

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Geodetic instrument calibration

Krdžalić Dževad



Sarajevo, septembra 2018. godine

This publication has been produced with financial support from the Erasmus+ Programme of the European Union, under the GEOWEB project: 561902-EPP-1-2015-1-SE-EPPKA2-CBHE-JP *Modernising geodesy education in Western Balkan with focus on competences and learning outcomes (GEOWEB)*

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Sadržaj

1	Uvod	7
2	TPS mjerni sistemi	8
2.1	Historijat razvoja elektrooptičkih tahimetara	8
2.1.1	Razvoj mehaničkih i optičkih teodolita	8
2.1.2	Razvoj elektronskih teodolita	9
2.1.3	Razvoj daljinomjera	11
2.1.4	Razvoj elektronskih tahimetara	11
2.2	Princip rada TPS sistema	12
2.3	Ispitivanje preciznosti TPS sistema standardizovanim postupcima	18
2.3.1	ISO 17123-3: Terenske procedure za određivanje preciznosti teodolita	18
2.3.1.1	Pojednostavljeni i puni test ISO 17123-3	19
2.3.1.2	Računanje – pojednostavljeni test ISO 17123-3	20
2.3.1.3	Računanje – potpuni test ISO 17123-3	20
2.3.1.4	Ispitivanje preciznosti mjerenja vertikalnih uglova prema ISO 17123-3	22
2.3.2	Ispitivanje preciznosti elektrooptičkih daljinomjera (EDM) prema ISO 17123-4	24
2.3.2.1	Pojednostavljena procedura ISO 17123-4	25
2.3.2.2	Potpuna procedura ISO 17123-4	26
2.3.3	ISO 17123-5: Terenske procedure za ispitivanje totalnih stanica	31
2.3.3.1	Pojednostavljena procedura ISO 17123-5	31
2.3.3.2	Potpuna procedura ISO 17123-5	33
3	TLS mjerni sistemi	39
3.1	Princip rada TLS sistema	39
3.2	Greške mjerenja TLS-om	41
3.2.1	Greške vezane za instrument	41
3.2.1.1	Obim laserske zrake	41
3.2.1.2	Efekat granice između objekata	41
3.2.1.3	Greške mjerenja dužine	41
3.2.1.4	Greške mjerenja uglova	42
3.2.1.5	Greške glavnih osa TLS-a	42
3.2.2	Greške vezane za oblik i svojstva skeniranog objekta	44
3.2.3	Greške uzrokovane okruženjem u kojem se izvodi skeniranje	44
3.2.4	Metodološke greške	44
3.3	Postupci kalibracije TLS-a	44

3.3.1	Kalibracija TLS-a primjenom standardizovanih postupaka.....	45
3.3.1.1	Pojednostavljeni postupak kalibracije TLS-a.....	45
3.3.1.2	Potpuni postupak kalibracije TLS-a.....	48
3.3.2	Dozvoljeno odstupanje $U\Delta$	53
3.3.2.1	Nesigurnost $U\Delta$ razlika dužina	54
4	Laser trackeri	55
4.1	Princip rada laser tracker-a.....	55
4.2	Izvori grešaka kod laserskih trackera.....	58
4.3	Postupci kalibracije laser trackera	58
4.3.1	Ispitivanje laserskih trackera prema ISO 10360-10.....	59
4.3.2	Ispitivanje laserskih trackera prema ASME B89.4.19.....	69
4.3.2.1	Ispitivanje preciznosti mjerenja dužine prema ASME B89.4.19.....	69
4.3.2.2	Ispitivanje tačnosti daljinomjera prema ASME B89.4.19	73
4.3.2.3	Uspostavljanje baze za ispitivanje daljinomjera LT-a.....	76
4.3.3	Ispitivanje laserskih trackera prema VDI/VDE 2617-10	77
5	Usporedba postupaka kalibracije TPS, TLS i laserskih trackera.....	79
6	Zaključak	82
7	Literatura.....	83

Popis slika:

Slika 1-1: Štap za mjerenje dužine u Starom Egiptu (URL1).....	7
Slika 2-1: Sissonov mehanički teodolit (URL2)	8
Slika 2-2: Prvi optički teodolit Carl Zeiss Jena Th1 (URL3)	8
Slika 2-3: Prvi elektronski teodolit Fennel FLT-3 (1963.) (URL4)	10
Slika 2-4: Šematski prikaz rasporeda osi i senzora u tahimetrima (Deumlich & Staiger, 2002.) ..	13
Slika 2-5: Očitavanje kodnih linija	13
Slika 2-6: Dinamički način čitanja kod teodolita Wild T2000 (Benčić & Solarić, 2008.).....	14
Slika 2-7: Osnovni princip rada impulsnih daljinomjera (Kogoj, 2006.)	15
Slika 2-8: Fazna metoda mjerenja dužina (Kogoj, 2006.).....	15
Slika 2-9: Grubo i fino vizira kod principa detekcije maksimalnog intenziteta povratnog signala (Valh, Marjetič, Ježovnik, & Kogoj, 2008.).....	16
Slika 2-10: Stop-and-go metoda (lijevo) i kinematička metoda (desno) (Deumlich & Staiger, 2002.)	17
Slika 2-11: Konfiguracija testnog polja za mjerenje horizontalnih pravaca.....	19
Slika 2-12: Konfiguracija testne baze za mjerenje vertikalnih uglova	22
Slika 2-13: Konfiguracija testne baze za pojednostavljenu proceduru ispitivanja EDM-a	25
Slika 2-14: Privremena baza za provjeru korekcije nulte tačke δ	26
Slika 2-15: Konfiguracija baze za potpunu proceduru ispitivanja (ISO 17123-4)	27
Slika 2-16: Prikaz 21 dužine koje je potrebno izmjeriti (ISO 17123-4)	28
Slika 2-17: Konfiguracija testnog polja	31
Slika 2-18: Konfiguracija testnog polja kod potpune procedure ISO 17123-5	34
Slika 2-19: Lokalni koordinatni sistem	35
Slika 3-1: Princip skeniranja terestričkog laserskog skenera (Pejić, 2013.).....	39
Slika 3-2: Šematski prikaz rada faznih skenera (Rietdorf, 2005.)	39
Slika 3-3: Šematski prikaz rada impulsnih skenera (Rietdorf, 2005.).....	40
Slika 3-4: Šematski prikaz triangulacijskog skenera (Miler, Đapo, Kordić, & Medved, 2007.)	40
Slika 3-5: Efekat granice između objekata (Sotoodeh, 2006.).....	42
Slika 3-6: Glavne ose TLS-a (Pejić, 2013.).....	43
Slika 3-7: Dvodimenzionalna projekcija najznačajnijih grešaka usljed uticaja položaja glavnih osa TLS. (a) greška ekscentriciteta kolimacione ose e; (b) kolimaciona greška c i greška vertikalnog indeksa i (Pejić, 2013.).....	43
Slika 3-8: Uticaj višetruke refleksije (Van Genechten, 2008.)	44
Slika 3-9: SDP postupak kalibracije TLS-a	46
Slika 3-10: CDP postupak kalibracije TLS-a	47
Slika 3-11: TP postupak kalibracije TLS-a	48
Slika 3-12: Testno polje (1H tačka se znatno razlikuje po visini od ostalih tačaka)	49
Slika 3-13: Konfiguracija testnog polja (Heister, 2009.).....	50
Slika 4-1: Modeli laserskih trackera od različitih proizvođača (lijevo-API, u sredini-Leica, desno-FARO).....	55
Slika 4-2: Šematski prikaz Leica MTD 500	56
Slika 4-3: Princip mjerenja kod laser trackera.....	57
Slika 4-4: Primjeri retroreflektora različitih proizvođača	58
Slika 4-5: Opis SMR i SRC (A – laserska zraka, B – retroreflektor, C – mjerena tačka, D – kontaktna tačka sa objektom, E – osnovni položaj, F – jedinični orijentacioni vektor, G – normal probing direction vector, L – razmak osnovnog položaja i mjerene tačke)	60

Slika 4-6: Raspored tačaka za mjerenje (A – tačka na sferi suprotno od držača) (ISO 10360-10: 2016).....	61
Slika 4-7: Greška oblika sfere.....	62
Slika 4-8: Test u dva položaja laser trackera (Phillips, 2007.)	63
Slika 4-9: Položaji za postavljanje etalona, brojevi položaja odgovaraju brojevima u tabeli 4-4..	65
Slika 4-10: Položaj etalona za preostale 64 pozicije (ISO 10360-10: 2016).....	67
Slika 4-11: Prijedlog rasporeda mjernih linija za ispitivanje greške dužine (Aneks D ISO 10360-10)	68
Slika 4-12: Mjerenje dužine u horizontalnoj (lijevo) i vertikalnoj (desno) ravni (ASME B89.4.19)	70
Slika 4-13: Mjerenje dužine desne dijagonale (lijevo) i lijeve dijagonale (desno) (ASME B89.4.19)	71
Slika 4-14: Test u dva položaja kruga laserskog trackera (ASME B89.4.19).....	73
Slika 4-15: Konfiguracija za ispitivanje preciznosti mjerenja dužina (ASME B 89.4.19)	74
Slika 4-16: Računanje prave metodom najmanjih kvadrata (ASME B89.4.19).....	75
Slika 4-17: Šematski prikaz šinskog sistema za ispitivanje daljinomjera laser trackera (Phillips, 2007.)	77
Slika 4-18: Primjer nosača sa montiranim referentnim retroreflektorom (lijevo) i retroreflektorom na koji se mjeri sa instrumentom koji se ispituje (desno) (Phillips, 2007.)	77

Popis tabela:

Tabela 2-1: ISO standardi vezani za ispitivanje preciznosti TPS sistema.....	18
Tabela 2-2: Statistički testovi (horizontalni pravci, teodolit).....	21
Tabela 2-3: Statistički testovi (vertikalni uglovi)	24
Tabela 2-4: Statistički testovi za EDM	30
Tabela 2-5: Redoslijed opažanja kod pojednostavljene procedure	32
Tabela 2-6: Redoslijed opažanja kod potpune procedure (sa stajališta S1).....	34
Tabela 2-7: Statistički testovi za x, y, z.....	37
Tabela 4-1: Standardi za ispitivanje laserskih trackera.....	59
Tabela 4-2: Lokacije testnih tačaka	62
Tabela 4-3: Opis baze za mjerenje u dva položaja instrumenta	63
Tabela 4-4: Položaji etalona pri mjerenju dužina.....	64
Tabela 4-5: Položaji etalona za dodatna mjerenja.....	66
Tabela 4-6: Najkraće i najduže dužine uzduž mjernih linija (Aneks D ISO 10360-10).....	68
Tabela 4-7: Pregled rasporeda mjerenja dužine u horizontalnoj i vertikalnoj ravni (ASME B89.4.19)	70
Tabela 4-8: Pregled rasporeda mjerenja dužine etalona postavljenog dijagonalno (i desna i lijeva dijagonala) (ASME B89.4.19)	71
Tabela 4-9: Pregled rasporeda mjerenja kod testa u dva položaja (ASME B89.4.19)	73
Tabela 4-10: Pregled rasporeda mjerenja dugih referentnih dužina (ASME B89.4.19).....	74
Tabela 5-1: Usporedba postupaka kalibracije TPS, TLS i LT.....	79

1 Uvod

Ne zna se kada je tačno upotrijebljen prvi geodetski mjerni instrument. Arheološki radovi na građevinama starih civilizacija pokazuju da su drevni narodi gradili veoma velike građevine sa izuzetnom preciznošću, koja se može u nekim slučajevima uporediti sa preciznošću sa kojom se danas izvode velike i kompleksne građevine. Osim preciznosti sa kojom su izgrađene, veoma bitna činjenica je da su drevne građevine bile orijentisane, bilo prema nebeskim tijelima, kao što je slučaj sa južnoameričkim piramidama koje su izgradile Maje, bilo prema stranama svijeta, kao što je slučaj sa egipatskim piramidama. Uporedo sa razvojem civilizacije razvijala se i geodezija kao nauka, a samim tim i geodetski mjerni instrumenti. Pretpostavlja se da su u Mesopotamiji razvijeni prvi geodetski mjerni instrumenti (Mulić, Vrce, Omičević, & Donlagić, 2015). U Mesopotamiji su pronađene glinene ploče sa ucrtanim kanalima za navodnjavanje. U Starom Egiptu su se primjenjivala geodetska mjerenja koja imaju veliku sličnost sa današnjim principima i tehnikama klasičnih geodetskih mjerenja. Plavljenje područja oko rijeke Nila imalo je kao posljedicu da su se svake godine vršila mjerenja u cilju uspostavljanja granica parcela koje su egzistirale prije poplava. Na osnovu arheoloških iskopina vidljivo je da su korišteni visak, konopac i štap za mjerenje dužina, te instrumenti za mjerenje pravaca i nivelanje. Među poznatim instrumentima iz tog doba su *merchet* i *groma*.



Slika 1-1: Štap za mjerenje dužine u Starom Egiptu (URL1)

Dalji razvoj i usavršavanje geodetskih instrumenata su nastavili Grci i Rimljani. Grčki instrument *dioptra*, koji se koristio za mjerenje horizontalnih i vertikalnih uglova, se smatra pretečom teodolita. Interes tadašnjih naroda za astronomijom i navigacijom je također dopirinio razvoju mjernih instrumenata. Poznati instrument iz tog perioda (150 godina p.n.e.) je *astrolab*. Arapi i Kinezi su također dali svoj doprinos u razvoju geodetskih mjernih instrumenata.

Naravno, razvojem civilizacije razvijali su se i usavršavali geodetski instrumenti. Krajem 18. stoljeća pojavili su teodoliti kakve danas poznajemo. Tehnološki napredak uveliko je uticao na razvoj i modernizaciju geodetskih mjernih sistema. Mnoge inovacije u tehnici su veoma uspješno primijenjene kod geodetskih instrumenata. Današnji geodetski instrumenti imaju izuzetne karakteristike u pogledu preciznosti, brzine, jednostavnosti za rad, težine, veličine, itd.

2 TPS mjerni sistemi

2.1 Historijat razvoja elektrooptičkih tahimetara

Historijski razvoj geodetskih mjernih instrumenata je veoma široka tema. Posmatrano sa tehničkog aspekta razvoj tahimetara se može podijeliti na nekoliko faza:

- Razvoj mehaničkih i optičkih teodolita
- Razvoj daljinomjera
- Razvoj modernih tahimetara

2.1.1 Razvoj mehaničkih i optičkih teodolita

Prvi mehanički teodolit se pojavio 1730. godine (Slika 2-1) a konstruisao ga je Sisson (Holsen, 1984.). Mehanički teodoliti su se usavršavali postepeno, sve do 1922. godine kada je kompanija Carl Zeiss Jena proizvela prvi optički teodolit Th1 (Slika 2-2) (Deumlich, 1982.). Švicarac Heinrich Wild je svojim otkrićima uveliko doprinio razvoju prvog optičkog teodolita. Naime, on je 1908. godine, kao saradnik u kompaniji Carl Zeiss Jena, uveo unutrašnje fokusiranje. Wild je dizajnirao cilindrične ose, mikrometar, podijelio libele, itd. Godine 1918. Wild je otkrio optičku koincidenciju mikrometra sa paralelnim pločama. Zahvaljujući navednim otkrićima i modernizacijama je i dizajniran prvi optički teodolit.



Slika 2-1: Sissonov mehanički teodolit (URL2)



Slika 2-2: Prvi optički teodolit Carl Zeiss Jena Th1 (URL3)

Važno je još napomenuti i upotrebu stakla za izradu limba. Prvi put je staklo upotrijebljeno 1884. godine. Za teodolit koji se koristio u rudarstvu, i to od strane Josefa i Jana Friča u Pragu (Deumlich, 1982.).

U posljednjih nešto manje od 100 godina, od pojave prvog optičkog teodolita, razvoj i modernizacija teodolita su tekli ubrzano. Teodoliti su bivali sve manji i lakši, i sve precizniji. Od kompanija koje su se bavile razvojem i proizvodnjom geodetskih instrumenata pomenut ćemo samo neke: Carl Zeiss Jena, Freiburger Präzisionsmechanik, Ertel-Werk für Feinmechanik, Pentax, Kern AG, Wild Heerbrugg AG, Schwabe (kasnije Geofizika), Aerogeopribor, MOM, Meopta, Officine Galileo, SLOM, Vickers Ltd., Rank Precisions Industries, AGA, Berger and Sons Inc., Brunson Instrument Comp., Fuji Surveying Instr. Co., Sokkisha, Tokyo Optical Co. (Topcon), Nikon, itd.

Kompanija Askania 1942. godine na svoj teodolit ugrađuje uređaj za fotografsku registraciju očitavanja limba. Nakon toga se proizvode Wild T3 i Carl Zeiss Jena Theo 002 sa uređajima za fotografsku registraciju čitanja. Kompanija Askania je uvela po prvi put elektrooptičku registraciju (tzv. „električno oko“).

Najvažnije karakteristike teodolita novije konstrukcije su (Holsen, 1984.):

- cilindrična azimutalna osočina,
- leće sa unutrašnjim fokusiranjem,
- mikrometar sa plan-paralelnim pločama od stakla,
- krugovi sa nanešenom podjelom izrađeni od stakla,
- optički mikrometar,
- optički visak,
- kompenzator,
- automatski indeks za očitavanje vertikalnog limba, itd.

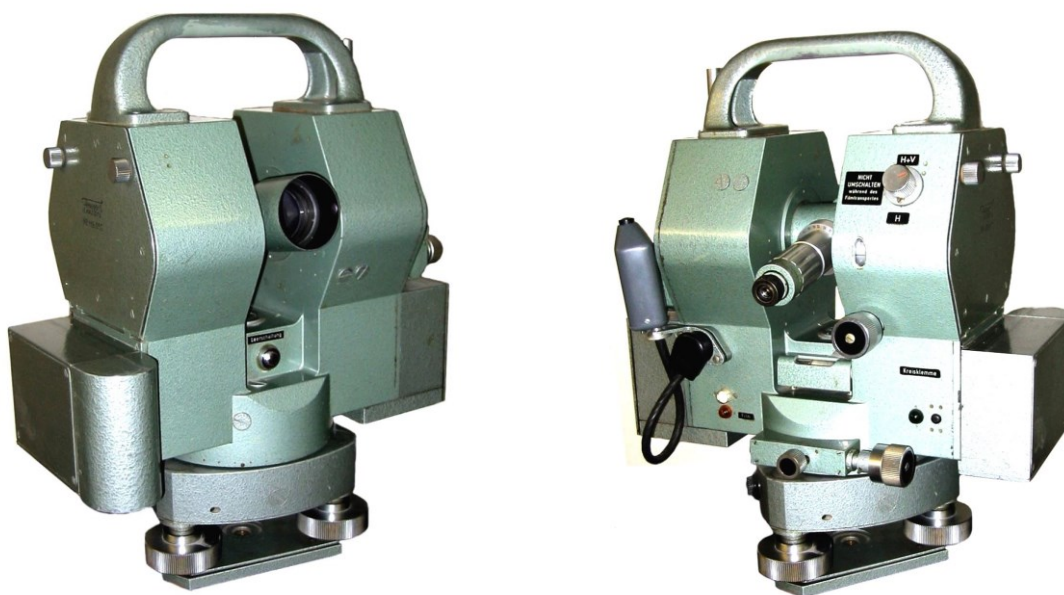
Najveći uticaj na razvoj teodolita imao je Wild. Upitan da prokomentariše u kojem bi pravcu trebao ići razvoj teodolita Wild je rekao: „Dizaj novih instrumenata ne treba voditi ka smanjenju zadatih tolerancija, tj. dozvoljenih grešaka mjerenja, jer su one već pomalo pretjerane. Umjesto toga trebalo bi omogućiti da se rezultati dobiju na što jednostavniji i što lakši način, za manje vremena. Također ne bi trebalo više biti neophodno da korisnik mora kalibrirati instrument prije mjerenja, jer već duže vremena postoje metode kojima se eliminišu greške instrumenta na veoma jednostavan način.“ (Deumlich, 1982.)

Jedan od najraširenijih i najpoznatijih optičkih teodolida koji se svojevremeno koristio jeste Wildov teodolit T2. T2 teodolit je usavršavan kroz vrijeme. Postoji nekoliko varijanti T2 (Tuno & Kogoj, 2011.): T2, NT2, T21, T21 dig, T21E, T210, T21L, T2 MIL, T2 mod, itd. Zadnji primjerak T2 mod je proizveden 1996. godine, a proizvela ga je kompanija Leica. Ovaj teodolit je prodan u desetinama hiljada primjeraka, što ga čini jednim od najprodavanijih geodetskih instrumenata u historiji.

2.1.2 Razvoj elektronskih teodolita

Logičan slijed u razvoju optičkih teodolita predstavlja modernizacija u smislu načina očitavanja horizontalnog i vertikalnog limba. Naime kako bi se izbjegle greške kod čitanja i kako bi se ubrzala mjerenja uvodi se elektronski način registracije podataka. Prvi elektronski teodolit FLT-3 (Slika 2-3) proizvela je kompanija Fennel 1963. godine (Deumlich, 1982.), iako je i ranije bilo pokušaja, prije svega od strane kompanija Wild, Carl Zeiss i Askania, da se uvede elektronski način čitanja i registracije podataka mjerenja. Do pojave FLT-3 teodolita registracija podataka se obavljavala fotografisanjem čitanja podjele limba, što je opet zahtijevalo rad u kancelariji. Elektronska registracija podataka na FLT-3 teodolitu obavljala se fotografskom registracijom kodirane podjele limba na filmu. Daljnja obrada registrovanih mjerenja odvijala se tako što film razvijao pomoću

Zuse Z84 uređaja i podaci prebacivali na 5-kanalnu perforiranu traku, i dalje se obrada vršila pomoću kompjutera. Instrumenati koji rade na principu skeniranja kodne podjele su i Reg Elta 14 (Zeiss) i HP 3820 A (Hewlett Packard). Osim instrumenata kod kojih je registracija bazirana na skeniranju kodne podjele, razvili su se i instrumenti sa inkrementalnim limbom (umjesto kodiranog limba). Prvi teodolit te vrste DIGIGON proizvela je kompanija Breithaupt & Son, Kassel, 1965. godine, no međutim ovaj teodolit se nije serijski proizvodio, nego je služio samo kao demonstracija pomenute metode. Isti princip je korišten i kod AGA Geodimeter 710 kao i kod digitalnog teodolita Vectron koji je proizvela kompanija Keuffel & Esser. Važnost ove metode registracije podataka je što se zahvaljujući razvoju ove metode afirmirala primjena elektronike u izradi geodetskih mjernih instrumenata, što će kasnije rezultirati pojavom totalnih stanica.



Slika 2-3: Prvi elektronski teodolit Fennel FLT-3 (1963.) (URL4)

Elektronski teodoliti se razlikuju po sistemu čitanja i registracije uglova. Razlikuju se tri osnovna postupka očitavanja ugla (Benčić & Solarić, 2008.):

1. apsolutni postupak – kodirani limbovi,
2. relativni postupak – inkrementalni limbovi,
3. dinamički postupak.

Osim ova tri osnovna postupka očitavanja, postoje i kombinacije ova tri postupka.

Apsolutni postupak očitavanja je primijenjen kod tahimetra (integrisan elektronski teodolit i daljinomjer) Opton Oberkochen Elta 2, HP 3820 A, DIGIGON, Leica T 1000, itd.

Relativni postupak je primijenjen kod teodolita Kern E2, Vectron, Geodimeter 700, Wild TC 1, Zeiss Elta 4, Topcon DT-20, itd.

Dinamički postupak je primijenjen kod teodolita Wild T2000.

Osim automatskog očitavanja i registracije podataka, veliki korak naprijed u razvoju elektronskih teodolita predstavlja i uvođenje automatskog kompenzatora, mikroračunara, elektronskog

displeja, laserskog viska. Elektronski teodoliti novije konstrukcije uglavnom su imali jednoosne kompenzatore, dok današnji elektronski teodoliti uglavnom imaju dvoosne kompenzatore, kao i mogućnost automatskog popravljivanja uglova za greške nagnutosti osa teodolita, što je omogućeno upotrebom mikroračunara ugrađenih u elektronske teodolite. Također elektronski teodoliti imaju mogućnost snimanja mjerena u digitalnoj formi, a osim toga, zahvaljući mikroračunarima moguće je vršiti i obradu mjerenih vrijednosti u samim teodolitima.

Kod elektronskih teodolita starije izvedbe stakleni krugovi su proizvođeni tako što se na staklene diskove nanosio sloj voska, na kojem se onda ugravirala podjela (pomoću visoko preciznih mašina) (Rüeger, 2013.). Nakon toga se na staklu gravirala podjela i uklanjao sloj voska. Kasnije su se proizvodili samo šablonski krugovi sa kojih su se onda fotolitografskim postupkom pravile kontakte kopije krugova za instrumente. Fotolitografski postupak je napušten pojavom tzv. „Projekcijskih printera“, koji su omogućavali izradu bezkontaktnih kopija.

Daljnji razvoj elektronskih teodolita usko je povezan sa razvojem tahimetara (totalnih stanica). Elektronski teodoliti se još uvijek proizvode, ali vjerovatno je da će s obzirom na cijenu i praktičnost totalnih stanica otići u historiju.

2.1.3 Razvoj daljinomjera

Daljinomjeri su se razvijali nezavisno od teodolita. Historija razvoja elektrooptičkih daljinomjera (EDM) je donekle povezana sa eksperimentima kojima se pokušavala odrediti brzina svjetlosti. Fizeau je još 1849. godine osmislio koncept rada elektrooptičkih instrumenata (Holsen, 1984.).

Prvi elektrooptički daljinomjer napravljen je u bivšem Sovjetskom savezu 1936. godine. Međutim ovaj instrument je ustvari bio prototip i nije se masovno proizvodio. Švedski fizičar i geodeta Bergstrand je 1949. godine konstruisao prvi elektronski daljinomjer *Geodimeter* (Kogoj, 2006.). Domet daljinomjera je iznosio 40 km. Daljinomjer je bio izrazito velikih dimenzija, te se zbog toga, prilikom izvođenja mjerenja na terenu, prevozio vozom. Radio je na principu faznih mjerenja. Godine 1957. Južnoafrikanac Wadley je izumio *Tellurometer*, koji predstavlja prvi mikrovalni daljinomjer (Deumlich, 1982.). Domet mu je iznosio 80 km. Za razliku od Geodimetra, sa Tellurometrom su se mjerenja mogla izvoditi i po danu. Već 1968. godine su predstavljani elektrooptički daljinomjeri koji su koristili laser – *Quartz* (USSR) i *AGA Geodimeter 8*. Također 1968. godine je predstavljeno prvi daljinomjer za kratke udaljenosti (do 3 km) koji je koristio GaAs diodu, a koji je proizvela kompanija Wild – *DI10* (Deumlich, 1982.).

Daljinomjeri su ubrzano razvijali. U narednim godinama smanjena je veličina instrumenata, povećana je tačnost, mjerenje je postalo brže, omogućeno je mjerenje dužina bez reflektora sa geodetskom tačnošću (Kogoj, 2006.). tokom godina su se sve više kombinovali daljinomjeri sa teodolitima i tako su nastali moderni elektronski tahimetri. Danas se uglavnom proizvode elektronski tahimetri.

2.1.4 Razvoj elektronskih tahimetara

Elektronski tahimetri su nastali kao kombinacija elektronskih teodolita i elektronskih daljinomjera. Tako je 1968. godine kombinacijom optičkog teodolita T2 i elektronskog daljinomjera Wild DI10 nastao elektrooptički tahimetar. Upotreba lasera i GaAs dioda, te automatske registracije podataka mjerenja doprinijela je razvoju elektronskih tahimetara. Među prve elektronske tahimetre se ubrajaju REG ElTa, Geodimeter 700 te TAHIMAT TC1. Ovi tahimetri su imali automatsku registraciju podataka (na bušene papirne trake ili na magnetne trake) (Benčić

& Solarić, 2008.). Podaci mjerenja su se automatski prenosili na računar i vršena je njihova daljnja obrada. Prilikom ovakvog načina automatske registracije podataka mogle su se javiti greške koje su onda uzrokovale pogrešnu obradu podataka. Također, na terenu nije bilo moguće vršiti kontrole mjerenja. Razvojem mikroprocesora ovi problemi su prevaziđeni. Na početku su se uglavnom koristile kombinacije elektronskog daljinomjera i optičkog teodolita, jer je izrada elektronskih teodolita bila skuplja. Vremenom je izrada elektronskih teodolita pojeftinila, a sami instrumenti su postali tačniji i sofisticiraniji. Veoma važan napredak je postignut i primjenom kompenzatora. Današnji elektronski tahimetri uglavnom imaju dvoosne kompenzatore.

Sljedeći korak u razvoju TPS sistema predstavljala je motorizacija (automatizacija) mjernog procesa. Prvi motorizovani elektronski tahimetar *Geodimeter 140* proizvela je AGA 1983. godine (Rüeger, 2013.). Kompanija Geotronics je 1990. proizvela System 4000, što je bio prvi motorizovani sistem sa automatskim traženjem reflektora. Osim automatskog traženja reflektora, postoje i tahimetri sa automatskim praćenjem reflektora.

Najnoviji elektronski tahimetri imaju mogućnost snimanja fotografija, skeniranja, snimanja tačaka koristeći sliku prikazanu na displeju instrumenta (video tahimetrija), softvere sa različitim opcijama za obradu podataka snimanja u samom instrumentu, laserski visak, itd.

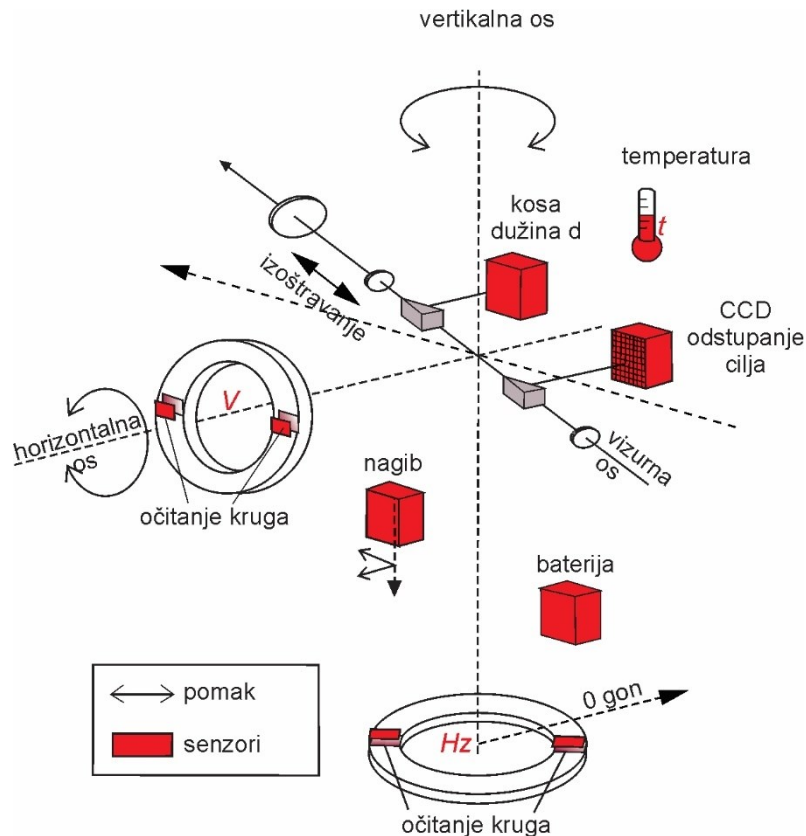
2.2 Princip rada TPS sistema

Svaki proizvođač TPS sistema ima različita tehnička rješenja za svoj sistem, tako da se i princip rada TPS sistema razlikuje u zavisnosti od proizvođača. Tehničke karakteristike TPS sistema zastupljene kod većine proizvođača su:

1. Elektronsko očitavanje kruga
2. Elektronski daljinomjer
3. Elektronski kompenzator
4. Ugrađen motor
5. Daljinsko upravljanje instrumentom
6. Kontrolna jedinica sa memorijom
7. Automatsko prepoznavanje cilja
8. Automatsko praćenje cilja
9. Automatsko traženje cilja
10. Mjerenje dužina bez upotrebe reflektora
11. Video tahimetrija
12. Funkcije skeniranja
13. Povezivanje sa GNSS-om

Elektronski tahimetri su sastavljeni od niza senzora koji se mogu razvrstati u dvije grupe (Benčić & Solarić, 2008.):

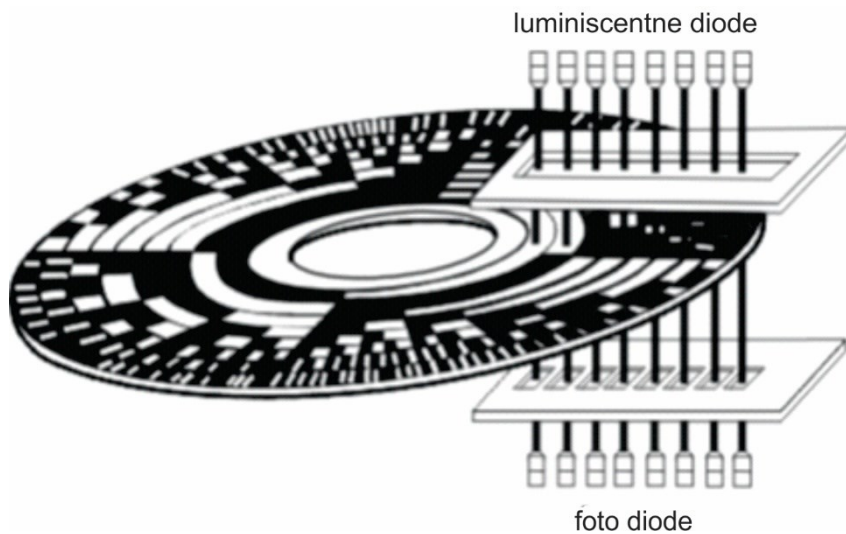
1. Geodetski senzori – kojima se određuju geodetske veličine: horizontalni ugao, vertikalni ugao i kosa dužina. Sastoje se od CCD – elemenata, fotodioda, luminiscentnih dioda, faznog mjerača, itd.
2. Pomoćni senzori – kojima se mjere nagib vertikalne ose tahimetra, temperatura u instrumentu, temperatura i pritisak zraka, napon baterije, odstupanje cilja od optičke osi durbina, itd.



Slika 2-4: Šematski prikaz rasporeda osi i senzora u tahimetrima (Deumlich & Staiger, 2002.)

Očitavanje horizontalnih i vertikalnih pravaca se vrši elektrooptički i rezultati se prikazuju na displeju instrumenta. Kod elektronskih tahimetara novije generacije upotrebljavaju se tri vrste limbova (Rüeger, 2010.):

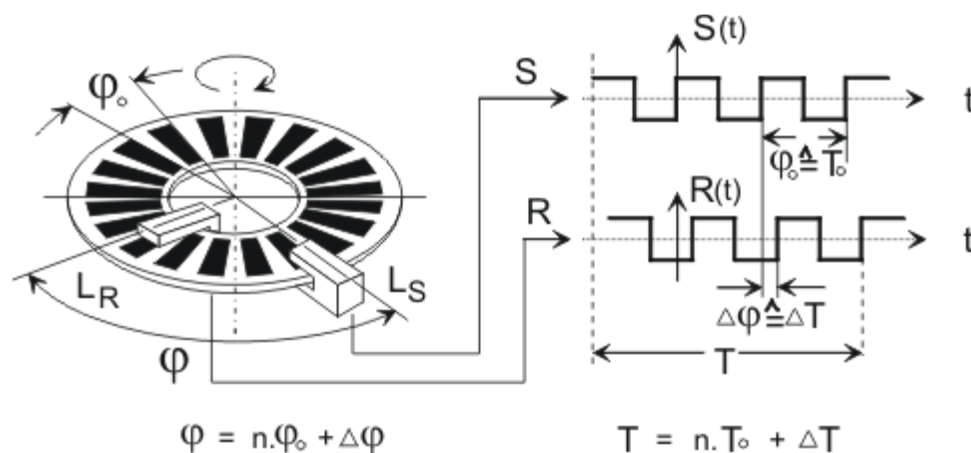
1. Inkrementalni limbovi
2. Kvazi-apsolutni limbovi
3. Apsolutni limbovi



Slika 2-5: Očitavanje kodnih linija

Prethodno je rečeno da postoje dva načina očitavanja i to statički i dinamički. Kod kodiranih limbova, klasična numerička podjela zamijenjena je kodnom podjelom. Mjesto očitavanja je definisano nizom fotoćelija. Fotoćelija predstavlja kombinaciju fotodiode i luminiscentne diode. Tačnost čitanja zavisi od broja kodova, a broj kodova zavisi od broja kodnih linija. Tako bi za instrumente visoke tačnosti trebalo jako puno kodnih linija, što je tehnički ne izvodivo. Zbog toga se primjenjuju dodatne interpolacije kod čitanja kodova, kako bi se postigla tražena tačnost.

Dinamička metoda očitavanja limba zasniva se na dobivanju vrijednosti ugla mjerenjem vremena. Rotirajuća ploča se okrene za minimalno jedan puni krug pri svakom čitanju ugla. Pri tome se vrše očitavanja ploče pomoću dvije fotoćelije: L_S – predstavlja nulto čitanje (nepomična fotoćelija) i L_R – pokretna fotoćelija koja rotira zajedno sa pločom i predstavlja indeks očitavanja. Ugao φ između dvije fotoćelije predstavlja mjerenu vrijednost koja se prikazuje na displeju instrumenta (Deumlich & Staiger, 2002.).



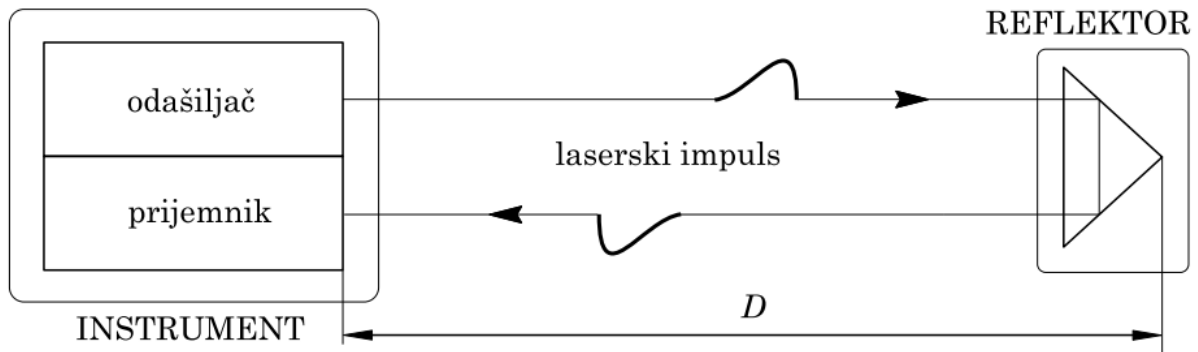
Slika 2-6: Dinamički način čitanja kod teodolita Wild T2000 (Benčić & Solarić, 2008.)

Osnovni princip mjerenja dužina elektronskim daljinomjerom je određivanje dužina na principu mjerenja vremena za koje elektromagnetni valovi pređu udaljenost između početne i krajnje tačke (Kogoj, 2006.). Prema načinu rada daljinomjeri se mogu podijeliti na tri grupe:

- impulsni,
- fazni,
- interferometrijski.

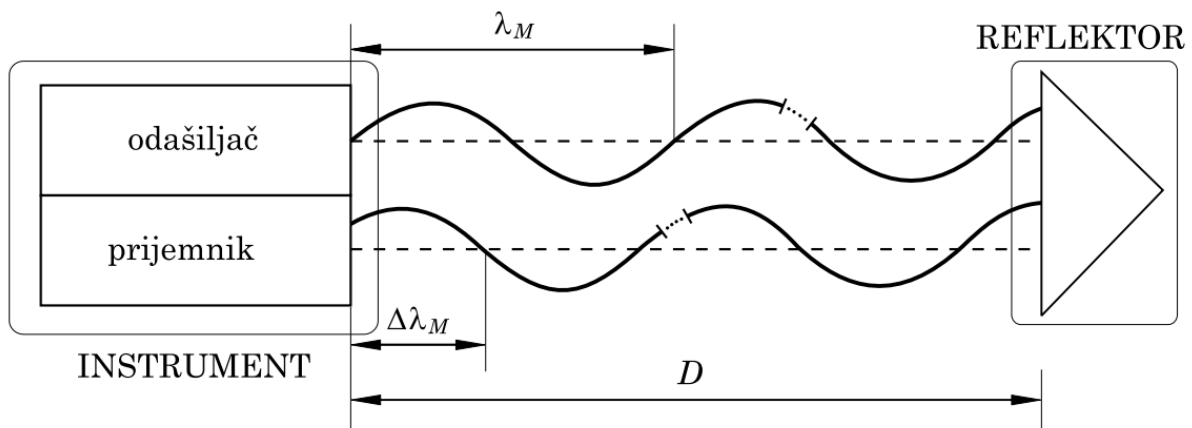
Impulsni daljinomjeri emituju svjetlosni impuls koji se odbija od reflektora i vraća u instrument. Mjeri se vrijeme za koje svjetlosni impuls pređe put od instrumenta do reflektora i nazad. Brzina svjetlosti je poznata, te zajedno sa mjerenim vremenom daje vrijednost pređenog puta, odnosno dužinu do reflektora.

$$D = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2-1)$$



Slika 2-7: Osnovni princip rada impulsnih daljinomjera (Kogoj, 2006.)

Kod faznih daljinomjera glavni zadatak je određivanje fazne razlike odaslanog i primljenog vala. Danas se uglavnom koristi digitalna metoda određivanja fazne razlike, dok su se u prošlosti koristile još i analogna i kompenzacijska metoda.



Slika 2-8: Fazna metoda mjerenja dužina (Kogoj, 2006.)

Interferometrijski daljinomjeri koriste fizikalnu pojavu interferentne svjetlosti, odatle dolazi i sam naziv daljinomjera. Ako udružimo dva koherentna svjetlosna zraka nastaje interferometrijska slika. Oblik interferometrijske slike ovisi od fazne razlike između zraka. Kad zraka titra u fazi, ona ojača i interferometrijska slika je dodata veličini amplitude zraka. Kako je njihova fazna razlika jednaka π , zraka oslabi i amplitude se međusobno oduzimaju, radi čega dolazi do gašenja svjetlosti (Kogoj, 2006.). Interferometrijski daljinomjeri se uglavnom koriste za laboratorijska mjerenja.

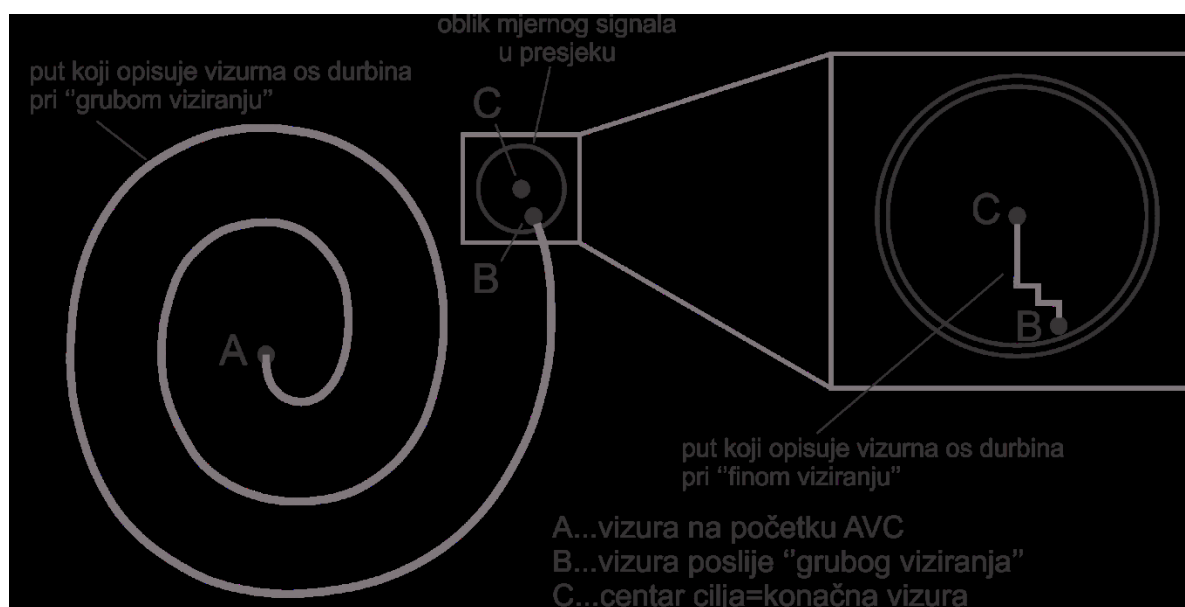
S obzirom na upotrebu reflektora pri mjerenju dužina imamo dvije vrste daljinomjera, i to daljinomjere kod kojih je obavezna upotreba reflektora i daljinomjere koji mogu mjeriti dužinu bez upotrebe reflektora.

Daljinomjeri koji mjere dužinu bez upotrebe reflektora rade na principu impulsnih daljinomjera. Prilikom mjerenja se emituju svjetlosni impulsi izrazito visoke energije u usporedbi sa faznim daljinomjerima. Zbog visoke energije impulsa dolazi do većeg reflektovanja signala od objekta do kojeg se mjeri dužina, te je moguće otkriti odbijeni izvor svjetlosti. Instrumenti novije generacije

rade na istom principu, s tim da su unaprijeđena tehnička rješenja u smislu elektronike kao i u smislu algoritama za obradu reflektovanih signala.

Pojava motorizovanih elektronskih tahimetara je zapravo posljedica želje za automatizacijom i ubrzanjem mjernog procesa. Najnoviji elektronski tahimetri imaju mogućnost automatskog prepoznavanja cilja (APC). Sistem se sastoji od automatskog viziranja cilja (AVC) i automatskog praćenja cilja (APC). Kao treći sastavni dio APC sistema je modul za automatsko traženje cilja. Instrumenti u kojima je ugrađen ovakav sistem su u potpunosti autonomni, tako da više nije potreban operator pored instrumenta. Ovakva rješenja se već koriste kod automatskog praćenja deformacija brana, mostova, tunela i sličnih objekata. Operator upravlja instrumentom iz kancelarije, bez potrebe da ide na teren. Naravno, potrebno je ispuniti čitav niz pripremnih radnji da bi se ovakav jedan sistem realizovao.

U prošlosti se za automatsko viziranje cilja koristio princip detekcije maksimalnog intenziteta povratnog signala. Operator izvrši okretanje durbina prema cilju, zatim instrument vrši „grubo viziranje“ a zatim „fino viziranje“.

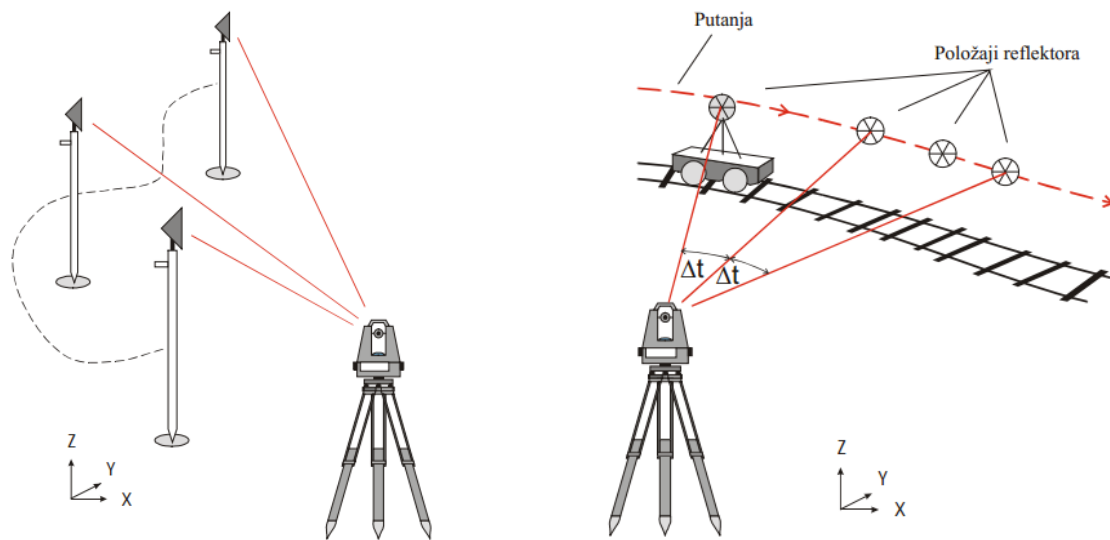


Slika 2-9: Grubo i fino vizira kod principa detekcije maksimalnog intenziteta povratnog signala (Valh, Marjetič, Ježovnik, & Kogoj, 2008.)

Danas se za automatsko viziranje cilja koriste uglavnom CCD (Charged Coupled Device) i CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) kamere i senzori. Daljinomjer odašilje laserski zrak koji se odbija od neke površi. Odbijeni laserski zrak registruje CCD ili CMOS. Zatim se vrši obrada registrovane slike, tako što se traži piksel sa najvećim intenzitetom svjetlosti. Položaj piksela se, na osnovu prethodno utvrđene funkcijske veze između mjernog sistema kamere i mjernog sistema tahimetra, transformiše u odstupanje cilja od vizurne ose po horizontali i vertikalni. Procesor tahimetra uz pomoć motora pomiče durbin na središte reflektora. Vizurna osa nije usmjerena tačno u središte reflektora, pa zbog toga dolazi do odstupanja u čitanju pravaca, ali to nisu definitivne vrijednosti mjerenja. Definitivne vrijednosti se dobivaju tako što se izvrši popravka približnih vrijednosti. Ponovo se vrši registracija odbijenog laserskog zraka na CCD i na osnovu toga se vrši popravka očitanih vrijednosti uglova.

Većina instrumenata koji imaju AVC sistem opremljena je i sistemom za automatsko praćenje cilja. Kada se jednom navizira cilj, instrument ga automatski prati koristeći CCD ili CMOS. Frekvencija obrade odbijenih signala zavisi od mogućnosti procesora AVC sistema senzora kao i od algoritama koji se koriste za APC. Kod APC sistema razlikujemo dvije metode mjerenja:

1. Stop-and-go metoda – kod koje se reflektor (cilj) koji se kreće kontinuirano prati, dok se mjerenje vrši kada se reflektor zaustavi,
2. Kinematička metoda – kod koje se mjerenja na reflektor vrše dok se reflektor kreće.



Slika 2-10: Stop-and-go metoda (lijevo) i kinematička metoda (desno) (Deumlich & Staiger, 2002.)

Glavni problem kod APC sistema nastaje kada se reflektor „izgubi“ iz vidnog polja instrumenta, usljed različitih prepreka na terenu. Također operator koji nosi reflektor mora paziti da ne pravi nagle ili prebrze pokrete sa reflektorom. Kako bi reflektor stalno bio usmjeren prema instrumentu obično se koriste reflektori 360°. Ukoliko se instrument izgubi vezu sa reflektorom, tada se primjenjuju algoritmi koji pokušavaju ekstrapolirati i predvidjeti kako se reflektor kretao za vrijeme prekida signala (Valh, Marjetič, Ježovnik, & Kogoj, 2008.).

Sljedeći korak automatizacije elektronskih tahimetara bio je uvođenje sistema za automatsko traženje cilja (ATC). U početku razvoje tehnologije ATC sistema najveći problem je predstavljalo određivanje područja koje instrument treba pretraživati. Da bi riješili ovaj problem proizvođači su počeli koristiti aktivne i pasivne reflektore. Aktivni reflektor se sastoji od prizme, kontrolne jedinice i uređaja za emitovanje elektromagnetnih valova. Operator usmjeri uređaj prema instrumentu te aktivira ATC sistem. Instrument zatim vrši traženje reflektora odašiljanjem snopa laserskih zraka. Kada se koristi pasivni reflektor, instrument odašilje snop laserskih zraka i u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Kada instrument primi reflektovani signal sistem počinje sa grubim te zatim finim viziranjem.

Najnoviji tahimetri imaju mogućnost mjerenja na osnovu prethodno zadanog grid-a (mreže tačaka). Upotrebom daljinomjera bez reflektora i odgovarajućeg softvera instrument vrši mjerenja po unaprijed zadanom uglovnom razmaku. To je izuzetno korisno kod izvođenja specifičnih radova, kao što su snimanje fasada, kamenoloma, kulturno historijskih spomenika, itd.

Ovakvi instrumenti rade na instom principu kao terestrički laserski skeneri, ali sa puno manjom brzinom.

Videotahimetrija je još jedna od novina kada su pitanju elektronski tahimetri. U durbinu se nalazi ugrađen slikovni senzor, pomoću kojeg se prikupljaju fotografije koje se zatim prikazuju da sipleju instrumenta. Da bi se moglo vršiti snimanje tačaka pomoću prikazane fotografije na displeju, potrebno je naći funkcijsku vezu između koordinatnog sistema slikovnog senzora i koordinatnog sistema instrumenta.

2.3 Ispitivanje preciznosti TPS sistema standardizovanim postupcima

U svijetu postoji veliki broj organizacija koje se bave donošenjem različitih vrsta standarda vezanih za različite oblasti. Najvažnija organizacija koja se bavi izradom standarda vezanih za ispitivanje tačnosti geodetskih instrumenata jeste Međunarodna Organizacija za Standardizaciju (International Organization of Standardization – ISO). Osim ISO organizacije, veoma važna organizacija je i njemačka organizacija „Deutsches Institut für Normung“ – DIN. Također američka organizacija „THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS“ – ASME se bavi izradom standarda vezanih za ispitivanje određenih geodetskih instrumenata. U novije vrijeme izradom standarda se bavi i Asocijacija njemačkih inženjera (The Association of German Engineers (VDI)).

Najvažniji standard koji se koristi za ispitivanje preciznosti TPS mjernih sistema je ISO 17123 i to dijelovi 3, 4 i 5. U sljedećoj tabeli je dat kratki prikaz ovog standarda:

Tabela 2-1: ISO standardi vezani za ispitivanje preciznosti TPS sistema

STANDARD	EN	BIH
ISO 17123	Optics and optical instruments -- Field procedures for testing geodetic and surveying instruments	Optika i optički instrumenti – terenske procedure za testiranje geodetskih i mjernih instrumenata
ISO 17123-3 Publication date: 2001-12	Part 3: Theodolites	Dio 3: Teodoliti
ISO 17123-4 Publication date: 2012-6	Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflector)	Dio 4: Elektro-optički daljinomjeri (EDM mjerenja sa reflektorom)
ISO 17123-5 Publication date: 2012-12	Part 5: Total stations	Dio 5: Totalne stanice

2.3.1 ISO 17123-3: Terenske procedure za određivanje preciznosti teodolita

Ovaj dio ISO 17123 standarda definiše terenske procedure koje se provode kako bi se odredila i testirala preciznost teodolita, kao i prateće opreme, kada se koriste kod izgradnje objekata i premjera. Ovi testovi su namijenjeni za verifikaciju određenog instrumenta za neposredni zadatak i da zadovolje kriterije drugih standarda.

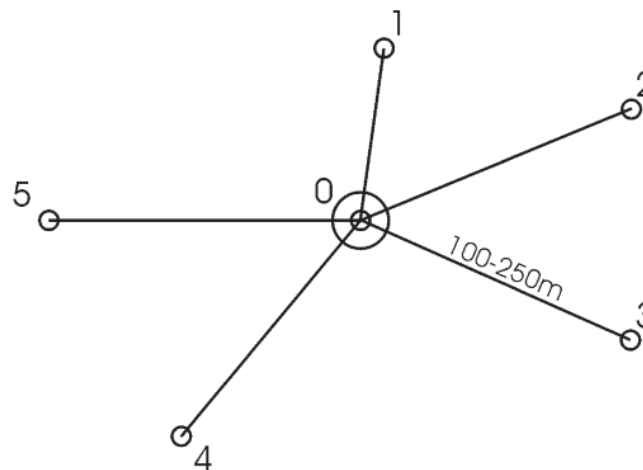
Rezultati testova puno zavise od meteoroloških uslova, posebno temperature. Oblačno vrijeme sa blagim vjetrom pruža najpovoljnije uslove za izvođenje testova. Odabrani vremenski uslovi za testiranje bi trebali odgovarati onima u kojima će se izvoditi mjerenja. Testiranje izvršeno u laboratorijskim uslovima je manje podložno (skoro nikako) atmosferskim uticajima, ali su troškovi izuzetno visoki i nisu prihvatljivi za većinu korisnika. Osim toga, laboratorijski testovi će dati puno veću preciznost u odnosu na onu koja se dobije u realnim uslovima, odnosno mjerenjem

na terenu. Preciznost teodolita se izražava standardnom devijacijom (srednjom kvadratnom greškom) horizontalnih i vertikalnih uglova-pravaca, opažanih jednom u oba položaja durbina. Razlikuju se dva načina ispitivanja preciznosti teodolita, i to pojednostavljeni i puni test.

2.3.1.1 Pojednostavljeni i puni test ISO 17123-3

Pojednostavljenim testom se utvrđuje da li je preciznost određenog teodolita u skladu sa dozvoljenim odstupanjem prema ISO 4463-1. Ovaj test je namijenjen za instrumente kojima se izvode standardna mjerenja. Ukoliko se radi o preciznim mjerenjima onda se provodi rigorozniji potpuni test.

Konfiguracija testnog polja za ispitivanje preciznosti mjerenja horizontalnih pravac je ista za oba testa. Na terenu se postave fiksne vizurne tačke (4 u slučaju pojednostavljenog testa, i 5 u slučaju potpunog testa) tako da se nalaze u približno istoj horizontalnoj ravni kao i instrument, te da su što je više moguće ravnomjerno raspoređene oko horizonta, na udaljenosti od 100 do 250 m (Slika 2-11):



Slika 2-11: Konfiguracija testnog polja za mjerenje horizontalnih pravaca

Za pojednostavljeni test se izvodi jedna serija mjerenja $m = 1$. Za potpuni test se izvode 4 serije mjerenja $m = 4$, i to pod različitim, ali ne ekstremnim vremenskim uslovima.

Svaka serija mjerenja (i) treba sadržavati $n = 3$ girusa (j) za svih $t = 4$ odnosno $t = 5$ tačaka (k).

Kod potpunog testa posebnu pažnju treba obratiti na centrisanje instrumenta. Postignuta tačnost centrisanja se može izraziti preko empirijske standardne devijacije:

- visak: 1 do 2 mm (i lošije u slučaju jakog vjetra)
- optički ili laserski visak: 0,5 mm (provjera viska bi se trebala obaviti prema uputstvu proizvođača)
- kruti visak: 1 mm.

Valja napomenuti da je uticaj greške centrisanja veći što je udaljenost od instrumenta do reflektora kraća.

Opažanja se vrše tako što se u prvom položaju durbina tačke opažaju u smjeru kazaljke na satu, a u drugom položaju u suprotnom smjeru kretanja kazaljke na satu, i to u svakom girusu. Nakon

svakog girusa vrši se pomak očitavanja limba za 60°. Kod elektronskih teodolita nije moguće fizički pomaknuti čitanje, pa se vrši okretanje dražfusa po glavi stativa za cca 120°.

2.3.1.2 Računanje – pojednostavljeni test ISO 17123-3

Proračun preciznosti se radi metodom najmanjih kvadrata. Pravci se označavaju kao $x_{j,k,I}$ i $x_{j,k,II}$, gdje indeks j predstavlja broj girusa k broj tačke. Indeksi I i II predstavljaju položaj durbina. Najprije se izračuna sredina iz dva položaja:

$$x_{j,k} = \frac{x_{j,k,I} + x_{j,k,II} \pm 180^\circ}{2}; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-2)$$

Zatim se vrši redukcija pravaca:

$$x'_{j,k} = x_{j,k} - x_{j,1}; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-3)$$

Srednja vrijednost iz 3 girusa se dobije kao:

$$\bar{x}_k = \frac{x'_{1,k} + x'_{2,k} + x'_{3,k}}{3}; k = 1, \dots, 4 \quad (2-4)$$

Na osnovu razlika:

$$d_{j,k} = \bar{x}_k - x'_{j,k}; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-5)$$

se za svaki girus sračuna srednja vrijednost

$$\bar{d}_j = \frac{d_{j,1} + d_{j,2} + d_{j,3} + d_{j,4}}{4}; j = 1, 2, 3 \quad (2-6)$$

iz čega se onda računa odstupanje:

$$r_{j,k} = d_{j,k} - \bar{d}_j; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-7)$$

Na osnovu broja stepeni slobode $\nu = (n - 1) \times (t - 1)$ i kvadrata odstupanja pojedinog mjerenja od srednje vrijednosti mjerenja $r^2_{j,k}$ dobije se empirijsko standardno odstupanje s pravca $x_{j,k}$ opažanog u jednom girusu u oba položaja durbina:

$$s = \sqrt{\frac{\sum r^2}{6}} \quad (2-8)$$

gdje je

$$\sum r^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 r^2_{j,k}$$

2.3.1.3 Računanje – potpuni test ISO 17123-3

Srednje vrijednosti i odstupanja se računaju na isti način kao i kod pojednostavljenog testa. Razlika između potpunog i pojednostavljenog testa je u broju stepeni slobode. Kod potpunog testa broj stepeni slobode je $\nu = (n - 1) \times (t - 1) = (3 - 1) \times (5 - 1) = 8$. Empirijsko standardno odstupanje s_i pravca $x_{j,k}$ opažanog u jednom girusu u oba položaja durbina za i -tu seriju mjerenja je:

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{8}} \quad (2-9)$$

Empirijsko standardno odstupanje s horizontalnog pravca opažanog u jednom girusu (u oba položaja durbina) sračunato iz sve 4 serije mjerenja, gdje je broj stepeni slobode $\nu = 4 \times \nu_i = 32$, iznosi:

$$s = s_{\text{ISO-THEO-HZ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 s_i^2}{8}} \quad (2-10)$$

Za potpunu proceduru su preporučeni i statistički testovi. Statističke testove je potrebno provesti kako bi se odgovorilo na sljedeća pitanja:

- je li izračunato empirijsko standardno odstupanje s manje od vrijednosti σ koju navodi proizvođač, ili je li manje od druge, unaprijed zadane vrijednosti σ ?
- pripadaju li dva standardna odstupanja s i $\tilde{s}$, određena za dva različita uzorka mjerenja istoj vrsti, pod pretpostavkom da ta oba uzorka imaju isti stepen slobode ν ?

Empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$ mogu se dobiti iz:

- dva uzorka mjerenja istim instrumentom, ali različitim opažačima,
- dva uzorka mjerenja istim instrumentom, ali u različito vrijeme,
- dva uzorka mjerenja od dva različita instrumenta.

Za sljedeće testove uzeto je da je interval povjerenja $1 - \alpha = 0,95$, a broj stepeni slobode je $\nu = 32$.

Tabela 2-2: Statistički testovi (horizontalni pravci, teodolit)

Pitanje	Nulta hipoteza	Alternativna hipoteza
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$\sigma = \tilde{\sigma}$	$\sigma \neq \tilde{\sigma}$

Pitanje a)

Nulta hipoteza je zasnovana na pretpostavci da je empirijsko standardno odstupanje s horizontalnih pravaca opažanih u oba položaja durbina manje ili jednako teoretskoj ili pretpostavljenoj vrijednosti σ , te se hipoteza ne odbacuje ako je ispunjen sljedeći uslov:

$$s \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(\nu)}{\nu}} \quad (2-11)$$

$$s \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(32)}{32}} \quad (2-12)$$

$$\chi_{0,95}^2(32) = 46,19 \quad (2-13)$$

$$s \leq \sigma \times \sqrt{\frac{46,19}{32}} = \sigma \times 1,20 \quad (2-14)$$

U suprotnom hipoteza se odbacuje.

Pitanje b)

U slučaju dva različita uzorka, test pokazuje pripadaju li empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$ istom osnovnom skupu. Odgovarajuća nulta hipoteza $\sigma = \tilde{\sigma}$ se ne odbacuje ako je ispunjen sljedeći uslov:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(v, v)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v, v) \quad (2-15)$$

$$\frac{1}{F_{0,975}(32, 32)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{0,975}(32, 32) \quad (2-16)$$

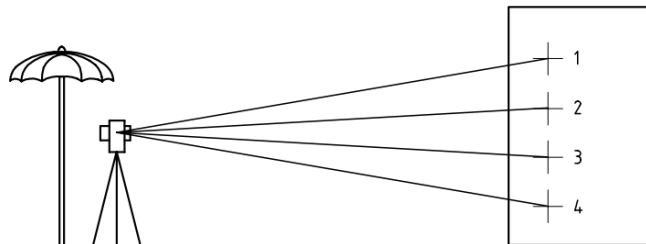
$$F_{0,975}(32) = 2,02 \quad (2-17)$$

$$0,49 \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq 2,02 \quad (2-18)$$

Statistički test (2-15) je Fischerov test.

2.3.1.4 Ispitivanje preciznosti mjerenja vertikalnih uglova prema ISO 17123-3

Teodolit se postavi na udaljenosti oko 50 m od visoke zgrade. Na zgradi se odaberu dobro definisane tačke (dijelovi prozora, čoškovi cigli, dijelovi antena, itd.) ili markice postavljene na zid, tako da zatvaraju vertikalni ugao od približno 30° (Slika 2-12).



Slika 2-12: Konfiguracija testne baze za mjerenje vertikalnih uglova

Prije početka mjerenja treba pustiti da se instrument aklimatizuje. Vrijeme potrebno za aklimatizaciju je oko 2 minute po °C.

I ovdje se kao i kod horizontalnih pravaca razlikuju dvije procedure, i to pojednostavljena i potpuna. Za pojednostavljenu proceduru se mjeri u jednoj seriji u tri girusa na četiri tačke. Za potpunu proceduru se mjeri četiri serije, tri girusa na četiri tačke. Za potpunu proceduru ispitivanja serije treba mjeriti u različitim ali ne ekstremno različitim vremenskim uslovima.

U prvom položaju tačke se opažaju od markice 1 do markice 4, a drugom od markice 4 do markice 1 (Slika 2-12).

Računanje se vrši slično kao i kod horizontalnih pravaca. Prvo se izračuna srednja vrijednost vertikalnog ugla iz dva položaja durbina:

$$x'_{j,k} = \frac{x_{j,k,I} - x_{j,k,II} + 360^\circ}{2}; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-19)$$

Ove vrijednosti su oslobođene uticaja greške vertikalnog indeksa δ_i . Greška vertikalnog indeksa δ_i se treba računati za svaku seriju mjerenja (preporučuje se samo za potpuni test):

$$\delta_i = \frac{1}{n \times t} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 \frac{x_{j,k,I} + x_{j,k,II} - 360^\circ}{2} \quad (2-20)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^4 \delta_i}{4} \quad (2-21)$$

Srednja vrijednost iz $n = 3$ girusa za tačku k je:

$$\bar{x}_k = \frac{x'_{1,k} + x'_{2,k} + x'_{3,k}}{3}; k = 1, \dots, 4 \quad (2-22)$$

Odstupanja od srednje vrijednosti se dobiju kao:

$$r_{j,k} = x'_{j,k} - \bar{x}_k; j = 1, 2, 3; k = 1, \dots, 4 \quad (2-23)$$

Za $n = 3$ girusa i $t = 4$ tačke za i -tu seriju mjerenja broj stepeni slobode je

$$v_i = (3 - 1) \times 4 = 8 \quad (2-24)$$

Empirijsko standardno odstupanje s_i vertikalnog ugla $x'_{j,k}$ mjerenog u jednom girusu u oba položaja durbina za i -tu seriju mjerenja je

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{v_i}} = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{8}} \quad (2-25)$$

U slučaju pojednostavljenog testa radi se samo jedna serija mjerenja pa vrijedi

$$v = v_1 \quad (2-26)$$

$$s = s_1 \quad (2-27)$$

U slučaju potpunog testa broj stepeni slobode za $m = 4$ serije mjerenja je

$$v = 4 \times v_i = 32 \quad (2-28)$$

Empirijska standardna devijacija s iz 4 serije mjerenja

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 s_i^2}{4}} \quad (2-29)$$

odnosno

$$S_{\text{ISO-THEO-V}} = s \quad (2-30)$$

Kao i u slučaju horizontalnih pravaca i ovdje se za potpunu proceduru preporučuju statistički testovi. U svrhu adekvatne interpretacije rezultata ispitivanja, statistički testovi se provode koristeći:

- empirijsko standardno odstupanje s vertikalnog ugla opažanog u oba položaja durbina,
- grešku vertikalnog indeksa δ (orijentacija vertikalnog kruga) i njegovo empirijsko standardno odstupanje s_δ ,

kako bi odgovorili na sljedeća pitanja:

- je li izračunato empirijsko standardno odstupanje s manje od vrijednosti σ koju navodi proizvođač, ili je li manje od druge, unaprijed zadane vrijednosti σ ?
- pripadaju li dva standardna odstupanja s i $\tilde{s}$, određena za dva različita uzorka mjerenja istoj vrsti, pod pretpostavkom da ta oba uzorka imaju isti stepen slobode ν ?
Empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$ mogu se dobiti iz:
 - dva uzorka mjerenja istim instrumentom, ali različitim opažaćima,
 - dva uzorka mjerenja istim instrumentom, ali u različito vrijeme,
 - dva uzorka mjerenja od dva različita instrumenta.
- da li je greška vertikalnog indeksa δ jednaka nuli?

Interval povjerenja je $1 - \alpha = 0,95$, a broj stepeni slobode je $\nu = 32$.

Tabela 2-3: Statistički testovi (vertikalni uglovi)

Pitanje	Nulta hipoteza	Alternativna hipoteza
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$\sigma = \tilde{\sigma}$	$\sigma \neq \tilde{\sigma}$
c)	$\delta = 0$	$\delta \neq 0$

Za pitanje a) vrijede formule (2-11), (2-12), (2-13) i (2-14), dok za pitanje b) vrijede formule (2-15) – (2-18).

Pitanje c)

Uslov da bi hipoteza bila potvrđena je da greška vertikalnog indeksa δ bude jednaka nuli. Taj uslov će biti ispunjen ako vrijedi sljedeće:

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{1-\alpha/2}(\nu) \quad (2-31)$$

$$|\delta| \leq s_\delta \times t_{0,975}(32) \quad (2-32)$$

$$s_\delta = \frac{s}{\sqrt{12} \times \sqrt{4}} \quad (2-33)$$

$$t_{0,975}(32) = 2,04 \quad (2-34)$$

$$|\delta| \leq \frac{s}{\sqrt{48}} \times 2,04 \leq s \times 0,3 \quad (2-35)$$

U suprotnom hipoteza se odbacuje.

Navedene procedure ispitivanja tačnosti mjerenja horizontalnih i vertikalnih uglova su validne za sve vrste TPS sistema, bilo da se radi o analognim, digitalnim ili motorizovanim instrumentima.

2.3.2 Ispitivanje preciznosti elektrooptičkih daljinomjera (EDM) prema ISO 17123-4

Preciznost elektrooptičkih daljinomjera se ispituje prema ISO 17123-4, dok se u prošlosti koristio još i DIN standard 18723-6 (za daljinomjere kratkog doseg). Za vrijeme ispitivanja na terenu potrebno je mjeriti i atmosferske parametre zbog korekcija koje treba provesti u obradi dobivenih mjerenja. Ispitivanje na terenu obavlja se na dva načina: jednostavnim postupkom i potpunim postupkom ispitivanja.

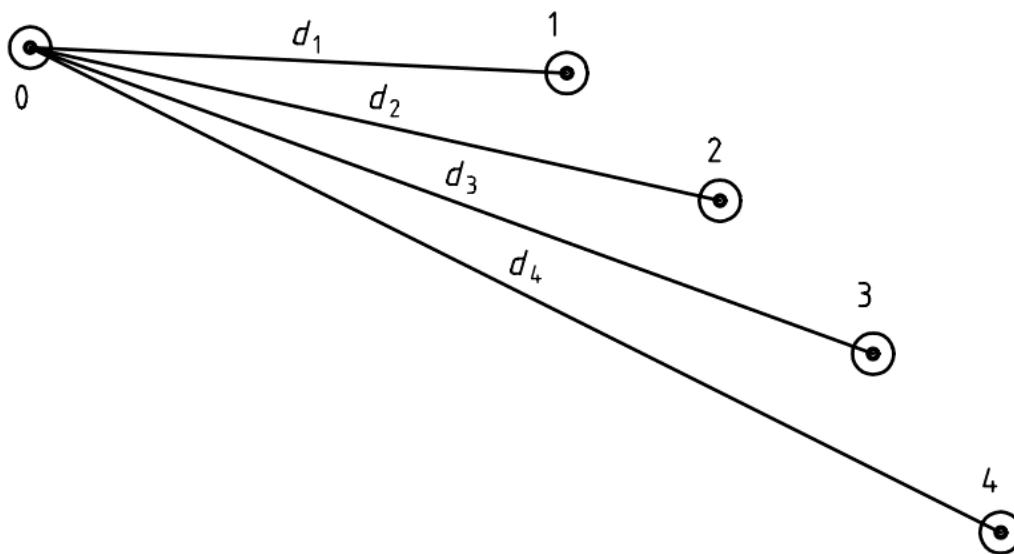
Za precizno ispitivanje daljinomjera potrebno je provesti potpuni postupak ispitivanja. Tim testom moguće je odrediti standardno odstupanje mjerenja dužine s kao i adicijonu korekciju δ . Ova norma također opisuje tri statistička testa kojima se testira nalazi li se dobiveno standardno odstupanje s unutar deklarisanog odstupanja instrumenta σ , pripadaju li testirani uzorci istom većem skupu te je li adicijona korekcija δ jednaka nuli ili deklarisanjoj vrijednosti δ_0 .

2.3.2.1 Pojednostavljena procedura ISO 17123-4

Pojednostavljena procedura ispitivanja osigurava procjenu o tome je li deklarirana preciznost EDM-a unutar dozvoljenog odstupanja prema ISO normi 4463-1. Ovaj postupak ispitivanja se bazira na ograničenom broju mjerenja, zbog čega dobivena preciznost mjerenja može biti nižeg stepena.

Ovaj postupak ispitivanja na testnom području zahtijeva poznavanje dužina. Ako takvo područje nije dostupno, potrebno je dužine odrediti pomoću elektrooptičkih daljinomjera visoke preciznosti.

Prije samog ispitivanja na terenu je potrebno uspostaviti tačke na kojima će se postaviti instrument i prizme. Kao tačke bi se trebali postaviti stubovi sa centralnim zavrtnjem, a ukoliko to nije moguće, onda bi trebalo izvršiti stabilizaciju geodetskih biljega na klasičan način. Udaljenost od EDM do prizmi bi se trebala kretati unutar radne dužine EDM (npr. od 20 m do 200 m). Testno polje se sastoji od 5 tačaka (stajalište i 4 prizme) (Slika 2-13).



Slika 2-13: Konfiguracija testne baze za pojednostavljenu proceduru ispitivanja EDM-a

Za uspostavljanje testnog polja potrebno je svaku dužinu izmjeriti tri puta, te izračunati aritmetičku sredinu. Srednje dužine se trebaju popraviti za uticaj temperature i pritiska, koji se mjere prilikom mjerenja dužina. Popravljenе srednje vrijednosti se smatraju referentnim veličinama:

$$\bar{x}_1 = d_1, \bar{x}_2 = d_2, \bar{x}_3 = d_3 \text{ i } \bar{x}_4 = d_4.$$

Prilikom postavljanja instrumenta iznad geodetskih tačaka stabilizovanih u tlu, posebnu pažnju treba obratiti na centrisanje.

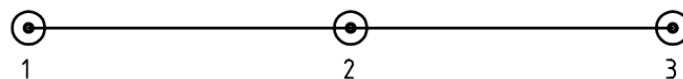
Svaka dužina se mjeri tri puta, i pri tome se mjere atmosferski parametri, kako bi se popravile dužine za uticaj temperature i pritiska. Mjerene dužine x_1, x_2, x_3 i x_4 su srednje vrijednosti iz tri mjerenja, i popravljene su za uticaj atmosferskih parametara.

Sve razlike $\bar{x}_j - x_j$ trebaju biti unutar dozvoljenog odstupanja $\pm p$ (prema ISO 4463-1) za određeni zadatak. Ako dozvoljeno odstupanje p nije dato, sve razlike trebaju biti $|\bar{x}_j - x_j| \leq 2,5 \times s$, gdje je s empirijska standardna devijacija jednostruko mjerene dužine, određena na osnovu potpune procedure sa EDM instrumentom korištenim za određivanje dužina u testnom polju.

Ako su razlike $|\bar{x}_j - x_j|$ prevelike za određeni zadatak, potrebno je provesti dodatna istraživanja kako bi se odredili uzroci grešaka.

Ako su sve razlike $\bar{x}_j - x_j$ istog predznaka, onda je vjerovatno uzrok postojanje sistematske greške. To može biti greška nule ili greška mjerila. Ukoliko se ne može prepoznati sistematska greška, preporučuje se provođenje potpune procedure.

Ukoliko se sumnja na grešku mjerila, potrebno je testirati frekvenciju EDM-a u laboratoriji. Za provjeru korekcije nulte tačke δ (adicionu konstantu), uspostavi se privremena baza (dužine oko 50 m) koja se sastoji od barem tri tačke koje su u pravcu i da su u približno istoj horizontalnoj ravni (Slika 2-14). Na tačke se postavje tri stativa sa priborom za prisilno centrisanje.



Slika 2-14: Privremena baza za provjeru korekcije nulte tačke δ

Adiciona konstanta se računa iz tri mjerene dužine:

$$\delta = \overline{1,3} - \overline{1,2} - \overline{2,3} \quad (2-36)$$

gdje su

δ – adiciona konstanta;

$\overline{1,3}, \overline{1,2}, \overline{2,3}$ – mjerene dužine između tri tačke.

2.3.2.2 Potpuna procedura ISO 17123-4

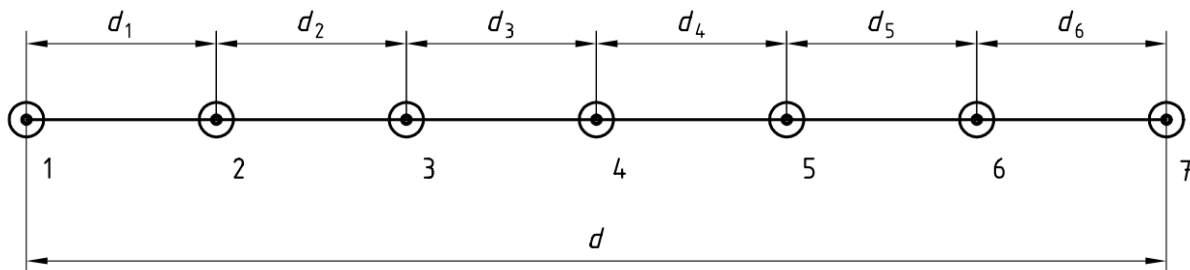
Potpuna procedura ispitivanja se treba koristiti kako bi se odredila najveća moguća mjera preciznosti nekog EDM instrumenta, i ostale opreme, pri uslovima koji vladaju na terenu.

Potpuna procedura se zasniva na mjerenju dužina u svim kombinacijama na bazi, a da pri tome nisu unaprijed poznate dužine između baznih tačaka (ili stativa ako tačke nisu stabilizovane).

Empirijsko standardno odstupanje pojedinačnog mjerenja dužine se određuje na osnovu izravnjanja dužina u svim kombinacijama po metodi najmanjih kvadrata. Naravno u svim kombinacijama. Ovim postupkom se ne mogu otkriti greška mjerila EDM-a. Međutim, greška mjerila nema nikakvog značaja ni uticaja ni na standardno odstupanje s , niti na adicionu korekciju δ . Kako bi se odredila stabilnost mjerila, frekvencija mjerenja EDM instrumenta se treba provjeriti u laboratoriji.

Mjera preciznosti se izražava pomoću empirijske standardne devijacije s , mjerene dužine $S_{\text{ISO-EDM}}$.

Baza za ispitivanje treba biti duga od 300 do 600 metara (po potrebi može biti i duža), te se sastojati od 7 tačaka u pravcu (Slika 2-15). Baza se uspostavlja na ravnom terenu ili na blago nagnutom terenu.



Slika 2-15: Konfiguracija baze za potpunu proceduru ispitivanja (ISO 17123-4)

Baza se može uspostaviti na dva načina:

- baza sa 21 različitom dužinom,
- baza s kojom je uključeno i ispitivanje cikličke greške instrumenta.

Za određivanje adicione konstante EDM koristi se postupak mjerenja 21 različite dužine unutar bazne linije od sedam tačaka, a najbolji rezultati će se dobiti ako tačke budu na sljedećim međusobnim rastojanjima:

$$d_1 = \frac{d}{63}, d_2 = 2d_1, d_3 = 4d_1, d_4 = 8d_1, d_5 = 16d_1 \text{ i } d_6 = 32d_1$$

gdje je d ukupna dužina baze.

Mjerenje dužina

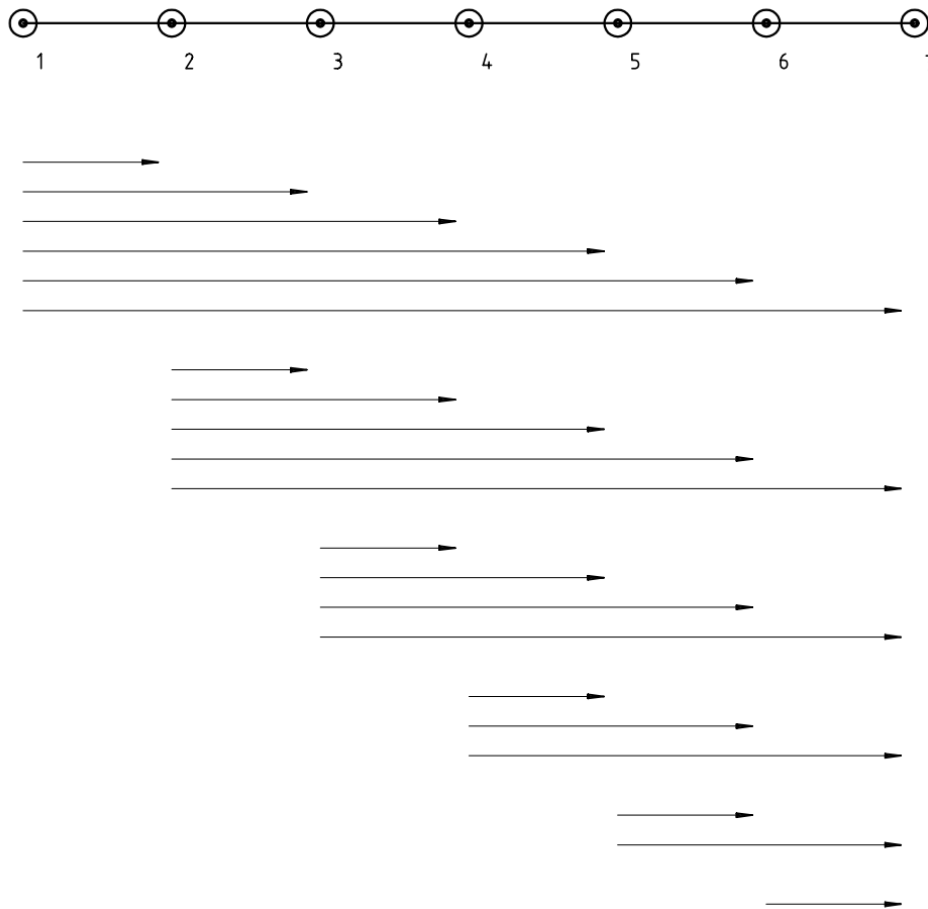
Kako je već navedeno potrebno je izmjeriti 21 dužinu na bazi (Slika 2-16), te istovremeno mjeriti atmosferske parametre. Potrebno je koristiti pribor za prisilno centrisanje, kako bi se eliminisala greška centrisanja. Prizma se odabire tako da se sve dužine mjere sa dobrim povratnim signalom. Mjerenje dužina izvoditi samo kada je vidljivost dobra i kada nije pretjerano sunčano.

Svaku dužinu je moguće mjeriti u više ponavljanja iz kojih se konačna vrijednost mjerene dužine $\bar{x}_{p,q}$ dobije računanje aritmetičke sredine:

$$\tilde{x}_{p,q} = \frac{x_{p,q_1} + \dots + x_{p,q_n}}{n} \quad (2-37)$$

gdje su:

- x_{p,q_i} – pojedinačno mjerena dužina,
- p – broj tačke stajališta,
- q – broj vizurne tačke,
- n – broj ponavljanja pojedinačnih mjerenja dužine.



Slika 2-16: Prikaz 21 dužine koje je potrebno izmjeriti (ISO 17123-4)

Računanje

Mjerenja $\tilde{x}_{p,q}$ predstavljaju sirova mjerenja EDM i potrebno ih je popraviti za uticaj atmosfere, a u slučaju da su mjerene kose dužine potrebno ih je redukovati na horizont. Popravljenja mjerenja se onda izravnavaju po metodi najmanjih kvadrata rješavanjem sistema normalnih jednačina. Obzirom da su sva mjerenja obavljena sa jednakom tačnošću težina svih mjerenja je 1, te je matrica težina zapravo jedinična matrica. Nepoznate vrijednosti su dužine između tačaka $\bar{x}_{1,2}, \bar{x}_{2,3}, \bar{x}_{3,4}, \bar{x}_{4,5}, \bar{x}_{5,6}, \bar{x}_{6,7}$ i adiciona korekcija δ .

Rezultati se dobiju primjenom sljedećih formula:

$$a_p = \sum_{q=1}^{7-p} x_{q,p+q} - \sum_{q=1}^p x_{q,7-p+q}; p = 4, 5, 6 \quad (2-38)$$

$$b_p = \frac{1}{7} \left(\sum_{q=p+1}^7 x_{p,q} - \sum_{q=1}^{p-1} x_{q,p} \right); p = 1, \dots, 7 \quad (2-39)$$

$$\delta = \frac{1}{35} \sum_{p=4}^6 (2p - 7) \times a_p \quad (2-40)$$

Popravke $r_{p,q}$ mjerenih dužina (bez adicijon korekcije) su

$$r_{p,q} = b_p - b_q - \frac{7 + 2(p - q)}{7} \times \delta - x_{p,q}; p = 1, \dots, 6; q = p + 1, \dots, 7 \quad (2-41)$$

Dalje je

$$\sum r^2 = \sum_{p=1}^6 \sum_{q=p+1}^7 r_{p,q} = r_{1,2}^2 + r_{1,3}^2 + \dots + r_{6,7}^2 \quad (2-42)$$

gdje je

$\sum r^2$ suma kvadrata popravki $r_{p,q}$.

Broj stepeni slobode ν je

$$\nu = n - u = 14 \quad (2-43)$$

gdje su:

n – broj mjerenja (=21),

u – broj nepoznatih parametara (=6+1=7).

Empirijsko standardno odstupanje pojedinačno mjerene dužine je

$$s_{\text{ISO-EDM}} = s = \sqrt{\frac{\sum r^2}{\nu}} = \sqrt{\frac{\sum r^2}{14}} \quad (2-44)$$

Empirijsko standardno odstupanje adicione korekcije je

$$s_{\delta} = s \times \frac{1}{\sqrt{5}} = s \times 0,45 \quad (2-45)$$

Statistički testovi

Statistički testovi se provode samo kod potpune procedure. Za interpretaciju rezultata statistički testovi se provode koristeći:

- standardno odstupanje dužina mjerenih na baznoj liniji s ,
- adicijonu korekciju EDM-a δ i njeno standardno odstupanje s_{δ} ,

u svrhu odgovora na sljedeća pitanja:

- a) je li izračunato empirijsko standardno odstupanje s manje od odgovarajućeg standardnog odstupanja σ deklarisanog od proizvođača ili manje od neke druge predodređene vrijednosti σ ?
- b) pripadaju li dva empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$, dobivena iz dviju sesija u kojima je mjereno istim instrumentom u različito vrijeme ili različitim instrumentima, istom skupu pretpostavljajući da oba imaju isti broj stepeni slobode ν ?

- c) je li adicijona korekcija δ jednaka nuli kako je deklarirano od proizvođača ($\delta_0 = 0$) ili, ako je za prizmu poznata vrijednost adicione korekcije, je li $\delta = \delta_0$?

Za testove koji slijede (Tabela 2-4) uzima se nivo pouzdanosti od $1 - \alpha = 0,95$, dok je broj stepeni slobode $\nu = 14$.

Tabela 2-4: Statistički testovi za EDM

Pitanje	Nulta hipoteza (H_0)	Alternativna hipoteza (H_1)
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$\sigma = \tilde{\sigma}$	$\sigma \neq \tilde{\sigma}$
c)	$\delta = \delta_0$	$\delta \neq \delta_0$

Pitanje a)

Nulta hipoteza navodi da je empirijsko standardno odstupanje s manje ili jednako teoretskoj ili unaprijed određenoj vrijednosti σ te se prihvata ako je zadovoljeno:

$$s_0 \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi^2_{1-\alpha}(\nu)}{\nu}} = \sigma \times \sqrt{\frac{23,68}{14}} = \sigma \times 1,30 \quad (2-46)$$

U protivnom nulta hipoteza se odbacuje i prihvata se alternativna hipoteza.

Pitanje b)

U slučaju dviju različitih sesija test pokazuje pripadaju li empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$ istom uzorku. Nulta hipoteza se prihvata ako vrijedi:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(\nu, \nu)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(\nu, \nu) \quad (2-47)$$

to jest ako je

$$0,34 \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq 2,98 \quad (2-48)$$

U protivnom nulta hipoteza se odbacuje.

Pitanje c)

Nulta hipoteza jednakosti adicijonih korekcija daljinomjera prihvata se ako je zadovoljen uslov:

$$|\delta - \delta_0| \leq s_\delta \times t_{1-\alpha/2}(\nu) \quad (2-49)$$

to jest

$$|\delta - \delta_0| \leq s_\delta \times 2,14 \quad (2-50)$$

U suprotnom nulta hipoteza se odbacuje.

2.3.3 ISO 17123-5: Terenske procedure za ispitivanje totalnih stanica

Standard ISO 17123-5: 2012 definiše terenske postupke ispitivanja totalnih stanica koji se trebaju primijeniti kada se određuje nesigurnost rezultata dobivenih terenskim mjerenjima. Terenski postupci su razvijeni tako da se na što jednostavniji način odredi preciznost instrumenta.

Prije samog početka mjerenja potrebno je osigurati zadovoljavajuću preciznost opreme (instrument, prizme, stativi, drajfusi) koja će se koristiti prilikom mjerenja. Preciznost opreme, kao i način ispitivanja su dati u prospektima proizvođača. Prije mjerenja prema ISO standardu potrebno je svu opremu ispitati i rektifikovati prema upustvima proizvođača. Također, kada se izvode terenska mjerenja potrebno je koristiti stativ i prizme koji se preporučuju od proizvođača instrumenta.

Mjerenja su zapravo koordinate (x, y, z) u lokalnom koordinatnom sistemu. Mjerenja se istog dana. Instrument uvijek treba biti pažljivo centrisan i horizontisan. Također je potrebno koristiti adicijonu konstantu prizme.

Rezultati ovih ispitivanja su pod uticajem atmosferskih uslova, posebno temperaturnog gradijenta. Preporučuje se da se mjerenja izvode za vrijeme oblačnog neba i s vjetrom što manje brzine. Prilikom izvođenja mjerenja obavezno se mjere atmosferski parametri kako bi se odredio njihov uticaj na mjerene dužine.

Kao i prethodnim slučajevima ispitivanja preciznosti mjerenja uglova i dužina prema ISO standardu, i ovdje imamo dvije procedure:

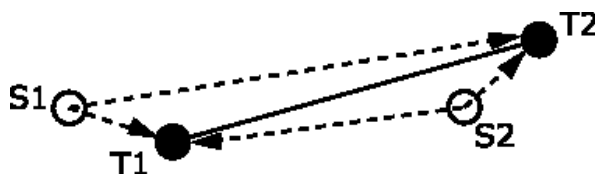
- pojednostavljena procedura ispitivanja i
- potpuna procedura ispitivanja.

2.3.3.1 Pojednostavljena procedura ISO 17123-5

Pojednostavljenom procedurom ispitivanja se dobiva procjena je li preciznost totalne stanice unutar dozvoljenog odstupanja. Pojednostavljena procedura se zasniva na malom broju mjerenja (x, y, z) koordinate). Preciznost se dobije kao maksimalna razlika od srednje vrijednosti mjerenja. Ovim postupkom nije moguće dobiti standardo odstupanje.

Konfiguracija testnog polja

Na terenu se stabilizuju dvije tačke, na udaljenosti oko 60 m, i ako to teren dopušta, da budu na različitim visinama (Slika 2-17). Stajališta (S1 i S2) treba odabrati tako da budu što bliže pravcu koji prolazi tačkama (T1, T2), na udaljenosti od 5 do 10 metara od pojedine tačke.



Slika 2-17: Konfiguracija testnog polja

Mjerenja

Jedna serija mjerenja se sastoji od dvaju mjerenja prema svakoj tački u jednom položaju instrumenta. Koordinate tačaka (T1, T2) treba mjeriti u četiri serije (položaj instrumenta: I – II – I – II) na stajalištu S1. Instrument se potom premjesti na stajalište S2 te se obave mjerenja

istim redoslijedom kao i na prvom stajalištu (položaj instrumenta: I – II – I – II). Koordinate stajališta i orijentacija su proizvoljne veličine (Tabela 2-5)

Tabela 2-5: Redoslijed opažanja kod pojednostavljene procedure

Redni broj	Stajalište i	Vizura j	Set k	Položaj instrumenta	$x_{i,j,k}$ [m]	$y_{i,j,k}$ [m]	$z_{i,j,k}$ [m]
1	1	1	1	I	$x_{1,1,1}$	$y_{1,1,1}$	$z_{1,1,1}$
2		2			$x_{1,2,1}$	$y_{1,2,1}$	$z_{1,2,1}$
3		1	2	II	$x_{1,1,2}$	$y_{1,1,2}$	$z_{1,1,2}$
4		2			$x_{1,2,2}$	$y_{1,2,2}$	$z_{1,2,2}$
5		1	3	I	$x_{1,1,3}$	$y_{1,1,3}$	$z_{1,1,3}$
6		2			$x_{1,2,3}$	$y_{1,2,3}$	$z_{1,2,3}$
7		1	4	II	$x_{1,1,4}$	$y_{1,1,4}$	$z_{1,1,4}$
8		2			$x_{1,2,4}$	$y_{1,2,4}$	$z_{1,2,4}$
9	2	1	1	I	$x_{2,1,1}$	$y_{2,1,1}$	$z_{2,1,1}$
10		2			$x_{2,2,1}$	$y_{2,2,1}$	$z_{2,2,1}$
11		1	2	II	$x_{2,1,2}$	$y_{2,1,2}$	$z_{2,1,2}$
12		2			$x_{2,2,2}$	$y_{2,2,2}$	$z_{2,2,2}$
13		1	3	I	$x_{2,1,3}$	$y_{2,1,3}$	$z_{2,1,3}$
14		2			$x_{2,2,3}$	$y_{2,2,3}$	$z_{2,2,3}$
15		1	4	II	$x_{2,1,4}$	$y_{2,1,4}$	$z_{2,1,4}$
16		2			$x_{2,2,4}$	$y_{2,2,4}$	$z_{2,2,4}$

Računanja

Računanje preciznosti se vrši posebno za x, y koordinate a posebno za z koordinatu.

a) Računanje preciznosti za x, y koordinate

Preciznost je data kao razlika horizontalne dužine svakog seta mjerenja i njihove srednje vrijednosti. Horizontalna dužina $l_{i,k}$ između dvije tačke je data izrazom:

$$l_{i,k} = \sqrt{(x_{i,2,k} - x_{i,1,k})^2 + (y_{i,2,k} - y_{i,1,k})^2}; i = 1,2; k = 1,2,3,4; \quad (2-51)$$

Srednja vrijednost horizontalne dužine se računa prema izrazu

$$L = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 l_{i,k} \quad (2-52)$$

Polovine razlika se računaju prema izrazu

$$r_{i,k} = \frac{l_{i,k} - L}{2}; i = 1,2; k = 1,2,3,4; \quad (2-53)$$

Maksimalna razlika se računa kao

$$d_{i,k} = \max |r_{i,k}| \quad (2-54)$$

b) Računanje preciznosti za z koordinatu

Visinske razlike između dviju tačaka $d_{z,i,k}$ se računaju iz svakog seta mjerenja

$$d_{z,i,k} = z_{i,2,k} - z_{i,1,k}; i = 1,2; k = 1,2,3,4; \quad (2-55)$$

Zatim se računa srednja vrijednost visinskih razlika a_z :

$$a_z = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 d_{z,i,k} \quad (2-56)$$

Reziduali se računaju prema izrazu

$$r_{z,i,k} = d_{z,i,k} - a_z; i = 1,2; k = 1,2,3,4; \quad (2-57)$$

Polovina maksimalne vrijednosti reziduala se računa kao

$$d_z = \frac{1}{2} \max |r_{z,i,k}| \quad (2-58)$$

Maksimalne razlike $d_{x,y}$ i d_z trebaju biti unutar dozvoljenih odstupanja $\pm p_{x,y}$ i $\pm p_z$ prema ISO 4463-1. Ako dozvoljena odstupanja $\pm p_{x,y}$ i $\pm p_z$ nisu data, računaju se prema izrazima

$$d_{x,y} \leq 2,5 \times \sqrt{2} \times s_{\text{ISO-TS-XY}} \quad (2-59)$$

$$d_z \leq 2,5 \times \sqrt{2} \times s_{\text{ISO-TS-Z}} \quad (2-60)$$

gdje su: $s_{\text{ISO-TS-XY}}$ i $s_{\text{ISO-TS-Z}}$ empirijska standardna odstupanja određena potpunom procedurom ispitivanja sa istim instrumentom.

2.3.3.2 Potpuna procedura ISO 17123-5

Potpuna procedura ispitivanja je dizajnirana tako da bude realna mjera preciznosti totalnih stanica koja se može dobiti terenskim ispitivanjem instrumenta. Empirijska standardna odstupanja koordinata ($s_{\text{ISO-TS-XY}}$ i $s_{\text{ISO-TS-Z}}$) svake tačke se određuju metodom najmanjih kvadrata, i predstavljaju mjeru preciznosti.

Potpuna procedura ispitivanja se provodi da bi smo odredili:

- preciznost totalne stanice i pratećeg pribora za mjerenje (stativi, prizme),
- promjene preciznosti instrumenta u dužim vremenskim razdobljima i
- preciznost nekoliko totalnih stanica, kako bi se uporedile dobivene preciznosti u sličnim terenskim uslovima.

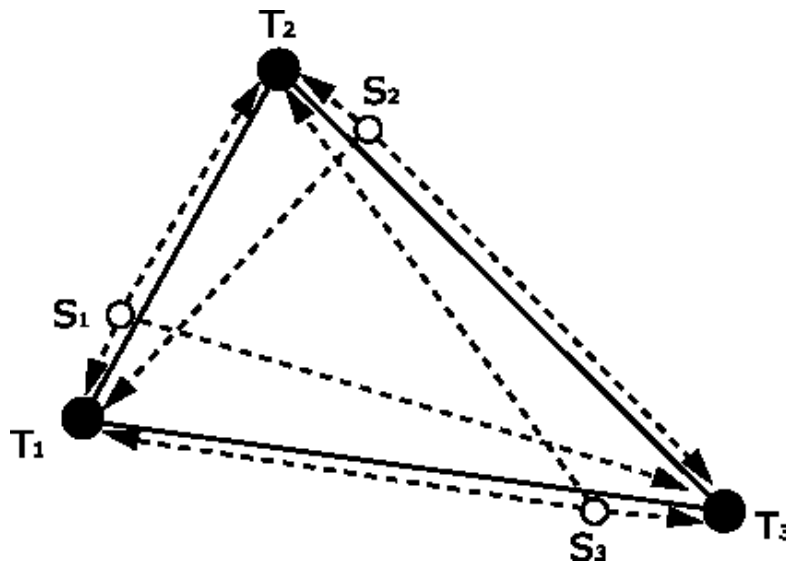
Kao i u prethodnim slučajevima kod potpunih procedura ispitivanja, tako se i ovdje provode statistički testovi, i to da bi se odredilo da li dobivena empirijska standardna odstupanja pripadaju skupu koji sadrži teorijska standardna odstupanja instrumenta (χ^2 test) i da li dva testna uzorka pripadaju istom skupu (Fischerov test).

Konfiguracija testnog polja

Na terenu se stabilizuju tri tačke (Slika 2-18), tako da dužine stranica trokuta čiji su vrhovi stabilizovane tačke budu međusobno različite (oko 60 m). Preporučljivo je da tačke budu na različitim visinama. Mjerenja se vrše sa tri stajališta, koja se biraju tako da budu što bliže stranicama trougla, na udaljenosti 5 do 10 metara od svake tačke.

Mjerenja

Mjerenja se vrše u četiri serije, pri čemu se jedna serija mjerenja sastoji od tri mjerenja prema svakoj tački u jednom položaju instrumenta. Koordinate stajališta i orijentacija nule limba su proizvoljne veličine.



Slika 2-18: Konfiguracija testnog polja kod potpune procedure ISO 17123-5

Redoslijed mjerenja sa jednog stajališta je prikazan u Tabela 2-6. Sa druga dva stajališta je isti postupak mjerenja.

Tabela 2-6: Redoslijed opažanja kod potpune procedure (sa stajališta S1)

Redni broj	Stajalište i	Vizura j	Set k	Položaj instrumenta	$x_{i,j,k}$ [m]	$y_{i,j,k}$ [m]	$z_{i,j,k}$ [m]
1	1	1	1	I	$x_{1,1,1}$	$y_{1,1,1}$	$z_{1,1,1}$
2		2			$x_{1,2,1}$	$y_{1,2,1}$	$z_{1,2,1}$
3		3			$x_{1,3,1}$	$y_{1,3,1}$	$z_{1,3,1}$
4		1	2	II	$x_{1,1,2}$	$y_{1,1,2}$	$z_{1,1,2}$
5		2			$x_{1,2,2}$	$y_{1,2,2}$	$z_{1,2,2}$
6		3			$x_{1,3,2}$	$y_{1,3,2}$	$z_{1,3,2}$
7		1	3	I	$x_{1,1,3}$	$y_{1,1,3}$	$z_{1,1,3}$
8		2			$x_{1,2,3}$	$y_{1,2,3}$	$z_{1,2,3}$
9		3			$x_{1,3,3}$	$y_{1,3,3}$	$z_{1,3,3}$
10		1	4	II	$x_{1,1,4}$	$y_{1,1,4}$	$z_{1,1,4}$
11		2			$x_{1,2,4}$	$y_{1,2,4}$	$z_{1,2,4}$
12		3			$x_{1,3,4}$	$y_{1,3,4}$	$z_{1,3,4}$

Računanja

a) Računanje preciznosti za x, y koordinate

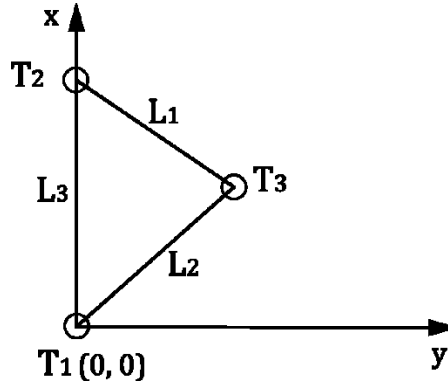
Prvo se izračunaju horizontalne dužine između tri tačke:

$$l_{i,j,k} = \sqrt{(x_{i,j-1,k} - x_{i,j+1,k})^2 + (y_{i,j-1,k} - y_{i,j+1,k})^2}; i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-61)$$

Srednja dužina svake stranice trougla se računa prema izrazu:

$$L_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^4 l_{i,j,k}; j = 1, 2, 3; \quad (2-62)$$

Koordinate tačka trougla su lokalnom koordinatnom sistemu. Uzmimo za koordinatni početak tačku T_1 , a tačka T_2 neka leži na x osi (Slika 2-19).



Slika 2-19: Lokalni koordinatni sistem

Koordinate tačke T_1 su:

$$T_1(X_1, Y_1) = (0, 0) \quad (2-63)$$

Koordinate tačke T_2 su:

$$T_2(X_2, Y_2) = (L_3, 0) \quad (2-64)$$

Koordinate tačke T_3 su:

$$T_3(X_3, Y_3) = \left(\frac{-L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}{2L_3}, \sqrt{L_2^2 - \frac{-L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}{2L_3}} \right) \quad (2-65)$$

Koordinate težišta trougla su:

$$(X_g, Y_g) = \left(\frac{\sum_{j=1}^3 X_j}{3}, \frac{\sum_{j=1}^3 Y_j}{3} \right) \quad (2-66)$$

Koordinate težišta trougla računaju se za svako stajalište i

$$(x_{gi}, y_{gi}) = \left(\frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 x_{i,j,k}}{12}, \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 y_{i,j,k}}{12} \right); i = 1, 2, 3 \quad (2-67)$$

Razlike koordinata tačaka trougla i težišta se računaju prema izrazu:

$$X_{t,i,j,k} = X_j + (x_{gi} - X_g), Y_{t,i,j,k} = Y_j + (y_{gi} - Y_g); i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-68)$$

Sljedeći korak predstavlja rotacija matematičkog modela trougla oko težišta da bi se smanjili reziduali najvećih koordinata između matematičkog modela i mjerenih vrhova trougla. Ugao rotacije je

$$\theta_{i,k} = \tan^{-1} \left(\frac{q_{i,k}}{p_{i,k}} \right); i = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-69)$$

gdje su:

$$q_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^3 [(X_{t,i,j,k} - x_{g,i})(y_{i,j,k} - y_{g,i}) - (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i})(x_{i,j,k} - x_{g,i})]}{\sum_{j=1}^3 [(X_{t,i,j,k} - x_{g,i})^2 + (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i})^2]} \quad (2-70)$$

$$p_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^3 [(X_{t,i,j,k} - x_{g,i})(x_{i,j,k} - x_{g,i}) + (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i})(y_{i,j,k} - y_{g,i})]}{\sum_{j=1}^3 [(X_{t,i,j,k} - x_{g,i})^2 + (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i})^2]} \quad (2-71)$$

Nakon rotacije koordinate tačaka iznose:

$$X_{m,i,j,k} = x_{g,i} + \cos \theta_{i,k} (X_{t,i,j,k} - x_{g,i}) - \sin \theta_{i,k} (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i}) \quad (2-72)$$

$$Y_{m,i,j,k} = y_{g,i} + \sin \theta_{i,k} (X_{t,i,j,k} - x_{g,i}) + \cos \theta_{i,k} (Y_{t,i,j,k} - y_{g,i}) \quad (2-73)$$

Reziduali se računaju prema izrazima:

$$r_{x,i,j,k} = x_{i,j,k} - X_{m,i,j,k}; i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-74)$$

$$r_{y,i,j,k} = y_{i,j,k} - Y_{m,i,j,k}; i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-75)$$

Suma kvadrata reziduala je:

$$\sum r_{xy}^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 (r_{x,i,j,k}^2 + r_{y,i,j,k}^2) \quad (2-76)$$

Broj stepeni slobode je

$$v_{xy} = n - u \quad (2-77)$$

gdje su:

- n – mjerene veličine: $n = 36$ (mjerjenja) $\times 2$ (koordinate) = 72,
- u – nepoznati parametri: 6 koordinata tačaka trougla, 3 strane trougla, 12 rotacijskih parametara (4 serije na 3 stajališta).

Broj stepeni slobode je $v_{xy} = 72 - 21 = 51$.

Empirijsko standardno odstupanje se računa prema izrazu:

$$s_{xy} = \sqrt{\frac{\sum r_{xy}^2}{51}} \quad (2-78)$$

to jest

$$s_{\text{ISO-TS-XY}} = s_{xy} \quad (2-79)$$

b) Računanje preciznosti za z koordinatu

Prvo se računaju visinske razlike između tačaka trougla

$$d_{z,i,j,k} = z_{i,j,k} - z_{i,1,k}; i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-80)$$

Srednje vrijednosti za $d_{z,i,2,k}$ i $d_{z,i,3,k}$ su:

$$a_{z,j} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^4 d_{z,i,j,k}; j = 2, 3; \quad (2-81)$$

Reziduali visinskih razlika su:

$$r_{z,i,j,k} = d_{z,i,j,k} - a_{z,j}; i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2-82)$$

Suma kvadrata reziduala je

$$\sum r_z^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^4 r_{z,i,j,k}^2 \quad (2-83)$$

Broj stepeni slobode je

$$v_z = n - u = 24 - 2 = 22 \quad (2-84)$$

Empirijsko standardno odstupanje visine je

$$s_z = \sqrt{\frac{\sum r_z^2}{22}} \quad (2-85)$$

odnosno

$$s_{\text{ISO-TS-Z}} = s_z \quad (2-86)$$

Statistički testovi

Za izračunata standardna odstupanja potrebno je provesti statističke testove kako bi se odgovorilo na sljedeća pitanja:

- je li izračunato empirijsko standardno odstupanje s manje od odgovarajućeg standardnog odstupanja σ deklarisanog od proizvođača ili manje od neke druge predodređene vrijednosti σ ?
- pripadaju li dva empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$, dobivena iz dviju sesija u kojima je mjereno istim instrumentom u različito vrijeme ili različitim instrumentima, istom skupu pretpostavljajući da oba imaju isti broj stepeni slobode v ?

Tabela 2-7: Statistički testovi za x, y, z

Pitanje	Nulta hipoteza (H_0)	Alternativna hipoteza (H_1)
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$\sigma = \tilde{\sigma}$	$\sigma \neq \tilde{\sigma}$

Interval povjerenja $1 - \alpha = 0,95$, dok je broj stepeni slobode $v_{xy} = 51$ i $v_z = 22$.

Pitanje a)

Nulta hipoteza navodi da je empirijsko standardno odstupanje s manje ili jednako teoretskoj ili unaprijed određenoj vrijednosti σ te se prihvata ako je zadovoljeno:

- za xy koordinate:

$$s \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_{xy})}{v_{xy}}} = \sigma \times \sqrt{\frac{68,65}{51}} = \sigma \times 1,16 \quad (2-87)$$

- za z koordinatu:

$$s \leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_z)}{v_z}} = \sigma \times \sqrt{\frac{33,92}{22}} = \sigma \times 1,24 \quad (2-88)$$

U protivnom nulta hipoteza se odbacuje i prihvata se alternativna hipoteza.

Pitanje b)

U slučaju dviju različitih sesija test pokazuje pripadaju li empirijska standardna odstupanja s i $\tilde{s}$ istom uzorku. Nulta hipoteza se prihvata ako vrijedi:

- za xy koordinate:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(v_{xy}, v_{xy})} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v_{xy}, v_{xy})$$

$$0,57 \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq 1,74 \quad (2-89)$$

- za z koordinatu:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(v_z, v_z)} \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v_z, v_z)$$

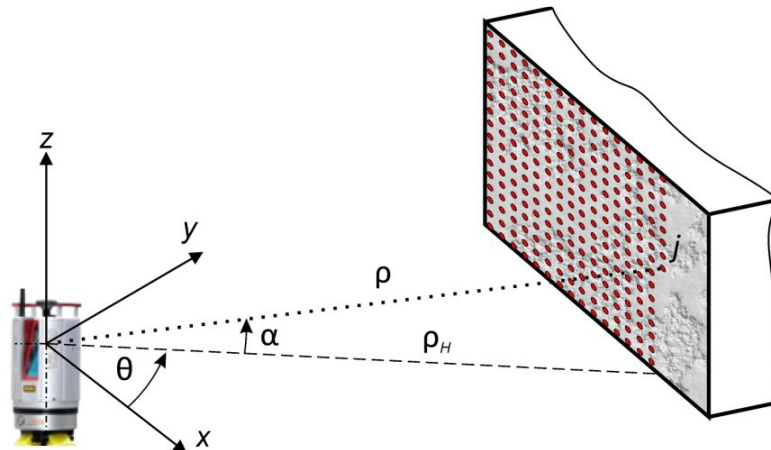
$$0,42 \leq \frac{s^2}{\tilde{s}^2} \leq 2,36 \quad (2-90)$$

U protivnom nulta hipoteza se odbacuje.

3 TLS mjerni sistemi

3.1 Princip rada TLS sistema

Terestrički laserski skeneri su aktivni senzori koji emituju lasersku zraku koja se zatim odbija od objekta i vraća u instrument (Lemmens, 2011.). Na taj način se mjeri dužina od skenera do objekta bez potrebe da operator ima kontakt sa objektom skeniranja. Kombinacijom mjerene dužine i ugla skeniranja sa položajem i orijentacijom skenera dobivaju se 3D koordinate tačaka koje pogađa laserska zraka. Kao rezultat se dobiva oblak tačaka sa poznatim 3D koordinatama.

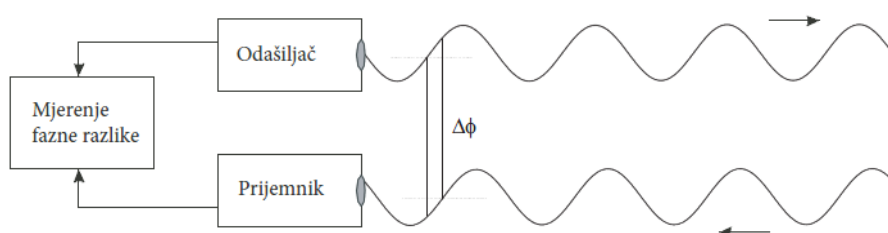


Slika 3-1: Princip skeniranja terestričkog laserskog skenera (Pejić, 2013.)

Tri su osnovna principa na kojima rade terestrički laserski skeneri:

1. Fazna mjerenja
2. Impulsna mjerenja, koja se još nazivaju i time-of-flight
3. Optička triangulacija

Prva dva principa se obično koriste kod laserskih skenera kojima se mjerenje vrši izvan objekata, odnosno vani. Kod skenera koji rade na faznom principu mjeri se faza reflektujućeg zraka i upoređuje sa fazom odaslanog zraka. Dužina se računa na osnovu razlika u fazi ova dva signala, odnosno na osnovu faznog pomaka.



Slika 3-2: Šematski prikaz rada faznih skenera (Rietdorf, 2005.)

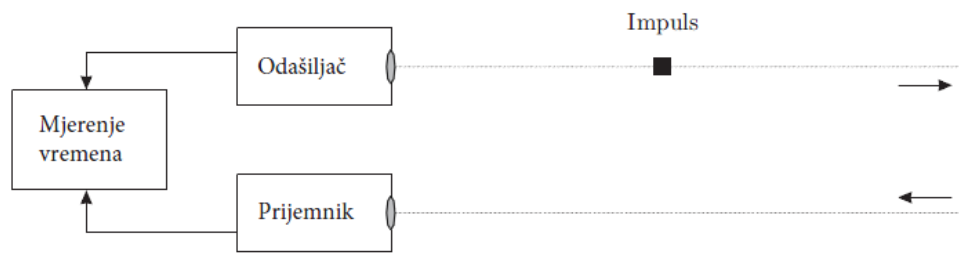
Dva su načina određivanja udaljenosti skenera koji rade na faznom principu i to modulacijom amplitude kontinualnog talasa ili modulacijom frekvencije kontinualnog talasa.

Kod impulsnih skenera mjeri se vrijeme putovanja emitovanog laserskog impulsa do objekta i nazad. Dužina se dobiva tako što se vrijeme putovanja množi sa brzinom svjetlosti i podijeli sa dva.

$$S = \frac{ct}{2} \quad (3-1)$$

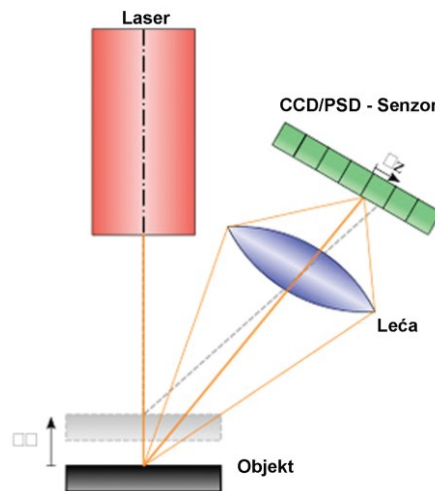
c – brzina svjetlosti

t – vrijeme putovanja zrake do objekta i nazad



Slika 3-3: Šematski prikaza rada impulsnih skenera (Rietdorf, 2005.)

Triangulacijski skeneri rade na principu optičke triangulacije. Laserska se zraka projicira na objekat i registruje se na senzoru koji je smješten na poznatoj udaljenosti od izvora zrake. Ovaj način mjerenja udaljenosti nema veliku korist u geodetskom premjeru jer je domet ograničen na nekoliko metara, ali su zato tačnosti koje se mogu postići ovom metodom u granicama mikrometra (Miler, Đapo, Kordić, & Medved, 2007.).



Slika 3-4: Šematski prikaz triangulacijskog skenera (Miler, Đapo, Kordić, & Medved, 2007.)

Triangulacijski laser skener funkcioniše tako što osvjetli laserom objekat dok se pomoću kamere pronalazi lokacija laserske tačke. Laserski odašiljač, laserska tačka i kamera formiraju trougao, kod kojeg je poznata dužina između laserskog odašiljača i kamere i dva ugla, što predstavlja dovoljan broj poznatih elemenata za računanje ostalih elemenata trougla.

3.2 Greške mjerenja TLS-om

Izvori grešaka se mogu podijeliti u četiri grupe (Cosarca, Jocea, & Savu, 2009.):

1. Greške vezane za instrument
2. Greške vezane za oblik i svojstva skeniranog objekta
3. Greške uzrokovane okruženjem u kojem se izvodi skeniranje
4. Metodološke greške

3.2.1 Greške vezane za instrument

Ove greške su uglavnom uzrokovane samom konstrukcijom instrumenta. Mogu se podijeliti na sistematske i slučajne. Slučajne greške imaju utjecaja na tačnost mjerenja dužina i uglova uglavnom kod impulsnih skenera. Sistematske greške nastaju kao posljedica nelinearnosti sistema za mjerenje vremena ili temperature, što može puno uticati na mjerenje dužina.

3.2.1.1 Obim laserske zrake

Obim laserske zrake utiče na rezoluciju skeniranja te položajnu tačnost. Širenje laserskog zraka je linearno za veće dužine. Divergencija laserske zrake se obično računa kao početni radijus plus linearni faktor širenja. Divergencija ima uticaja na tačnost mjerenja uglova. Na osnovu praktičnih iskustava ustanovljeno je da položajna nesigurnost iznosi $\frac{1}{4}$ radijusa zrake.

3.2.1.2 Efekat granice između objekata

Laserska zraka ima oblik elipse. Kada zraka udari na granicu prepreke, dijeli se na dva dijela. Jedan dio se odbija od jedne površine, dok se drugi dio može odbiti od površine koja se nalazi iza prvog objekta. Fluks će se računati kao srednja vrijednost oba reflektovana signala. Površina na koju pada više laserskog zraka će imati veću težinu kod računanja prosječne vrijednosti, tako da će se tačka nalaziti bliže toj površini, a ne na samoj površini.

3.2.1.3 Greške mjerenja dužine

Greške mjerenja dužine zavise od preciznosti laserskog daljinomjera, konstrukcije TLS-a i interakcije veličine obima laserskog snopa sa površi objekta.

Standardna devijacija mjerene dužine kod impulsnih skenera se može izraziti sljedećom formulom:

$$\sigma_d \approx \frac{c}{2} \frac{t_r}{\sqrt{SNR}} \quad (3-2)$$

gdje je: c – brzina svjetlosti, t_r – vrijeme rasta laserskog impulsa i SNR – odnos signala i šuma.

Standardna devijacija mjerene dužine kod faznih skenera se računa kao:

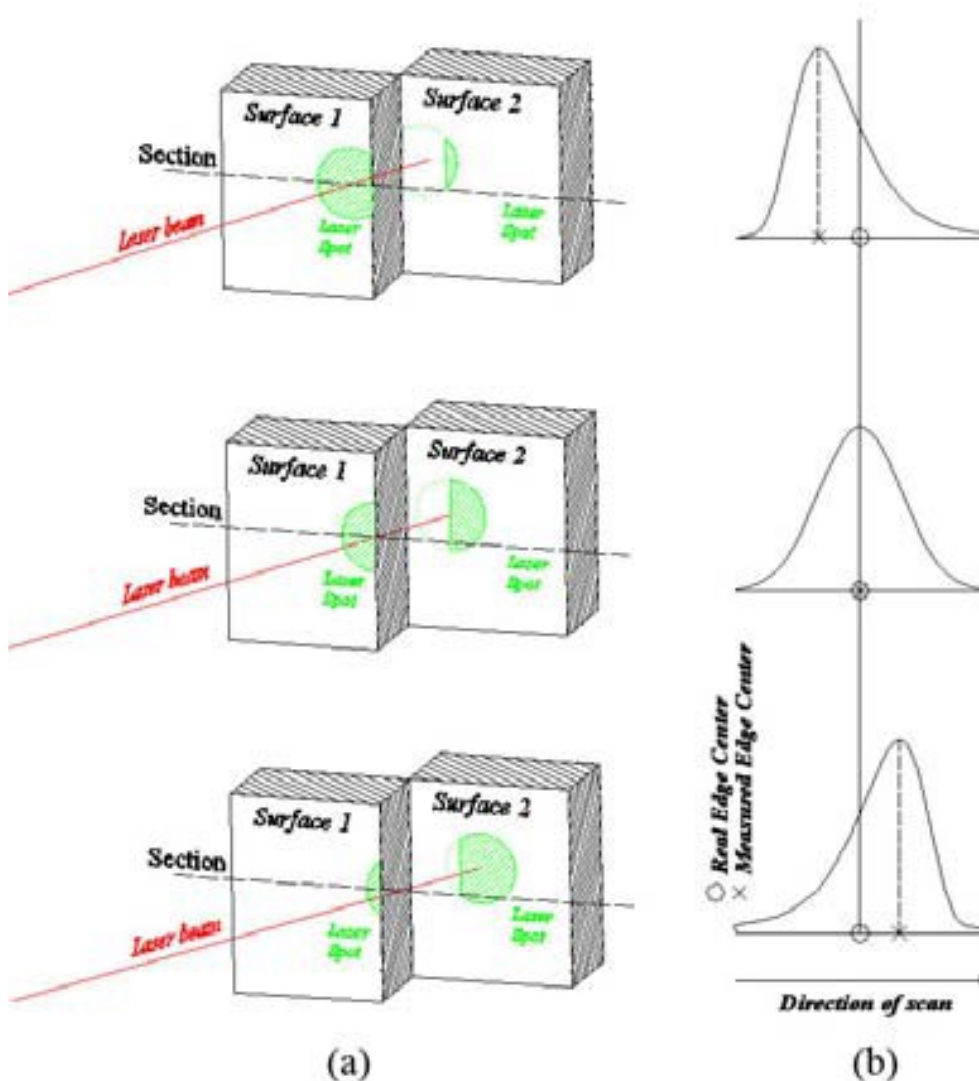
$$\sigma_d \approx \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{SNR}} \quad (3-3)$$

gdje je λ valna dužina laserskog zraka.

Standardna devijacija mjerene dužine kod triangulacijskih skenera se računa kao:

$$\sigma_d \approx \frac{Z^2}{fD} \sigma_p \quad (3-4)$$

gdje je f – efektivan položaj laserske tačke, D – dužina triangulacijske bazne linije, Z – udaljenost do skenirane površine i σ_p – rezolucija lasera.



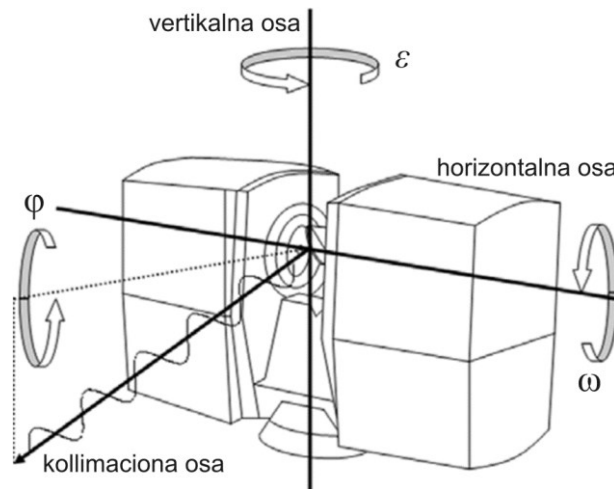
Slika 3-5: Efekat granice između objekata (Sotoodeh, 2006.)

3.2.1.4 Greške mjerenja uglova

Većina laserskih skenera koristi male rotirajuće uređaje (ogledala, prizme) da bi skrenuli laserski snop u određenom pravcu. Usljed nesavršenosti ovih uređaja javljaju se greške u mjerenju uglova. Tačnost mjerenja uglova zavisi od položajne tačnosti rotirajućih uređaja i tačnosti senzora za mjerenje uglova.

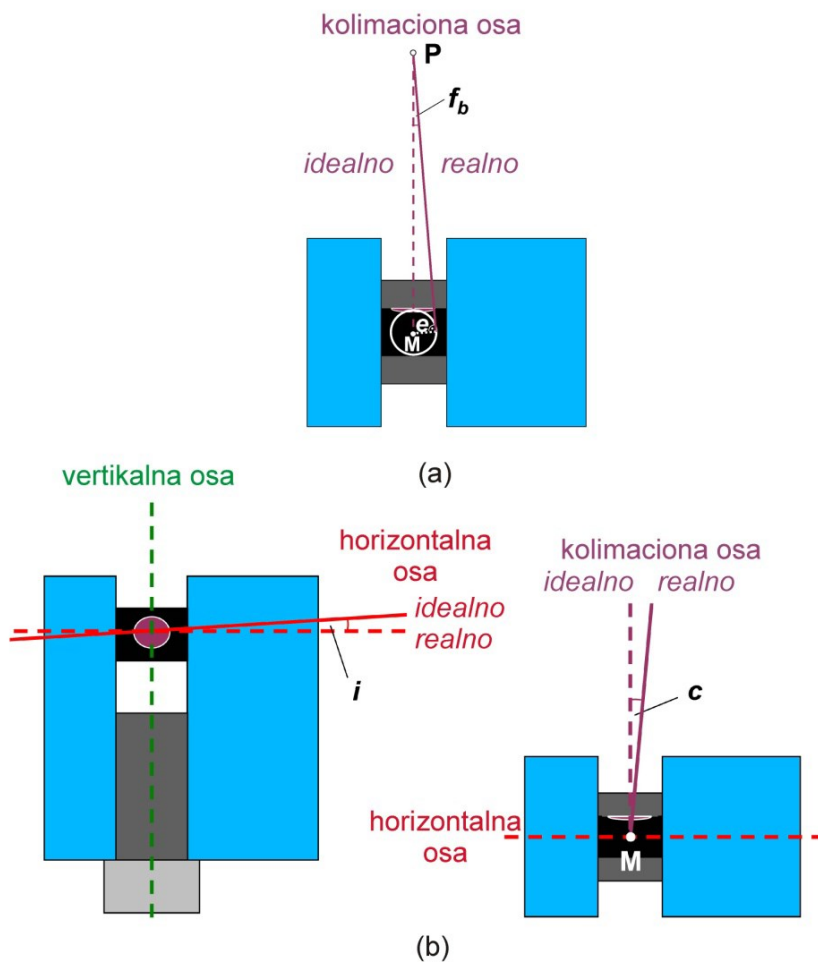
3.2.1.5 Greške glavnih osa TLS-a

Svi TLS sistemi su opterećeni uticajem nesavršenosti međusobnog položaja glavnih osa TLS-a. Za razliku od TPS sistema, gdje se ove greške eliminišu metodom rada, kod TLS sistema to nije slučaj, jer većina TLS sistema ne pruža mogućnost viziranja.



Slika 3-6: Glavne ose TLS-a (Pejić, 2013.)

Najveći uticaj imaju kolimaciona greška, greška vertikalnog indeksa i greška ekscentriciteta kolimacione ose.



Slika 3-7: Dvodimenzionalna projekcija najznačajnijih grešaka usljed uticaja položaja glavnih osa TLS. (a) greška ekscentriciteta kolimacione ose e ; (b) kolimaciona greška c i greška vertikalnog indeksa i (Pejić, 2013.)

3.2.2 Greške vezane za oblik i svojstva skeniranog objekta

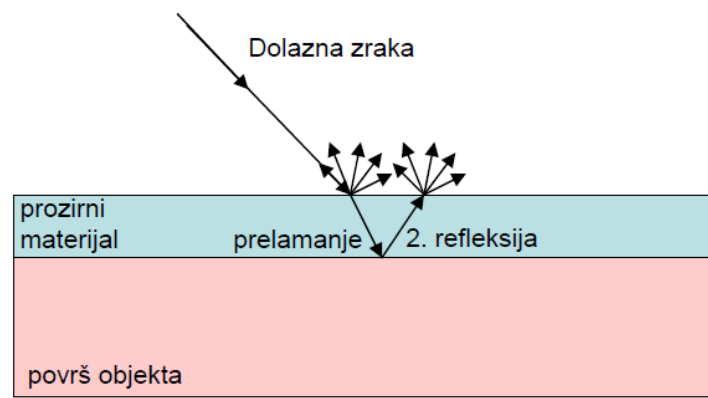
Ove greške se mogu razvrstati u dvije grupe prema uticaju koji imaju na tačnost skeniranja:

1. Uticaj reflektivnosti površi objekta

Reflektivnost površi objekta zavisi od osobine materijala objekta, boje površi, hrapavosti površi, valne dužine lasera, temperature i vlažnosti površi. Na osnovu praktičnih saznanja utvrđeno je da snimanje površi različite reflektivnosti ima za posledicu sistematsku grešku mjerenja dužina. Ponekad ta greška može biti veća od standardne devijacije pojedinačnog mjerenja dužine.

2. Uticaj višestruke refleksije – multipath-a

Skenirani objekti ponekad imaju sloj prozirnog premaza (na površini objekta je ugrađen prozirni materijal). Zbog toga dolazi do prelamanja i reflektovanja laserskog snopa na površi samog materijala, što utiče na vrijednost mjerene dužine.



Slika 3-8: Uticaj višestruke refleksije (Van Genechten, 2008.)

3.2.3 Greške uzrokovane okruženjem u kojem se izvodi skeniranje

Temperatura, vlažnost i pritisak okruženja u kojem se izvodi skeniranje utiču na geometriju i intenzitet laserskog zraka. Također temperatura skeniranog objekta ima uticaja na tačnost skeniranja. Ukoliko se skeniraju zagrijani objekti odnos SNR se reducira što automatski znači reduciranje preciznosti mjerenja dužina. U ove greške se još ubrajaju i greške koje nastaju zbog uticaja osvijetljenosti objekta, vibracija i nestabilnosti TLS-a, interferencije.

3.2.4 Metodološke greške

Pogrešan odabir metode skeniranja, pogrešan odabir tipa skenera, pogrešan odabir metode registracije su neke od najčešćih grešaka. Uglavnom nastaju zbog neiskustva operatera.

3.3 Postupci kalibracije TLS-a

Kao i kod drugih geodetskih instrumenata i kod TLS-a su prisutne sistematske greške. One nastaju usljed nesavršenosti konstrukcije samih skenera kao i usljed različitih poremećajnih uticaja u toku rada TLS-a. Sistematske greške se mogu svesti na zanemarljivu mjeru metodom mjerenja, metodom obrade i kalibracijom skenera. Razlikuju se dva načina kalibracije TLS-a:

1. Kalibracija TLS-a u specijalizovanim laboratorija
2. Kalibracija TLS-a primjenom određenih standarda

Prvi način kalibracije TLS-a se izvodi u specijalizovanim laboratorijama. Ovaj način kalibracije se uglavnom vrši nakon proizvodnje skenera ili periodično u zavisnosti od potreba krajnjeg korisnika.

Drugi način kalibracije podrazumijeva primjenu određenih standardizovanih terenskih postupaka od strane korisnika u svrhu verifikacije specificirane tačnosti skenera, kao i u svrhu određivanja konstanti koje utiču na tačnost skenera (adiciona, multiplikaciona...).

3.3.1 Kalibracija TLS-a primjenom standardizovanih postupaka

Za gotovo sve geodetske instrumente postoje propisani standardi za kalibraciju, prema ISO, DIN, ASME ili nekom drugom standardu. Još uvijek ne postoji standard kojim je definisan način ispitivanja i kalibracije TLS-a na terenu, od strane korisnika. Međutim, postoji nekoliko istraživanja na tu temu.

Prema (Gottwald, 2008.) dva su postupka za ispitivanje TLS-a:

1. Pojednostavljeni postupak
2. Potpuni postupak

3.3.1.1 Pojednostavljeni postupak kalibracije TLS-a

Pojednostavljeni postupak kalibracije podrazumijeva (Gottwald, 2008.):

- verifikaciju tačnosti skenera za veoma kratko vrijeme
- računanje standardnih devijacija na osnovu malog broja mjerenja, što znači manju pouzdanost samih rezultata kalibracije

Vodeći se filozofijom ISO standarda, pojednostavljeni postupak kalibracije (kao prijedlog za ISO standard) bi trebao zadovoljiti sljedeće uslove:

- nezavisnost od tipa skenera (fazni, impulsni, triangulacijski, ...),
- pouzdano otkrivanje grešaka mjerenja uglova i dužina,
- korištenje standardne opreme koja ide uz skenere, odnosno bez korištenja dodatne opreme kao što su totalne stanice ili neki drugi senzori,
- maksimalno trajanje mjerenja i obrade rezultata ne bi trebalo biti duže od 1h.

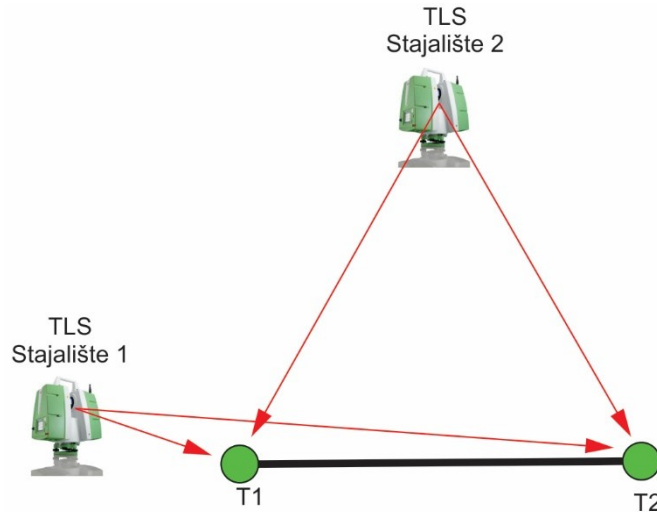
Uvažavajući navedene uslove predložena su 4 načina za provođenje pojednostavljene procedure kalibracije TLS-a:

- pomoću jedne dužine (eng. Single Distance Procedure-SDP),
- pomoću dvije ukrštene dužine (eng. Crossed Double Distance Procedure-CDP),
- pomoću trougla (eng. Triangle Procedure-TP),
- pomoću trougla pri čemu je skener postavljen unutar trougla (eng. Triangle Star Procedure-TSP) – ovaj postupak je odbačen zbog visoke korelacije između računatih i mjerenih dužina.

Tereneski postupak kalibracije koristeći SDP

Na terenu se postave markice koje predstavljaju krajnje tačke bazne linije koja se mjeri (Slika 3-9). TLS se postavi u pravcu bazne linije i izvrši se opažanje markica. Zatim se TLS postavi okomito na baznu liniju i naprave mjerenja na markice. Nakon toga se izračuna dužina iz dva mjerenja. Uporedi se razlika dužina iz dva mjerenja i uporedi sa dozvoljenim odstupanjem. Ukoliko je razlika

veća od dozvoljenog odstupanja instrument se mora kalibrirati. Dužina bazne linije se definiše na osnovu tipa skenera i u zavisnosti od udaljenosti objekta koji će se skenirati. Također poželjno je testirati dvije bazne linije, i to jednu kod koje je visinska razlika između tačaka bazne linije mala (linija je približno horizontalna) i drugu kod koje je visinska razlika između krajnjih tačaka bazne linije velika (Gottwald, 2008.).



Slika 3-9: SDP postupak kalibracije TLS-a

Skeniranjem se dobivaju koordinate krajnjih tačaka u lokalnom kooordinatnom sistemu skenera iz kojih računamo dužinu bazne linije:

$$\overline{T_1 T_2}(S_i) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3-5)$$

Razlika dužina se računa po formuli:

$$\Delta_{1,2} = \overline{T_1 T_2}(S_1) - \overline{T_1 T_2}(S_2) \quad (3-6)$$

Ukoliko je razlika manja od dozvoljenog odstupanja instrument je ispravan i spreman za mjerenje.

Prednosti:

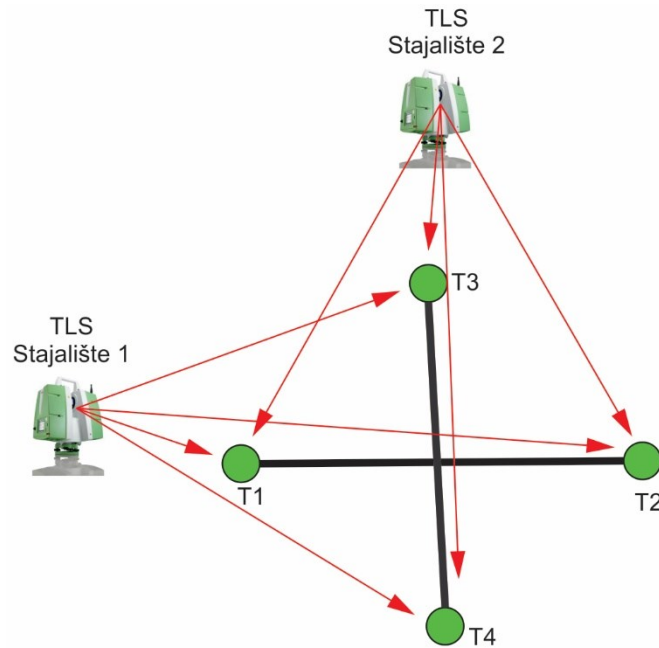
- nezavisnost od tipa skenera,
- korištenje samo standardne opreme,
- jednostavna procedura,
- za provođenje postupka ispitivanja potrebno je manje od 60 minuta.

Nedostaci:

- nema prekobrojnosti,
- nema nezavisne kontrole.

Tereneski postupak kalibracije koristeći CDP

Na terenu se pomoću markica uspostave dvije bazne linije koje se sijeku pod približno pravim uglom (Slika 3-10). Razlikujemo dva slučaja: CDP1-sve tačke-markice se nalaze približno u istoj ravni, CDP2-tačka 2 ili 4 je na većoj visini u odnosu na ostale tri tačke.



Slika 3-10: CDP postupak kalibracije TLS-a

Skeniranjem se dobivaju koordinate tačaka baznih linija u lokalnom kooordinatnom sistemu skenera iz kojih računamo dužine bazne linije:

$$\overline{T_1 T_2}(S_i) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3-7)$$

$$\overline{T_3 T_4}(S_i) = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} \quad (3-8)$$

Razlike dužina mjerenih sa dva stajališta se računaju prema izrazima:

$$\Delta_{1,2} = \overline{T_1 T_2}(S_1) - \overline{T_1 T_2}(S_2) \quad (3-9)$$

$$\Delta_{3,4} = \overline{T_3 T_4}(S_1) - \overline{T_3 T_4}(S_2) \quad (3-10)$$

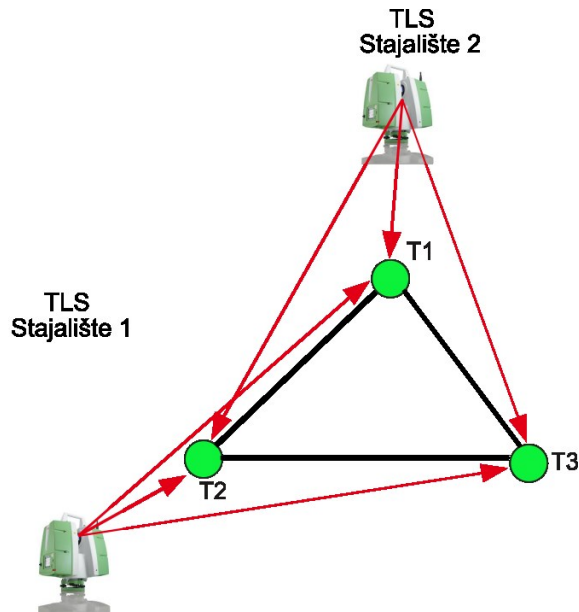
Ukoliko su razlike manje od dozvoljenih odstupanja instrument se smatra ispravnim.

Prednosti:

- nezavisnost od tipa skenera,
- korištenje samo standardne opreme,
- jednostavna procedura,
- za provođenje postupka ispitivanja potrebno je oko 60 minuta.
- nezavisna kontrola.

Terenski postupak kalibracije koristeći TP

Na terenu se postave tri tačke tako čine trougao sa stranicama približno jednake dužine (dužine između tačaka su proizvoljne), a jedna tačka se visinski treba znatno razlikovati od druge dvije (Slika 3-11). Sa dva stajališta se izmjere koordinate sve tri tačke.



Slika 3-11: TP postupak kalibracije TLS-a

Skeniranjem se dobivaju koordinate tačaka baznih linija u lokalnom kooordinatnom sistemu skenera iz kojih računamo dužine bazne linije:

$$\overline{T_1 T_2}(S_i) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3-11)$$

$$\overline{T_2 T_3}(S_i) = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \quad (3-12)$$

$$\overline{T_1 T_3}(S_i) = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2} \quad (3-13)$$

Razlike dužina mjerenih sa dva stajališta se računaju prema izrazima:

$$\Delta_{1,2} = \overline{T_1 T_2}(S_1) - \overline{T_1 T_2}(S_2) \quad (3-14)$$

$$\Delta_{2,3} = \overline{T_2 T_3}(S_1) - \overline{T_2 T_3}(S_2) \quad (3-15)$$

$$\Delta_{1,3} = \overline{T_1 T_3}(S_1) - \overline{T_1 T_3}(S_2) \quad (3-16)$$

Ukoliko su razlike manje od dozvoljenih odstupanja instrument se smatra ispravnim.

Prednosti:

- nezavisnost od tipa skenera,
- korištenje samo standardne opreme,
- jednostavna procedura,
- za provođenje postupka ispitivanja potrebno je oko 60 minuta.
- nezavisna kontrola.

3.3.1.2 Potpuni postupak kalibracije TLS-a

Potpuni postupak kalibracije treba ispunjavati sljedeće uslove (Gottwald, 2008.):

- nezavisnost od vrste TLS-a,
- korištenje referentnih senzora (npr. preciznih totalnih stanica) i po mogućnosti stabilizovanih stajališta,
- određivanje empirijskih standardnih odstupanja i provođenje statističkih testova,
- maksimalno trajanje mjerenja i obrade mjerenih podataka do pola dana.

Da bi test bio sveobuhvatan potrebno je odrediti čitav niz parametara:

- probing error – disperzija/preciznost radijusa kugle (bez datih koordinata),
- greška rastojanja među kuglama (spacing error),
- **flatness measurement error**,
- greška markice (target error),
- standardno odstupanje mjerenja uglova (angle measurement deviation),
- adiciona konstanta (zero point error (range finder)),
- greška mjerila (scaling error (range finder)),
- ofset markice i radijus sfere (target offsets and sphere diameter).

Preporučeno je modularni pristup, kako bi se omogućilo ispitivanje specifičnih karakteristika skenera (u zavisnosti od tipa skenera).

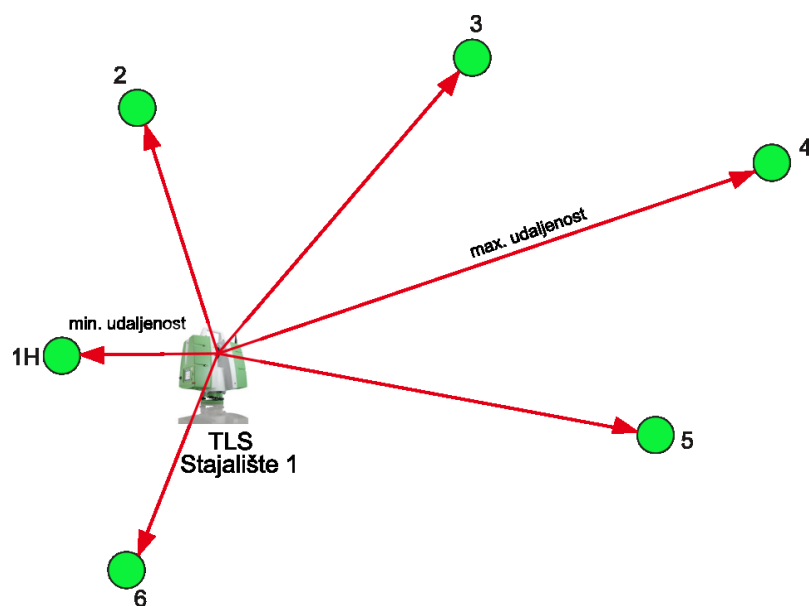
Osnovni modul

Ovaj modul omogućava određivanje sljedećih odstupanja:

- probing error – disperzija/preciznost radijusa kugle (bez datih koordinata),
- greška rastojanja među kuglama (spacing error),
- greška markice (target error),
- standardno odstupanje mjerenja uglova (angle measurement deviation).

Preporučuje se da se uspostavi testno polje koje čini 6 tačaka (Slika 3-12), tako da su ispunjeni sljedeći uslovi:

- testno polje treba da pokriva minimalni i maksimalni domet skenera,
- tačke trebaju biti ravnomjerno raspoređene na horizontu,
- jedna tačka se treba značajno razlikovati po visini od ostalih tačaka (tačka 1H na Slika 3-12),
- mreža se treba prije testiranja izmjeriti što preciznije, najbolje totalnom stanicom kako bi se dobile referente vrijednosti.



Slika 3-12: Testno polje (1H tačka se znatno razlikuje po visini od ostalih tačaka)

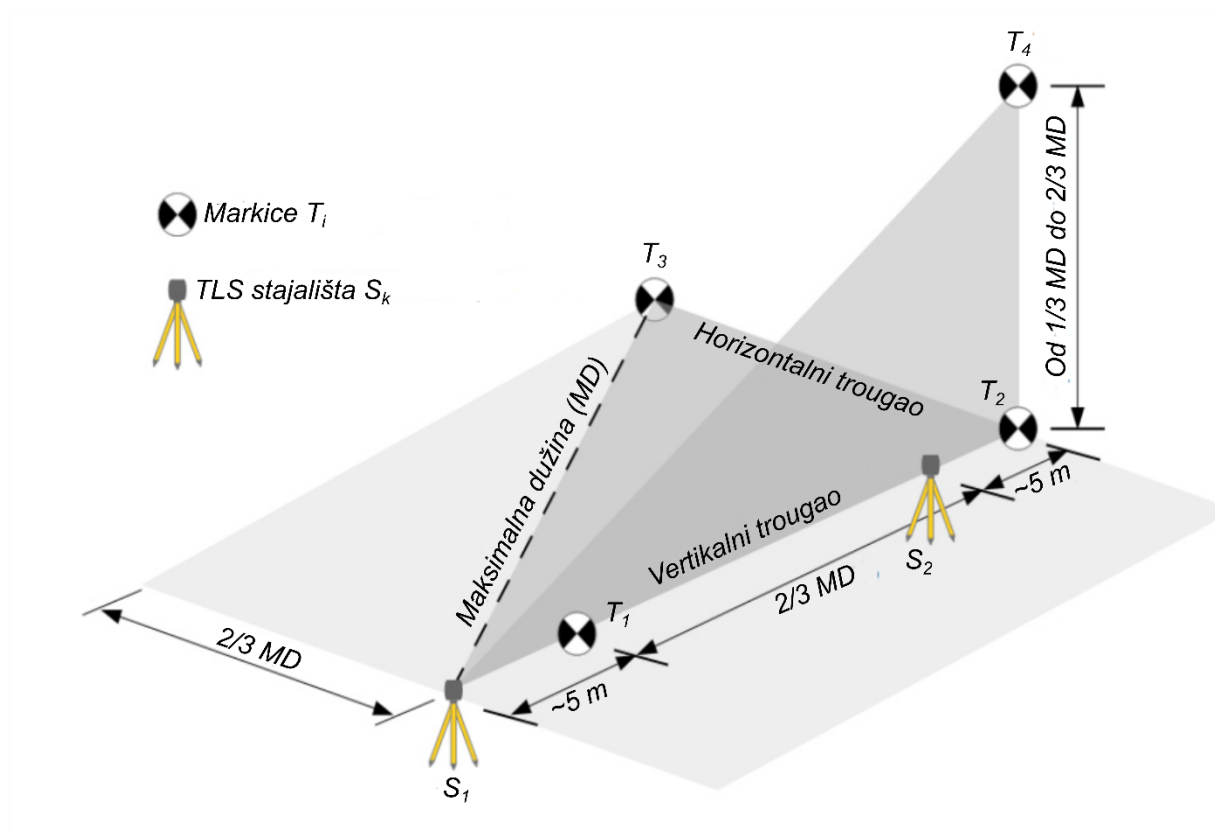
Ovaj prijedlog nije zaživio u praksi te se stoga neće detaljnije opisivati.

Za određivanje adicione korekcije mogu se primjenjivati procedure propisane ISO 17123-4 standardom, ali u tom slučaju se mora koristiti pribor za prisilno centrisanje.

Trenutno se u praksi najviše spominje prijedlog koji je dao Heister, na osnovu koga je u časopisu koji izdaje Udruženje za geodeziju, geoinformacija i land management (DVW) izdata publikacija pod naslovom „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)“ 2014. godine, u kojoj je opisan prijedlog postupka ispitivanja TLS-a. Ovdje će se opisati taj prijedlog, zajedno sa prijedlogom Heistera.

Konfiguracija testnog polja (Gottwald, Heister, & Staiger, 2009.), (Heister, 2009.), (Neitzel, Gordon, & Wujanz, 2014.)

Testno polje (isto je za pojednostavljenu i potpunu proceduru) se sastoji od 4 tačke koje čine dva trougla, od kojih je jedan u horizontalnoj ravni (horizontalni trougao) a drugi u vertikalnoj ravni (vertikalni trougao) (Neitzel, Gordon, & Wujanz, 2014.)



Slika 3-13: Konfiguracija testnog polja (Heister, 2009.)

Dva stajališta S_1 i S_2 i dvije tačke T_1 i T_2 formiraju zajedničku stranicu za dva navedena trougla. To je potrebno zbog određivanja sistematske greške mjerenja dužina. Dimenzije trouglova kao i udaljenost između stajališta su uslovljeni dometom TLS-a koji se ispituje (a koji je naveden od strane proizvođača). Pri konfiguraciji testnog polja u obzir se uzima sljedeće (Neitzel, Gordon, & Wujanz, 2014.):

- stajališta S_1 i S_2 i dvije tačke T_1 i T_2 se postavljaju tako da se nalaze u približno horizontalnoj ravni, i da su na istom pravcu,
- horizontalni i vertikalni trougao bi trebali biti pravougli, sa pravim uglom u tački T_2 ,
- hipotenuza horizontalnog trougla $\overline{S_1T_3}$ treba biti duga koliko je preporučeni maksimalni domet TLS-a, i ujedno predstavlja maksimalnu dužinu MD ,
- dužina $\overline{T_2T_4}$ se bira u skladu sa terenskim uslovima, ali da iznosi minimalno $1/3$ od maksimalne dužine MD . Osim toga, vizura sa stajališta S_2 prema tački T_4 treba da bude strma. Maksimalna preporučena vrijednost zenitnog ugla sa S_2 prema tački T_4 je 30 gona,
- omjer kateta u vertikalnom trouglu bi trebao biti 1:1. Ukoliko je moguće ovaj omjer ne bi trebao biti veći od 2:1, te ako je moguće tačku T_4 postaviti na odgovarajuću visinu.

Pojednostavljena procedura

Ciljevi (Heister, 2009.):

- razdvojiti uticaje grešaka koje zavise od dužine i od mjerenja uglova što je više moguće,
- odrediti jedinstvenu mjeru standardnog odstupanja,
- procedura treba biti validna za skenere sa i bez kompenzatora,
- korištenje dostupnih markica (od proizvođača skenera ili drugih dostupnih na tržištu),
- bez potrebe za korištenjem specijalizovanog softvera (korištenje softvera isporučenog sa instrumentom).

Mjerenje i računanje

Sa oba stajališta se izvrši skeniranje sve četiri tačke i to jednom sa svakog stajališta.

Greška dužine (horizontalna ravan)

Dužina između tačaka T_1 i T_2 sračunata iz podataka skeniranja sa stajališta S_2 nije ovisna o bilo kakvoj uglovnoj greški ili o adicionej konstanti a , dok je dužina dobivena sa stajališta S_1 direktno pod uticajem adicione konstante a :

$$\overline{T_1T_2}(S_1) = \overline{T_1T_2} + 2a \quad (3-17)$$

$$\overline{T_1T_2}(S_2) = \overline{T_1T_2} \quad (3-18)$$

$$a = \frac{\overline{T_1T_2}(S_1) - \overline{T_1T_2}(S_2)}{2} \quad (3-19)$$

Razlika dužina između tačaka T_1 i T_2 određenih sa dva stajališta treba biti u granicama dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_1| = |\overline{T_1T_2}(S_1) - \overline{T_1T_2}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-20)$$

Greška horizontalnog ugla – $H_{zgreška}$ (horizontalna ravan)

Dužina između tačaka T_2 i T_3 sračunata iz podataka skeniranja sa stajališta S_1 gotovo je nezavisna o bilo kakvoj uglovnoj greški (kratka dužina od stajališta do tačke T_1) ali je osjetljiva na moguće postojanje adicione konstante (tačka T_3 je u pravcu dužine $\overline{T_2T_3}$). Dužina između tačaka T_2 i T_3

sračunata iz podataka skeniranja sa stajališta S_2 je izuzetno osjetljiva na postojanje uglovne greške i veoma malo osjetljiva na moguće postojanje adicione konstante.

$$\overline{T_2T_3}(S_1) = \overline{T_2T_3} + a \quad (3-21)$$

$$\overline{T_2T_3}(S_2) = \overline{T_2T_3} + a \times \tan(\sphericalangle T_1S_2T_3) + H_{greška} \quad (3-22)$$

$$H_{greška} = \overline{T_2T_3}(S_2) - \overline{T_2T_3}(S_1) + a \times \tan(\sphericalangle T_1S_2T_3) \quad (3-23)$$

Razlika dužina između tačaka T_2 i T_3 određenih sa dva stajališta treba biti u granicama dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_2| = |\overline{T_2T_3}(S_1) - \overline{T_2T_3}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-24)$$

Greška vertikalnog ugla - $V_{greška}$ (vertikalna ravan)

Slično kao kod greške horizontalnog ugla imamo:

$$\overline{T_2T_4}(S_1) = \overline{T_2T_4} + a \quad (3-25)$$

$$\overline{T_2T_4}(S_2) = \overline{T_2T_4} + a \times \tan(\sphericalangle T_1S_2T_4) + V_{greška} \quad (3-26)$$

$$V_{greška} = \overline{T_2T_4}(S_2) - \overline{T_2T_4}(S_1) + a \times \tan(\sphericalangle T_1S_2T_4) \quad (3-27)$$

Razlika dužina između tačaka T_2 i T_4 određenih sa dva stajališta treba biti u granicama dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_3| = |\overline{T_2T_4}(S_1) - \overline{T_2T_4}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-28)$$

Potpuna procedura

Testno polje je isto kao i kod pojednostavljene procedure, s tim da se sa oba stajališta skeniranje vrši tri puta.

Računanje

Skeniranjem sa svakog stajališta se dobivaju koordinate sve četiri tačke. Nakon toga se računaju srednje vrijednosti koordinata tačaka za oba stajališta:

$$\bar{x}_{T_i}(S_j) = \frac{\sum_{i=1}^3 x_{T_i}}{3}; j = 1, 2 \quad (3-29)$$

$$\bar{y}_{T_i}(S_j) = \frac{\sum_{i=1}^3 y_{T_i}}{3}; j = 1, 2 \quad (3-30)$$

$$\bar{z}_{T_i}(S_j) = \frac{\sum_{i=1}^3 z_{T_i}}{3}; j = 1, 2 \quad (3-31)$$

Nakon toga se iz srednjih vrijednosti koordinata tačaka dobivenih sa dva stajališta računaju dužine:

1. Dužine između tačaka T_1 i T_2 sa stajališta S_1 i S_2 :

$$\overline{T_1 T_2}(S_1) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_2}(S_1) - \bar{x}_{T_1}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_2}(S_1) - \bar{y}_{T_1}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_2}(S_1) - \bar{z}_{T_1}(S_1)\right)^2} \quad (3-32)$$

$$\overline{T_1 T_2}(S_2) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_2}(S_2) - \bar{x}_{T_1}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_2}(S_2) - \bar{y}_{T_1}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_2}(S_2) - \bar{z}_{T_1}(S_2)\right)^2} \quad (3-33)$$

Razlika dužine između tačaka T_1 i T_2 treba biti manja od dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_{1,2}| = |\overline{T_1 T_2}(S_1) - \overline{T_1 T_2}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-34)$$

2. Dužine između tačaka T_1 i T_4 sa stajališta S_1 i S_2 :

$$\overline{T_1 T_4}(S_1) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_4}(S_1) - \bar{x}_{T_1}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_4}(S_1) - \bar{y}_{T_1}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_4}(S_1) - \bar{z}_{T_1}(S_1)\right)^2} \quad (3-35)$$

$$\overline{T_1 T_4}(S_2) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_4}(S_2) - \bar{x}_{T_1}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_4}(S_2) - \bar{y}_{T_1}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_4}(S_2) - \bar{z}_{T_1}(S_2)\right)^2} \quad (3-36)$$

Razlika dužine između tačaka T_1 i T_4 treba biti manja od dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_{1,4}| = |\overline{T_1 T_4}(S_1) - \overline{T_1 T_4}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-37)$$

3. Dužine između tačaka T_3 i T_4 sa stajališta S_1 i S_2 :

$$\overline{T_3 T_4}(S_1) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_4}(S_1) - \bar{x}_{T_3}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_4}(S_1) - \bar{y}_{T_3}(S_1)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_4}(S_1) - \bar{z}_{T_3}(S_1)\right)^2} \quad (3-38)$$

$$\overline{T_3 T_4}(S_2) = \sqrt{\left(\bar{x}_{T_4}(S_2) - \bar{x}_{T_3}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{y}_{T_4}(S_2) - \bar{y}_{T_3}(S_2)\right)^2 + \left(\bar{z}_{T_4}(S_2) - \bar{z}_{T_3}(S_2)\right)^2} \quad (3-39)$$

Razlika dužine između tačaka T_3 i T_4 treba biti manja od dozvoljenog odstupanja:

$$|\Delta_{3,4}| = |\overline{T_3 T_4}(S_1) - \overline{T_3 T_4}(S_2)| < U_\Delta \quad (3-40)$$

U slučaju da je ili $|\Delta_{1,4}| > U_\Delta$ ili $|\Delta_{3,4}| > U_\Delta$ onda postoji sistematska greška horizontalnog kruga ili greška kompenzatora ili oboje. U tom slučaju se preporučuje kalibracija TLS-a.

3.3.2 Dozvoljeno odstupanje U_Δ

Za ocjenu signifikantnosti razlika dužina neophodno je donijeti razumnu pretpostavku o mjernoj nesigurnosti u_T , s kojom se mogu odrediti centri markica uz pomoć TLS-a. Jednostavni načini, s kojima se u_T može odrediti su:

- Korištenje informacija koje daje proizvođač za određivanje centra markica.
- Utvrđivanje standardnog odstupanja koordinata centra markica kroz višestruka mjerenja prema markicama, na različitim odstojanjima, koja po pitanju reda veličine odgovaraju dužinama na testnom polju. Potrebno je skrenuti pažnju na to, da rezultujuće standardno

odstupanje oslikava samo unutrašnju tačnost, pa se tako eventualno može smatrati preoptimističnim.

Da bi se međutim donijela što realističnija procjena nesigurnosti u_T za centre ciljnih markica, trebalo bi uključiti sto više nezavisnih faktora uticaja u mjeru nesigurnosti.

U slučaju jedne veličine mjernoj nesigurnosti u_T centara markica, mogu se npr. pridodati:

- **Veličine nesigurnosti iz statističkih procjena (Tip A):**

Veličina nesigurnosti za tačnost ciljnih markica može da se utvrdi u formi standardnog odstupanja iz višestrukih mjerenja prema ciljnim markicama. Treba imati u vidu, da tačnost očitavanja ciljnih markica može ovisiti od udaljenosti ciljne markice.

- **Navodi proizvođača (Tip B):**

U listu s podacima pojedinih proizvođača može da se pronađe 3D tačnost očitavanja preporučenih ciljnih markica, koja direktno može da se uključi u nesigurnost u_T ciljnih markica, kao veličina nesigurnosti tipa A. Alternativno se 3D tačnost očitavanja markica može izvesti i iz navoda tačnosti uglovnih i dužinskih očitavanja, kada su dodatno uključeni korišteni broj tačaka za očitavanje markice i tačnost modeliranja centra ciljne markice. Pojedini proizvođači navode sistematske greške i odstupanja, kao i odstupanje mjerenja u zavisnosti od udaljenosti i refleksije. Ovi navodi se također mogu uzeti u obzir.

- **Vlastite vrijednosti iz iskustva**

Faktori uticaja, koji iz vlastitog iskustva utiču na nesigurnost utvrđivanja centra ciljnih markica, mogu se također uzeti u obzir.

3.3.2.1 Nesigurnost U_Δ razlika dužina

Ako imamo veličinu nesigurnosti u_T centara ciljnih markica, onda veličinu poređenja U_Δ za procjenu sračunatih razlika dužina izvodimo. Sa u_T dobija se prvo, po zakonu o raspodjeli grešaka, nesigurnost u_S izračunatih dužina:

$$u_S = u_T \cdot \sqrt{2} \quad (3-41)$$

Sa u_S se može ponovno, uz pomoć zakona o raspodjeli grešaka, izračunati greška – nesigurnost u_Δ razlika dužina:

$$u_\Delta = u_S \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot u_T \quad (3-42)$$

Proširena nesigurnost – greška:

$$U_\Delta = k \cdot u_\Delta \quad (3-43)$$

označava područje, koje sadrži veći dio mjerenja, koji za vrijednost mjerenja izgledaju vjerovatna. Često se bira $k=2$, što u slučaju normalne distribucije, odgovara intervalu tačnosti od 95%.

Za posmatranje razlika dužina dozvoljeno odstupanje se dobije kao:

$$U_\Delta = k \cdot u_\Delta = k \cdot 2 \cdot u_T = 4 \cdot u_T \quad (3-44)$$

4 Laser trackeri

Laserski trackeri su uređaji novije generacije. Pojavili su se 90-tih godina prošlog vijeka. Prvi komercijalni laserski tracker je izradio dr. Kam Lau 1987. godine. Također Leica je 1990. godine predstavila System Smart 310 (Deumlich & Staiger, 2002.). Ovi uređaji se primjenjuju u raznim granama industrije, i zbog svoje mobilnosti (PCMS-Portable Coordinate Measuring Systems) su postali zamjena za CMM (eng. Coordinate Measuring Machines) sisteme koji su bili stacionarni i koji se još uvijek koriste i to prvenstveno kod proizvodnje manjih dijelova. Laser trackeri se odlikuju izuzetno velikom preciznošću, zbog čega se primarno koriste u automobilskoj i avio industriji. O kakvim instrumentima se radi govori i činjenica da se koriste u CERN-u. Domet laserskih trackera je ograničen na oko 60 m.

Vodeći proizvođači laser trackera su:

- Automated Precision INC (API),
- Leica Geosystems (Hexagon) i
- FARO Technologies INC.

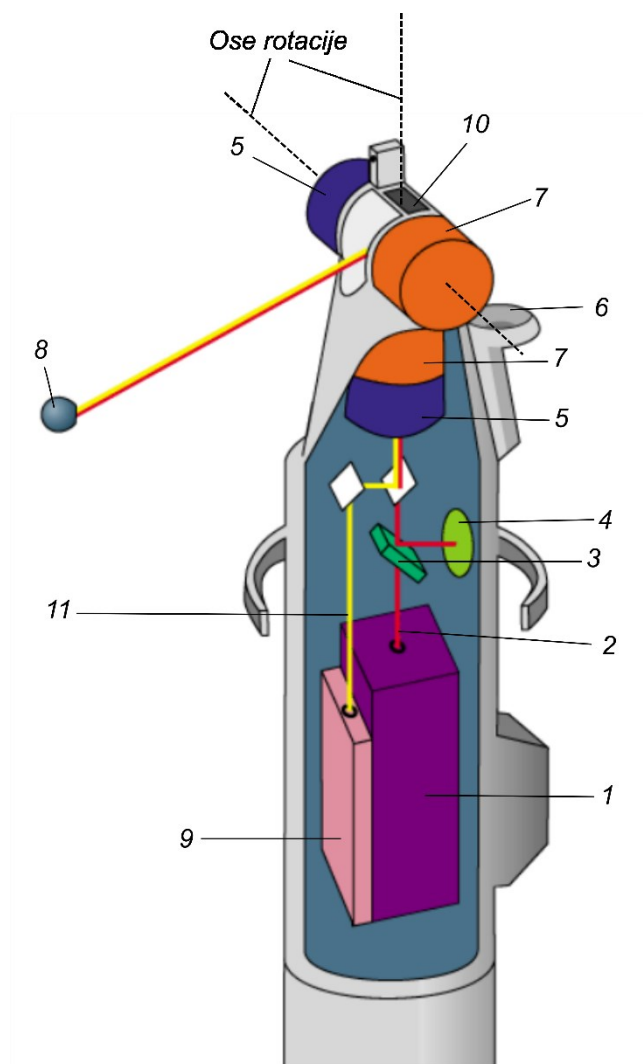


Slika 4-1: Modeli laserskih trackera od različitih proizvođača (lijevo-API, u sredini-Leica, desno-FARO)

4.1 Princip rada laser tracker-a

Laserski trackeri rade na principu tahimetrije: na osnovu mjerenja dužine i dva pravca računaju se 3D polarne koordinate. Instrument se sastoji od fiksne baze i rotirajuće glave koja usmjerava lasersku zraku prema pokretnom reflektoru (Harding, 2013.). Reflektor je konstruisan tako da odbija dolazeću lasersku zraku (pod bilo kojim upadnim uglom) nazad do instrumenta istim putem. Ovo je preduslov za praćenje i mjerenje dužine. Laserska zraka potiče od laserskog interferometra ili laserskog daljinomjera. Brzina određivanja koordinata reflektora je impresivna,

i kreće se oko 1000 tačaka u sekundi. Iako postoje različite konstrukcije laser tracker, princip rada je veoma sličan kod svih instrumenata.



Slika 4-2: Šematski prikaz Leica MTD 500

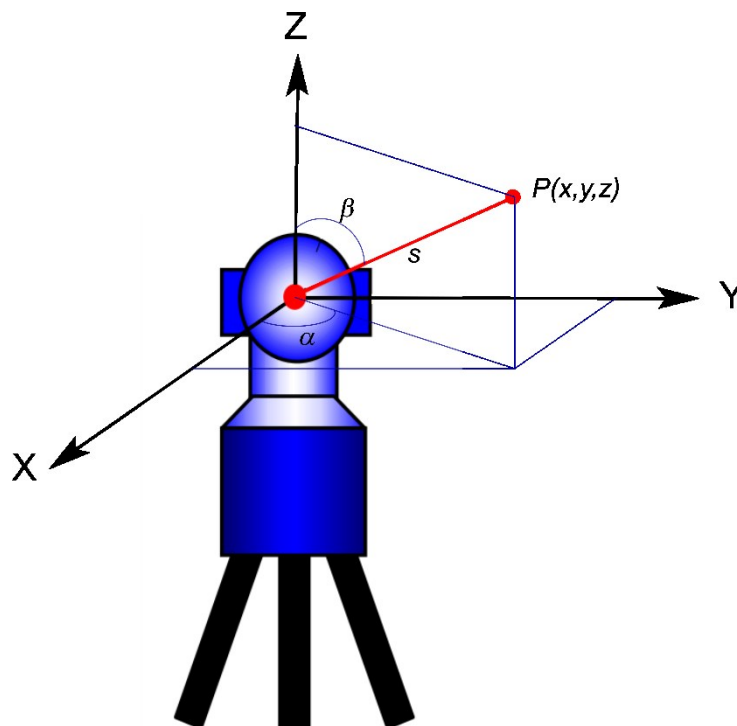
Princip rada laser trackera će se objasniti na laserskom trackeru Leica MTD 500 (Slika 4-2). Element za mjerenje dužina se sastoji od interferometra (1), dok se mjerene vrijednosti uglova dobivaju na osnovu mjerenja dva elektrooptička enkodera (5). Ogledalo (10), koje se rotira oko obje ose, usmjerava lasersku zraku (2) emitovanu iz interferometra (1) prema reflektoru (8), od kojeg se potom zraka vraća u instrument. Dio reflektovane laserske zrake pada na detektor položaja (4), prethodno prolazeći kroz djelimično prozirno ogledalo (3). Ostatak reflektovane zrake se vraća u interferometar (1). Ugao laserske zrake se određuje kontinuirano pomoću uglovnih enkodera (5) koji se nalaze na dvije upravne ose rotacije, a koji se okreću pomoću motora (7). Bilo kakav pomak reflektora (8) uzrokuje pomak reflektovane laserske zrake koji se detektuje na detektoru položaja (4) kao dvodimenzionalni pomak (x, y). Kada se zraka nalazi na reflektoru definiše se nulti ofset. Ukoliko postoji pomak, on se koristi da bi se izračunala korekcija na osnovu koje se laserska zraka dovodi na reflektor. U procesu regulacije uz mjerenje uglovnih enkodera dolazi do navođenja ogledala uz motorno okretanje osi ogledala tako da se odstupanja stalno

minimiziraju. Time mjerna glava slijedi pokretnu tačku. Računar iz razlika dužina mjerenih interferometrom, uglovnih promjena enkodera i otklona, računa koordinatne promjene reflektora ovisno o vremenu. Time su koordinate reflektora kontinuirao na raspolaganju (Benčić & Solarić, 2008.). Novije verzije laser trackera imaju ugrađene lasere za apsolutno mjerenje dužina (9), koje se koristi uglavnom kod statičnih ciljeva.

Da bi se započeo proces mjerenja, retroreflektor (8) se postavlja u početni položaj instrumenta (6) u svrhu inicijalizacije (6 – eng. home position). Ukoliko dođe do prekida laserske zrake između retroreflektora i laser trackera, mora se izvršiti reinicijalizacija, odnosno ponovno postavljanje retroreflektora u početni položaj (6).

Kao što je već pomenuto, laser trackeri rade na principu tahimetrije. Tri veličine se mjere: s – kosa dužina, α – azimut i β – zenitni ugao, i one predstavljaju polarne koordinate reflektora (Slika 4-3). Ishodište koordinatnog sistema u kojem se vrše mjerenja je smješteno u centar rotirajućeg ogledala, u presjeku dvaju osa rotacije. Na osnovu mjerenih veličina računaju se pravougle kartezijske koordinate tačke – reflektora:

$$\begin{aligned}x &= s \sin \beta \cos \alpha \\y &= s \sin \beta \sin \alpha \\z &= s \cos \beta\end{aligned}\tag{4-1}$$



Slika 4-3: Princip mjerenja kod laser trackera

Ukoliko je potrebno izmjeriti sve tačke od interesa nekog objekta, a to nije moguće izvršiti sa jednog mjesta, tada je potrebno premjestiti laser tracker. Zbog toga se obično oko objekta postavljaju sferni retroreflektori. Tracker mjeri koordinate retroreflektora prije i poslije premještanja. Time

je omogućeno da softver sve koordinate sa svih stajališta izračuna u istom koordinatnom sistemu u kojem su koordinate retroreflektora.

Laser trackere obično nije potrebno horizontisati, izuzev ako to nije uslovljeno nekim specifičnim zadatkom. Laser trackeri su obično približno horizontisani, iako su u nekim slučajevima postavljeni sa strane ili odozgo.

Uz laser tracker se koristi i dodatna oprema:

- *daljinski upravljač* - omogućuje operatoru da izvede mjerenja bez hodanja između trackera i računara,
- *dodaci retroreflektivnom signalu* - ubrzavaju teška mjerenja,
- *dodaci temperaturnom senzoru* - kompenziraju okolinske fluktuacije, ili kompenziraju termalne ekspanzije objekta mjerenja,
- *senzori temperature zraka duž mjernog puta* - optimiziraju tačnost pri mjerenju udaljenosti,
- *inklinometar* - mjeri orijentaciju trackera u odnosu na silu teže.



Slika 4-4: Primjeri retroreflektora različitih proizvođača

4.2 Izvori grešaka kod laserskih trackera

Izvori grešaka laserskih trackera se mogu klasificirati na nekoliko načina, što prije svega zavisi od kriterija koji se uzimaju prilikom klasifikacije.

Laserski trackeri predstavlja integrisane sisteme za mjerenje čiji su sastavni dijelovi optičke, mehaničke i elektronske komponente. Uslijed nesavršenosti konstrukcije ovih elemenata nastaju greške instrumenta.

Laserski trackeri rade u okolini u kojoj su atmosferski parametri varijabilni (temperatura, pritisak, vlažnost) što također utiče na pojavu grešaka povezanih sa uticajem okoline. Također je važno napomenuti da mogu nastati greške koje prouzrokuje sam korisnik, kao i greške vezane za objekat mjerenja.

4.3 Postupci kalibracije laser trackera

Postoji nekoliko standarda u kojima se opisuje postupak kalibracije laser trackera (Tabela 4-1).

Tabela 4-1: Standardi za ispitivanje laserskih trackera

STANDARD	EN	BIH
ASME B89.4.19	Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems	Ispitivanje laserskih sfernih koordinatnih mjernih sistema
VDI/VDE 2617	Part 10: Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their checking - Laser trackers with multiple probing systems	Dio 10: Tačnost koordinatnih mjernih sistema – njihove karakteristike i provjera – laserski trackeri sa više
ISO 10360-10	Part 10: Laser Trackers for measuring point-to-point distances	Dio 10: Laserski trackeri za mjerenje dužina „od tačke do tačke“

4.3.1 Ispitivanje laserskih trackera prema ISO 10360-10

Ovaj dio ISO 10360 standarda propisuje test prihvatljivosti za verifikaciju performansi laser trackera mjerenjem kalibriranih testnih dužina, testnih kugli i ravnih objekata, u cilju potvrđivanja navedenih specifikacija laser trackera od strane proizvođača. Također se propisuje test ponovne verifikacije što omogućuje korisniku da periodično ispituje laserski tracker. Ovaj standard je primjenjiv na laser trackere koji koriste retroreflektore, bez obzira na način mjerenja dužina (IFM ili ADM).

Ovaj dio ISO 10360 standarda propisuje:

- zahtjeve u pogledu performansi koje mogu biti propisane od strane proizvođača ili korisnika laser trackera,
- način izvođenja testa prihvatljivosti i test ponovne verifikacije za provjeru navedenih specifikacija instrumenta,
- aplikacije za koje se može koristiti test prihvatljivosti i test ponovne verifikacije.

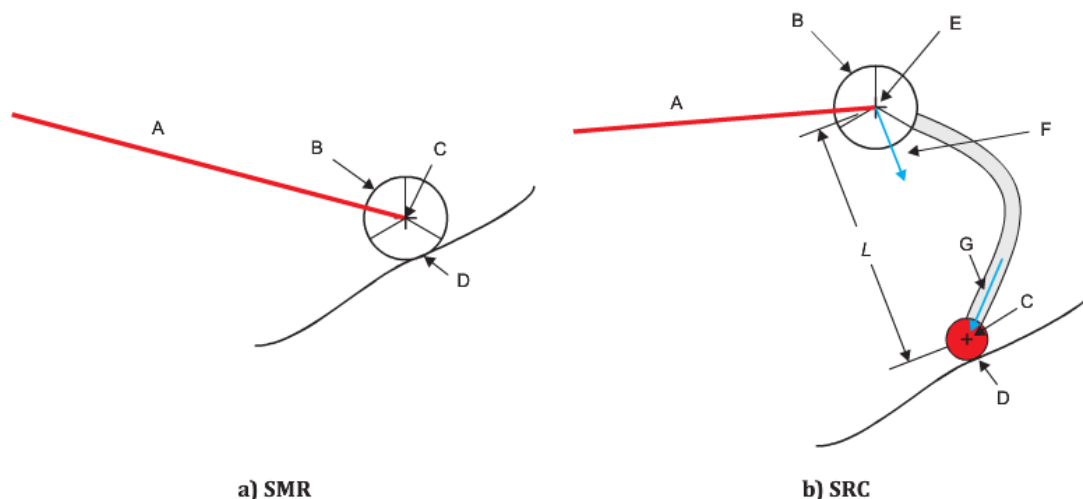
Temperatura, pritisak i vlažnost kao i vibracije na mjestu gdje se vrši testiranje trebaju biti:

- u skladu sa uputama proizvođača u slučaju testa prihvatljivosti i
- u skladu sa odlukom korisnika, za test ponovne verifikacije.

U oba slučaja korisniku je ostavljeno da odabere atmosferske i druge uslove okoline u kojima će vršiti testiranje.

Radni uslovi, propisani od strane proizvođača, kako bi se postigla maksimalna dozvoljena graška (MPE – eng. Maximum Permissible Error) se trebaju specificirati. Također, korištenje laserskog trackera treba izvoditi prema korisničkom uputstvu, npr.:

- a) broj ciklusa startanja/zagrijavanja,
- b) procedure za kalibraciju (samostalnu kalibraciju) instrumenta,
- c) procedure čišćenja retroreflektora i kućišta,
- d) SMR (eng. Spherical Mounted Retroreflector – retroreflektor postavljen u sferno kućište) ili SRC (eng. Stylus and Retroreflector Combination) kvalifikacija (Slika 4-5),
- e) lokacija, tip i broj okolišnih senzora (npr. „meteorološka stanica), i
- f) lokacija, tip i broj termalnih senzora objekta.



Slika 4-5: Opis SMR i SRC (A – laserska zraka, B – retroreflektor, C – mjerena tačka, D – kontaktna tačka sa objektom, E – osnovni položaj, F – jedinični orijentacioni vektor, G – normal probing direction vector, L – razmak osnovnog položaja i mjerene tačke)

Test prihvatljivosti i test ponovne verifikacije

Test prihvatljivosti se provodi prema uputstvima proizvođača i procedurama propisanim ovim standardom. Test ponovne verifikacije se provodi prema specifikacijama korisnika i procedurama propisanim od strane proizvođača. Ukoliko je specifikacijama dozvoljeno, laserski tracker se može testirati i u nekom drugom položaju osim u vertikalnom. U svakom slučaju azimut i elevacioni ugao će biti orijentisani u odnosu na instrument. Položaj i orijentacija testnih dužina u odnosu na laserski tracker se moraju jasno definisati prije početka testiranja. U opštem slučaju testna baza se ne rotira sa laserskim trackerom.

Za računanje se koristi metoda najmanjih kvadrata, i to bez unaprijed poznatih veličina, iako se u posebno slučajevima neke veličine mogu smatrati poznatima.

Greške određivanja veličine i oblika

Procedura određivanja ovih grešaka se zasniva na mjerenju veličine i oblika testne kugle pomoću 25 tačaka koje se mjere koristeći SMR, SRC ili ODR (eng. Optical Distance senzor and Retroreflector combination). Ispitju se sfera definisana sa 25 tačaka, dobivena metodom najmanjih kvadrata, kako bi se otkrile greške u veličini i obliku sfere. Ovom analizom se dobiva greška određivanja oblika $P_{Form.Sph.x::SMR.LT}$, i greška određivanja veličine $P_{Size.Sph.x::SMR.LT}$.

Oprema za mjerenje

Sfera koja se ispituje treba imati radijus ne manji od 10 mm i ne veći od 51 mm. Sfera treba biti kalibrisana za oblik i veličinu.

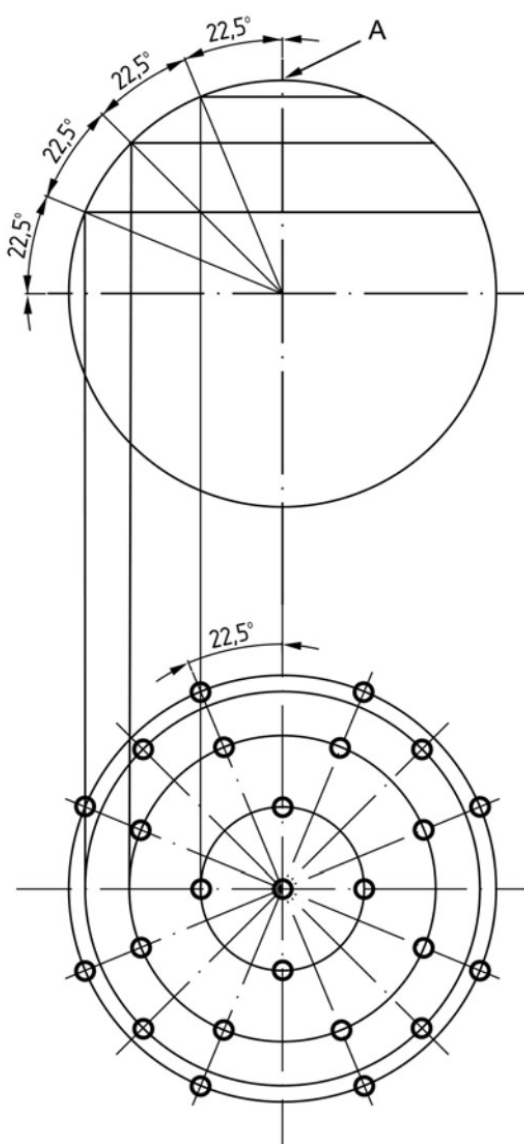
Postupak mjerenja

Testna sfera se treba postaviti tako da se može izmjeriti njena cijela hemisfera. Kada se za mjerenje koristi SMR, testne polje treba biti udaljeno od laserskog trackera.

Testna sfera treba biti čvrsto motirana, kako bi se minimizirale greška usljed savijanja.

Mjeri se i snima 25 tačaka. Tačke trebaju biti ravnomjerno raspoređene preko sfere tako da se obuhvati najmanje jedna hemisfera testne kugle-sfere. Položaj tačaka određuje korisnik, a ukoliko nije unaprijed definisano, preporučuje se sljedeći raspored tačaka (Slika 4-6):

- jedna tačka na polu testne sfere (tačka A na Slika 4-6),
- četiri tačke (ravnomjerno raspoređene) $22,5^\circ$ ispod pola,
- osam tačaka (ravnomjerno raspoređenih) 45° ispod pola, i zarotirane u odnosu na prethodne tačke za $22,5^\circ$,
- četiri tačke (ravnomjerno raspoređene) $67,5^\circ$ ispod pola, i zarotirane u odnosu na prethodne tačke za $22,5^\circ$,
- osam tačaka (ravnomjerno raspoređenih) 90° ispod pola, i zarotirane u odnosu na prethodne tačke za $22,5^\circ$.



Slika 4-6: Raspored tačaka za mjerenje (A – tačka na sferi suprotno od držača) (ISO 10360-10: 2016)

Rezultati testova mogu biti veoma zavisni u odnosu na udaljenost retroreflektora od laserskog trackera, posebno kada se koriste SRC ili ODR senzori. Zbog toga se treba pridržavati sljedećeg:

Tabela 4-2: Lokacije testnih tačaka

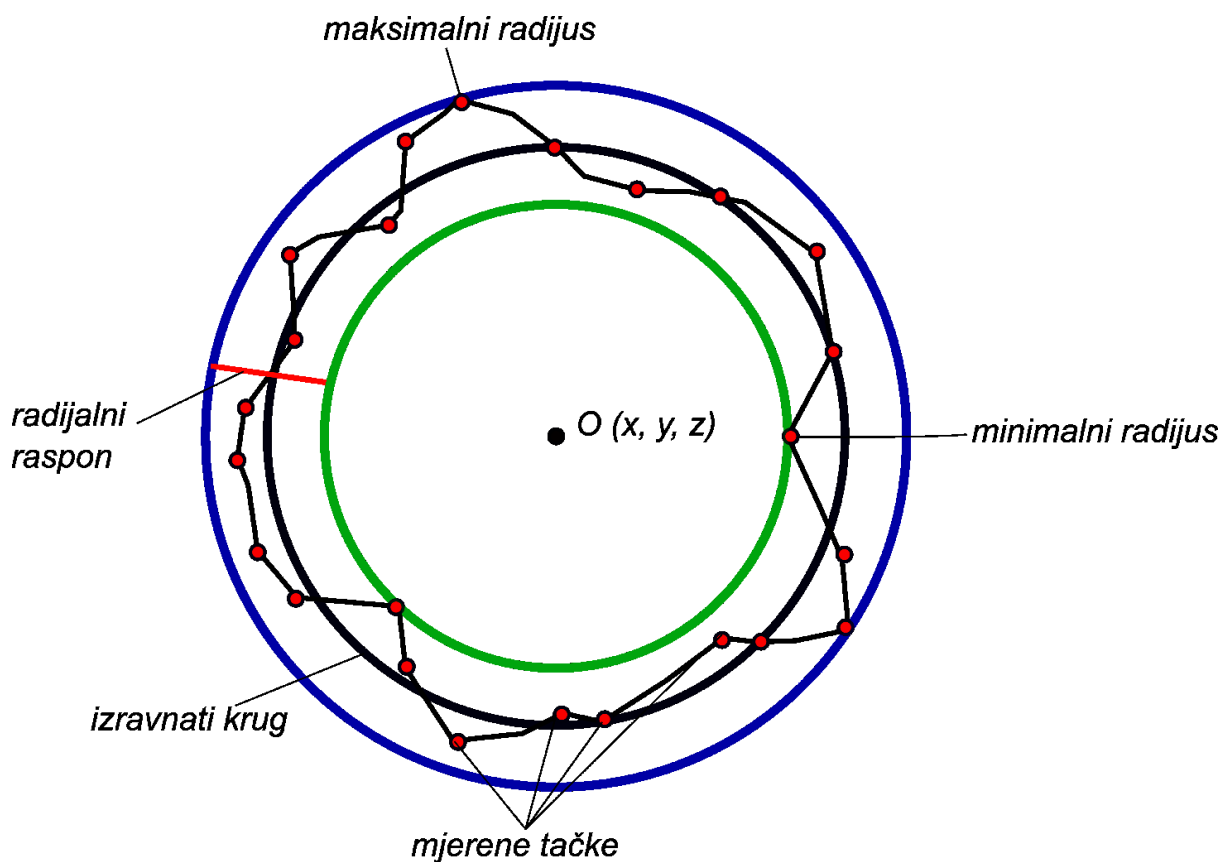
Udaljenost od laserskog trackera	Obavezno za ove senzore	Visina relativno u odnosu na centar rotacije laser trackera
$< 2 \text{ m}^a$	SMR, SRC, ODR	približno ista visina
približno 10 m	SRC, ODR	više od 1 m ispod ili iznad

^a samo gdje je proizvođač eksplicitno naveo da se SRC i ODR koriste za dužine veće od 2 m od laser trackera, test se treba izvoditi na propisanoj udaljenosti od strane proizvođača.

Računanja

Na osnovu 25 mjerenih tačaka se, metodom najmanjih kvadrata, računa sfera koja najbolje aproksimira mjerene tačke. Razlika između radijusa ovako dobivene sfere i referentnog (etalona), tj. $D_{MEAS} - D_{REF}$, predstavlja grešku veličine sfere $P_{Size.Sph.x::SMR.LT}$ (za SMR).

Za svih 25 mjerenja se izračuna radijus R , odnosno udaljenost mjerene tačke od centra sfere dobivene MNK. Razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti radijusa $R_{max} - R_{min}$ predstavlja grešku oblika sfere $P_{Form.Sph.x::SMR.LT}$ (Slika 4-7).



Slika 4-7: Greška oblika sfere

Položajne greške (test u dva položaja)

Suština ovog testa je otkrivanje geometrijskih grešaka laser trackera mjerenjem lokacije stacionarnog retroreflektora dva puta u dva položaja laser trackera. Razlika između dva mjerenja položaja tačke, koja je okomita na lasersku zraku, predstavlja položajnu grešku $L_{\text{Dia.2x1:P\&R:LT}}$.

Pošto se ovaj test može sprovesti veoma brzo, i obzirom da se njime otkrivaju greške vezane za geometriju (odnos osa i mjernih elemenata) laser trackera, preporučuje se da se on izvodi prvi.



Slika 4-8: Test u dva položaja laser trackera (Phillips, 2007.)

Oprema potrebna za izvođenje ovog testa je sfera montirana na nosač (Slika 4-8). Nosači reflektora moraju biti učvršćeni na položajima koji su opisani u Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Opis baze za mjerenje u dva položaja instrumenta

Broj položaja	Udaljenost od laser trackera ^a	Opis pozicije retroreflektora	Azimut u odnosu na laser tracker ^a [°]
1-3	1,5 m	retroreflektor se nalazi minimalno 1 m ispod visine centra rotacije LT	0, 120, 240
4-6	1,5 m	retroreflektor se nalazi na visini centra rotacije LT	0, 120, 240
7-9	1,5 m	retroreflektor se nalazi najmanje 1 m iznad centra rotacije LT	0, 120, 240
10-12	6 m	retroreflektor se nalazi minimalno 1 m ispod visine centra rotacije LT	0, 120, 240
13-15	6 m	retroreflektor se nalazi na visini centra rotacije LT	0, 120, 240
16-18	6 m	retroreflektor se nalazi najmanje 1 m iznad centra rotacije LT	0, 120, 240
^a udaljenost od LS mora biti manje od 10% od propisane udaljenosti, odstupanje azimuta manje od 5°			

Postupak mjerenja

U prvom položaju se vrši mjerenje dužine, azimuta i vertikalnog ugla, dok se u drugom položaju mjere samo uglovi. Potrebno je napraviti ukupno 18 mjerenja (Tabela 4-3).

Računanje

Razlika između položaja tačke dobivena na osnovu mjerenja u dva položaja LS-a predstavlja položajnu grešku $L_{\text{Dia.2x1:P\&R:LT}}$.

Sferne koordinate (θ – azimut, φ – elevacioni ugao, R – dužina) mjerenih tačaka označimo sa $(\theta_1, \varphi_1, R_1)$ i $(\theta_2, \varphi_2, R_2)$. Položajna greška se računa po formuli:

$$L_{\text{Dia.2x1:P\&R:LT}} = R_1 \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + [(|\theta_1 - \theta_2| - \pi) \cos \varphi_1]^2} \quad (4-2)$$

pri čemu su uglovi u radijanima.

Greška mjerenja dužine

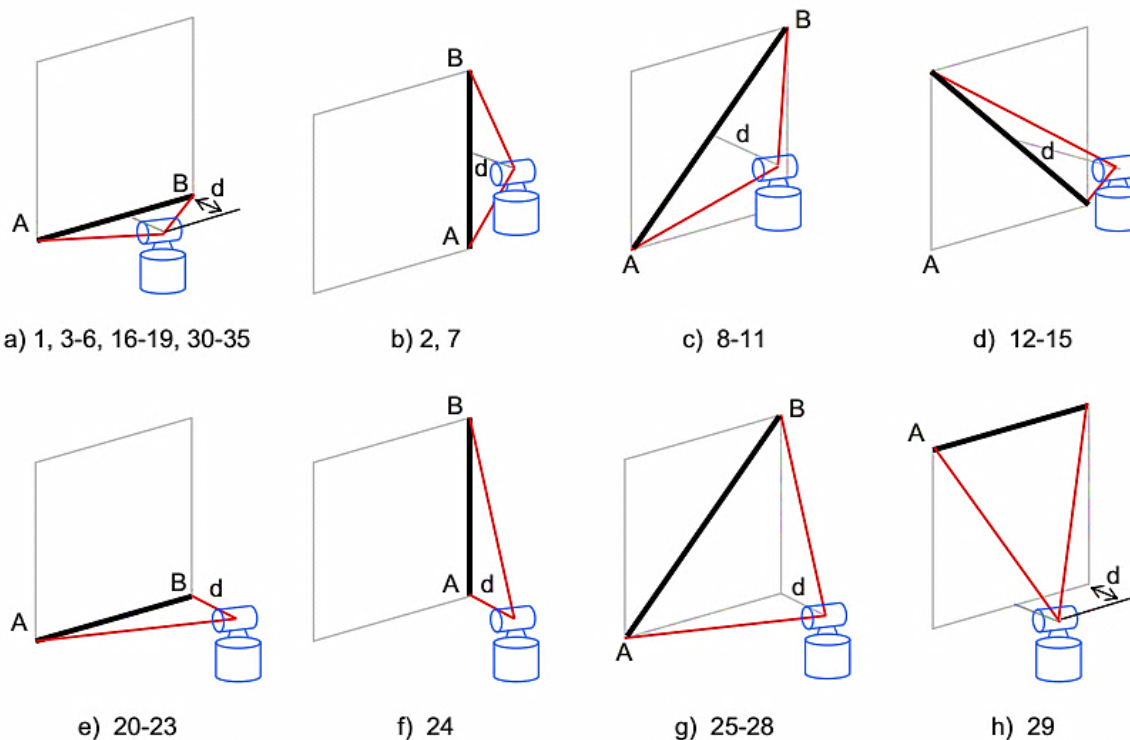
Potrebno je napraviti ukupno 105 mjerenja dužine nekog etalona (etalon može biti od karbonskih cijevi na kojima su mjesta za stavljanje kugle, držači montirani na zid, sistem montiran na šine, itd.), od kojih su propisane specifikacije za 41 mjerenje (Tabela 4-4).

Tabela 4-4: Položaji etalona pri mjerenju dužina

Broj položaja	Udaljenost etalona od LT-a	Opis položaja etalona (Slika 4-9)	Azimut u odnosu na LT [°]
1	što bliže	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), na istoj visini kao i LT	proizvoljan azimut
2	što bliže	vertikalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), na istoj visini kao i LT	proizvoljan azimut
3-6	3 m	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), na istoj visini kao i LT	0, 90, 180, 270
7	3 m	vertikalno, centar etalona u visina LT-a (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT)	proizvoljan azimut
8-11	3 m	desna dijagonala, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao i LT	0, 90, 180, 270
12-15	3 m	lijeva dijagonala, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao i LT	0, 90, 180, 270
16-19	6 m	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), na istoj visini kao i LT	0, 90, 180, 270

20-23	što bliže	horizontalno, necentrično (jedan kraj etalona okomit na LT), na istoj visini kao i LT	0, 90, 180, 270
24	što bliže	vertikalno, necentrično (jedan kraj etalona okomit na LT)	proizvoljan azimut
25-28	što bliže	dijagonalno, krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT, jedan kraj etalona iznad ili ispod okomice na ravan etalona, drugi kraj etalona lijevo ili desno od LT-a	0, 90, 180, 270
29	što bliže	horizontalno, centrično, što više iznad LT	proizvoljan azimut
30-35	što veća udaljenost ^a	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), na istoj visini kao i LT	0, 30, 60, 90, 120, 150
36-40	5 testnih dužina	testne dužine trebaju pokrivati najmanje 66% dometa uređaja za mjerenje dužina LT-a (IFM ili ADM)	proizvoljan azimut
41	„sintetička“ testna dužina	u skladu sa Aneksom C ISO 10360-10, kada se zahtijeva ispitivanje sa što manjim uticajem temperature (mjerenje dužina etalona uzimajući u obzir koeficijent termičkog širenja)	proizvoljan azimut

^a u specijalnom slučaju „što veća udaljenosti“, mjeri se veća dužina sa većom udaljenosti od LT-a. Preporučeno je da dužina etalona bude od 7 m do 9 m, a udaljenost etalona od LT-a da bude od 7 m do 9 m.



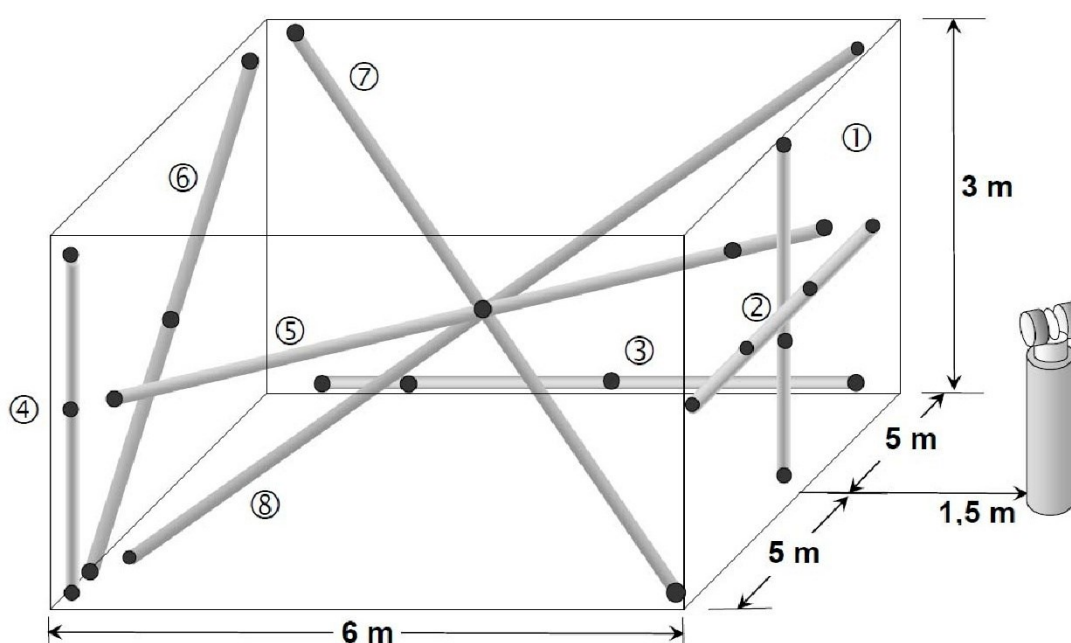
Slika 4-9: Položaji za postavljanje etalona, brojevi položaja odgovaraju brojevima u tabeli 4-4

Korisnik u skladu sa svojim potrebama odabire ostale položaje za testiranje. Međutim kako se ne bi ponavljali već izmjereni položaji, date su preporuke za ostalih 64 položaja (Tabela 4-5).

Tabela 4-5: Položaji etalona za dodatna mjerenja

Broj položaja	Udaljenost etalona od LT-a	Opis položaja etalona (Slika 4-9)	Azimut u odnosu na LT [°]
42-44	3 m	kao položaj 7 samo pod različitim uglovima – vertikalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao LT	90, 180, 270 (relativno u odnosu na uglove korištene u 7)
45-48	6 m	vertikalno, centar etalona na istoj visini kao LT (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT)	0, 90, 180, 270
49-52	6 m	desna dijagonala, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao LT	0, 90, 180, 270
53-56	6 m	lijeva dijagonala, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao LT	0, 90, 180, 270
57-59	što bliže	kao položaj 24 samo pod različitim uglovima – vertikalno, necentrično (jedan kraj etalona je okomit na LT)	90, 180, 270 (relativno u odnosu na uglove korištene u 24)
60-63	što bliže	Horizontalno, necentrično (jedan kraj etalona je okomit na LT), centar etalona na istoj visini kao LT, suprotno u odnosu na položaj LT u 20-23 (LT se postavlja okomito na suprotan kraj etalona u odnosu na poziciju u 20-23)	0, 90, 180, 270
64-67	što bliže	dijagonalno, krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT, jednak kraj iznad ili ispod okomice na ravan etalona, drugi kraj lijevo ili desno od LT, suprotno od položaja etalona u 25-28	0, 90, 180, 270
68-71	što bliže	dijagonalno, krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT, jednak kraj iznad ili ispod okomice na ravan etalona, drugi kraj lijevo ili desno od LT, kao položaji 64-67 ali posmatrani u ogledalu	0, 90, 180, 270
72-74	što bliže	horizontalno, centrično, što više iznad LT	90, 180, 270 (relativno u odnosu na položaj 29)
75-78	6 m	dijagonala kocke	0, 90, 180, 270

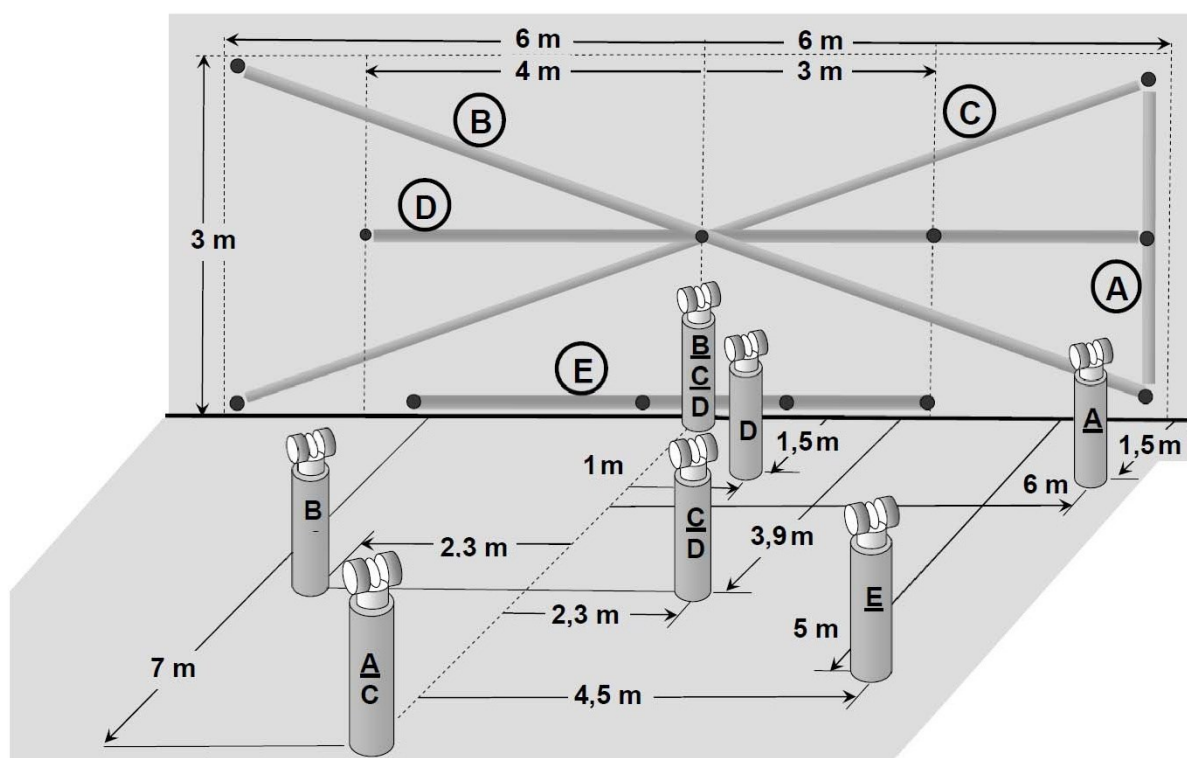
79-82	što bliže	dijagonala, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), centar etalona na istoj visini kao LT	0, 90, 180, 270
Ispitivanje ponovljivosti mjerenja			
83-86	udaljenost jednaka polovini etalona	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), etalon na istoj visini kao LT mjerenja se vrše u 4 serije	proizvoljan azimut
87-90	udaljenost jednaka polovini etalona	horizontalno, centrično (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT), etalon na istoj visini kao LT mjerenja se vrše u 4 serije	proizvoljan azimut
91-94	udaljenost jednaka polovini etalona	vertikalno, centar etalona na istoj visini kao LT (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT) mjerenja se vrše u 4 serije	proizvoljan azimut
95-98	udaljenost jednaka polovini etalona	vertikalno, centar etalona na istoj visini kao LT (krajevi etalona ekvidistantni u odnosu na LT) mjerenja se vrše u 4 serije	proizvoljan azimut
99-102	3 m	u bilo kojem radijalnom smjeru, gdje je bliži kraj etalona udaljen 3 m od LT mjerenja se vrše u 4 serije	proizvoljan azimut
103-105	6 m	u bilo kojem radijalnom smjeru, gdje je bliži kraj etalona udaljen 6 m od LT mjerenja se vrše u 3 serije	proizvoljan azimut



Slika 4-10: Položaj etalona za preostale 64 pozicije (ISO 10360-10: 2016)

Druga alternativa za izbor 64 položaja etalona je prikazana na Slika 4-10. Laserski tracker je postavljen ispred sredine duže stranice mjernog volumena, na udaljenosti od 1,5 m od stranice. Testne dužine su definisane sa 8 različitih mjernih linija. Mjerni volumen je dimenzija 10m×6m×3m (dužina×širina×visina). Ukoliko se LT koristi za mjerenje manjih dijelova onda su preporučene dimezije mjernog volumena 5m×3m×2m. Na Slika 4-10 su prikazane 33 dužine. Različitim kombinacijama potrebno je napraviti 64 dodatna mjerenja. Duž svake mjerne linije potrebno je izmjeriti tri različite testne dužine u tri različita položaja horizontalnog kruga (rotira se LT za oko 120° oko svoje vertikalne ose).

Osim ovog alternativnog prijedloga u Aneksu D ISO 10360-10 je dat još jedan prijedlog (Slika 4-11).



Slika 4-11: Prijedlog rasporeda mjernih linija za ispitivanje greške dužine (Aneks D ISO 10360-10)

Mjerne linije se postavljaju na zidu, i veoma precizno su pozicionirane. Laserski tracker se premješta tako da se na kraju dobije efekat mjernog volumena kao na Slika 4-10. u sljedećoj tabeli je dat pregled najkraćih i najdužih dužina uzduž mjerne linije:

Tabela 4-6: Najkraće i najduže dužine uzduž mjernih linija (Aneks D ISO 10360-10)

Mjerna linija	Najkraća testna dužina $L_{\min}$ [m]	Najduža testna dužina $L_{\max}$ [m]	Preporučena najduža testna dužina u [m]
A	$L_{\min} \geq 0,3$	$2,0 \leq L_{\max} \leq 3,0$	3,0
B	$L_{\min} \geq 0,3$	$8,1 \leq L_{\max} \leq 12,4$	12,0
C	$L_{\min} \geq 0,3$	$8,1 \leq L_{\max} \leq 12,4$	12,0
D	$L_{\min} \geq 0,3$	$6,6 \leq L_{\max} \leq 10,0$	9,0
E	$L_{\min} \geq 0,3$	$4,0 \leq L_{\max} \leq 6,0$	6,0

Računanje

Za svih 105 mjerenja računa su greška mjerenja dužine, $E_{\text{Uni:0:LT}}$ ili $E_{\text{Bi:0:LT}}$, kao razlika između mjerene i kalibrirane dužine svakog etalona. Mjerena dužina može biti popravljena za uticaj sistematskih grešaka, ili popravljena za uticaj termičkog širenja ako je LT integrisan odgovarajući senzor. Korekcije rezultata nakon mjerenja se ne bi trebale provoditi. Za svih 105 mjerenja se računa odgovarajuća maksimalna dozvoljena greška prema uputstvu proizvođača ($E_{\text{Uni:0:LT,MPE}}$ ili $E_{\text{Bi:0:LT,MPE}}$).

Opće napomene

Sve vrijednosti računatih grešaka iz svih testova moraju biti manje od maksimalnih dozvoljenih grešaka, i u slučaju testa prihvatljivosti kao i u slučaju testa ponovljene verifikacije. Također se preporučuje grafička interpretacija rezultata zbog boljeg pregleda.

U Aneksu A je dat obrazac za upisivanje osnovnih podataka vezanih za ispitivanje, kao i obrazac za unos dobivenih rezultata testiranja.

4.3.2 Ispitivanje laserskih trackera prema ASME B89.4.19

ASME B89.4.19 je prvi uspostavljeni standard kojim je propisano ispitivanje laserskih trackera. Standardom su propisani testovi za otkrivanje greške mjerenja dužine „od tačke do tačke“. Također standard obuhvata i IFM i ADM laserske trackere. Standardom su propisana dva načina ispitivanja LT:

- a) *Sistemske testove* su namijenjeni za ispitivanje performansi LT kod mjerenja seta dužina „od tačke do tačke“. Svaka mjerena dužina se poredi sa referentnom dužinom. Sistemski testovi su osmišljeni tako da se ispita preciznost mjerenja dužina i uglova sa LT. Etaloni se postavljaju u različitim položajima i na različitim udaljenostima, kako bi se ispitala osjetljivost LT na poznate izvore grešaka. Ovi testovi se rade i u dva položaja LT-a.
- b) *Testovi za ispitivanje daljinomjera (IFM ili ADM)* imaju za svrhu utvrđivanje tačnosti daljinomjera pri mjerenju dužina.

4.3.2.1 Ispitivanje preciznosti mjerenja dužine prema ASME B89.4.19

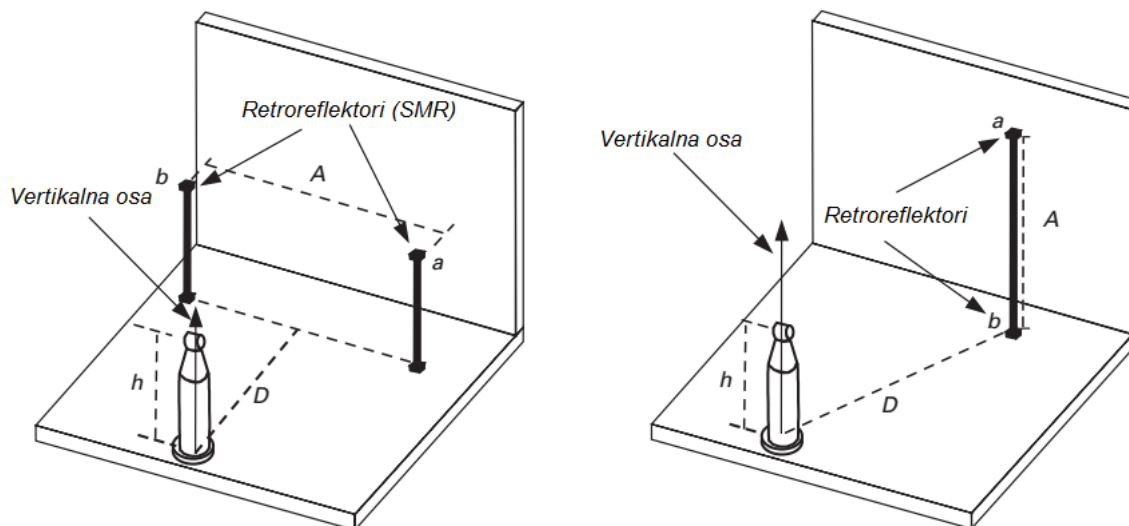
Ispitivanje preciznosti mjerenja dužina „od tačke do tačke“ se provodi mjerenjem dužine između dvije tačke u prostoru i upoređivanjem dobivene dužine sa referentnom dužinom – etalom. Etalon treba biti dug minimalno 2,3 m, a očekivana mjerna nesigurnost U mora bit manja od $1/4$ MPE . Etalon može biti realizovan na nekoliko načina:

- a) kalibrisani etalon sa mogućnošću postavljanja retroreflektora na krajevima,
- b) dva reflektora postavljena na stubove, između kojih je dužina izmjerena visoko preciznim instrumentom,
- c) etalon uspostavljen pomoću pružnog sistema sa nosačima reflektora montiranim na šine kao i uređajem za precizno mjerenje dužine.

Prilikom izvođenja mjerenja SMR biti približno isto orijentisan relativno u odnosu na lasersku zraku. Time se smanjuje uticaj geometrijskih grešaka u konstrukciji SMR-a na tačnost konačnih rezultata testiranja. Preporučuje se korištenje jednog SMR-a tokom provođenja svih testova propisanih ovim standardom.

U slučaju korištenja kalibrisanog etalona neophodno je mjeriti njegovu temperaturu kako bi se odredio koeficijent termičkog širenja. U slučaju korištenja stubova ili šinskog sistema, mjeri se temperatura vazduha kako bi se korigovale promjene u indeksu refrakcije zraka.

Ispitivanje mjerenja dužine provodi se za različite položaje etalona odnosno retroreflektora. Dužina A između krajnjih tačaka etalona a i b treba biti minimalno 2,3 m (Slika 4-12). U slučaju mjerenja dužine u horizontalnoj ravni visina h laserskog trackera treba biti približno ista kao visina krajnjih tačaka etalona. U slučaju mjerenja dužine u vertikalnoj ravni visina h laserskog trackera treba biti približno ista srednjoj visini između krajnjih tačaka etalona.



Slika 4-12: Mjerenje dužine u horizontalnoj (lijevo) i vertikalnoj (desno) ravni (ASME B89.4.19)

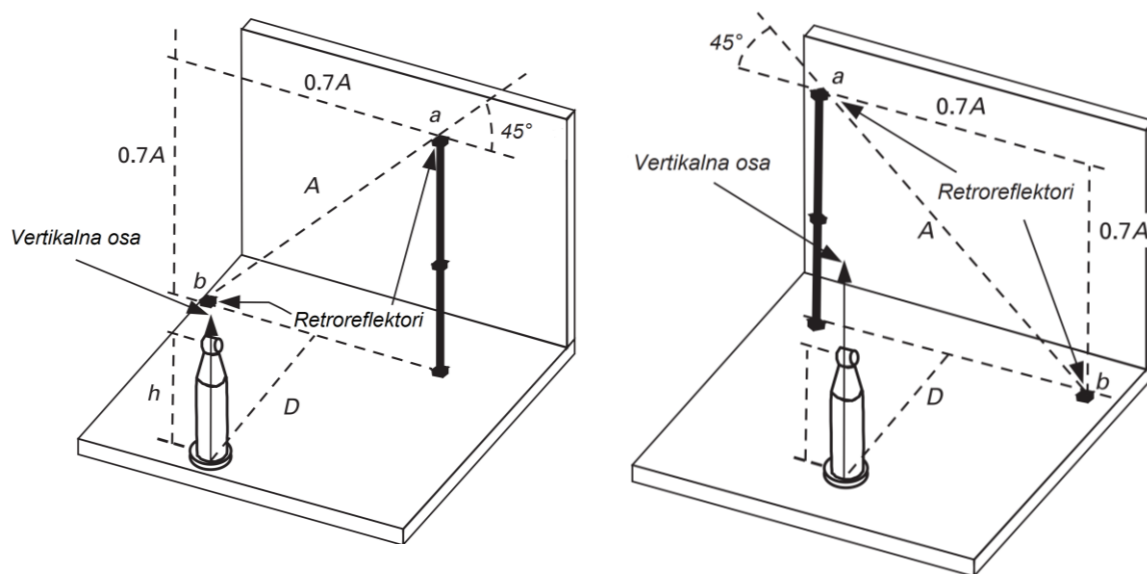
Dužina D na slici 4-12 predstavlja udaljenost etalona od laserskog trackera. Krajevi etalona su ekvidistantni u odnosu na osu rotacije laserskog trackera. Mjerenje se izvode prema rasporedu opisanom u Tabela 4-7. Navedeni horizontalni uglovi se dobiju rotacijom laserskog trackera oko vertikalne ose. U svakom položaju se izvode tri mjerenja.

Tabela 4-7: Pregled rasporeda mjerenja dužine u horizontalnoj i vertikalnoj ravni (ASME B89.4.19)

Broj položaja	Udaljenost etalona od LT D – za mjerenje dužine u horizontalnoj ravni	Udaljenost etalona od LT D – za mjerenje dužine u vertikalnoj ravni	Mjereni horizontalni ugao prema tačkama a i b za mjerenje dužine u horizontalnoj ravni	Mjereni horizontalni ugao prema tačkama a i b za mjerenje dužine u vertikalnoj ravni
1	$0,1A$	$1,2A$	Proizvoljan	0°
2	$1,2A$	$1,2A$	0°	90°
3	$1,2A$	$1,2A$	90°	180°
4	$1,2A$	$1,2A$	180°	270°
5	$1,2A$	$2,7A$	270°	0°
6	$2,7A$	$2,7A$	0°	90°
7	$2,7A$	$2,7A$	90°	180°
8	$2,7A$	$2,7A$	180°	270°
9	$2,7A$		270°	

U slučaju kada nije moguće ostvariti predviđene horizontalne uglove, potrebno je napraviti mjerenja tako da budu ravnomjerno raspoređena u smislu mogućeg uglovnog intervala laserskog trackera.

Osim mjerenja dužina u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, standardom je propisano da se mjeri dužina etalona postavljenog dijagonalno (Slika 4-13). Dužina dijagonale treba biti najmanje 2,3 m. Visina laserskog trackera h treba biti jednaka visini sredine dijagonale. Dužina D predstavlja udaljenost laserskog trackera od etalona.



Slika 4-13: Mjerenje dužine desne dijagonale (lijevo) i lijeve dijagonale (desno) (ASME B89.4.19)

U tabeli 4-9 dat je prikaz rasporeda mjerenja koji vrijedi i za desnu i za lijevu dijagonalu.

Naznačeni horizontalni uglovi se dobiju rotacijom laserskog trackera oko vertikalne ose. Ukoliko se, laserskim trackerom koji se testira, ne mogu izvršiti mjerenja svih navedenih uglova, onda se mjere horizontalni uglovi u obimu u kojem je to moguće, s tim da se gleda da budu približno jednaki i ravnomjerno raspoređeni na cijelom intervalu koji laserski tracker može mjeriti. U svakom položaju se izvode tri mjerenja.

Tabela 4-8: Pregled rasporeda mjerenja dužine etalona postavljenog dijagonalno (i desna i lijeva dijagonala) (ASME B89.4.19)

Broj položaja	D (približno)	Mjereni horizontalni ugao prema tačkama a i b
1	$1,2A$	0°
2	$1,2A$	90°
3	$1,2A$	180°
4	$1,2A$	270°
5	$2,7A$	0°
6	$2,7A$	90°
7	$2,7A$	180°
8	$2,7A$	270°

Osim ova četiri definisana položaja etalona, potrebno je izmjeriti dužinu etalona u još dva položaja. Korisnik može proizvoljno odabrati položaje. Ukoliko korisnik nema eksplicitno definisane položaje može uzeti položaje preporučene ovim standardom. Prvi položaj se preporučuje za korisnike koji mjerenja obavljaju većinom u vertikalnom smjeru, odnosno za situacije gdje se većinom mjere vertikalni uglovi. Položaj etalona je sličan položaju u slučaju kada je etalon postavljen u vertikalnom položaju, s tim da se etalon pomjeri tako da visina kraja b etalona bude na približno istoj visini laserskog trackera. Instrument treba biti što bliže etalonu, odnosno dužina D treba biti što kraća, ali da je moguće mjeriti i gornji kraj etalona a . Drugi položaj je sličan položaju desne dijagonale, s tim da je etalon postavljen na spojni ugao koji uključuje približno isti pomak za sve tri ose laserskog trackera. Centar etalona treba biti na približno istoj visini kao laserski tracker i udaljen 5 m od laserskog trackera. Za ova dva dodatna položaja je potrebno napraviti po tri mjerenja.

Kada se završe mjerenja vrši se računanje razlika između referentne dužine etalona i mjerene dužine i dobivene vrijednosti se upisuju u odgovarajući obrazac. Računanje razlika se vrši prema izrazu:

$$\delta = |L_m - L_{\text{ref}}| \quad (4-3)$$

gdje su:

- L_m – mjerena dužina etalona,
- L_{ref} – referentna dužina etalona.

Za svaki položaj se dobiju tri vrijednosti ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$), obzirom da se vrše tri mjerenja u svakom položaju. Upoređuje se maksimalna razlika $\delta_{\text{max}} = \max(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ sa maksimalnom dozvoljenom greškom (MPE). Uslov koji treba biti ispunjen kako bi instrument zadovoljio testove je da maksimalna razlika svih dužina bude manja ili jednaka MPE tj. $\delta_{\text{max}} \leq MPE$.

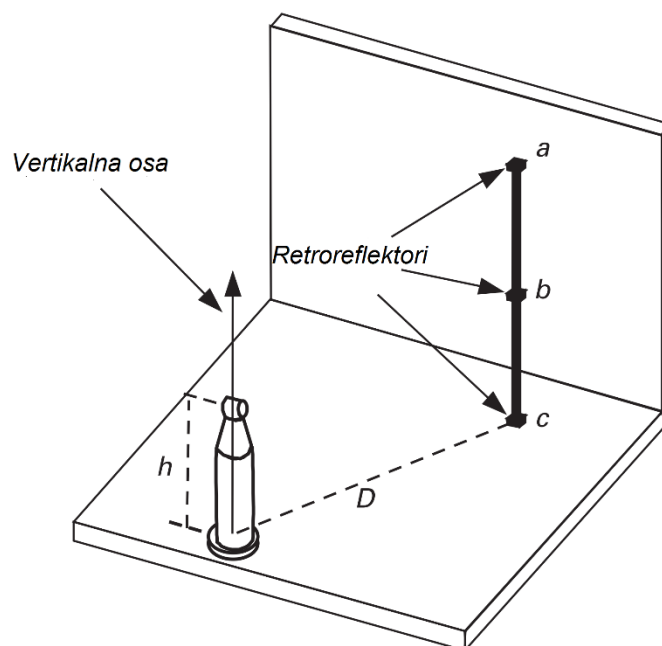
Testiranje u dva položaja kruga instrumenta

Sljedeći test koji je neophodno provesti je testiranje laserskog trackera u dva položaja kruga. Na Slika 4-14 je prikazan raspored retroreflektora. Retroreflektor b treba biti u visini laserskog trackera. Udaljenost laserskog trackera od etalona je označena sa D . Mjerenja se vrše prvo u prvom položaju na retroreflektor, a zatim u drugom položaju. Procedura se ponavlja tri puta za sve retroreflektore.

Mjerenjem u prvom položaju dobiju se koordinate mjerene tačke (x_I, y_I, z_I). Koordinate u drugom položaju označimo sa (x_{II}, y_{II}, z_{II}). Udaljenost između prvo i drugog položaja je

$$\Delta = \sqrt{(x_{II} - x_I)^2 + (y_{II} - y_I)^2 + (z_{II} - z_I)^2} \quad (4-4)$$

Obzirom da se vrše tri mjerenja dobiju se tri vrijednosti Δ , tj. Δ_1, Δ_2 i Δ_3 . Maksimalna položajna razlika $\Delta_{\text{max}} = \max(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)$ mora biti manja ili jednaka MPE za sve dužine, tj. $\Delta_{\text{max}} \leq MPE$



Slika 4-14: Test u dva položaja kruga laserskog trackera (ASME B89.4.19)

U sljedećoj tabeli je dat prikaz rasporeda položaja laserskog trackera i etalona:

Tabela 4-9: Pregled rasporeda mjerenja kod testa u dva položaja (ASME B89.4.19)

Broj položaja	D (približno)	Mjereni horizontalni ugao prema tački b
1	Napomena	0°
2	Napomena	90°
3	Napomena	180°
4	Napomena	270°
5	3 m	0°
6	3 m	90°
7	3 m	180°
8	3 m	270°
9	6 m	0°
10	6 m	90°
11	6 m	180°
12	6 m	270°
Napomena: Udaljenost D treba biti što kraća tako da se dobije što veća razlika vertikalnih uglova na a i c		

4.3.2.2 Ispitivanje tačnosti daljinomjera prema ASME B89.4.19

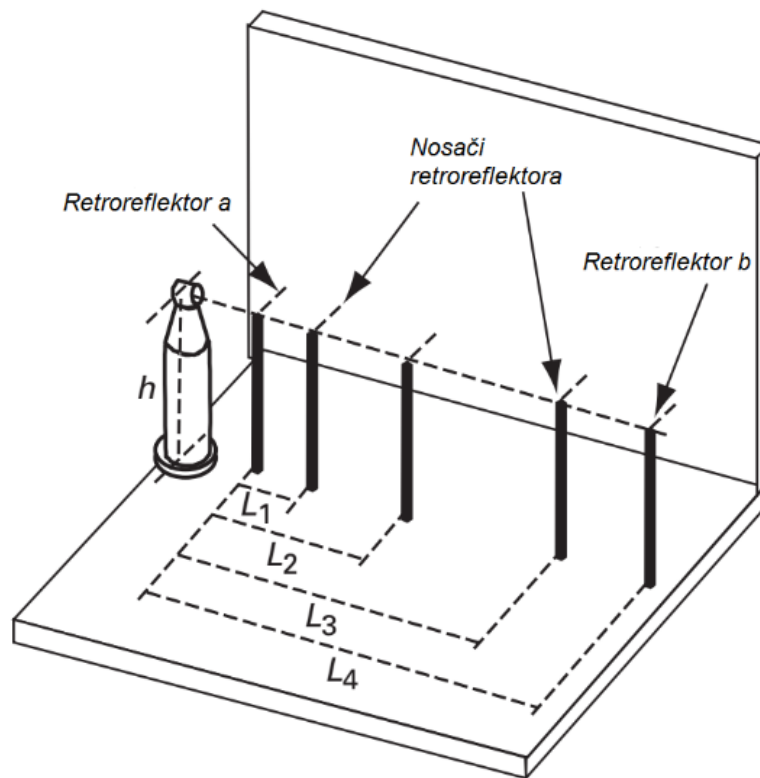
Ovaj test se provodi kako bi se ispitala tačnost mjerenja dužina laserskim trackerom. U zavisnosti od vrste daljinomjera razlikuju se dvije vrste testova:

1. Testovi laserskih trackera sa IFM daljinomjerom,
2. Testovi laserskih trackera sa ADM daljinomjerom.

Tri su testa kod laserskih trackera sa IFM daljinomjerom:

- a) duga referentna dužina,
- b) kratka referentna dužina,
- c) kalibracija laserskim interferometrom.

Ad a) Ovaj test podrazumijeva mjerenje 4 referentne dužine poredane radijalno, tako da se pokrije maksimalni domet laserskog trackera (Slika 4-15).



Slika 4-15: Konfiguracija za ispitivanje preciznosti mjerenja dužina (ASME B 89.4.19)

Vrijednosti referentnih dužina su date u tabeli 4-11. Mjere se samo 4 dužine.

Tabela 4-10: Pregled rasporeda mjerenja dugih referentnih dužina (ASME B89.4.19)

Broj položaja	Referentne dužine	Mjereni zenitni ugao prema tačkama a i b
1	$L_1 \approx 18\%R$	90°
2	$L_2 \approx 18\%R$	90°
3	$L_3 \approx 18\%R$	90°
4	$L_4 \approx 18\%R$	90°
5	Korisnik odabire	90°
6	Korisnik odabire	90°
R – maksimalna dužina koju instrument može izmjeriti		

Računanje

Računa se razlika između mjerenih i referentnih dužina:

$$\delta = |L_m - L_{\text{ref}}| \quad (4-5)$$

gdje su:

- L_m – mjerena dužina etalona,
- L_{ref} – referentna dužina etalona.

Da bi test bio zadovoljen potrebno je da razlika δ bude manja ili jednaka MPE , tj. $\delta \leq MPE$ za sve dužine.

Ad b) Ovaj test podrazumijeva mjerenje četiri kratke referentne dužine. Preporučuju se dužine od 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m i 2,3 m. Najduža referentna dužina ne smije biti kraća od 1,5 m. U jednoj seriji se izmjere sve četiri dužine. Potrebno je napraviti tri serije mjerenja, tako da se na kraju ima ukupno 12 mjerenja.

Računanje

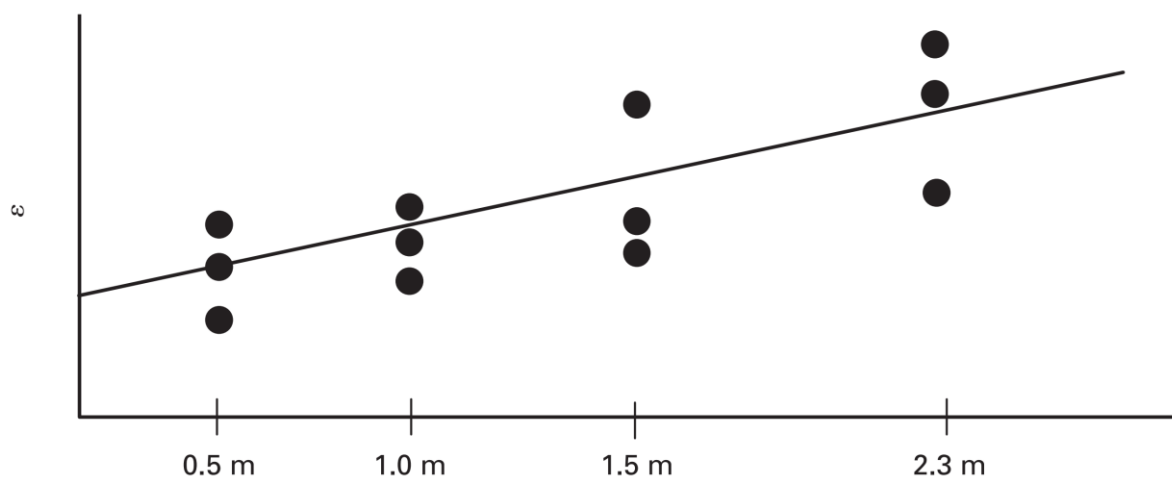
Računa se razlika između mjerenih i referentnih dužina, za svih 12 mjerenja:

$$\varepsilon = |L_m - L_{\text{ref-short}}| \quad (4-6)$$

gdje su:

- L_m – mjerena dužina etalona,
- $L_{\text{ref-short}}$ – referentna dužina etalona.

Za svih 12 vrijednosti ε se računa najvjerovatnija vrijednost metodom najmanjih kvadrata, te nagib i koeficijent pravca $A + B \times L$ (Slika 4-16).



Slika 4-16: Računanje prave metodom najmanjih kvadrata (ASME B89.4.19)

Nakon toga se računaju četiri vrijednosti δ prema sljedećem izrazu:

$$\delta = A + B \times L_{\text{ref}} \quad (4-7)$$

gdje L_{ref} predstavlja 4 vrijednosti referentnih dužina navedene u Tabela 4-10. Sve četiri vrijednosti $\delta(L_{\text{ref}})$ moraju biti manje ili jednake od odgovarajućih MPE za date dužine, tj. $\delta(L_{\text{ref}}) \leq MPE$.

Ad c) Interferometar u laser trackeru se treba kalibrirati prema standardu ASME B89.1.8-2011. ispitivanjem se dobiva greška ovisna samo o dužini (*eng. LDE – lenght dependent error*, multiplikaciona konstanta) i pomak D – adiciona konstanta.

Računanje

U slučaju kalibracije laserskog interferometra računaju se četiri vrijednosti δ prema sljedećem izrazu:

$$\delta = D + LDE \times L_{\text{ref}} \quad (4-8)$$

gdje L_{ref} predstavlja 4 vrijednosti referentnih dužina navedene u Tabela 4-10. Vrijednosti D i LDE su date u certifikatu o kalibraciji interferometra.

Sve četiri vrijednosti $\delta(L_{\text{ref}})$ moraju biti manje ili jednake od odgovarajućih MPE za date dužine, tj. $\delta(L_{\text{ref}}) \leq MPE$.

U slučaju ispitivanja ADM koristi se samo test sa dugim referentnim dužinama. Mjeri se ukupno 6 dužina (Tabela 4-10).

Računanje

Računa se razlika između mjerenih i referentnih dužina:

$$\delta = |L_m - L_{\text{ref}}| \quad (4-9)$$

gdje su:

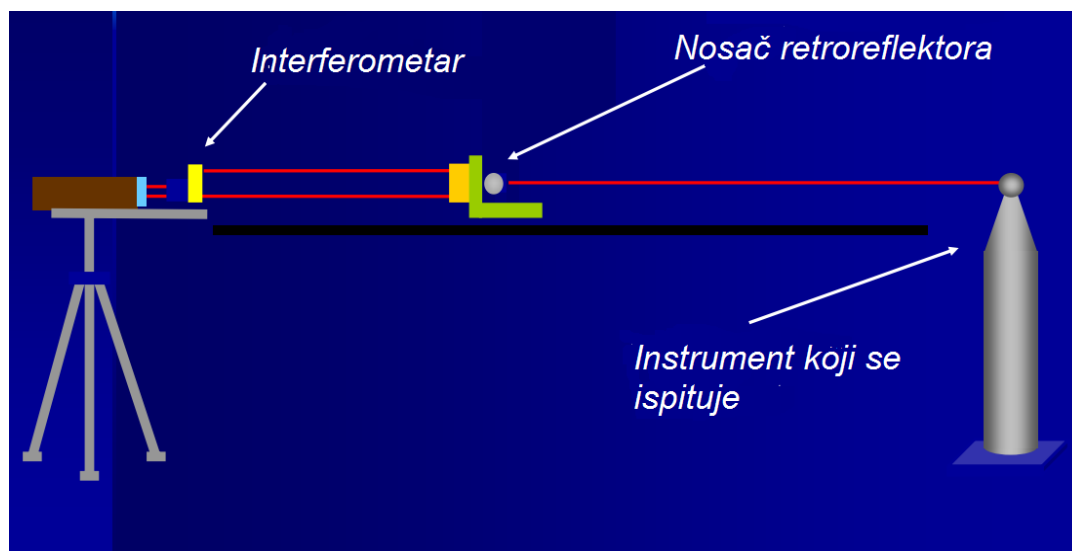
- L_m – mjerena dužina etalona,
- L_{ref} – referentna dužina etalona.

Da bi test bio zadovoljen potrebno je da razlika δ bude manja ili jednaka MPE , tj. $\delta \leq MPE$ za sve dužine.

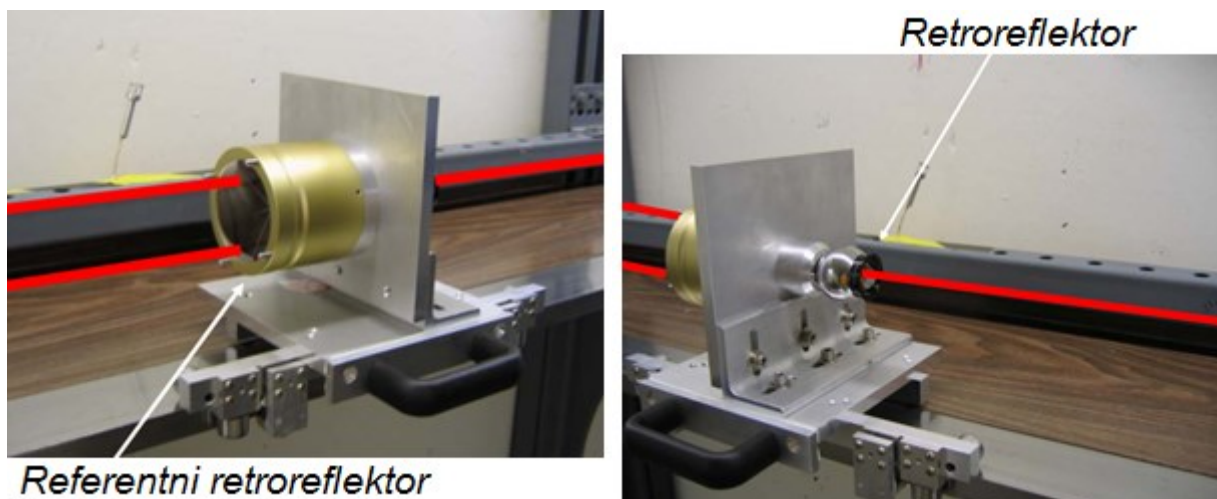
4.3.2.3 Uspostavljanje baze za ispitivanje daljinomjera LT-a

Baza za ispitivanje preciznosti mjerenja dužine se može uspostaviti na nekoliko načina:

- a) Pomoću šina na kojima je montiran nosač za retroreflektor. Pomak nosača se mjeri interferometrom i instrumentom, te se na taj način dobivaju vrijednosti potrebne za računanje konstanti laserskog trackera. Dužina šinskog sistema je obično duža od 20 m. U slučaju ispitivanja ADM, ukoliko je u laser trackeru integrisan IFM koji je zadovoljio testove i indeks mjerljivosti C_m koji predstavlja odnos MPE i mjerne nesigurnosti U referentne dužine, onda se laser tracker može koristiti za kalibraciju ADM.
- b) Pomoću čvrsto postavljenih držača sa retroreflektorima, pri čemu se referentna dužina između pojedinih tačaka određuje odgovarajućim instrumentom (npr. laserskim interferometrom).



Slika 4-17: Šematski prikaz šinskog sistema za ispitivanje daljinomjera laser trackera (Phillips, 2007.)



Slika 4-18: Primjer nosača sa montiranim referentnim retroreflektorom (lijevo) i retroreflektorom na koji se mjeri sa instrumentom koji se ispituje (desno) (Phillips, 2007.)

Uz standard za ispitivanje laserskih trackera propisan je i način za ispitivanje SMR retroreflektora, koji međutim nije obavezan. Također su kao aneksi opisani i postupci povremenog testiranja laserskih trackera (između dvije kalibracije). Povremeni testovi služe da se utvrdi funkcionalnost laserskih trackera u smislu tačnosti mjerenja.

4.3.3 Ispitivanje laserskih trackera prema VDI/VDE 2617-10

ISO 10360-10 se faktički sastoji od dijelova ASME B89.4.19 i VDI/VDE 2617-10, uz određene izmjene. Standardom VDI/VDE 2617-10 je također propisano određivanja grešaka veličine i oblika sfere, kao i greške mjerenja dužine u mjernom volumenu (eng. volumetric length test). Greške određivanja oblika i veličine se provode kao po ISO 10360-10. greške mjerenja dužine se provode mjerenjem dužina kojima je definisan volumen dimenzija 10m x 6m x 3m (Slika 4-10). Potrebno je izmjeriti 105 dužina. Prvo se izmjeri 96 dužina, pri čemu je LT ispred etalona koji se mjeri (Slika 4-10), a zatim se LT premjesti unutar mjernog volumena i izmjeri se još 9 preostalih dužina. Drugi slučaj je predstavljen na Slika 4-10, kada se etalon postavlja na zid dok se LT premješta. Računanja se vrše prema prethodno opisanim formulama u ISO 10360-10 standardu.

Ovim standardom nije predviđeno obavezno ispitivanje u dva položaja instrumenta, već je to preporučeno.

5 Usporedba postupaka kalibracije TPS, TLS i laserskih trackera

Da bi se napravila usporedba postupaka kalibracije TPS, TLS i laserskih trackera (LT), potrebno je definisati parametre koji će biti referentni za usporedbu. Ti parametri mogu biti sljedeći:

- postojanje jednog ili više međunarodnih standarda za ispitivanje,
- jednostavna i potpuna procedura ispitivanja,
- ispitivanje komponenti ili cijelog sistema,
- jednostavnost procedure za ispitivanje,
- kompleksnost računanja,
- potreba za dodatnom opremom prilikom ispitivanja (oprema koja se inače ne koristi uz instrument),
- vremensko trajanje ispitivanja, itd.

U sljedećoj tabeli je dat pregled i usporedba prema određenim parametrima:

Tabela 5-1: Usporedba postupaka kalibracije TPS, TLS i LT

Sistem Parametri	TPS	TLS	LT
Standard	Da	Ne ¹	Da
Naziv standarda	ISO 17123 (3, 4, 5)	-	ISO 10360-10, ASME B89.4.19, VDI/VDE 2617-10
Jednostavna procedura	Da	Da	Ne ²
Potpuna procedura	Da	Da	Da
Ispitivanje komponenti	Da	Da	Da
Ispitivanje sistema	Da	Ne	Ne
Jednostavnost procedure	Jednostavna	Jednostavna	Kompleksna
Kompleksnost računanja	Ne	Ne	Ne ³
Dodatna oprema	Ne	Ne	Da
Referentna vrijednost	Ne	Ne	Da
Vremensko trajanje	max. 8h	max. 8h	max. 8h
¹ postoji nekoliko vrlo sličnih prijedloga, dok je ISO standard još u pripremi ² obzirom da se radi o preciznim sistemima ne postoji jednostavna procedura ispitivanja, jer u tom slučaju nije moguća ocjena tačnosti dobivenih rezultata ³ računanja su kompleksna ukoliko se ne radi sa softverom, ali budući da uz instrument dolazi softver onda to više nije slučaj			

Za TPS sisteme se koriste samo ISO standardi, te ih nije moguće porediti sa drugim standardima. Međutim, moglo bi se govoriti o prednostima i nedostacima ISO standarda.

Prednosti ISO standarda za ispitivanje TPS sistema:

- jednostavna procedura za manje precizne radove,
- potpuna procedura za preciznije radove,
- jednostavnost za izvođenje na terenu,
- malo vremena za izvođenje terenskih procedura,
- jednostavnost za računanje, bez potrebe za specijalnim softverom,
- nije potrebna specijalna dodatna oprema za ispitivanje.

Nedostaci ISO standarda za ispitivanje TPS sistema:

- nepostojanje referentnih vrijednosti sa kojima bi se mogle uporediti mjerene vrijednosti,
- mjerenje vertikalnih uglova se ne izvodi na markice, već na markantne tačke na vertikalnom objektu, tako da se vrlo često dobiva lošija tačnost od specificirane.

Još uvijek ne postoji standard za ispitivanje specijalnih komponenti TPS sistema, kao što su automatsko viziranje prizme, automatsko praćenje prizme, automatsko traženje prizme, mjerenje dužine bez reflektora, videotahimetrija, itd. Istina, neke od ovih komponenti se mogu testirati postojećim ISO standardima (npr. mjerenje dužine bez reflektora), ali u svakom slučaju preciznije definisanje načina ispitivanja pojedinih komponenti TPS sistema bi bilo preporučljivo.

Za TLS sisteme još uvijek ne postoji standard za ispitivanje. U toku je rad na ISO 17123-9 standardu, kojim će biti propisane terenske procedure za ispitivanje terestričkih laserskih skenera. Za laserske trackere postoje tri standarda, koji su opisani u prethodnim poglavljima.

Prednosti ASME B89.4.19:

- odvojeno testiranje mjerenja dužine i volumena omogućava testiranje instrumenta u maksimalnom dometu, kao i korištenje kraćih etalona (kao što je etalon dužine 2,3 m) prilikom volumetrijskog testiranja,
- provođenje testova u dva položaja instrumenta omogućava brzu i efikasnu provjeru ispravnosti LT-a. Ovi testovi su idealni, jer su osjetljivi na brojne greške LT-a, te za njihovo izvođenje nije potreban etalon,^o
- mnogi testovi u standardu su osjetljivi na geometrijske/optičke greške LT-a. Recimo, test mjerenja dužina izveden u četiri različita položaja horizontalnog kruga (0°, 90°, 180° i 270°) je osjetljiv na ekscentricitet enkodera horizontalnih uglova.

Nedostaci ASME B89.4.19:

- postoji nekoliko suvišnih testova u standardu. Test mjerenja dužine u vertikalnoj ravni se izvodi u nekoliko različitih položaja horizontalnog kruga, a jasno je da azimut nema utjecaj na mjerenje dužine u vertikalnoj ravni, tako da je dovoljno mjerenje u jednom položaju horizontalnog kruga. Test mjerenja dužine dijagonale izvodi se sa dvije udaljenosti LT od etalona, što je suvišno. Mjerenje u dva položaja sa udaljenosti od 3 m je nepotrebno.
- postoji znatna simetrija u položajima etalona, što rezultira slabom ili nikakvom osjetljivošću na greške u konstrukciji, odnosno geometriji LT-a,

- standardom se ispituju pojedinačne komponente sistema, iako su komponente međusobno zavisne kada se određuju 3D koordinate objekta.

Prednosti VDI/VDE 2617 dio 10:

- propisano je mjerenje nekih veoma dugih dužina, što je bliže namjeni LT-a,
- propisani su neki veoma interesantni položaji kod mjerenja volumena, a koji su osjetljivi na neke greške, kao što je horizontalni položaj etalona udaljen 1,5 m od LT-a i na visini 1,5 m iznad ili ispod visine LT-a kojim je omogućeno otkrivanje nevertikalnosti vertikalne ose LT-a. Ovu grešku je veoma teško otkriti,
- standard propisuje i mjerenje veličine i oblika sfernog etalona pomoću sfernog reflektora. To je veoma koristan test, jer sferni reflektori nisu oslobođeni konstrukcijskih grešaka.

Nedostaci VDI/VDE 2617 dio 10:

- standard omogućava veliku fleksibilnost pri izboru udaljenosti za testiranje, pa se javlja rizik da se zbog neodgovarajućeg izbora udaljenosti ne otkriju neke greške LT-a,
- s obzirom da su dužinski i volumetrijski testovi sastavljeni potrebno je napraviti mjerenja velikih dužina, što je zamoran i mukotrpan posao,
- testovi u dva položaja instrumenta su dati samo kao prijedlog (neobavezni su) brzog ispitivanja LT-a, iako je ovo jedan od najboljih testova. U praksi se pokazalo da je ovaj test nepogrešiv i svakako bi ga trebalo provoditi.

Standard ISO 10360-10 objedinjuje prednosti ASME B89.4.19 i VDI/VDE dio 10. Obuhvata simetrične i asimetrične položaje etalona prilikom mjerenja. ISO standardom je propisan 41 položaj etalona, čime je omogućeno otkrivanje svih poznatih izvora grešaka u konstrukciji LT-a. Također, ISO 10360-10 propisuje i povremene testove LT-a od strane korisnika, kako bi se na brz i jednostavan način verificovale performanse LT-a.

6 Zaključak

Postojanje standarda za ispitivanje geodetskih instrumenata je nužno kako bi se odredila njihova pouzdanost prije izvođenja nekih specifičnih zadataka. Svaki instrument ima propisanu tačnost mjerenih veličina, ali vremenom se ta tačnost može smanjiti. Iz tog razloga je prije upotrebe instrumenta na nekom određenom projektu, a gdje je propisana tačnost instrumenata koji se mogu koristiti, potrebno verificirati specificiranu tačnost. Kod TPS sistema, njemački standard DIN je propisivao upotrebu referentnih vrijednosti koje su određene preciznim instrumentima. Međutim, to bi značilo da korisnik mora imati ili precizni instrument, ili neko testno polje sa unaprijed određenim vrijednostima. To bi iziskivalo dodatne troškove za korisnika/vlasnika TPS-a. Iz tog razloga su propisani ISO standardi koji su jednostavni i ne zahtijevaju referente vrijednosti. U slučaju LT sistema obavezno je korištenje etalona, obzirom da se radi o preciznim instrumentima. Korisnik može kupiti na tržištu kalibrirane etalone pomoću kojih onda može vršiti ispitivanje.

7 Literatura

- Benčić, D., & Solarić, N. (2008.). *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici*. Zagreb: Školska knjiga.
- Cosarca, C., Jocea, A., & Savu, A. (2009.). Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning. *RevCAD - Journal of Geodesy and Cadastre*, 125-135. Preuzeto od <http://www.uab.ro/geocad/index.php?pagina=-&id=3&modul=rev&rev=da>
- Deumlich, F. (1982.). *Surveying Instruments*. New York: Walter de Gruyter.
- Deumlich, F., & Staiger, R. (2002.). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik* (Tom. 9.). Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary surveying: an introduction to geomatics* (Tom. XIII). New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Gottwald, R. (2008.). Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS) – A contribution to a future ISO standard. *FIG Working Weeks- Integrating Generations*. Stockholm: International Federation of Surveyors (FIG).
- Gottwald, R., Heister, H., & Staiger, R. (2009.). Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern - eine Standortbestimmung. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 88-96.
- Harding, K. (2013.). *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. Taylor & Francis. doi:10.1201/b13855
- Heister, H. (2009.). Terrestrisches Laserscanning - Prüfen und Kalibrieren. *INTERGEO - Laserscanning von Mikro und Makro, 22. septembar 2009*. Karlsruhe. Preuzeto 15. April 2015. iz <http://cms5.hinte-e-services.com/share/public/Intergeo/Archiv/2009/Heister.pdf>
- Holsen, J. (Januar 1984.). The development of survey instruments. *International Hydrographic Review*, LXI(1).
- Kogoj, D. (2006.). *Mjerenje dužina elektronskim daljinomjerima*. Sarajevo: Građevinski fakultet u Sarajevu.
- Lemmens, M. (2011.). *Geo-information, Technologies, Applications and the Environment* (Tom. 5). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Miler, M., Đapo, A., Kordić, B., & Medved, I. (2007.). Terestrički laserski skeneri. *Ekscentar*, 35-38.
- Mulić, M., Vrce, E., Omičević, D., & Đonlagić, E. (Decembar 2015). Geodezija od Mesopotamije do globalnog geodetskog opažackog sistema. *Geodetski glasnik*, 49(46), 132-168.
- Neitzel, F., Gordon, B., & Wujanz, D. (2014.). Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). *DVW-Merkblatt 7-2014*. Preuzeto 15. April 2017. iz <http://www.dvw.de/dvw-iso/17364/verfahren-zur-standardisierten-berpr-fung-terrestrischen-laserscannern-tls>

- Pejić, M. (2013.). *Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja - doktorska disertacija*. Beograd: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet.
- Phillips, D. S. (2007.). *Laser Trackers: Testing and Standards. Manufacturing & Measurement Conference & Workshop*. Clearwater Beach, FL. Preuzeto 22.. April 2017. iz CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA: <https://www.nist.gov/publications/laser-trackers-testing-and-standards>
- Rietdorf, A. (2005.). *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Berlin: Doktorska disertacija.
- Rüeger, J. M. (2010.). *Electronic Surveying Instruments*. Sydney, Australia: University of New South Wales-School of Surveying and Spatial Information Systems.
- Rüeger, J. M. (Juli 2013.). 75 Years of Change in Survey Technology. *Survey Review*, 38(300). doi:10.1179/sre.2006.38.300.459
- Sotoodeh, S. (2006.). Outlier detection in laser scanner point clouds. *Image Engineering and Vision Metrology*. Dresden: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Steiger, R. (2003.). *Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications. 2 FIG Regional Conference*. Marrakech: FIG. Preuzeto 23. Februar 2017. iz https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/morocco/proceedings/TS12/TS12_3_staiger.pdf
- Tuno, N., & Kogoj, D. (Decembar 2011.). Prvi optički teodoliti. *Geodetski glasnik*, 45(41), 42-51.
- Tüxen, H. (2. Septembar 2008.). *Ideas for field procedure to test Terrestrial Laser Scanners (TLS)*. Preuzeto 19. April 2017. iz Offenes Forum Terrestrisches Laserscanning: http://www.laserscanning.org/Sitzung1/PDF/2008-09-02Tuexen-Proposal-for-field-procedure-to-test-TLS_5.pdf
- URL1. (bez datuma). Preuzeto 22. Septembar 2016. iz [gslandsurveying.com](http://gslandsurveying.com/history-of-surveying): <http://gslandsurveying.com/history-of-surveying>
- URL2. (bez datuma). Preuzeto 31. Oktobar 2016. iz Smithsonian National Museum of American History: <http://amhistory.si.edu/surveying/enlarge.cfm?recordnumber=747813>
- URL3. (bez datuma). Preuzeto 31. Oktobar 2016. iz deHilster: http://www.dehilster.info/geodetic_instruments/1924_carl_zeiss_jena_th1_theodolite.php
- URL4. (bez datuma). Preuzeto 07. Novembar 2016. iz Geodätisches Institut Hannover: <https://www.gih.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/instrumente/theodolite.pdf>
- Valh, M. M., Marjetič, A., Ježovnik, V., & Kogoj, D. (2008.). Avtomatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov. *Geodetski vestnik*, 52(3), 487-499.
- Van Genechten, B. (2008.). *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications*. (Q. Santana, J. L. Lerma, E. Heine, & B. V. Genechten, Ur.)

Valencia: Universidad Politecnica de Valencia Editorial. Preuzeto 24.. Februara 2017. iz
<https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/201130>

Contents

1	Preface	7
2	TPS masurement systems	8
2.1	History of development of electrooptical tachimeters.....	8
2.1.1	Development of mechanical and optical theodolites	8
2.1.2	Development of electronic theodolites	9
2.1.3	Development of distance meters	11
2.1.4	Development of electronic tachimeters.....	11
2.2	Principle of the TPS system operation.....	12
2.3	TPS precision testing with standardized procedures.....	18
2.3.1	ISO 17123-3: Field procedures for theodolite precision testing.....	18
2.3.1.1	Simplified and full test ISO 17123-3.....	19
2.3.1.2	Computation – simplified test ISO 17123-3.....	20
2.3.1.3	Computation – full test ISO 17123-3.....	20
2.3.1.4	Vertical angle measurement precision testing according to ISO 17123-3	22
2.3.2	EDM precision testing according to ISO 17123-4.....	24
2.3.2.1	Simplified procedure ISO 17123-4	25
2.3.2.2	Full procedure ISO 17123-4	26
2.3.3	ISO 17123-5: Field procedure for total station precision testing	31
2.3.3.1	Simplified procedure ISO 17123-5	31
2.3.3.2	Full procedure ISO 17123-5	33
3	TLS measurement systems.....	39
3.1	Principle of work of TLS system.....	39
3.2	Errors of TLS measurements	41
3.2.1	Instruemnt errors	41
3.2.1.1	The scope of the laser beam.....	41
3.2.1.2	Efect of the boundaries between objects.....	41
3.2.1.3	Distance measurement errors	41
3.2.1.4	Angle measurement errors	42
3.2.1.5	TLS main axis errors	42
3.2.2	Errors related to the shape and properties of the scanned object.....	44
3.2.3	Errors caused by the scanning environment.....	44
3.2.4	Metodological errors	44
3.3	TLS calibration procedure	44
3.3.1	TLS calibration using standardized procedures	45

3.3.1.1	Simplified TLS calibration procedure	45
3.3.1.2	Full TLS calibration procedure	48
3.3.2	Acceptable deviation $U\Delta$	53
3.3.2.1	Uncertainty $U\Delta$ difference in length	54
4	Laser tracker	55
4.1	Principle of work of laser tracker	55
4.2	Error sources of laser tracker	58
4.3	Laser tracker calibration procedure	58
4.3.1	Laser tracker testing according to ISO 10360-10	59
4.3.2	Laser tracker testing according to ASME B89.4.19	69
4.3.2.1	Testing precision of distance measurement according to ASME B89.4.19	69
4.3.2.2	Testing accuracy of distance meter according to ASME B89.4.19	73
4.3.2.3	Establishing a base for LT distance meter testing	76
4.3.3	Laser tracker testing according to VDI/VDE 2617-10	77
5	Comparison of calibration procedures of TPS, TLS and laser trackers	79
6	Conclusion	82
7	Literature	83