

Primljeno / Received: 15.09.2017.
Prihvaćeno / Accepted: 26.10.2017.

UDK 681.783:528.5-187
Pregledni naučni rad / Review article

KALIBRACIJA TERESTRIČKIH LASERSKIH SKENERA

CALIBRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNERS

Mirnes Bojić, Dušan Kogoj

SAŽETAK

Terestričko lasersko skeniranje je vrlo moćna i vrlo napredna tehnika geodetskog mjerenja koja je u posljednje vrijeme doživjela veliki progres u svom razvoju i usavršavanju. Da bi rezultati laserskog skeniranja bili tačni i pouzdani, pored niza drugih uslova neophodno je imati kalibrisan laserski skener. Kalibracija laserskog skenera veoma je bitan element cijelog postupka laserskog skeniranja i neophodno joj je posvetiti posebnu pažnju. Ovim radom autori su pokušali opisati različite postupke kalibracije terestričkih laserskih skenera.

Ključne riječi: *terestrički laserski skeneri, kalibracija TLS-a, sistemska kalibracija TLS-a, kalibracija komponenti TLS-a*

ABSTRACT

Terrestrial laser scanning is very powerful and advanced geodetic surveying technique, which has lately made significant progress in its development and improvement. For results of laser scanning to be accurate and reliable, beside the list of other conditions, it is necessary to have calibrated laser scanner. Calibration of laser scanner is very important element of the whole laser scanning process and it is necessary to give this element special attention. In this paper authors try to describe different procedures of calibration of terrestrial laser scanners.

Keywords: *terrestrial laser scanner, calibration of TLS, self-calibration of TLS, components calibration of TLS*

1 UVOD

Lasersko skeniranje je geodetska metoda mjerenja nekog objekta ili područja koja, primjenom laserske tehnologije, omogućava prikupljanje velikog broja mjerenih podataka o objektu u vrlo kratkom vremenu i to bez neposrednog kontakta sa objektom skeniranja.

Terestričko lasersko skeniranje (lasersko skeniranje sa Zemlje), odnosno lasersko skeniranje općenito, relativno je nova tehnologija geodetskog mjerenja, koja se pojavila krajem devedesetih godina prošlog vijeka. Od pojave prvih terestričkih laserskih skenera do danas, došlo je do značajnog tehničkog i tehnološkog napretka u ovoj oblasti, koji su omogućili optičko-elektronski senzori visokih performansi i efikasan softver sposoban za obradu velike količine podataka.

U posljednjih nekoliko godina, tehnologija terestričkog laserskog skeniranja doživjela je velik i brz napredak, a glavni pravci razvoja imaju za cilj integraciju raznih senzora, koji će pružiti sveobuhvatan i kvalitetan snimak postojećeg stanja. U isto vrijeme radi se na razvijanju procedura automatizacije obrade podataka prikupljenih raznim sensorima, odnosno razvoj softvera za obrada podataka laserskog skeniranja.

Velika pouzdanost i tačnost terestričkih laserskih skenera, kao i brzina dobijanja konačnog proizvoda (3D prikaza snimljenog područja) razlog su sve većoj primjeni tehnologije laserskog skeniranja u raznim oblastima počevši od mjerenja građevinskih objekata, mjerenja deformacija na branama, topografskim mjerenjima, industrijskim mjerenjima, arheološkim mjerenjima, mjerenjima u geologiji, mjerenjima kulturnih objekata, mjerenjima u forenzici (3D modeli mjesta nesreće), pa čak i do primjene u oblasti robotike.

2 TERESTRIČKO LASERSKO SKENIRANJE

2.1 Osnovni principi

Današnji terestrički laserski skeneri su elektro-optički instrumenti koji su najslabiji tahimetrima, mjere koordinate točaka u prozoru snimanja, što se postiže mjerenjem dužine r , mjerenjem horizontalnog ugla φ i mjerenjem vertikalnog ugla θ , što ujedno predstavlja veliku sličnost sa totalnim stanicama.

Koordinate svake izmjerene tačke u koordinatnom sistemu laserskog skenera dobiju se prelazom sa sfernog na Kartezijev koordinatni sistem (Gordon, 2008):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\theta \\ \sin\varphi\cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Rezultat terestričkog laserskog skeniranja je oblak točaka - skup prostornih 3D tačaka. Osim koordinata tačaka terestrički laserski skeneri snimaju još intenzitet povratnog signala, koji se često naziva i četvrtom dimenzijom snimljene tačke. Intenzitet je vrlo koristan za vizualizaciju, posebno u gustim i složenim oblacima tačaka.

2.2 Historijski razvoj

Od pojave prvih terestričkih laserskih skenera na tržištu, uočljiva su ogromna poboljšanja u pogledu brzine mjerenja, preciznost i opće upotrebljivosti. U isto vrijeme sistem terestričkih laserskih skenera je postao manji, lakši za rukovanje i jeftiniji. Iako su postojeći sistemi veoma dobro projektovani i posjeduju dobra tehnička rješenja, napredak u razvoju terestričkih laserskih skenera sigurno će se nastaviti i u narednom periodu.

Razvoj terestričkih laserskih skenera može se grubo svrstati u četiri faze ili generacije (Staiger, 2011):

Prva generacija (od 1997): instrumenti su glomazni, izgledaju kao prototipovi, čuvanje podataka i napajanje su vanjski. Frekvencija mjerenja je između 1 i 5 kHz na dometu od 50 m do 200 m. Svi sistemi su dužine mjerili impulsnom metodom mjerenja dužina.

Druga generacija (od 2002): skladištenje podataka i napajanje su i dalje izvan instrumenta, ali sistemi postaju brži. Pojavljuju se prvi instrumenti sa faznom metodom mjerenja dužina.

Treća generacija (od 2007): proizvođači su počeli integraciju pohrane podataka i napajanja u instrument. Domet i brzina mjerenja su poboljšani. Digitalna slika je sve više u upotrebi u kombinaciji s oblakom tačaka. Sistem za prisilno centrisanje instrumenta i meta, te korištenje GNSS prijemnika pokazuju bližu saradnju sa tradicionalnim metodama mjerenja.

Četvrta generacije (od 2009): skladištenje podataka i napajanje su u potpunosti integrisani. Kamera je također potpuno integrisan i neizostavan dio sistema. Pored toga, performanse u smislu brzine mjerenja i dometa su ponovo poboljšani.

Posljednjih godina terestrički laserski skeneri također bilježe napredak u razvoju i to uglavnom u vidu integrisanja više senzora u terestrički laserski skener (GNSS, visoko rezolutne kamere, mjerenje intenziteta), čime se povećava kvalitet krajnjeg proizvoda i upotrebljivost sistema.

2.3 Vrste terestričkih laserskih skenera

Obzirom da ne postoji jedan univerzalni skener s kojim bi se mogla izvršiti sva mjerenja, tako postoje i različite vrste terestričkih laserskih skenera. Neki skeneri su bolji za zatvorene prostore i mjerenje srednjih dužina, neki su bolji za otvorene prostore i mogu mjeriti velike dužine, neki pak mogu mjeriti samo kratke dužine, neki imaju ograničen prozor snimanja, dok neki imaju veći prozor snimanja.

Terestrički laserski skeneri mogu se grupisati prema više aspekata i to prema:

- metodi mjerenja dužina (impulsni, fazni, triangulacioni i impulsno-fazni skeneri),
- vidnom polju (panoramski, hibridni, kamera skeneri i totalne stanice skeneri),
- dometu (skeneri kratkog, srednjeg i velikog dometa) i
- mobilnosti (statički i kinematički skeneri).

3 TEHNOLOGIJA MJERENJA TLS-om

3.1 Metode mjerenja dužina

Jedan od najvažnijih elemenata terestričkih laserskih skenera je sistem za mjerenje dužina. Kod terestričkih laserskih skenera u primjeni je više metoda mjerenja dužina.

Impulsna metoda mjerenja dužina (engl. *time-of-flight*, TOF) je najčešće korištena metoda mjerenja dužina kod terestričkih laserskih skenera. Naime, terestrički laserski skener mjeri vremensku razliku između emitovanja signal i prijema odbijenog signala, i na osnovu izmjerene vremenske razlike i brzine svjetlosti odredi dužinu.

Sve dok napredna tehnologija nije omogućila direktno mjerenje veoma malih vremenskih intervala koji su potrebni za mjerenje dužine impulsnom metodom, u geodeziji se uglavnom koristila fazna metoda mjerenja dužina. Osnovni princip fazne metode je određivanje fazne razlike između odaslanog i primljenog signala, a sve to kako bi se odredila dužina između terestričkog laserskog skenera i objekata skeniranja. Ograničenje kod ove metode za upotrebu kod laserskih skenera je, da dužina teoretski ne može biti duža od polovine valne dužine modulisanog elektromagnetnog tala (VanRee, 2006). Domet ovih skenera je zbog toga obično manji od 100 m.

Za najtačnija mjerenja kod laserskog skeniranja na veoma male udaljenosti, koristi se metoda triangulacije, gdje se dužina mjeri indirektno. Optika i elektronika definišu pravougli trougao (Joeckel, Stober i Huep, 2008). Promjena udaljenosti se odredi na osnovu konstantne baze i mjerene promjene ugla, koja se odredi na osnovu odstupanja na CCD senzoru. Dužine mjerene na ovaj način su za geodetski način razmišljanja veoma male od 1 mm pa do nekoliko dm.

Svaka od navedenih metoda mjerenja dužina kod terestričkih laserskih skenera ima svoje prednosti i nedostatke. Ono što je u novije vrijeme popularno, i što predstavlja jedan od pravaca razvoja terestričkog laserskog skeniranja jeste kombinacija impulsne i fazne metode mjerenja dužina. Leica Geosystems upotrebljava ovakvu naprednu tehnologiju mjerenja zvanu WFD (engl. *Wave Form Digitizer*) (Maar i Zogg, 2014). Ovakva kombinacija primjenjuje najbolje osobine svake metode, a kombinovana metoda nudi kraće vrijeme mjerenja, manju divergenciju laserskog zraka i veoma visoku tačnost mjerenja dužina. Također, postoji mogućnost kombinovanja metoda, odnosno mjerenje onom metodom koja bolje odgovara trenutnim uslovima.

3.2 Metode mjerenja otklona laserske zrake – određivanje horizontalnog i vertikalnog pravca

Veoma važan dio konstrukcije terestričkog laserskog skanera je rješenje usmjeravanja laserske zrake. Kako bi se moglo postići skeniranje, odnosno skeniranje željenog objekta mjerenjem velikog broja točaka u 3D koordinatnom sistemu, potrebno je uz mjerenje dužine dovoljno tačno izmjeriti horizontalni i vertikalni ugao prema njima.

Glavni element uređaja za otklon laserskih zraka su rotirajuća ili oscilirajuća ogledala, koja omogućavaju slanje laserske zrake u vertikalnom, a ponekad i u horizontalnom smjeru.

Prva grupa skanera tzv. hibridni skeneri temelje se na okretanju jednog ogledala dok je pomak u horizontalnom smislu izveden okretanjem dijela instrumenta. Rotirajuće ogledalo je rotirajući optički elementi sa tri ili više reflektirajućih strana, najčešće se koriste poligonske ogledalne prizme, gdje su ogledalne strane paralelne, jednako udaljene i odmaknute od glavne rotacijske osi (Joeckel i dr., 2008). Ovaj tip poligonskih ogledala je najisplativiji za proizvođače, a obično je napravljen od aluminija, stakla, plastike ili berilija.

Druga grupa skanera tzv. kamera skeneri temelje se na usmjeravanju zrake pomoću dva ogledala koja se mogu okretati. Prvo ogledalo usmjerava zraku u vertikalnoj ravnini i okreće se manjom brzinom. Za svaki postav prvog, drugo ogledalo prelazi cijeli zadani pojas koji treba izmjeriti te određuje položaj zrake u trenutnoj horizontalnoj ravnini (Joeckel i dr., 2008). Pomak jednog i drugog ogledala moguće je unaprijed odrediti, a ograničen je rezolucijom odnosno najmanjim pomakom sistema sa servo motorima koji ih okreću. Kako bi se omogućilo precizno pozicioniranje ogledala, ono je spojeno na postolje koje je fiksirano na osovinu skenera. Ogledala su uobičajeno napravljena od aluminija, titana, legura čelika i berilija.

Treća grupa skanera tzv. sferni (panoramski) skeneri temelje se na usmjeravanju zrake pomoću jednog ogledala koje se rotira na cilindru. Ogledalo usmjerava zraku u vertikalnoj ravnini i okreće se velikom brzinom. Horizontalni pomak omogućen je rotacijom instrumenta oko vertikalne ose (Joeckel i dr., 2008). Prednost ovakvog rješenja je veliko područje koje se može snimiti jednim stajalištem instrumenta. Zbog mogućnosti snimanja većeg područja u jednom postavu, instrumenti temeljeni na ovakvom rješenju su pogodni za mjerenje unutrašnjosti građevina.

4 KALIBRACIJA TLS-a

Terestričko lasersko skeniranje je, kao i sve druge geodetske tehnike mjerenje, opterećeno uticajima različitih grešaka. Obzirom da ne postoji univerzalni terestrički laserski skener, te obzirom da građa terestričkog laserskog skenera isključivo zavisi od proizvođače istog i da je jako kompleksna, sa mnogo elektronskih i mehaničkih komponenti, to je i veoma teško opisati greške sistema terestričkog laserskog skeniranja. Različiti autori prave različite podjele grešaka prema porijeklu, pa tako greške sistema terestričkog laserskog skeniranja mogu se grupisati u nekoliko osnovnih grupa.

Zbog veoma visokog nivoa automatiziranosti terestričkih laserskih skenera ljudske greške su minimalne i ne uzimaju se u obzir i nisu uključene u klasifikaciju grešaka.

Instrumentalne greške su greške koje su vezane uz konstrukciju laserskog skenera i njegove tehničke karakteristike. Instrumentalne greške kod terestričkih laserskih skenera su: greške mjerenja dužina, greške opažanja horizontalnih i vertikalnih pravaca, greške sinhronizacije senzora, greške glavnih osa terestričkog laserskog skenera.

Instrumentalne greške, također imaju i slučajni i sistematski uticaj na tačnost mjerenja. Kao i kod svih drugih geodetskih instrumenata i mjernih tehnika, sistematske greške su prisutne i kod skeniranja terestričkim laserskim skenerom. One se uglavnom fizički mogu interpretirati, odnosno prisutne su uslijed nesavršenosti u izradi i postojanju različitih poremećajnih uticaja tokom rada terestričkog laserskog skenera.

Pored ostalih i **greške vezane uz karakteristike objekta skeniranja** imaju značajan uticaj na tačnost. Uticaji ovih grešaka generalno se mogu podijeliti u dvije grupe. Prvu grupu čine prostorni faktori, odnosno veličina objekta i njegova orijentacija u prostoru. Ovi faktori utiču na planiranje skeniranja i izbor lokacija stajališta. Drugu grupu čine faktori fizičkog ograničenja zakona refleksije (upadni ugao laserske zrake) i optička svojstva površine objekta (električna i magnetna provodljivost materijala objekta, boja, hrapavost, te temperatura i vlažnost površine objekta).

Greške registracije i georeferensiranja obuhvaćaju greške metodologije registracije tačaka i greške određivanja transformacionih parametara indirektno i direktno metode transformacije oblaka tačaka.

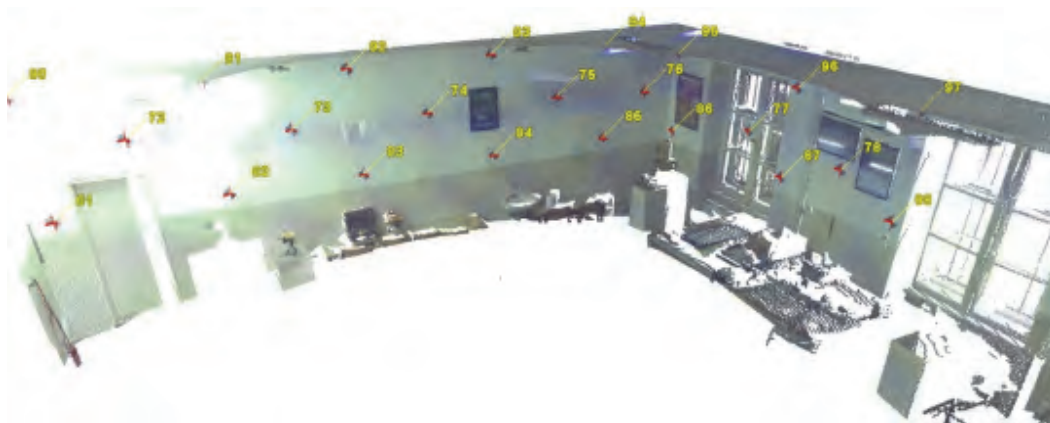
Uslovi okoliša snimanja, kao što su temperatura, vlažnost, pritisak, osvjetljenost, različite vibracije veoma su važan faktor kod mjerenja terestričkim laserskim skenerima i doprinose pojavi grešaka koje se svrstavaju u grupu **greške vezane uz uticaj sredine**.

Kao i kod svih drugih geodetskih instrumenata, kod terestričkih laserskih skenera veoma važno pitanje je kalibracija instrumenta. Najčešće, kalibracija se bavi određivanjem instrumentalnih grešaka, odnosno "razlike između stvarnog i idealnog instrumenta" zbog mehaničke nesavršenosti (Schulz, 2007).

Kalibracija terestričkih laserskih skenera može se izvršiti sistemskom kalibracijom ili samokalibracijom i kalibracijom komponenti.

4.2 Sistemska kalibracija

Terestrički laserski skeneri ne mogu se rektifikovati korištenjem standardnih postupaka, primjenjivih kod klasičnih geodetskih instrumenata. Prisustvo i veličina sistematskih grešaka mogu biti određeni putem postupaka sistemske kalibracije (samokalibracije) terestričkog laserskog skenera preko visoko redundantnih opažanja i mreže skenerskih meta (Pejić, 2013).



Slika 1. Mreža skenerskih meta (Pejić, 2013)

Modeliranje mreže skenerskih meta (Slika 1) podrazumijeva postavljanje većeg broja tipskih skenerskih meta koje se detektuju sa više skenerskih stajališta pri različitim orijentacijama skenera.

Primjenom metode najmanjih kvadrata izravnane se vrši nad svim opažanjima, u više scena simultano, kako bi se odredile koordinate meta u sistemu kontrolne geodetske mreže, parametri transformacije svake scene i svi dodatni parametri, odnosno koeficijenti modela sistematskih grešaka.

Tako osnovni model opažanja dobije oblik (Gordon, 2008):

$$s_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta s, \quad (2)$$

$$\xi_{ij} = \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) + \Delta \xi, \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = \arctan\left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) + \Delta\alpha, \quad (4)$$

ili u matičnoj formi:

$$\begin{bmatrix} A_{se} & A_{sa} & A_{so} \\ A_{\xi e} & A_{\xi a} & A_{\xi o} \\ A_{ae} & A_{aa} & A_{ao} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_e \\ \hat{\delta}_a \\ \hat{\delta}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_s \\ w_\xi \\ w_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_s \\ \hat{v}_\xi \\ \hat{v}_\alpha \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$A_{xy} \cdot \delta_y + w_x = v_x, \quad (6)$$

gdje su:

A_{xy} – dizajn matrica opažanja,

x, δ_y – vektor priraštaja približnih vrijednosti parametara grupe y , w_x i

v_x – vektori slobodnih članova grupe opažanja x .

U ovaj model mogu biti uvedene i dodatne promjenljive ili uslovi među nepoznatim (inklinacija, etalonska dužina i sl.).

Ukoliko se datum geodetske mreže realizuje isključivo preko skenerskih meta funkcionalni oblik modela uslova glasi:

$$[0 \quad 0 \quad G_0^T] \begin{bmatrix} \hat{\delta}_e \\ \hat{\delta}_a \\ \hat{\delta}_o \end{bmatrix} = 0, \quad (7)$$

gdje je G_0 standardna analitička forma matrice datumskih uslova.

Težine opažanja imaju standardnu formu, i definišu se na osnovu karakteristika terestričkog laserskog skenera:

$$P = \begin{pmatrix} P_s & 0 & 0 \\ 0 & P_{\theta\xi} & 0 \\ 0 & 0 & P_\alpha \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Upotrebom Lagranžovih multiplikatora, normalna jednačina glasi:

$$\begin{bmatrix}
 \begin{pmatrix} A_{se}^T P_s A_{se} \\ +A_{\xi e}^T P_{\xi} A_{\xi e} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha e} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{se}^T P_s A_{sa} \\ +A_{\xi e}^T P_{\xi} A_{\xi a} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha a} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{se}^T P_s A_{so} \\ +A_{\xi e}^T P_{\xi} A_{\xi o} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha o} \end{pmatrix} & 0 \\
 \begin{pmatrix} A_{sa}^T P_s A_{sa} \\ +A_{\xi a}^T P_{\xi} A_{\xi a} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha a} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{sa}^T P_s A_{so} \\ +A_{\xi a}^T P_{\xi} A_{\xi o} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha o} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} A_{so}^T P_s A_{so} \\ +A_{\xi o}^T P_{\xi} A_{\xi o} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} A_{\alpha o} \end{pmatrix} & 0 \\
 \text{simetrično} & & & G_0 \\
 & & & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \delta_e \\
 \delta_a \\
 \delta_o \\
 \hat{k}_c
 \end{bmatrix}
 = \begin{bmatrix}
 \begin{pmatrix} A_{se}^T P_s w_s \\ +A_{\xi e}^T P_{\xi} w_{\xi} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} w_{\alpha} \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} A_{sa}^T P_s w_s \\ +A_{\theta a}^T P_{\theta} w_{\theta} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} w_{\alpha} \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} A_{so}^T P_s w_s \\ +A_{\xi o}^T P_{\xi} w_{\xi} \\ +A_{\alpha a}^T P_{\alpha} w_{\alpha} \end{pmatrix} \\
 0
 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

gdje je k_c vektor Lagranžovih multiplikatora.

Da bi sistemska kalibracije terestričkog laserskog skenera bila uspješna potrebno je ispuniti nekoliko uslova. Dizajn mreže skenerskih meta jedna je od najbitnijih stavki kod sistemske kalibracije terestričkog laserskog skenera. Naime, neophodno je osigurati dovoljan broj opažanja ispred i iza skenera kako bi se mogle pouzdano i dovoljno dobro odrediti kolimacije instrumenta. Također, veliki raspon vrijednosti vertikalnih uglova je neophodan kako bi se odredila greška neupravnosti obrtne ose ogledala, pa je potrebno projektovati raspored markica na plafonu i podu.

Minimalno dva stajališta i dovoljan broj opažanja dužina su neophodni kako bi se odredila adiciona konstanta skenera. Za određivanje ciklične greška dužina kod faznih skenera neophodno je postojanje različitih dužina. Također se preporučuje da se sa istog stajališta skeniraju međusobno ortogonalne scene kako bi se dekorelisali parametri spoljašnje orijentacije i dodatni parametri.

Sistemska kalibracija terestričkog laserskog skenera ima praktičnog smisla samo onda kada se korekcije osnovnih opažanja mogu primijeniti na „sirov“ oblak tačaka, odnosno da parametri kalibracije budu primijenjeni na sirova mjerenja, a sve u cilju izbjegavanja problema memorijske ograničenosti programerskih alata.

Većina današnjih terestričkih laserskih skenera koji su u komercijalnoj upotrebi, ima mogućnost prethodne sistemske kalibracije i primjene parametara kalibracije na sirova mjerenja.

4.3 Kalibracija komponenti TLS-a

Postupak kalibracije komponenti terestričkog laserskog skenera analogan je postupcima kalibracije klasičnih geodetskih instrumenata – daljinomjera i teodolita odnosno tahimetara. Kalibracija komponenti svodi se na pojedinačnu fizičku interpretaciju sistematskih uticaja koji potiču od pojedinačnih komponenti terestričkog laserskog skenera. Posebno se analiziraju uticaji sistema za mjerenje dužina, mjerenje uglova i ostalih instrumentalnih i neinstrumentalnih grešaka.

Za postupak kalibracije komponenti neophodno je imati pristup specijalnoj laboratorijskoj infrastrukturi i opremi. U praksi se mogu javiti određeni problemi uslijed specifičnosti određenih tipova terestričkih laserskih skenera obzirom da se pojedini terestrički laserski skeneri ne mogu horizontisati ili centrisati. Nedostatak dvoosnog kompenzatora također može stvarati određene probleme.

4.3.1 Laboratorija i pribor za kalibraciju

Kod kalibracije komponenti terestričkih laserskih skenera veoma je važna laboratorija i pribor za ispitivanje. Što je laboratorija opremljena sa više testnih polja to će i terestrički laserski skeneri biti kalibrisani u odnosu na više aspekata.

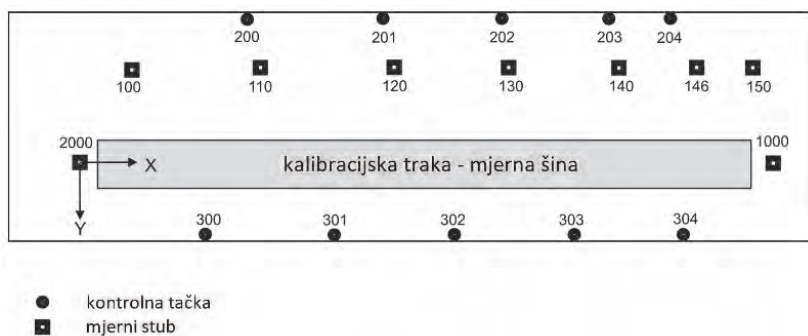
Kalibracijska traka (mjerna šina) je traka na kojoj se po šinama, automatski ili manualno kreću testna kolica (Slika 2). Položaj testnih kolica se mjeri visokopreciznim laserskim mjernim sistemom (interferometar), koji omogućava tačnost bolju od 0,01 mm. Atmosferske prilike, odnosno temperatura, pritisak i vlažnost vazduha se mjere, kako bi se izvršila korekcija mjerenja udaljenosti za prvu popravku brzine svjetlosti.



Slika 2. Kalibracijska traka na IGP, ETH Zurich (Schulz, 2007)

Na jednom kraju kalibracijske baze postavljen je stub na koji se postavlja instrument, dok je na drugom kraju kalibracijske trake laserski mjerni sistem (interferometar). Testna kolica, sa postavljenom skenerskom metom se kreću između ova dva mjerna sistema.

Mreža kontrolnih tačaka sastoji se od tačaka koje su postavljene na mjerne stubove i na zidove laboratorije (Slika 3). Kontrolne tačke postavljaju se na različite visine. Prilikom mjerenja i izravnjanja mreže kontrolnih tačaka neophodno je da sve tačke imaju vrlo visoku horizontalnu i vertikalnu tačnost.



Slika 3. Mreža kontrolnih točaka na IGP, ETH Zurich (Schulz, 2007)

Mreža mjernih stubova sastoji se od stubova koji su opremljeni podnožjima instrumenta i imaju mogućnost postavljanja različitih vrsta instrumenata i meta (Slika 4). Prilikom mjerenja i izravnjanja mreže mjernih stubova neophodno je da svi stubovi imaju vrlo visoku horizontalnu i vertikalnu tačnost.



Slika 4. Mreža mjernih stubova na IGP, ETH Zurich (Schulz, 2007)

Uređaj za mjerenje frekvencije verifikuje modulaciju frekvencije na osnovu svoje poznate nominalne frekvencije (Slika 5). Ovaj uređaj mora biti vrlo visoke tačnosti kako bi se obezbijedili pouzdani rezultati mjerenja frekvencije.

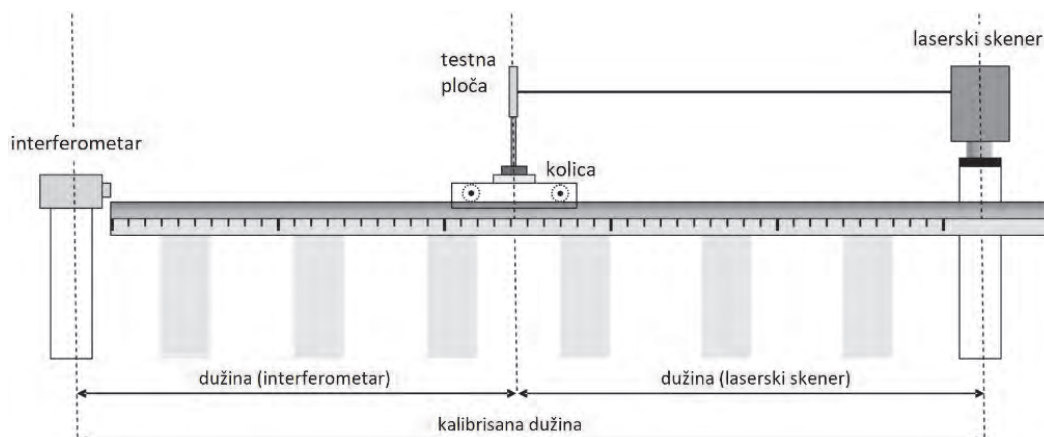


Slika 5. Uređaj za mjerenje frekvencije na IGP, ETH Zurich (Schulz, 2007)

4.3.1 Kalibracija sistema za mjerenje dužina

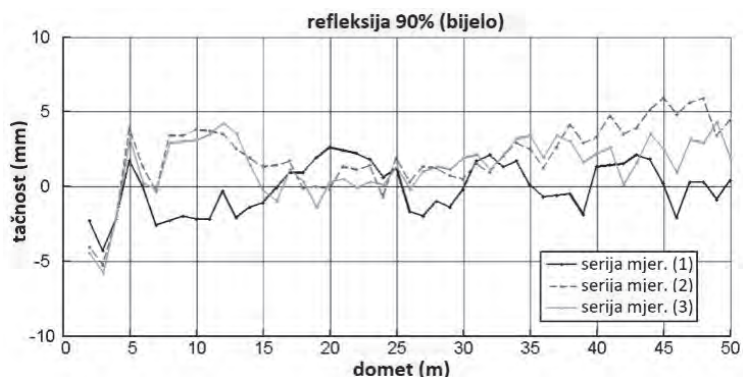
Kod terestričkih laserskih skenera postoje dva različita režima rada i to: statički režim rada i režim skeniranja. Režim skeniranja je režim u kome laserski skener vrši skeniranje, odnosno uređaji za mjerenje otklona horizontalnih i vertikalnih uglova se rotiraju (aktivni su). Statički režim rada laserskog skenera je režim rada u kome se laserska zraka može namjestiti na jednu tačku i neprestano mjeri samo tu tačku, odnosno uređaj za mjerenje otklona horizontalnih i vertikalnih uglova se ne rotira (stanje mirovanja). Statički režim rada uglavnom se koristi za ispitivanje i kalibraciju ili za neke specifične radove. U statičkom režimu mogu se dobiti neki veoma važni podaci, kao što su: preciznost i tačnost, dugoročno ponašanje i stabilnost frekvencije (Schulz, 2007). Iako je kalibracija sistema za mjerenje dužina moguća i u režimu skeniranja, u ovom radu će biti opisana samo kalibracija u statičkom režimu skeniranja.

Postupak kalibracije sistema za mjerenje dužina uključuje mjerenja na mete sa različitim vrijednostima refleksije (90% - bijela, 60% - siva i 20% - tamno siva). Postupak kalibracije sistema za mjerenje dužina izvodi se na testnoj traci, laserski skener postavi se na mjerni stub na jedno kraju trake, a reflektirajuće mete se postavljaju na testna kolica.



Slika 6. Postavka kod kalibracije sistema za mjerenje dužina u statičkom režimu (Schulz, 2007)

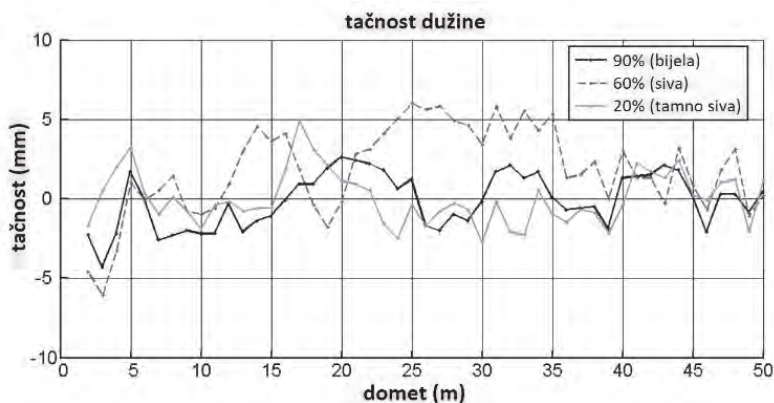
Ponavljjanje mjerenja omogućava određivanje sistematskih uticaja koji se odnose na adicijonu i multiplikacionu konstantu sistema za mjerenje dužina. Određivanje ovih parametara ima smisla samo u ako su mjerenja ponovljiva. Dakle, mjerenja se ponavljaju u kratkom vremenskom periodu, pod istim uslovima i sa istim postavkama.



Slika 7. Ponovljivost mjerenja (Schulz, 2007)

Na Slici 7 su prikazana odstupanja dužina mjerenih laserskim skenerom Imager 5003 proizvođača Zoller+Fröhlich, i nominalne vrijednosti dužine dobijene mjerenjima interferometrom. Izvršena su tri mjerenja na istu reflektirajuću podlogu i pod istim uslovima.

Za potrebe kalibracije neophodno je utvrditi da li **tačnost** sistema za mjerenje dužina zavisi od refleksije od podlogu. U tu svrhu vrše se mjerenja na tri podloge različite vrijednosti refleksije (90% - bijela, 60% - siva i 20% - tamno siva).

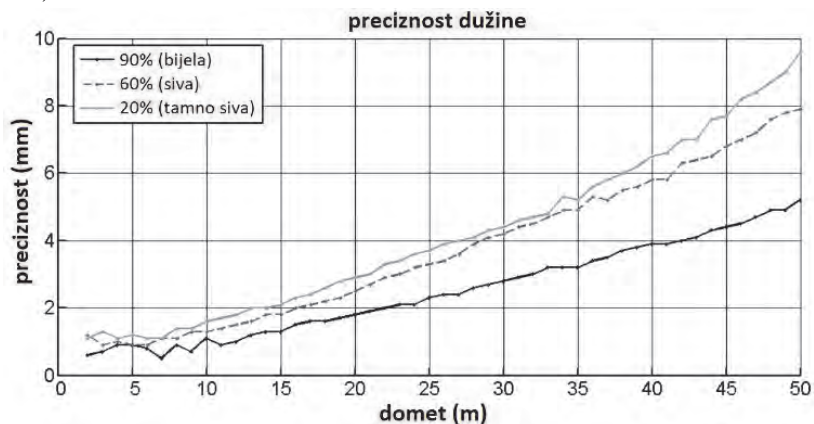


Slika 8. Tačnost sistema z mjerenje dužina (Schulz, 2007)

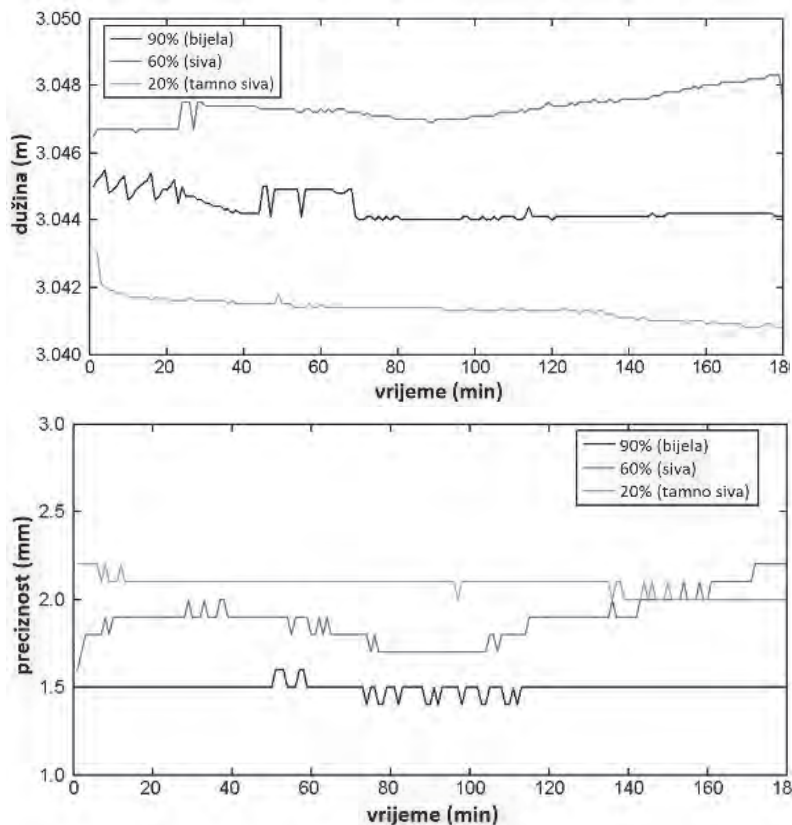
Na Slici 8 su prikazane tačnosti sistema za mjerenje dužina kod laserskog skenera Imager 5003 proizvođača Zoller+Fröhlich, pri mjerenjima na mete sa različitim vrijednostima refleksije (90% - bijela, 60% - siva i 20% - tamno siva).

Kod laserskog skeniranja, **preciznost** sistema za mjerenje dužina daje procjenu empirijske standardne devijacije mjerenje jedne dužine. Preciznost je parametar pouzdanosti koji definira nepreciznost jednog mjerenja koje je napravljeno tokom procesa skeniranja, te omogućava procjenu svake pojedine tačke u oblaku tačaka.

Na Slici 9 je prikazana preciznost sistema za mjerenje dužina kod laserskog skenera Imager 5003 proizvođača Zoller+Fröhlich. Preciznost je data za dužine do 50 m, na rastojanju svakih 5 m, za mjerenja na tri različite vrijednosti refleksije (90% - bijela, 60% - siva i 20% - tamno siva).



Slika 9. Preciznost sistema za mjerenje dužina (Schulz, 2007)



Slika 10. Stabilnost sistema za mjerenje dužina tokom vremenskog perioda od 3 sata (varijacije dužine i varijacije preciznosti) (Schulz, 2007)

Stabilnost sistema za mjerenje dužina neophodno je ocijeniti jer dužine mjerene laserskim skenerom tokom dužeg vremena mogu varirati uslijed uticaja unutrašnjeg zagrijavanja i promjene modulacije frekvencije ili uslijed drugih unutrašnjih ili vanjskih uticaja.

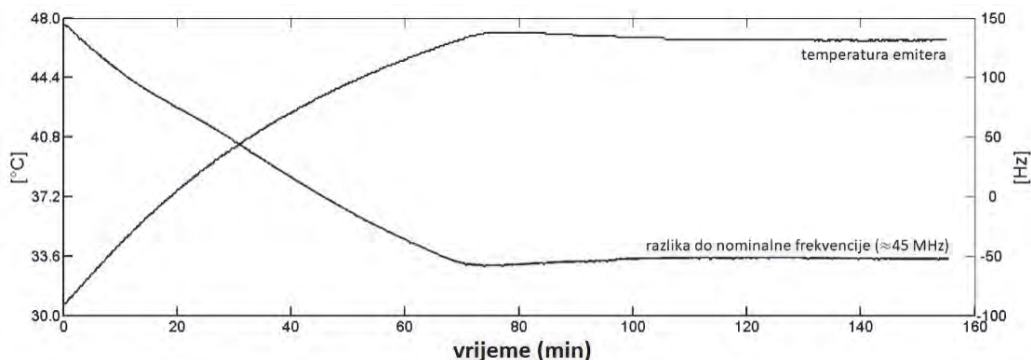
Stabilnost sistema za mjerenje dužina provjerava se na način da se postave mete sa različitim vrijednostima refleksije na mjerne stubove (npr. dva stuba) i mjeri se dužina jedan duži vremenski period (npr. tri sata).

Rezultati ovih mjerenja mogu se interpretirati na slijedeći način (Schulz, 2007):

- uticaj refleksije na mjerenu dužinu;
- promjena vrijednosti izmjerene dužine kroz vrijeme;
- preciznost mjerenja dužine kroz vrijeme.

Na Slici 10 su prikazani rezultati mjerenja dužine i preciznost mjerenja kod faznog laserskog skenera Imager 5003 proizvođača Zoller+Fröhlich. Vršeno je mjerenje dužine između dva stuba koji su na rastojanju od oko 3 m, a korištene su mete sa različitim vrijednostima refleksije (90% - bijela, 60% - siva i 20% - tamno siva).

Stabilnost frekvencije, odnosno njena varijacija direktno utiče na mjerenje dužina. Varijacija frekvencije mjeri se i kontroliše uređajem za mjerenje frekvencije i to u kontrolisanim uslovima u laboratoriji. Prati se ponašanje frekvencije u odnosu na temperaturu u instrumentu koja se mjeri dok instrument radi duže vrijeme.



Slika 11. Stabilnost frekvencije signala (Schulz, 2007)

Na Slici 11 su prikazani rezultati mjerenja varijacije frekvencije kod faznog laserskog skenera Imager 5003 proizvođača Zoller+Fröhlich. Mjerena je varijacija frekvencije tokom tri sata mjerenja u kontrolisanim uslovima laboratorijske temperature i sa mjerenjem temperature u samom instrumentu.

4.3.2 Kalibracija sistema za mjerenje uglova

Kod ispitivanja sistema za mjerenje uglova neophodno je omogućiti ispitivanje sistema koje je nezavisno od sistema za mjerenje dužina. Ispitivanje sistema za mjerenje uglova može se vršiti na dva načina i to sa mjernih stubova i sa kalibracijske trake. Način zavisi od vrste skenera u odnosu na način otklona laserske zrake, odnosno od načina određivanja uglovnih vrijednosti.

Osnovni princip ispitivanja sistema za mjerenje uglova sa mjernih stubova je taj da se laserski skener postavi u sredinu između više mjernih stubova na koje su postavljene skenerske mete. Vršiti se mjerenje uglova na sve stubova sa centralnog stuba i na osnovu prebrojnih i ponovljenih mjerenja određuje se srednja vrijednost horizontalnih i vertikalnih uglova te se vrši procjena preciznosti srednjih vrijednosti uglova i tačnost mjerenja ugla.

Osnovni princip ispitivanja sistema za mjerenje uglova korištenjem kalibracijske trake je taj da se skeniranjem odredi pozicija skenerske mete (sfere), te tako određena pozicija uporedi sa nominalnom vrijednošću. Poprečna i vertikalna razlika između pozicije dobijene skeniranjem i nominalne pozicije su greške horizontalnog i vertikalnog ugla dok je uzdužna razlika greška sistema za mjerenje dužina.

4.3.2 Ostale instrumentalne greške

Instrumentalne greške terestričkih laserskih skenera utiču na svako pojedino mjerenje, a nastaju kao posljedica nesavršenosti u konstrukciji i izvedbi terestričkih laserskih skenera.

Savršena konstrukcija instrumenata pretpostavlja da stvarni (realni) centar rotacije instrumenta oko pojedinih osa odgovara idealnom centru rotacije (hibridni i sferni skeneri). Ukoliko stvarni i idealni centar ne odgovaraju jedan drugome, to znači da postoje instrumentalne greške.

Ekscentričnost vertikalne ose ispituje se sa dva stajališta pomoću teodolita, i to tako što se na vrh skenera postave markice u obliku šiljaka koje su pogodne za uglovna mjerenja. Teodolitom se mjere uglovi na osam pozicija terestričkog laserskog skenera i ova mjerenja definišu da li se markice opisuju idealan krug prilikom rotacije i da li centralna tačka stvarne rotacije odgovara centralnoj tački idealne rotacije.

Ukoliko putanja markica odgovara krugu, to znači da je rotacija homogena i da je laserski skener dobro izravnat. Ukoliko putanja markice ne čini krug onda znači da je rotacije nehomogena i da se rotacija vertikalne osi ne odvija u horizontalnoj ravnini nego u kosoj ravni.

Kolebanje vertikalne osi (hibridni i sferni skeneri) je instrumentalna greška koja je uzrokovana varijacijom rotacije vertikalne osi. Uzroci varijacije su nesavršenost izvedbe, mehanički nedostaci, neispravnost težišta itd.

Varijacija vertikalne osi utvrđuje se mjerenjem nagiba vertikalne osi, pomoću nekog visokopreciznog nivelira. Cilj ispitivanja varijacija vertikalne osi je utvrđivanje prisutnosti sistematskih efekata kolebanja.

Idealno, kolimaciona os terestričkog laserskog skenera (hibridni i sferni skeneri) treba biti normalna na horizontalnu os, a odstupanje od idealne situacije dovodi do **kolimacione greške i ekscentričnosti kolimacione osi**.

Postupak ispitivanja isti je kao i kod teodolita. Uključuje opažanje skenerskih meta u dva položaja instrumenta (samo sferni skeneri). Odstupanja uglova u dva položaja pokazuju prisutnost kolimacione greške i ekscentričnosti kolimacione osi.

Kolimaciona greška je prisutan ukoliko kolimaciona os nije okomita na horizontalnu os.

Greške horizontalne osi tretiraju se i ispituju slično kao i greške kolimacione osi (hibridni i sferni skeneri). Ove greške definišu se kao odstupanje horizontalne osi od normalnog slučaja, odnosno od okomitosti na vertikalnu os.

Postupak ispitivanja isti je kao i kod teodolita. Uključuje opažanje skenerskih meta u dva položaja instrumenta (samo sferni skeneri), s tim da su mete postavljene su u vertikalnoj ravni, raspoređene na pozicijama od 15° do 165°.

Kada je testiranje završeno neophodno je sračunate kalibracijske parametre, za određene sisteme mjerenja, ali i druge parametre koji se odnose na instrumentalne i neinstrumentalne greške, primijeniti na terestrički laserski skener, izvršiti podešavanja (softverska ili mehanička) i sa tako kalibrisanim terestričkim laserskim skenerom ponoviti postupak kalibracije sukcesivno do dobijanja zadovoljavajućih rezultata. Kada je terestrički laserski skener kalibrisan moguće je pristupiti postupku skeniranja, kako bi rezultati skeniranja, odnosno oblak tačaka što više bio oslobođen grešaka.

4.4 Kalibracija komponenti TLS-a – drugi pristup

Pored navedenog pristupa kalibracije komponenti koji je predložio Schultz (2007) postoje i drugi pristupi i prijedlozi koji su nastali u godinama poslije toga. Interesantan prijedlog je onaj Geodetske laboratorije na Katedri za Geodeziju na Technische Universität München, koji je član Društva za Kalibraciju geodetskih uređaja. Ovaj prijedlog zasnovan je na objektivnoj procjeni karakteristika te na taj način određivanja parametara kalibracije. Detaljan pregled ovog koncepta komparacije i testiranja terestričkih laserskih skenera prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1.

Detaljan pregled koncepta komparacije i testiranja terestričkih laserskih skenera

| PREDMET POREĐENJA | Parametri komparacije | Zaključak | Izvođenje | |
|-----------------------|-----------------------|--|--|---|
| TAČNOST | PRECIZNOST (ŠUM) | σ_{DIST} : Preciznost (šum) u zavisnosti od udaljenosti. | Standardna devijacija na osnovu popravke izravnate ravnine. | Testni primjer: Testna ploča – bijela površina sa različitim refleksijama (albeldo), sa promjenjivim upadnim uglom, mjerenja na različitim udaljenostima. |
| | 3D TAČNOST | σ_{3D} : apsolutna 3D tačnost σ_{di} : tačnost dužina, σ_{Hz} : tačnost horizontalnog ugla, σ_V : tačnost vertikalnog ugla. Različiti kalibracijski parametri. | Rezultat 3D izravnjanja, izravnjanje po metodi najmanjih kvadrata koristeći prekobrojna mjerenja u dva položaja durbina. | 3D testno polje s upotrebom proizvođačevih meta i programske opreme (sistemska kalibracija). |
| GEOMETRIJSKA REALNOST | IVICE | n_{richtig} : Geometrijski korektne tačke (geometrijska realnost u zavisnosti od dužine). | Klasifikacija tačaka uz upotrebu $3\sigma_{\text{DIST}}$ intervala pouzdanosti. | Testni primjer: Bijeli prsten, sa definisanom udaljenosti od podloge, mjerenja na različitim udaljenostima. |
| | REALNOST OBLIKA | Geometrijski podaci (npr. radijus sfere). | Nominalni / Stvarni parametar geometrijskog poređenja | Testni primjer: Geometrijsko referentno tijelo, mjerenje dužina na različitim udaljenostima. |
| DOMET | DOMET MODELIRANJA | d_{max} : Najveće udaljenost od objekta. | Efikasnost snimanja ε ili dokaz o normalnoj distribuciji mjerenja. | Testni primjer: Bijela površina, mjerenja na različitim udaljenostima. |
| | DOMET REGISTRACIJE | d_{ziel} : Najveće udaljenost od mete. | Nominalno / Stvarno poređenje i kvalitet koordinata meta. | Testni primjer: Proizvođačeve mete, mjerenja na različitim udaljenostima. |
| BRZINA | BRZINA SKENIRANJA | t_{typisch} : Tipično vrijeme mjerenja. | Vrijeme mjerenja. | Vrijeme mjerenja / tehnički podatak. |

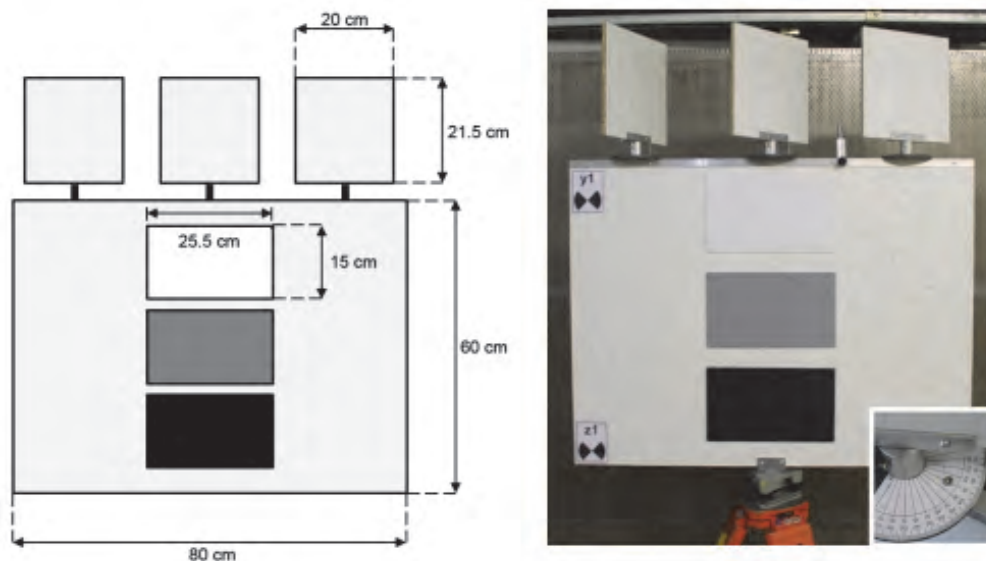
4.4.1 Tačnost

Kod usporedbe tačnosti, domet TLS-a se uzima u obzir. Razlikuje se preciznost mjerenja (statistička tačnost) i apsolutna 3D tačnost (ispravnost) pojedinačnih, diskretnih tačaka izdvojenih iz 3D oblaka tačaka kada se koriste skenerske mete (Wunderlich, Wasmeier, Ohlmann-Lauber, Schäfer i Reidl, 2013).

Preciznost (šum) pojedinačnih mjerenja terestričkih laserskih skenera je odstupanje pojedinog mjerenja od srednje vrijednosti svih uzoraka (Wunderlich i dr., 2013).

Određivanje preciznosti mjerenja vrši se skeniranjem na testne ploče (Slika 12). Testna ploča obložena je bijelom bojom, te zatim je podijeljena na još tri dodatna testna područja koja se koriste za različita testiranja. Lijevo i desno područje koristi se za određivanje preciznosti dometa σ_{DIST} , dok se dodatna tri područja koriste za testiranja vezana za simuliranje materijala različitih vrijednosti refleksije (crna, siva i bijela podloga). Na gornjem dijelu testne ploče postavljene su tri dodatne ploče koje se mogu rotirati, s ciljem simuliranja različitih upadnih uglova laserske zrake.

Kombinacija ovalikog broja testnih područja koristi se s ciljem dobivanja što šireg spektra različitih testiranja tokom jednog skeniranja, pod istim okolnostima skeniranja.



Slika 12. Testna ploča za određivanje preciznosti (šum) (Wunderlich i dr., 2013)

Za analizu šuma koriste se sirovi podaci dobijeni iz instrumenta. Obzirom na testnu ploču moguće je dobiti šum za mjerenja na različitim područjima testne ploče (na bijelom području, na sivom području, na crnom području, na bijelom području nagnutom za 45° itd.).

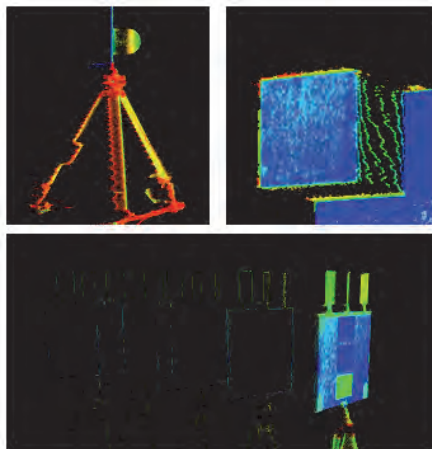
3D tačnost je apsolutna vrijednost točnosti definisana kao standardan devijacija mjerenih koordinate od referentne vrijednosti (Wunderlich i dr., 2013). Tačnost 3D koordinata tačke može se izraziti kao greška tačke σ_{3D} ili kao standardna devijacija pojedinih elemenata σ_d (dužine), σ_{Hz} (horizontalnog ugla) i σ_V (vertikalnog ugla). Sve greške koje utiču na 3D tačnost su sistemske i to: greške mjerenja dužina (adiciona i multiplikaciona konstanta), nepreciznost mjerenja uglova, kao i greške osi i ekscentričnosti.

Testiranje se vrši u laboratoriji i skeniranjem više skenerskih meta sa više stajališta. Prekobrojna mjerenja omogućavaju izražavanje tačnosti mjerenja, koristeći izravnane 3D mreža.

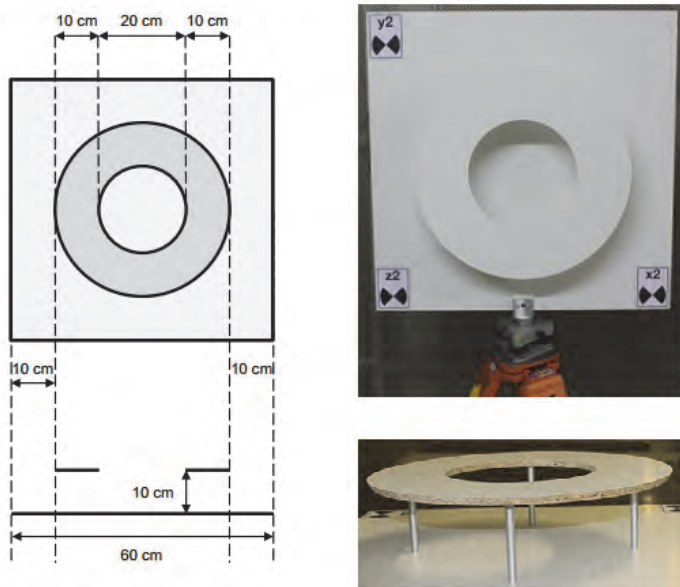
4.4.2 Geometrijska realnost

Geometrijska realnost posebno ispituje uticaj filtera (filter zaglađivanja) na kvalitet oblaka tačaka. Uticaj grešaka geometrije od velikog je značaja. Moguće je analizirati da li određeno geometrijsko tijelo zaista predstavlja geometriju i veličinu tijela iz izmjerenog oblaka tačaka.

Geometrijske ivice ili paralelne ravni na različitim dubinama, zbog miješanja refleksije stvaraju lažne tačke (Slika 13), pa se zbog toga stvarne ivice objekta ne mogu dobiti. Ovaj problem dodatno je izražen kada se koriste filteri na sirova mjerenja.



Slika 13. Lažne tačke kod skeniranja ivica (Wunderlich i dr., 2013)

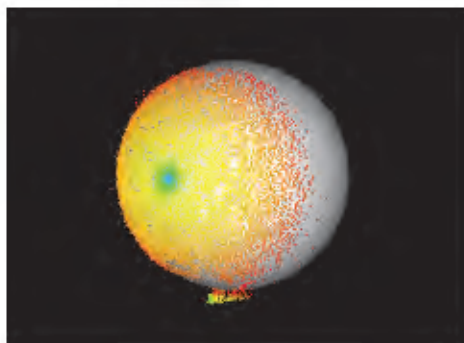


Slika 14. Testni uzorak za testiranja mjerenja ivica (Wunderlich i dr., 2013)

Šum oblaka tačaka kod ovog problema nije kritična stvar, kritična stvar kod ovog problema su postavke kvaliteta skeniranja. Postavke višeg kvaliteta skeniranja daju kvalitetniji oblak tačaka i smanjuju šumove, za korisnika to izgleda kao precizniji oblak tačaka, ali to rezultira većim brojem geometrijski lažnih tačaka i geometrijski degradira oblak tačaka. Geometrijska realnost $n_{richtig}$ (%), definiše se kao procent skeniranih tačaka koje su pogodne za pravilno definisanje datog geometrijskog uzorka (Wunderlich i dr., 2013).

Kao uzorak za testiranje koristi se 10 cm širok prsten postavljen 10 cm ispred bijele ploče 60 cm x 60 cm (Slika 14). Ploča i prsten su precizno izrađeni u laboratoriji od istog materijala.

Realnost oblika obično se mjeri korištenjem greška radijusa kugle (skenerske mete). Određuju se razlike između izmjerenih i referentnih radijusa, te na taj način se daju informacije o geometrijskom kvalitetu izvedenih objekata, a samim tim i informacije o kvalitetu modeliranja. Obzirom da se obično radi o velikoj prekobrojnosti, efekat šuma je zanemariv.



Slika 15. Best-fit kugle iz oblaka tačaka (Wunderlich i dr., 2013)

Za ispitivanje realnosti oblika posebno je pogodna kugla (skenerska meta), jer omogućava različite upadne uglove i različite intenzitete refleksije (Slika 15). Osim kugle, realnost oblika moguće je ispitati i na skenerskim metama drugih geometrijskih oblika.

4.4.3 Radni domet

Efikasnost snimanja $\varepsilon(d)$ računa se kao odnos između teoretskog i stvarnog broja mjernih tačaka na objektu u odnosu na mjerenje udaljenosti d . Kriterijum za maksimalni mogući domet koji je pogodan za praktičan rad je minimalna dozvoljena vrijednost ε_K (unaprijed definisana kritična efikasnost snimanja). Određivanje **maksimalnog dometa modeliranja** d_{max} tako se može izračunati (pod pretpostavkom linearnog odnosa) po izrazu (Wunderlich i dr., 2013):

$$d_{max} \quad \text{kod} \quad \varepsilon(d_{max}) = \varepsilon_K \quad \text{i} \quad \varepsilon(d) = \frac{n_g(d)}{n_t(d)}. \quad (10)$$

Pored dometa modeliranja potrebno je odrediti i **domet registracije** d_{ziel} . Domet registracije se određuje za skenerske mete i daje informacije o mogućnosti upotrebe skenerskih meta kod registracije ovisno od mjerenja dužine.

Potrebno je odrediti kvalitet geometrijskog modeliranja i izračunati sve dostupne mete na određenoj udaljenosti, te ih uporediti sa referentnim vrijednostima. Domet registracije treba definirati kako bi se osigurala željena točnost registracije. Prilikom ispitivanja treba uzeti u obzir postavke (prethodno definisanih) rezolucije i postavke kvaliteta skeniranja.

4.4.4 Brzina skeniranja

Određivanje brzine skeniranja je trivijalno. Potrebno je definisati rezoluciju skeniranja, udaljenost i postavke kvaliteta skeniranja te na osnovu ovih elemenata odrediti vrijeme skeniranja.

4 ZAKLJUČAK

Terestričko lasersko skeniranje relativno je nova tehnologija geodetskog mjerenja. Od svoje pojave, krajem devedesetih godina prošlog vijeka pa do danas, ova tehnologija napravila je veliki tehnološki napredak, i to u pravcu integracije raznih senzora, povećanja brzine skeniranja, preciznosti i opće upotrebljivosti.

Kao i svaka druga geodetska metoda i terestričko lasersko skeniranje opterećeno je greškama. Terestrički laserski skeneri ne mogu se rektifikovati pomoću klasičnih procedura rektifikacije i kalibracije geodetskih instrumenata, nego se kod ovih instrumenata koristi tzv. sistemska kalibracija ili samokalibracija i kalibracija komponenti.

Sistemska kalibracija je kalibracija koja se provodi preko velikog broja prekobrojnih mjerenja mreže skenerskih meta, te na osnovu toga računanja koeficijenata kalibracije. Ova kalibracija terestričkog laserskog skenera ima praktičnog smisla samo onda kada se korekcije osnovnih opažanja mogu primijeniti na „sirov“ oblak tačaka, odnosno da parametri kalibracije budu primijenjeni na sirova mjerenja, odnosno prije mjerenja izvršiti kalibraciju, rektifikovati instrument za kalibracijske koeficijenta pa nakon toga vršiti mjerenje.

Kalibracija komponenti terestričkog laserskog skenera je postupak koji je analogan postupcima kalibracije klasičnih geodetskih instrumenata. Kalibracija komponenti svodi se na pojedinačnu fizičku interpretaciju sistematskih uticaja koji potiču od pojedinačnih komponenti terestričkog laserskog skenera, gdje se posebno analiziraju uticaji sistema za mjerenje dužina, mjerenje uglova i ostalih instrumentalnih i neinstrumentalnih grešaka.

Terestričko lasersko skeniranje moćna tehnika geodetskog mjerenja, koja uz pravilan izbor terestričkog laserskog skenera, metode mjerenja, te uz primjenu kvalitetnog postupka

kalibracije može ponuditi veoma dobre rezultate visoke tačnosti. Također, i pored velikog zamaha u razvoju u posljednje vrijeme može se reći da i dalje postoji dosta prostora za usavršavanje kako samih instrumenata tako i metodologije registracije i georeferenciranja.

LITERATURA I IZVORI

Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner* (doktorska disertacija). Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Dostupno na: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1206/1/Dissertation_BGordon.pdf

Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.

Maar, H., Zogg, H. M. (2014). *WFD – Wave Form Digitizer Technology*. [White paper]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Dostupno na: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_ms50/white-tech-paper/Leica_Nova_MS50_WFD-Wave_Form_Digitizer_Technology_TPA_en.pdf

Pejić, M. (2013): *Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja* (doktorska disertacija). Beograd: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Dostupno na: <https://fedorabg.bg.ac.rs/fedora/get/o:8145/bdef:Content/download>.

Schulz, T. (2007). *Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy* (doktorska disertacija). Zurich: Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich.

Staiger, R. (2011). 10 years of terrestrial laser scanning – technology, systems and applications. *7th International Exhibition and Scientific Congress on geodesy, cartography, GIS-technologies, land management, earth remote sensing, environmental monitoring, forestry management, geology, geophysics, thermophysics, customized instrumentation, and metrology GEO-Siberia 27-29 April 2011*. Dostupno na: https://www.fig.net/news/news_2011/geosiberia_april_2011/Novosibirsk_Geosiberia_2011_Paper_Rudolf_Staiger.pdf.

Vanree, J. M. (2006). *Determination of the precision and reliability parameters of terrestrial laserr scanners* (magistarski rad). Delft: Delft University of Technology.

Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., Reidl, F. (2013). Objective Specifications of Terrestrial Laserscanners – A Contribution of the Geodetic Laboratory at the Technische Universität München. Technische Universität München, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Institute of Geodesy, GIS and Land Management, Chair of Geodesy. Dostupno na: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1188549/document.pdf>

Autori:

Mirnes Bojić, dipl. inž. geod.

BNpro doo Sarajevo
Buka 6, 71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina
E-mail: mirnes@bnpro.ba

Vanr. prof. dr. sc. Dušan Kogoj, dipl. inž. geod.

Fakultet za gradbeništvo in geodezijo – Oddelak za geodezijo, Univerza u Ljubljani
Jamova cesta 2, p.p. 3422, 1000 Ljubljana
Republika Slovenija
E-mail: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si