i model kompozicije voza. (a) Modelirana 3D površ tunela, (b) prošireni model kompozicije voza, (c) lokacije detektovanih kontakata i (d) poprečni profili

Modeliranje tela kompozicije voza izvršeno je na osnovu prethodno definisane trajektorije. U odnosu na 3D model tunela (Slika 7-16a i Slika 7-14) i model tela voza (Slika 7-16b), analizirana je veličina zazora (Slika 7-16c). Poprečni profili su generisani za svaki metar stacionaže pruge (Slika 7-16d).



## 8 Zaključna razmatranja

Iako se TLS tehnologija prikupljanja podataka koristi u inženjerstvu već gotovo jednu deceniju, još uvek nedostaju potvrđene metodologije projektovanja eksperimenta, obrade merenja i kriterijumi ocene kvaliteta postignutih rezultata. Pored toga, još uvek nema standarda deklarisanja kvalitativnih karakteristika instrumenta TLS od strane proizvođača. To se pre svega odnosi na mere deklarisanje preciznosti i tačnosti TLS sistema. Nažalost u praksi, usled nedostatka obavezujući standarda, specifikacije proizvođača su često nejasne i ne mogu se jednoznačno tumačiti. Metodologiju projektovanja eksperimenta, ocene postignutih rezultata, ispitivanja i kalibracije TLS potrebno je definisati po ugledu na konvencionalne instrumente i metode merenja, uvažavajući sve specifičnosti ove metode geodetskog merenja.

Kvalitet modeliranja inženjerskih objekata na osnovu TLS merenja, a pre svega postizanje adekvatne geometrijske tačnosti oblaka tačaka, podrazumeva analizu uticaja izvora grešaka u procesu merenja i procesa obrade rezultata merenja, pre svega registracije i georeferenciranja. Formiranje oblaka tačaka koji je u granicama projektovane geometrijske tačnosti, karakterističan je i suštinski domet geodetskog stručnjaka. To ukazuje na potrebu da se u geodetskom inženjerstvu izvorima grešaka merenja, prenosu grešaka tokom registracije i georeferenciranja mora posvetiti naročita pažnja prilikom modeliranja objekta pomoću tehnologije TLS.

Potrebno je obezbediti da gustina tačaka ne utiče negativno na zahtevanu tačnost 3D modela objekta. Prostorna rezolucija treba da bude takva da se obezbedi kontinualno modeliranje objekta i da nedostaci složenih algoritama 3D modeliranja imaju mali uticaj na konačnu tačnost 3D modela. U praktičnim primenama dobro je raspolagati velikim uzorkom terenskih merenja, koji se u fazama obrade može redukovati na potrebnu meru.

Kovarijaciona matrica koordinata u sistemu kontrolne geodetske mreže -  $C_{x_k}$  sadrži veličine slučajnih grešaka rezultata merenja i nesigurnost parametara transformacije koordinata. Model kovarijacione matrice zavisi od metodologije georeferenciranja, odnosno od toga da li se koristi indirektna metoda georeferenciranja (u jednom ili dva



koraka) ili direktna metoda georeferenciranja (procedura poznate stanice i orijentacije ili procedura presecanja nazad). U geodetskom inženjerstvu, greške usled različitih poremećajnih uticaja sredine i usled karakteristika objekta skeniranja, mogu se u najvećem broju slučajeva svesti na zanemarljivu veličinu i to planiranjem eksperimenta i njegovim izvođenjem u optimalnim uslovima. Kod specifičnih inženjerskih objekata, ti dodatni izvori grešaka mogu biti i glavni ograničavajući faktori u realizaciji eksperimenta. Najčešće je to doprinos veličine upadnog ugla laserskog zraka intenzitetu povratnog zračenja, a time i nesigurnosti rezultata merenja rastojanja. Često značajan izvor grubih grešaka može biti i efekat izmešanih piksela, kao i uticaji ekstremnih vrednosti reflektivnosti površi objekta.

Sa stanovišta korišćenja TLS u inženjerskim radovima visoke tačnosti, bez obzira na tendenciju usavršavanja hardvera i različitih korekcionih algoritama, metoda direktnog georeferenciranja će uvek biti nižeg ranga tačnosti u odnosu na indirektnu metodu. Analogija orijentisanju skenera je orijentisanje totalnom stanicom u premeru, i to u jednom položaju durbina. Skener naravno nije moguće koristiti analogijom dva položaja durbina, što ostavlja značajan skup uticaja sistematskih grešaka prilikom orijentisanja na datu tačku. Ti uticaji se ne mogu metodom rada neutralisati (efekat horizontalne kolimacije i greške vertikalnog indeksa). Takođe, merenje visine skenera ima sve negativne implikacije kao merenje visine totalne stanice u trigonometrijskom nivelmanu. Centrisanje i horizontiranje TLS dodatno opterećuju uzorak merenja. Ukoliko se koristi indirektna metoda georeferenciranja ove greške ne postoje, uz uslovnu analogiju sa prisilnim centrisanjem totalne stanice ili opažanjem sa geodetskog stuba. Takođe važan aspekt diferencijacije ove dve metode georeferenciranja, pored postignute tačnosti je i konceptualne prirode. Tradicionalno, u projektovanju eksperimenta u inženjerskoj geodeziji se mora obezbediti pouzdanost rezultata, sprovođenje kontrole i dokazivanja adekvatnosti rezultata, što favorizuje indirektnu metodu. Radi poboljšanja tačnosti georeferenciranja potrebno je obezbediti da poziciona tačnost kontrolnih tačaka određenih u okviru kontrolne geodetske mreže bude takva da se greške datih veličina mogu zanemariti u transformacionom modelu oblaka tačaka. Broj kontrolnih tačaka treba biti veći od minimalne tri, kako bi se unapredila tačnost i pouzdanost transformacije. Više od četiri dobro raspoređene kontrolne tačke ne doprinose značajno tačnosti modela. Takođe, treba obezbediti minimalno 30% preklopa

između susednih scena prilikom registracije. Treba osigurati dobar prostorni raspored kontrolnih tačaka sa varijacijom po dubini, uz uslov da kontrolne tačke nisu kolinearne u pravcu laserskog zraka. Kod georeferenciranja i registracije podataka skeniranja linijskih objekata treba obezbediti tačke za georeferenciranje minimalno nakon svakog trećeg stajališta i koristiti predloženi arbitrarni postupak georeferenciranja, kako bi se smanjio efekat multiplikacije grešaka registracije. Tipski skenerski signali treba da budu, ukoliko je moguće, locirani što bliže poziciji TLS, i da, ako se koriste ravni signali, ulazni ugao laserskog zraka bude približno ortogonalan na ravan signala.

Utvrđivanje značajnosti uticaja pojedinih sistematskih grešaka na rezultate merenja i uvođenje korekcija vrši se u okviru procedura kalibracije TLS. Na osnovu sprovedene analize, može se reći da je kalibracija sistema u odnosu na kalibraciju komponenti sistema TLS, odgovarajuća metodologija kalibracije. Osnovni problem je činjenica da TLS još uvek predstavlja „crnu kutiju“ u koji su od strane proizvođača primenjeni nepoznati kalibracioni modeli. Oni se ne mogu neutralisati od strane istraživača ili korisnika. Takođe, korekcije opažanja sfernih koordinata se ne mogu implementirati direktno u instrument, nego posredno na uzorak merenja preko različitih programskih rutina. Tada se nailazi na problem memorijske ograničenosti tipičnih programerskih alata i posledične nekonzistentnosti sa matičnim softverom proizvođača tokom dalje obrade podataka skeniranja. Dakle, kalibracija TLS ima praktičnog smisla samo onda kada se korekcije osnovnih opažanja mogu primeniti nad samim TLS, odnosno kada izvorni oblak tačaka sadrži u sebi popravljena opažanja za različite sistematske uticaje. To će biti moguće samo onda kada TLS prestane da bude „crna kutija“ i kada proizvođači omoguće takvu proceduru. U toku završne faze pisanja ove disertacije, tokom meseca oktobra 2012. godine, kompanija *Leica Geosystems* je konačno predstavila novi TLS model impulsnog skenera *Scanstation P20*, koji poseduje opciju „*Check and Adjust*“, odnosno omogućuje vršenje kalibracionih procedura po ugledu na ostale geodetske instrumente.

Ispitivanja sprovedena u Metrološkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu za cilj su imala predlaganje pojednostavljene procedure ispitivanja TLS, po kriterijumima standarda ISO17123. Procedura obuhvata ispitivanje, analizu i ocenu tačnosti TLS u laboratorijskim uslovima, po ugledu na postupke kalibracije sistema i

mreže skenerskih signala. Ispitivan je impulsni TLS Leica HDS3000. Utvrđena je tačnost rezultata TLS opažanja, odnosno rezultujućeg oblaka tačaka, kojeg reprezentuju registrovani skenerski signali u koordinatnom sistemu kontrolne geodetske mreže. Pored toga analizirana je preciznost registracije skenerskih signala, kao i uticaj nehorizontalnosti TLS na grešku centrisanja. Preduslov za određivanje položajne nesigurnosti oblaka tačaka je postojanje referentne mreže skenerskih signala, čije su koordinate određene tačnijom metodom i na način da se ocenjene kontrolne koordinate skenerskih signala mogu smatrati uslovno tačnim, odnosno da uticaj nesigurnosti datih veličina bude zanemarljiv prilikom ispitivanja TLS. Takođe, potrebno je obezbediti što veći broj skenerskih signala uz njihov dobar prostorni raspored. Preciznost registracije tipskih skenerskih signala dobija se iz parova merenja identičnih koordinata markica, odnosno iz razlika koordinata identičnih signala pri ponovljenim merenjima. Rezultati analize preciznosti određivanja centra markice ukazuju na činjenicu da prilikom skeniranja ravni skenerski signali trebaju biti postavljeni tako da se izbegavaju oštri uglovi upadnog laserskog zraka. Pri svim varijantama prostorne transformacije na ukupno 25 skenerskih markica u kojima je variran broj kontrolnih tačaka, kao i pri skeniranju sa različitih stubova, uzorci analiziranih grešaka oblaka tačaka su sa visokom verovatnoćom saglasni sa teorijskom normalnom raspodelom. Obavljeni statistički testovi ukazuju da sistematski uticaji, odnosno pomerenost sistema koja se može pripisati vrednostima transformacionih parametara, nisu značajni. Dobijeni pokazatelji pozicione tačnosti skenerskih markica, na osnovu statističke analize dužina između markica, mogu se smatrati jednakim onima koji su dobijeni na osnovu prostorne transformacije. Međutim, u tom slučaju postoji snažna korelacija sa vrednostima dužina između markica. Na osnovu sferne statistike vektora grešaka, može se zaključiti da su globalne orijentacije vektora grešaka u pravcu vizure. Iz toga sledi da najveći uticaj na grešku modula vektora ima rezultat merenja rastojanja. To je i očekivano, obzirom na relativno kratke dužine. Kada se ima u vidu da ispitivani TLS ne poseduje dvoosni kompenzator nagiba, interesantno je ispitati uticaj nehorizontalnosti TLS na veličinu horizontalnog ekscentriciteta između projekcije optičko-mehaničkog centra skenera i centra stuba. Veličine ovog ekscentriciteta ukazuju da je ovaj uticaj značajan, te se ovakvi instrumenti prilikom upotrebe u geodetskom inženjerstvu isključivo mogu koristiti primenjujući metodologiju indirektnog georeferenciranja.

Visokoprecizno skeniranje inženjerskih objekata zahteva postojanje adekvatne kontrolne geodetske mreže sa dva osnovna cilja: da kalibriše i kontroliše rezultate skeniranja i da obezbedi odgovarajući geodetski datum 3D modelu objekta. Takođe, potrebno je obezbediti adekvatnu metodologiju projektovanja TLS eksperimenta i odgovarajuću metodologiju obrade podataka. U test primeru predstavljena je metodologija projektovanja eksperimenta skeniranja, registracije i georeferenciranja, realizacije merenja i modeliranja železničkih tunela radi kontrole geometrije izvedenog stanja. Na osnovu rezultata koji su dobijenu u ovom istraživanju, može se reći da su faktori koji imaju najveći uticaj na parametre skeniranja, dizajn kontrolne geodetske mreže i model georeferenciranja:

- zahtevana geometrijska tačnost 3D modela objekta,
- oblik i dimenzije objekta,
- parametri TLS, odnosno: preciznost, vidno polje, brzina skeniranja i performanse procesa automatskog prepoznavanja signala,
- fleksibilnost fabričkog TLS softvera, i
- fizička ograničenja TLS tehnologije, posebno: doprinos nesigurnosti određivanja rastojanja usled uticaja upadnog ugla laserskog zraka, nivoa reflektivnosti laserskog zraka i efekta izmešanih piksela.

Projektovanje geodetskog eksperimenta je aktivnost koja je tradicionalno nezaobilazna u inženjerskoj geodeziji. Uvođenje tehnologije TLS u inženjerstvo podrazumeva da metodologija projektovanja eksperimenta i obrade rezultata TLS mora biti razvijana. I pored specifičnosti TLS tehnologije, posebno u fazama obrade i interpretacije rezultata merenja, osnovni inženjerski pristup ostaje isti i oslanja se uglavnom na statističku analizu grešaka geodetskih merenja.

Linijski inženjerski objekti poput tunela, a posebno ukoliko su dugi i uski, predstavljaju izazov koji se postavlja pred geodetu. Postizanje projektovane pozicione tačnosti oblaka tačaka mora se ostvariti preko pažljivog projektovanja i kontrole rezultata opažanja. U uslovima test objekata, maksimalno dozvoljeno rastojanje između dve susedne stanice

TLS je primarno uslovljeno faktorima poput vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na površ tunela i prostornim rasporedom gustine tačaka. Princip zanemarljivosti komponenti rastojanja pokazao se kao dobar kriterijum za projektovanje dozvoljenih vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na površ objekta. Optimalni plan opažanja u kontrolnoj geodetskoj mreži obezbeđuje zahtevanu pozicionu tačnost i pouzdanost merenja u odnosu na princip ekonomičnosti resursa. Kontrolna geodetska mreža treba biti projektovana tako da vrednost parametara unutrašnje pouzdanosti bude u potrebnim okvirima za kontrolne mreže u inženjerskoj geodeziji. *A priori* ocene pozicione nesigurnosti i rezultati izravnjanja merenja pokazuju da je postignuta tačnost kontrolne geodetske mreže i do 5 puta veća od zahtevane apsolutne tačnosti modela objekta. Na primeru najdužeg tunela je pokazano da arbitrarni pristup georeferenciranju doprinosi da se veličina greške registracije zadrži u dozvoljenim granicama, u odnosu na klasičan indirektni pristup kojim se to ne može ostvariti. U najdužem tunelu, dužine 1.36 km, ostvarena apsolutna tačnost oblaka tačaka korišćenjem metodologije arbitrarnog georeferenciranja iznosi oko 11 mm, dok korišćenjem standardne procedure reziduali prostorne transformacije oblaka tačaka idu i do 1 m.

Generalno posmatrano, geometrijski korektan oblak tačaka objekta je karakterističan domet geodetskog inženjera u inženjerskim oblastima. Međutim, oblak tačaka objekta, iako ispunjava zahteve geometrijske tačnosti, praktično je neupotrebljiv za korisnika, uglavnom zbog veoma velike količine zahtevane memorije i nedostupnosti softverskih i hardverskih resursa za naknadne analize. Zbog toga je važno prezentovati rezultate TLS merenja u vidu tehničkih crteža i/ili numeričkih izveštaja. Ovo znači da geodetski stručnjak koji primenjuje tehnologiju TLS u inženjerstvu, pored geodetskog, mora posedovati i visok nivo znanja u oblastima računarskog 3D modeliranja, prostornih analiza podataka i prezentacije rezultata. Funkcionalna ograničenja tehnologije TLS moraju biti uzeta u obzir prilikom projektovanja merenja, kako bi u potpunosti došle do izražaja prednosti TLS u odnosu na tradicionalne geodetske metode merenja u inženjerstvu. Do sada, pored visoke cene TLS sistema, ovi razlozi su uglavnom bili ograničavajući faktori značajnije zastupljenosti TLS u inženjerskoj geodeziji, posebno u zahtevnim okruženjima poput tunela.

## **Literatura**

- [1] ABMAYR, T., DALTON, G., HINES, D., LIU, R., HÄRTL, F., HIRZINGER, G., FRÖHLICH, C. (2010): Standardization and visualization of 2.5D scanning data and color information by inverse mapping: Proceedings of the 7th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Wien 2005. Vol. I, pp. 164-173.
- [2] ABOLMASOV, B., PEJIĆ, M. (2011a): 3D Terrestrial Laser scanning and GPS Technology for slope stability investigations-case studies. 2nd Project workshop-Monitoring and analysis for disaster mitigation of landslides, debris flow and floods. 15-17 December 2011, Rijeka, Croatia.
- [3] AHN, S. J. (2004): Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space. LNCS, vol. 3151. Springer, Heidelberg.
- [4] AKCA, D. (2007): Least Squares 3D Surface Matching. Doctoral thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [5] AKCA, D., GRUEN, A. (2005): Recent advances in least squares 3D surface matching. Gruen A, Kahmen H (eds.) Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. II, pp 197 – 206.
- [6] ALBA, M., RONCORONI, F., SCAIONI, M. (2008): Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring. IASPRS, XXXVII(B5):1053–1059.
- [7] ARAYICI, Y. (2008): Towards building information modelling for existing structures, Structural Survey 26 (3) (2008) 210–222.
- [8] ASME, (1982): ANSI Standard Y14.5M – Dimensioning and Tolerancing. American Society of Mechanical Engineers.
- [9] BAARDA, W. (1967): Statistical concepts in geodesy, Neth. Geod. Comm., Publ. on Geod., New Series 2, No. 4, Delft.

- [10] BALTSAVIAS, E.P. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 199 – 214.
- [11] BEINAT, A., CROSILLA, F. (2001): Generalized Procrustes analysis for size and shape 3-D object reconstructions. Gruen, A., Kahmen, H. (Eds.), *Optical 3-D Measurements Techniques V*, Vienna, pp. 345-353.
- [12] BELLOCCHIO, F., BORGHESE, N.A., FERRARI, S., PIURI, V. (2012): 3D surface reconstruction : multi-scale hierarchical approaches. Springer, 2012.
- [13] BERALDIN, J.A., BLAIS, F., LOHR, U. (2010): Laser Scanning Technology. In: VOSSSELMAN, G., MAAS H-G, editors: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, ISBN 978-19044445-87-6. pp. 83-129.
- [14] BOEHLER, W., BORDAS VICENT, M., MARBS, A. (2003): Investigating laser scanner accuracy. *Proc. CIPA XIXth Int. Symposium, Antalya, Turkey*, 30 September–4 October, pp. 696–702.
- [15] BOGGS, P.T., BYRD, R.H., SCHNABEL, R.B. (1987): A stable and efficient algorithm for nonlinear orthogonal distance regression. *SIAM J. of Scientific and Statistical Computing* 8, 1052–1078.
- [16] BORNAZ, L., LINGUA, A., RINAUDO F. (2003): Multiple scan registration in LIDAR close-range applications. *Proceedings of the ISPRS International Workshop WG V/4 and INTCOM III/V “Vision Techniques for Digital Architectural and Archaeological Archives”*. Ancona, Italy, July 1 – 3.
- [17] BOŽIĆ, S. B. (2010a): Račun izravnjanja – Napredni nivo, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [18] BOŽIĆ, S. B. (2010b): Račun izravnjanja – Osnovni nivo, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [19] BOŽIĆ, S. B. (2010c): Teorija grešaka geodetskih merenja, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [20] BUCKSCH, A., LINDENBERGH, R., VAN REE, J. (2007): Error budget of Terrestrial Laser Scanning: Influence of the intensity remission on the scan quality. In: *Proc. in the GeoSiberia - 2007, Novosibirsk, Russia*.
-

- [21] CAI, H. (2003): Accuracy Evaluation of a 3-D Spatial Modeling Approach to Model Linear Objects and Predict their Lengths, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- [22] CASAGLI, N., CATANI, F., DEL VENTISETTE, C., LUZI, G., (2010): Monitoring, prediction and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides* 7, 291–301.
- [23] CHOW, J., TESKEY B., LICHTI D.D. (2010): Self-calibration and evaluation of the Trimble GX terrestrial laser scanner. In Proceedings of The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS, Volume XXXVIII, Calgary, Canada, 15–18 June.
- [24] CLARKE, T. A., LINDSEY, E., (1992): Profiling methods reviewed, *Tunnels and Tunnelling*, June. pp. 29-31.
- [25] COȘARCĂ, C., JOCEA, A., SAVU A. (2009): Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning. In: Proceedings International Scientific Symposium GeoCAD'09, Alba Iulia, May 07-09.
- [26] CUARTERO, A., ARMESTO, J., GARCÍA RODRÍGUEZ, P., ARIAS, P. (2010): Error Analysis of Terrestrial Laser Scanning Data by Means of Spherical Statistics and 3D Graphs. *Sensors* 2010, 10, pp. 10128–10145.
- [27] CVIJETINOVIĆ, Ž. (2005): Razvoj metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje digitalnog modela terena za teritoriju države, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [28] ČINKLOVIC, N., (1978): Analiza i a-priori ocena tačnosti preciznih geodetskih merenja, Monografija. Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
- [29] DELČEV, S., PEJIĆ, M., GUČEVIĆ, J., OGRIZOVIĆ, V. (2011): A Procedure for Accuracy Investigation of Terrestrial Laser Scanners, 10th IMEKO Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI) 2011, Braunschweig, Germany, ISBN: 978-3-18-092156-3.
- [30] DEWITT, B. A. (1996): Initial approximations for the three dimensional conformal coordinate transformation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(1), pp. 79-83.
-



- [31] ELING D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 641, München
- [32] ELING, D., KUTTERER, H. (2007): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung am Beispiel einer Talsperre. In: F. K. Brunner (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2007. Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 119-130.
- [33] FANG, T.P., PIEGL, L., (1995): Delaunay triangulation in three dimensions. IEEE Computer Graphics and Applications 15 (5), 62–69
- [34] FEKETE, S., DIEDERICHS, M., LATO, M., (2010): Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology 25, 614–628.
- [35] FISHER, N.I., LEWIS, T., EMBLETON, B.J.J. (1987): Statistical Analysis of Spherical Data. Cambridge University Press, New York.
- [36] FOIX, S., ALENYÀ, G., ANDRADE-CETTO J., TORRAS, C. (2010): Object modeling using a ToF camera under an uncertainty reduction approach, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, pp. 1306-1312.
- [37] GHILANI C. D., WOLF, P. R. (2006): Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, Fourth Edition, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-69728-2.
- [38] GIELSDORF, F., RIETDORF, A., GRUENDIG, L. (2004): A concept for the calibration of terrestrial laser scanners. In: Proceedings of FIG Working Week, Athens, Greece, 22-27 May. Available online: [http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts26/TS26\\_2\\_Gielsdorf\\_et\\_al.pdf](http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts26/TS26_2_Gielsdorf_et_al.pdf). (pristupljeno avgusta 2012)
- [39] GOTTWALD, R. (2008): Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS). A Contribution to a Future ISO Standard. In Proceedings of FIG Working Week, Stockholm, Sweden, 14–19 June 2008; pp. 14-19.
- [40] GONZÁLEZ-AGUILERA, D., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P., ARMESTO, J., ARIAS, P. (2011): Trimble GX200 and Riegl LMS-Z390i sensor self-calibration. Opt. Express, 19 (3), pp. 2676-2693.

- [41] GRESS, A., KLEIN, R. (2004): Efficient representation and extraction of 2-manifold isosurfaces using kd-trees. *Graphical Models* 66(6): 370-397.
- [42] HANKE, K., GRUSSENMEYER, P., GRIMM-PITZINGER, A., WEINOLD, T., (2006): First Experiences with the Trimble GX Scanner. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 5, ISSN 1682-1750, ISPRS Comm. V Symposium, Dresden, Sept. 25-27, Germany.
- [43] HEBERT, M., Krotkov, E. (1992): 3D measurements from imaging laser radars: how good are they? *Image and Vision Computing* 10(3), pp. 170-178.
- [44] HEJBUDZKA, K., LINDENBERGH, R., SOUDARISSANANE, S., HUMME, A. (2010): Influence of atmospheric conditions on the range distance and number of returned points in Leica scanstation 2 point clouds. *Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement Techniques*, vol. XXXVIII, pp.282-287.
- [45] HODGE, R. A. (2010): Using simulated terrestrial laser scanning to analyse errors in high-resolution scan data of irregular surfaces. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 65, Issue 2, pp. 227-240.
- [46] HORN, B.K.P. (1987): Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America*, A-4 (4), pp. 629-642.
- [47] HU, C., WANG, Y., YU, W. (2008): Mapping Digital Image Texture onto 3D Model from LiDAR data." *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37(Part B5): 611-614.
- [48] INGENSAND, H., RYF A., SCHULZ, T. (2003): Performances and experiences in terrestrial laserscanning. In: Gruen A, Kahmen H (eds.) *Optical 3-D Measurement Techniques VI*. Available online: <http://www.geometh.ethz.ch/research>. (pristupljeno juna 2010)
- [49] ISO 1101. (2004): *Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out*.
- [50] ISO. (2008) *International Vocabulary of Metrology-Basic and General Concepts and Associated Terms*, 3rd ed.; JCGM 200:2008. Available online:
-

[http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2008](http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008)  
(pristupljeno avgusta 2012).

- [51] KAHLMANN, T. (2007): Range Imaging Metrology: Investigations, Calibration and Development. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- [52] KERSTEN, T., MECHELKE, K., STERNBERG, H., LINDSTAEDT, M. (2008): Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. In: Proceedings of FIG Working Week, Stockholm, Sweden, 14 – 19 June. <http://www.fig.net/pub/fig2008/index.htm>
- [53] KERSTEN, T., STERNBERG, H., MECHELKE, K. (2005): Investigations into the accuracy behaviour of the terrestrial laser scanning system MENSIS GS 100. In: Gruen A, Kahmen H (eds.) Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. I, pp 122 – 131.
- [54] LAM, Y.W. S. (2006): Application of terrestrial laser scanning methodology in geometric tolerances analysis of tunnel structures. Safety in the Underground Space - Proceedings of the ITA-AITES 2006 World Tunnel Congress and 32nd ITA General Assembly. Seoul, Korea.
- [55] LATO, M., DIEDERICHS, M. S., HUTCHINSON, D. J., HARRAP, R. (2009): Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 46, 194–199.
- [56] LEMY, F., YONG, S., SCHULZ, T. (2006): A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology. International Association for Engineering Geology (Paper 482).
- [57] LEONG, P., CARLILE, S. (1998): Methods for spherical data analysis and visualization. *Journal of Neuroscience Methods* 80, 191–200.
- [58] LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. (2005): Digital Terrain Modelling – Principles and Methodology, CRC Press, 323 p. Partly available online: <http://www>. <http://books.google.com/> (pristupljeno oktobra 2012)
- [59] LICHTI, D.D., BRUSTLE, S., Franke, J., (2007): Self calibration and analysis of the surphaser 25HS 3D scanner. In: Proceedings of FIG Working Week, Hong

- Kong SAR, China, 13-17 May. Available online: [http://www.fig.net/pub/fig2007/papers/ts\\_8c/ts08c\\_04\\_lichti\\_etal\\_1325.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2007/papers/ts_8c/ts08c_04_lichti_etal_1325.pdf). (pristupljeno januara 2009)
- [60] LICHTI, D.D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (5), 307–324.
- [61] LICHTI, D.D. (2008): A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63(2), 169-180.
- [62] LICHTI, D.D. (2009): The impact of angle parametrisation on terrestrial laser scanner self-calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (Part 3/W8), 171-176.
- [63] LICHTI, D.D. (2010): Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (1), 93-102.
- [64] LICHTI, D.D., GORDON, S.J., (2004): Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. In: *Proceedings of FIG Working Week, Athens, Greece, 22-27 May*. Available online: [http://www.fig.net/pub/athens/papers/wsa2/WSA2\\_6\\_Lichti\\_Gordon.pdf](http://www.fig.net/pub/athens/papers/wsa2/WSA2_6_Lichti_Gordon.pdf). (pristupljeno septembra 2009)
- [65] LICHTI, D.D., JAMTSO, S. (2006): Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogrammetric Record* 21(114): 141–160. Available online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1477-9730.2006.00367.x/full>. (pristupljeno avgusta 2012)
- [66] LICHTI, D. D., HARVEY, B.R. (2002) The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-Of-Flight Laser Scanner Measurements. In *Proceedings of ISPRS Commission IV. Symposium 2002 on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, Canada, 9–12 July 2002; Volume 34*.
- [67] LICHTI, D.D., LICHT, M.A. (2006): Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *IAPRS Volume 36, (Part 5)*, 155-160.
-

- [68] LICHTI, D.D., SKALOUD, J. (2010): Registration and Calibration. In: VOSSELMAN, G., MAAS H-G, editors: Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, ISBN 978-19044445-87-6. pp. 83-129.
- [69] LICHTI, D. D., STEWART, M., TSAKIRI, M., SNOW, A. (2000a): Benchmark Testing on a Three-Dimensional Laser Scanning System. *Geomatics Res. Aust.* 2000, 72, 1-23.
- [70] LICHTI, D. D., STEWART, M., TSAKIRI, M., SNOW, A. (2000b): Calibration and Testing of a Terrestrial Scanner. *IAPRS 2000*, 33, 485-492.
- [71] LINDENBERGH, R., PFEIFER, N., RABBANI, R. (2005): Accuracy Analysis of the Leica HDS3000 and Feasibility of Tunnel Deformation Monitoring *IAPRS Vol XXXVI, 3/W3, Proceedings of Laserscanning 2005*, Enschede, The Netherlands.
- [72] LINDENBERGH, R., UCHANSKI, L., BUCKSCH, A., GOSLIGA, R. (2009): Structural monitoring of tunnels using terrestrial laser scanning. In *Reports on Geodesy*, 2(87), pp 231-239.
- [73] LO, S. H. (2012): Parallel Delaunay triangulation in three dimensions. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 237-240, pp. 88-106.
- [74] LO, S. H. (2013): Delaunay triangulation of non-uniform point distributions by means of multi-grid insertion. In: *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 63, pp. 8–22.
- [75] LUHMANN, T. (2012): *Photogrammetrie und Laserscanning. Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management*, Heidelberg: H. Wichmann Verlag.
- [76] MÄÄTTÄ, K., KOSTAMOVAARA, J., MYLLYLÄ, R. (1993): Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques. *Appl Opt* 32(27): 5324 – 5347.
- [77] NEBIKER, S., BLEISCH, S., CHRISTEN, M. (2010): Rich point clouds in virtual globes – A new paradigm in city modeling? *Computers, Environment and Urban Systems*. pp. 34(6):508-517.
-

- [78] NEITZEL, F. (2006): Investigation of Axes Errors of Terrestrial Laser Scanners. In: L. Gründig, O. Altan (editors), Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days, March 29th - 31st, Berlin.
- [79] NIEMEIER W., Thomsen S., Schäfer M. (2002): 3D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning. Wichmann Verlag: 15–26.
- [80] NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichsrechnung. 2. überarb. u. erw. Aufl., Lehrbuch, de Gruyter Berlin, ISBN: 978-3-11-019055-7.
- [81] PEJIĆ, M. (2010): Primena tehnologije terestričkog laserskog skeniranja u geodeziji. Tehnika-Naše građevinarstvo, 64/1 (2010), str. 13-18.
- [82] PEROVIĆ, G., (1985): Neglectivity of systematic errors. Sixth International Meeting of A.E.A, Health Econometrics No 2. Rotterdam, 16-17 December 1985, 158-161.
- [83] PEROVIĆ, G. (1985): Račun izravnjanja, Knjiga I - Teorija grešaka merenja, Naučna knjiga, Beograd.
- [84] PEROVIĆ, G. (2005): Metod najmanjih kvadrata, Monografija 1 - Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- [85] PESCI, A., TEZA, G., (2008): Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach. Annals of Geophysics 51 (5/6), 839–848.
- [86] PFEIFER, N. (2002): 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation, PhD Thesis, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technischen Universität Wien.
- [87] R Core Team (2012): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- [88] RABBANI, T. (2007): Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images. PhD thesis, Delft University of Technology.

- [89] REMONDINO, F. (2003): From point cloud to surface: the modeling and visualization problem, Workshop on Visualization and Animation of Reality based 3D Models, Tarasp-Vulpera, Switzerland, February 24-28, 2003.
- [90] REMONDINO, F., Fraser, C. (2006): Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 5), 266-272.
- [91] RESHETYUK, Y. (2006): Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology, Division of Geodesy, Stockholm.
- [92] RESHETYUK, Y. (2006a): Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering. In *Proceedings of FIG Working Week*, Munich, Germany.
- [93] RESHETYUK, Y. (2009): Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy. Royal Institute of Technology, Division of Geodesy. Stockholm.
- [94] RESHETYUK, Y. (2010): A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 445–456.
- [95] RIEGL (2001): Laser Measurement Systems. Laser Mirror Scanner LMS-Z210, Technical Documentation and User's Instructions.
- [96] RIEGL (2006): Reflectivity of various surfaces / materials. Available online: <http://www.riegl.com/distancemeters-/distancemeter-applications-/notes/-e-gi004.htm>. (pristupljeno juna 2011)
- [97] RUIZ, J. C., POLO M. E., RODRÍGUEZ P. G. (2012a): VecStatGraphs2D, The R-project. Dostupno na: <http://cran.es.r-project.org/>
- [98] RUIZ, J. C., POLO M. E., RODRÍGUEZ P. G. (2012b): VecStatGraphs3D, The R-project. Dostupno na: <http://cran.es.r-project.org/>
- [99] IEC (2007): Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements, 2nd edition. International Electrotechnical Commission.

- [100] SANZO, F. (1973): An exact solution of the roto-translation problem. *Photogrammetria*, 29, 203-616.
- [101] SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M. E., PAINTER, T. H., DANGEL, S., MARTONCHIK, J. V. (2006): Reflectance quantities in optical remote sensing - Definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103, 27–42.
- [102] SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., GORTE, B. (2008): Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up, Proc. of the XXI Congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS2008, Vol. XXXVII, Commission V, 3–11 July 2008, Beijing, China, pp 615–620.
- [103] SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M., TEUNISSEN, P. (2009): Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. *Proceedings of ISPRS Works, Paris, France, 1–2 September, 2009; Volume XXXVIII, Part 3/W8*, pp 183-188.
- [104] SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M., TEUNISSEN, P., (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 66, Issue 4*, pp 389–399.
- [105] SCAIONI, M. (2005): Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites. In: *Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH “Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”, Mestre-Venice, Italy, August 22 – 24. Available online: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17/pdf/23.pdf>. (pristupljeno juna 2011)*
- [106] SCHNEIDER, D. (2009): Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (Part 3/W8)*, 177-182.



- [107] SCHULZ, T. (2007): Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- [108] SCHULZ, T., INGENSAND, H. (2004): Influencing variables, precision and accuracy of terrestrial laser scanners. In: Proceedings of INGENO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November 11 –13.
- [109] STAIGER, R. (2005): The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS). In: Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt, April 16 – 21. Available online: <http://www.fig.net/pub/cairo>. (pristupljeno januara 2010)
- [110] TAIT, M., FOX, R., Teskey WF. (2004): A Comparison and Full Error Budget Analysis for Close Range Photogrammetry and 3D Terrestrial Laser Scanning with Rigorous Ground Control in an Industrial Setting. In: Proceedings of INGENO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November 11 – 13. Available online: [http://www.fig.net/pub/bratislava/papers/ts\\_05/ts\\_05\\_tait\\_etal.pdf](http://www.fig.net/pub/bratislava/papers/ts_05/ts_05_tait_etal.pdf). (pristupljeno januara 2010)
- [111] VOEGTLE, T., SCHWAB, I., LANDES, T. (2008): Influences of different materials on the measurement of a Terrestrial Laser Scanner (TLS). Proc. of the XXI Congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS2008, Vol. XXXVII, Commission V, 3–11 July 2008, Beijing, China, 1061–1066, 2008.
- [112] VOISIN, S., FOUFOU, S., TRUCHETET, F., PAGE, D. and ABIDI, M., (2007): Study of ambient light influence for three-dimensional scanners based on structured light. *Optical Engineering* 46(3), pp. 030502–1 030502–3.
- [113] VOSELMAN, G., KLEIN, R. (2010): Visualisation and Structuring of Point Clouds. In: VOSELMAN, G., MAAS H-G, editors: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, ISBN 978-19044445-87-6. pp. 45-81.
- [114] VOSELMAN, G., MAAS H-G, editors. (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, ISBN 978-19044445-87-6.

- [115] WUNDERLICH, T.A. (2006): Der Anwendungsreichtum des terrestrischen Laserscannings. In: Flächenmanagement und Bodenordnung (fub), Vol. 4/2006, pp. 170-174.
- [116] ZHONG, D., LI, M., SONG, L., WANG, G. (2006): Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoengineering applications: an example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China. *Comput Geosci* 32(9):1270–1282.
- [117] ZHOU, K., GONG, M., HUANG, X., GUO, B. (2011): Data-parallel Octree for surface reconstruction, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(5), pp 669–681.
- [118] ZOGG, H.M. (2008): Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

## **Prilozi**

**Prilog 1.**

**Izjava o autorstvu**

Potpisani: mr Marko Pejić, dipl. inž. geod.

broj upisa: \_\_\_\_\_

**Izjavljujem**

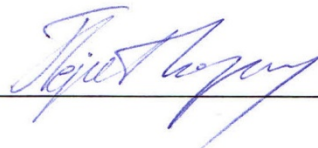
da je doktorska disertacija pod naslovom:

**Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranta**

U Beogradu, 21.01.2013.



---

**Prilog 2.**

**Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije  
doktorskog rada**

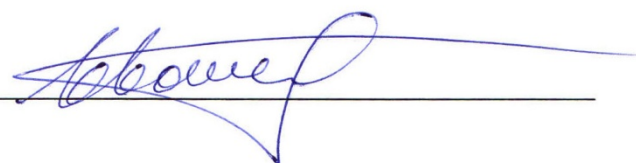
Ime i prezime autora: Marko Pejić

Broj upisa \_\_\_\_\_

Studijski program: Geodezija

Naslov rada: Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog  
skeniranja

Mentor: Prof. dr Branko Božić

Potpisani  \_\_\_\_\_

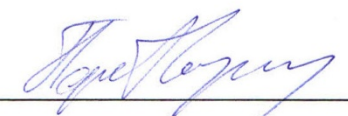
izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranta**

U Beogradu, 21.01.2013.

 \_\_\_\_\_

**Prilog 3.**

**Izjava o korišćenju**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja,**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

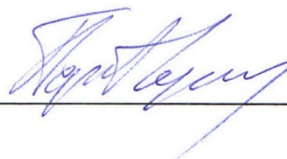
Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

**Potpis doktoranta**

U Beogradu, 21.01.2013.



---

## Spisak slika

Slika 1-1 Oblak tačaka tunela. Bez dodatnih atributa (a.), sa atributom intenziteta povratnog zračenja (b.) i atributom RGB vrednosti (c.).....	2
Slika 1-2 Metode laserskog određivanja rastojanja, oblasti primene, domet i tačnost TLS (Schulz, 2007).....	3
Slika 2-1 Karakteristike metoda merenja u geodetskom inženjerstvu (prema Zogg, 2008).....	19
Slika 2-2 Klasifikacija optičkih trodimenzionalnih mernih sistema .....	19
Slika 2-3 Komponente elektromagnetne energije ( <a href="http://www.geo.mtu.edu">http://www.geo.mtu.edu</a> ).....	20
Slika 2-4 Spektar elektromagnetne energije u prirodi ( <a href="http://www.nrcan.gc.ca">www.nrcan.gc.ca</a> ) .....	22
Slika 2-5 Minimalna širina i ugao divergencije laserskog snopa $\gamma$ (prema Schulz, 2007) .....	23
Slika 2-6 Ekspanzija i konvergencija laserskog snopa (prema Reshetyuk., 2009) .....	23
Slika 2-7 Propusnost ljudskog oka za EM talase (prema Schulz, 2007) .....	25
Slika 2-8 Princip određivanja rastojanja kod „time-of-flight“ daljinomera .....	26
Slika 2-9 Karakteristike laserskog impulsa i princip određivanja rastojanja (prema Beraldin i dr., 2010).....	28
Slika 2-10 AMCW određivanje rastojanja – detekcija fazne razlike (prema Schulz, 2007).....	30
Slika 2-11 Gore: Tipovi uređaja za divergenciju laserskog snopa kod TLS. Dole: Odgovarajući tipovi vidnog polja TLS (prema Reshetyuk, 2009) .....	33
Slika 3-1 Princip skeniranja i rezultati merenja kod terestričkog laserskog skeniranja .	37
Slika 3-2 Odnos KS skenera ( $S_1$ , $S_2$ ili $S_3$ ) i KS kontrolne mreže G (Eling, 2009).....	38
Slika 3-3 Transformacija koordinata (tri translacije $T_x$ , $T_y$ , $T_z$ i tri rotacije $\omega$ , $\varphi$ , $\varepsilon$ ).....	39
Slika 3-4 Detaljno skeniranje signala i pozicija referentnog položaja .....	45

---

Slika 3-5 Primer registracije identifikacijom karakterističnih mesta na nestabilnoj kosini „Letnja pozornica“ u Beogradu .....	46
Slika 3-6 Indirektno georeferenciranje u dva koraka (prema Reshetyuk, 2009).....	53
Slika 3-7 Indirektno georeferenciranje u jednom koraku na osnovu tačaka kontrolne geodetske mreže (prema Reshetyuk, 2009.).....	54
Slika 4-1 Adiciona greška TLS daljinomera. Dvodimenzionalno nepoklapanje mehaničke nulte pozicije daljinomera TLS i elektrooptičke „nule“ (Riegl, 2001) .....	65
Slika 4-2 Efekat izmešanih piksela podataka skeniranog cilindra i zida na rastojanju manjem od polovine dužine impulsa $l_p$ kod impulsnog TLS - Riegl LMS-Z210. (prema Lichti i Skaloud, 2010).....	67
Slika 4-3 Efekat izmešanih piksela. Sfera skenirana ispred zida. Izmešani pikseli su ispred i iza sfere kao rezultat primene fazne AMCW tehnike merenja rastojanja (prema Schulz, 2007).....	68
Slika 4-4 Uticaj veličine obima laserskog zraka na uglovno odstupanje. Oblak tačaka skenirane vertikalne linije i ocenjena MNK prava. (a) Leica HDS 2500 - obim zraka: 6 mm/50 m); (b) Riegl LMS-Z210 - obim zraka: 150 mm/50 m (Lichti i Jamtsho, 2006)70	
Slika 4-5 Glavne ose TLS (Lichti, 2010) .....	71
Slika 4-6 Dvodimenzionalne projekcije položaja glavnih osa TLS. (a) pogled odozgo po z-osi; (b) pogled levo po y-osi i (c) pogled napred po x-osi (Neitzel, 2007) .....	72
Slika 4-7 Dvodimenzionalna projekcija najznačajnijih grešaka usled uticaja položaja glavnih osa TLS. (a) greška ekscentriciteta kolimacione ose $e$ ; (b) kolimaciona greška $c$ i greška vertikalnog indeksa $i$ (Neitzel, 2007).....	74
Slika 4-8 Preciznost modeliranja ravni na osnovu podataka skeniranja u uslovima noći i dana. TLS Trimble GX. Zeleni laser. (Voegtle i dr., 2008) .....	78
Slika 4-9 Zavisnost preciznosti modeliranja ravni na osnovu podataka skeniranja objekta različitih nijansi sivog tona. TLS Trimble GX, zeleni laser - $\lambda=532$ nm. (Voegtle i dr., 2008) .....	82

---



Slika 4-10 Rasipanje i apsorpcija laserskog zraka. Svetla i glatka površ (a.). Tamna i glatka površ (b.). Svetla i hrapava površ (c.). Tamna i hrapava površ (d.). (Bucksch i dr., 2007).....	83
Slika 4-11 Doprinos upadnog ugla laserskog zraka nesigurnosti laserskog određivanja rastojanja (Soudarissanane i dr., 2009).....	84
Slika 5-1 Reziduali rastojanja $v_p$ u funkciji horizontalnog pravca $\theta$ . Gore: nekorigovani i dole: korigovani. Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007).....	102
Slika 5-2 Reziduali horizontalnog pravca $v_\theta$ u funkciji od vrednosti $\theta$ . Gore: bez implementirane korekcije $B_l$ i dole: sa korekcijom $B_l$ . Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007).....	104
Slika 5-3 Reziduali vertikalnog pravca $v_\alpha$ u funkciji od vrednosti horizontalnog pravca $\theta$ . Gore: bez implementirane korekcije $C_6$ i $C_7$ i dole: sa korekcijom $C_6$ i $C_7$ . Rezultati kalibracije skenera Faro880 (Lichti, 2007).....	105
Slika 5-4 Laboratorijska konfiguracija za kalibraciju komponente rastojanje TLS (Schulz, 2007).....	111
Slika 6-1 Razlike predstavljanja objekta u 2D, 2.5D i 3D prostoru (Cai, 2003).....	112
Slika 6-2 Parametarska rekonstrukcija realnog objekta .....	115
Slika 6-3 Parametri implicitnog oblika modela ravni (Rabbani, 2007).....	120
Slika 6-4 Parametri implicitnog oblika modela sfere (Rabbani, 2007).....	120
Slika 6-5 Parametri implicitnog oblika modela cilindra (Rabbani, 2007).....	121
Slika 6-6 Poređenje 3D digitalnih modela terena mesta brane. (a) TIN i (b) NURBS 3D model (Zhong i dr., 2006).....	122
Slika 6-7 CSG modeliranje primenom Bulove algebre ( <a href="http://www.sensysmag.com">http://www.sensysmag.com</a> )	123
Slika 6-8 Zapreminsko 3D modeliranje pomoću $k$ -D hijerarhijske strukture (Gress i Klein, 2004).....	124
Slika 6-9 Prikaz 3D modela. Gore: na osnovu oktanske hijerarhijske strukture i dole: na osnovu $k$ -D hijerarhijske strukture (Gress i Klein, 2004).....	125

Slika 7-1 Mreža skenerskih signala i geodetskih stubova u Metrološkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu .....	129
Slika 7-2 Leica crno-bela ravna markica i njen model u vidu oblaka tačaka .....	130
Slika 7-3 Raspored geodetskih stubova u Metrološkoj laboratoriji .....	131
Slika 7-4 Distribucija komponenti $X$ i $Z$ vektora grešaka na zidu laboratorije. Skeniranje sa stuba 4 .....	139
Slika 7-5 Grafici orijentacije i vrednosti modula grešaka. Pojedinačni vektori u plavoj i srednji vektor u crvenoj boji. 3D grafik (a), grafik u $XY$ -projekciji (b), $XZ$ -projekciji (c) i $YZ$ -projekciji (d) .....	143
Slika 7-6 Gustina tačaka kao funkcija rastojanja do objekta i uglovne rezolucije skeniranja. Osa $x$ predstavlja rastojanje od instrumenta, a $N$ -osa logaritamsku skalu broja tačaka po kvadratnom centimetru .....	149
Slika 7-7 Efekat povećanja vrednosti upadnog ugla laserskog zraka na nesigurnost određivanja rastojanja, pri koeficijentu zanemarljivosti $\alpha = 0.05$ .....	151
Slika 7-8 Fotografija unutrašnjosti železničkog tunela Budoš, dužine 1.26 km .....	157
Slika 7-9 Pozicija kontrolnih tačaka ( $S_i$ , $M$ i $K$ ) i stanica skenera $S_c$ na primeru dela tunela br. 1. Prisilno centrisanje TS na tačkama $S_{t1}$ , $S_{t2}$ , ..., $S_{tn}$ , skenerski signali na oblozi tunela $M_1$ , $M_2$ , ..., $M_n$ i kontrolne tačke na zavrtnjima šina $K_1$ , $K_2$ , ..., $K_n$ .....	160
Slika 7-10 Oblak tačaka tunela sa detektovanim Riegl retro-reflektivnim signalima. Vezne tačke na podu tunela i kontrolne tačke na zidu tunela .....	164
Slika 7-11 Histogram frekvencija vrednosti reziduala. Efekat multiplikacije grešaka registracije korišćenjem standardne metode indirektnog georeferenciranja u dva koraka. Pojedine vrednosti reziduala su veće od 60 cm .....	168
Slika 7-12 Histogram frekvencija vrednosti reziduala arbitrarnog georeferenciranja. Efekat kontrolisanih grešaka registracije. 97.7 % uzorka reziduala pripadaju teorijskom $1\sigma$ (2cm) intervalu poverenja .....	168
Slika 7-13 Dodatna kontrola georeferenciranja. Snimljene pozicije šina i signalisane tačke kontrolne geodetske mreže su kontrolisane vizuelno, nezavisno od modela prostorne transformacije .....	169

---

Slika 7-14 3D model tunela. Optimizovana 3D mreža trouglova na osnovu podataka TLS .....	170
Slika 7-15 Loša geometrija skeniranih šina zahvaljujući šumu u podacima usled efekta izmešanih piksela. Pogrešna pozicija tačaka sa obe strane šine (a) i 3D model pozicije šina (b) .....	170
Slika 7-16 3D model i model kompozicije voza. (a) Modelirana 3D površ tunela, (b) prošireni model kompozicije voza, (c) lokacije detektovanih kontakata i (d) poprečni profili .....	171
Slika 7-17 Primer poprečnog profila. Geometrija i zazori tunela i slobodnog profila tipa A i C. Pozicija i veličina prodora slobodnog profila kroz oblogu tunela .....	172

## Spisak tabela

Tabela 2-1 Karakteristike pojedinih komercijalnih TLS koji se koriste u inženjerskoj geodeziji (novembar 2011).....	15
Tabela 2-2 Spektar EM zračenja .....	21
Tabela 2-3 Klasifikacija lasera u skladu sa IEC 60825-1 standardom .....	25
Tabela 3-1 Neke od vrsta tipskih skenerskih signala .....	44
Tabela 4-1 Reflektivnost različitih materijala pri $\lambda=0,9\mu\text{m}$ - blisko IC područje (Riegl, 2006).....	81
Tabela 6-1 Krive i površi u pravouglom koordinatnom sistemu (Ahn, 2004) .....	115
Tabela 7-1 Ocena tačnosti rezultata MNK izravnjanja kontrolne laboratorijske mreže	134
Tabela 7-2 Najvažnije deklarirane karakteristike TLS Leica HDS3000.....	135
Tabela 7-3 Pokazatelji preciznosti određivanja pojedinačnog centra markice.....	136
Tabela 7-4 Broj datih kontrolnih tačaka ( $K$ ) i tačaka za verifikaciju ( $V$ ) transformacionog modela .....	137
Tabela 7-5 Standardne greške vektora reziduala – modul standardnog vektora grešaka .....	137
Tabela 7-6 Testiranje uzoraka grešaka na saglasnost sa teorijskom normalnom i teorijskom eksponencijalnom raspodelom - skeniranje sa stuba 1 .....	138
Tabela 7-7 Uticaj nehorizontalnosti TLS na grešku centrisanja.....	140
Tabela 7-8 Pokazatelji tačnosti podataka skeniranja na osnovu statističke analize dužina .....	141
Tabela 7-9 Testiranje jednakosti ocena varijansi dobijenih transformacijom podataka skeniranja u KS kontrolne mreže i analizom dužina između markica .....	142
Tabela 7-10 Elementi modula i sferne orijentacije vektora grešaka za uzorak podataka sa stuba 4 .....	142

Tabela 7-11 <i>A priori</i> pokazatelji preciznosti kontrolne geodetske mreže tunela .....	160
Tabela 7-12 Pokazatelji unutrašnje pouzdanosti kontrolne geodetske mreže tunela ...	162
Tabela 7-13 <i>A posteriori</i> pokazatelji preciznosti kontrolne geodetske mreže tunela Budoš.....	163
Tabela 7-14 Pokazatelji tačnosti registrovanih susednih scena u tunelu Budoš.....	165
Tabela 7-15 Rezultati arbitrarnog georeferenciranja u tunelu Budoš.....	167

---

## Biografija autora

Marko Pejić je rođen 10.01.1977. godine u Beogradu, Republika Srbija, od majke Miline i oca Milana. Završio je osnovnu školu 1991. godine, a srednju Elektro-mašinsku školu 1995. godine. U toku osnovnog i srednjoškolskog obrazovanja bio je vrlo dobar učenik.

Na Vojnotehničku akademiju u Beogradu, Smer geodezije, upisao se 1995. godine, a diplomirao je 2000. godine sa prosečnom ocenom 8.06, čime je stekao zvanje diplomirani inženjer geodezije. Odbranio je diplomski rad ocenom 10. Poslediplomske studije je upisao 2001. godine na Vojnoj akademiji. Položio je 7 ispita uz prosečnu ocenu 9.57. Akademska zvanje magistra tehničkih nauka stekao je u martu 2007. godine.

Na Odseku za geodeziju i geoinformatiku Građevinskog fakulteta u Beogradu zaposlen je od 2007. godine. Asistent je na predmetima Teorija grešaka geodetskih merenja, Račun izravnjanja osnovni kurs, Račun izravnjanja napredni kurs i Praktična nastava iz geodezije. Od oktobra 2005. do decembra 2007. godine bio je zaposlen na Vojnoj akademiji na Katedri prirodno matematičkih nauka, Odsek za topografiju i geodeziju. Izvodio je nastavu sa studentima Vojne akademije iz predmeta Geodezija i Topografija. Od juna 2002. do oktobra 2005. godine radio je kao asistent-pripravnik na Geodetskom smeru u Vojnoj akademiji. Izvodio je nastavu iz predmeta Topografija i vežbe iz predmeta Račun izravnjanja 1 i 2. Aktivno je učestvovao u pripremi i realizaciji nastavnog procesa, stručnih praksi i izradi diplomskih radova studenata. U periodu oktobar 2000 – juni 2002. bio je zaposlen u Vojnogeografskom institutu na mestu – referent za naučnoistraživački rad.

Objavljeni radovi, naučna aktivnost kao i oblast interesovanja, usmereni su na probleme projektovanja, obrade i analize geodetskih merenja i primene savremenih tehnologija u geodetskom inženjerstvu. Do sada je objavio preko 30 stručnih i naučnoistraživačkih radova. Učestvovao je na više nacionalnih i međunarodnih naučnih konferencija i na dva projekta tehnološkog razvoja.

Oženjen je i ima dva sina.