

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET



Marko M. Pejić

TERESTRIČKO LASERSKO SKENIRANJE U INŽENJERSTVU

Beograd, 2022

Marko M. Pejić

TERESTRIČKO LASERSKO SKENIRANJE U INŽENJERSTVU

Recenzenti

Dr Branko Božić

Dr Željko Cvijetinović

Izdavači

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Akademska misao, Beograd

Štampa

Planeta print, Beograd

Tiraž

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-932-7

Mesto i godina izdanja: Beograd, 2022.

Predgovor

Udžbenik je namenjen studentima akademskih studija geodezije i geoinformatike kao osnovna literatura za predmet *Terestričko lasersko skeniranje u inženjerstvu* i kao dodatna za predmet *Modeliranje objekata u 3D prostoru*. Mogu ga koristiti i studenti drugih fakulteta i ostala zainteresovana stručna javnost.

Udžbenik je rezultat dugogodišnjeg naučnog i stručnog iskustva autora u oblasti geodetskog inženjerstva. Većina materijala potiče iz doktorske disertacije koju je autor odbranio 2013. godine na temu: *Tačnost modeliranja objekata tehnologijom terestričkog laserskog skeniranja*. Tokom 2015. godine tekst se prvi put pojavio u formi skripte čiji je osnovni zadatak bio da obezbedi osnovu za učenje studentima koji su pohađali tada novoformirane izborne predmete na Građevinskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu iz ove oblasti. Time je u velikoj meri prevaziđen problem nedostatka literature, posebno na srpskom jeziku, obzirom da je terestričko lasersko skeniranje relativno mlada metoda u geodeziji.

Posebna zahvalnost pripada recenzentima udžbenika prof. dr Branku Božiću i v. prof. dr Željku Cvijetinoviću na detaljnom pregledu materijala i pružanju korisnih sugestija.

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

Udžbenik je podeljen u 8 poglavlja, uključujući uvodno i zaključno poglavlje. Poglavlja od 2 do 6, pored opštih teorijskih razmatranja, sadrže i najvažnije rezultate i zaključke istraživanja relevantnih autora.

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

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

i nedostaci direktnog i indirektnog georeferenciranja oblaka tačaka su takođe detaljno razmatrani.

Poglavlje 4 tretira izvore grešaka sistema TLS. Obzirom na kompleksnost elektromehaničkog sklopa skenera i složenost fizičkih zakonitosti prostiranja i refleksije laserskog zraka, razmatranja ovih fenomena su data u generalnom maniru, bez detaljne analize svake komponente sistema, ponaosob. Uspostavljena je osnovna klasifikacija izvora grešaka. Kao instrumentalne greške, posebno su analizirane greške merenja rastojanja (preciznost laserskog daljinomera, adicione i multiplikaciona greška, uticaj otiska laserskog snopa na efekat izmeđuanih piksela, itd.). Greške rezultata merenja horizontalnih i vertikalnih pravaca su razmatrane preko njihove deklarirane instrumentalne preciznosti, njihove adicione i multiplikacione komponente i uticaja otiska laserskog zraka na nesigurnost rezultata merenja pravca. Posebno su razmatrani i ostali instrumentalni uticaji, i to: greške sinhronizacije senzora, greške položaja glavnih osa, ekscentriciteti i efekti klacjenja TLS prilikom skeniranja. Greške usled okoline prostiranja zraka su tretirane sa stanovišta atmosferskih uticaja, uticaja vremenskih prilika, iluminacije i nestabilnosti TLS usled delovanja spoljašnjih uticaja. Greške koje potiču od objekta skeniranja su svrstane i objašnjene preko fenomena reflektivnosti materijala. Analizirani su zajednički uticaji boje površi i talasne dužine lasera; zatim uticaj hrapavosti, vlažnosti, temperature površi i upadnog ugla laserskog zraka na intenzitet povratnog signala, odnosno na nesigurnost rezultata merenja rastojanja. Greške metodološkog pristupa obrade podataka, odnosno greške registracije i georeferenciranja su detaljno predstavljene kroz stohastičke modele MNK transformacije koordinata iz skenerskog koordinatnog sistema u koordinatni sistem kontrolne geodetske mreže objekta. Posebno je dat stohastički model indirektnog georeferenciranja u jednom i u dva koraka. Takođe, definisan je prošireni model grešaka direktnog georeferenciranja korišćenjem procedure poznate stanice i orijentacije i procedure presecanja nazad.

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

Poglavlje 6 predstavlja metode 3D modeliranja oblaka tačaka. Ovde su razmatrani isključivo 3D modeli objekta i ukazano je na njihove prednosti u odnosu na 2D i kvazi 3D modele koji se tradicionalno koriste u geodeziji i srodnim naukama. Predstavljene su osnove modeliranja površi na osnovu funkcionalnih zavisnosti i MNK uklapanja prostornih primitiva, a date su i osnove prostorne triangulacije i zapreminskih tehnika modeliranja ograničenog skupa 3D tačaka.

Eksperimentalna istraživanja su prikazana u poglavlju 7 koje se sastoji iz dve celine. U ovom poglavlju predstavljena su eksperimentalna istraživanja mogućnosti tehnologije TLS sa aspekta njene primene u inženjerskim oblastima.

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

Potpoglavlje 7.2 obrađuje metodologiju projektovanja i optimizacije eksperimenta TLS i obrade podataka skeniranja specifičnog inženjerskog objekta, kojeg generalno odlikuju nepovoljni uslovi za ostvarivanje visoke tačnosti geodetskog eksperimenta. U skladu sa dominantnim izvorima grešaka TLS, predstavljena je metodologija optimizovanja parametara skeniranja i kontrolne geodetske mreže u tunelima. Takođe je predložena metodologija georeferenciranja podataka skeniranja koja omogućuje postizanje visoke apsolutne tačnosti modela objekta, i rešava poznati problem velike geometrijske distorzije globalne registracije prilikom skeniranja linijskih objekata. Test objekat predstavlja 12 tunela na pruži Nikšić - Podgorica, ukupne dužine 3.5 km.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	III
1 UVOD	1
2 OSNOVE TEHNOLOGIJE TERESTRIČKOG LASERSKOG SKENIRANJA OBJEKATA U GEODETSKOM INŽENJERSTVU	5
2.1 Mesto TLS metode u geodetskom inženjerstvu	6
2.1.1 Metode merenja u geodetskom inženjerstvu.....	6
2.1.2 Metoda TLS u geodetskom inženjerstvu.....	7
2.2 Osnovni principi laserskog određivanja rastojanja	9
2.2.1 Elektromagnetni talasi.....	10
2.2.2 Laser.....	12
2.2.2.1 <i>Bezbednost laserskog zraka</i>	13
2.2.3 Impulsna “time of flight” merenja.....	15
2.2.4 Fazne metode laserskog merenja.....	17
2.2.4.1 <i>AMCW tehnika određivanja rastojanja</i>	18
2.2.4.2 <i>FMCW tehnika određivanja rastojanja</i>	19
2.2.5 Kombinacija impulsnih i faznih merenja.....	19
2.3 Sistem za skretanje laserskog snopa i merenje vrednosti pravca	20
2.3.1 Uređaj za skretanje laserskog snopa.....	20
2.3.2 Sistem za merenje vrednosti pravca.....	21
3 MATEMATIČKI MODEL SKENIRANJA I MODELI REGISTRACIJE I GEOREFERENCIRANJA	23
3.1 Osnovne matematičke relacije TLS opažanja	23
3.2 Registracija i georeferenciranje oblaka tačaka	24
3.2.1 Funkcionalni model registracije i georeferenciranja.....	25
3.2.2 Metode registracije podataka skeniranja.....	29

3.2.2.1	<i>Registracija tipskim signalima</i>	29
3.2.2.2	<i>Registracija po morfološkim detaljima</i>	31
3.2.2.3	<i>Registracija najboljim uklapanjem površi</i>	32
3.2.2.4	<i>Registracija pravilnim geometrijskim figurama</i>	34
3.2.2.5	<i>Kombinacija metoda</i>	35
3.2.3	Metode georeferenciranja podataka skeniranja	35
3.2.3.1	<i>Direktna metoda</i>	35
3.2.3.2	<i>Indirektna metoda</i>	36
3.2.3.3	<i>Prednosti i nedostaci direktne i indirektno metode georeferenciranja</i>	39
4	IZVORI GREŠAKA TLS	41
4.1	Instrumentalne greške	43
4.1.1	Greške merenja rastojanja	44
4.1.1.1	<i>Preciznost laserskog daljinomera</i>	44
4.1.1.2	<i>Adiciona i multiplikaciona greška laserskog daljinomera TLS</i>	45
4.1.1.3	<i>Uticao otiska laserskog snopa na nesigurnost rezultata merenja rastojanja - efekat „izmešanih piksela“</i>	46
4.1.2	Greške merenja vrednosti horizontalnog i vertikalnog pravca	48
4.1.2.1	<i>Preciznost merenja pravaca</i>	48
4.1.2.2	<i>Adiciona i multiplikaciona greška u rezultatima merenja pravaca</i>	49
4.1.2.3	<i>Greška merenja vrednosti pravaca usled uticaja obima laserskog snopa</i>	49
4.1.3	Greške sinhronizacije senzora	50
4.1.4	Greške glavnih osa TLS	50
4.1.4.1	<i>Definicija glavnih osa TLS</i>	51
4.1.4.2	<i>Karakteristične greške osa TLS i ekscentriciteti</i>	52
4.1.4.3	<i>Efekat klaćenja osa TLS</i>	53
4.2	Greške koje potiču od uticaja sredine	54
4.2.1	Atmosferski uticaji	54
4.2.2	Uticaji vremenskih prilika	55

4.2.3	Uticaj iluminacije	56
4.2.4	Uticaj vibracija i nestabilnosti TLS.....	56
4.3	Greške koje potiču od karakteristika objekta skeniranja	57
4.3.1	Reflektivnost površi objekta.....	57
4.3.1.1	<i>Boja površi i talasna dužina lasera.....</i>	<i>58</i>
4.3.1.2	<i>Hrapavost površi.....</i>	<i>59</i>
4.3.1.3	<i>Temperatura i vlažnost površi.....</i>	<i>60</i>
4.3.2	Upadni ugao laserskog zraka.....	60
4.4	Greške registracije i georeferenciranja.....	61
4.4.1	Greške indirektnih metode georeferenciranja.....	62
4.4.1.1	<i>Greške indirektnog georeferenciranja u dva koraka.....</i>	<i>63</i>
4.4.1.2	<i>Greške indirektnog georeferenciranja u jednom koraku.....</i>	<i>65</i>
4.4.1.3	<i>Mogućnosti unapređenja preciznosti indirektnog georeferenciranja</i>	<i>66</i>
4.4.2	Greške direktnih metode georeferenciranja.....	66
4.4.2.1	<i>Greške procedure poznate stanice i orijentacije TLS.....</i>	<i>67</i>
4.4.2.2	<i>Greške procedure presecanja nazad</i>	<i>71</i>
5	MODELI SISTEMATSKIH GREŠAKA I KALIBRACIJA TLS.....	73
5.1	Generalni modeli sistematskih grešaka TLS i kalibracija sistema	73
5.1.1	Modeli sistematskih uticaja izvornih opažanja TLS	74
5.1.1.1	<i>Korekcija rastojanja.....</i>	<i>74</i>
5.1.1.2	<i>Korekcija horizontalnog ugla.....</i>	<i>76</i>
5.1.1.3	<i>Korekcija vertikalnog ugla.....</i>	<i>77</i>
5.1.2	Kalibracija sistema	79
5.2	Kalibracija komponenti TLS	82
6	3D MODELIRANJE POVRŠI NA OSNOVU OBLAKA TAČAKA.....	83
6.1	MNK modeli uklapanja linija i površi.....	85
6.1.1	Matematički oblici linija i površi	85
6.1.2	Algebarska i geometrijska mera rastojanja	86

6.1.3	MNK uklapanje osnovnih geometrijskih primitiva	87
6.1.3.1	<i>MNK uklapanje ravni</i>	88
6.1.3.2	<i>MNK uklapanje sfere</i>	89
6.1.3.3	<i>MNK uklapanje cilindra</i>	90
6.1.4	B-rep i CSG modeli	91
6.2	3D triangulacija i zapreminske tehnike modeliranja oblaka tačaka	92
7	EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	94
7.1	Laboratorijsko ispitivanje tačnosti TLS	94
7.1.1	Prethodni rezultati	95
7.1.2	Metodologija ispitivanja TLS u laboratorijskim uslovima	96
7.1.2.1	<i>Test poligon i konfiguracija mreže</i>	96
7.1.2.2	<i>Statistički ocenjivači i analiza tačnosti podataka skeniranja</i>	98
7.1.3	Rezultati i diskusija laboratorijskog ispitivanja tačnosti skenera	100
7.1.3.1	<i>Kontrolna mreža skenerskih signala</i>	100
7.1.3.2	<i>Rezultati skeniranja i analiza tačnosti</i>	101
	Preciznost određivanja centra markice	102
	Transformacija rezultata skeniranja, ocena i analiza grešaka	102
	Uticaj nagiba i doprinos grešci centrisanja TLS	105
	Analiza 3D dužina između skenerskih markica	105
	Sferna statistika vektora grešaka	106
7.2	Projektovanje i realizacija skeniranja inženjerskog objekta	109
7.2.1	Širi kontekst skeniranja tunela i prethodni radovi	109
7.2.2	Metodologija projektovanja skeniranja	111
7.2.2.1	<i>Optimizacija parametara skeniranja</i>	111
	Faktor gustine tačaka	112
	Faktor upadnog ugla laserskog zraka	113
	Definisanje lokacija stanica TLS	115
	Izbor TLS	115
7.2.2.2	<i>Registracija i georeferenciranje</i>	116
7.2.2.3	<i>Kontrolna geodetska mreža</i>	117

7.2.3	Rezultati i diskusija	118
7.2.3.1	<i>Test područje i projektni zahtevi</i>	118
7.2.3.2	<i>Optimizacija parametara skeniranja i izbor instrumenta</i>	119
7.2.3.3	<i>Projektno rešenje i realizacija kontrolne geodetske mreže i rezultati registracije i georeferenciranja</i>	120
	Optimizacija i realizacija kontrolne geodetske mreže tunela	120
	Rezultati registracije i georeferenciranja.....	124
7.2.3.4	<i>3D modeliranje oblaka tačaka tunela i finalni CAD crteži</i>	129
LITERATURA		133
PRILOZI.....		143
SPISAK SKRAĆENICA		144
SPISAK SLIKA.....		146
SPISAK TABELA.....		151

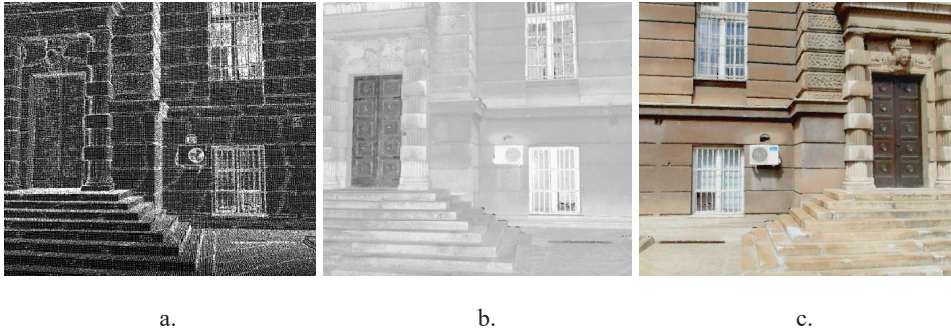
1 Uvod

Unapređenjem funkcionalnih karakteristika laserskih skenera i razvojem odgovarajućih softverskih algoritama, stvorili su se osnovni preduслови da se u okviru jednog zaokruženog procesa merenja i obrade podataka zadovolje dva osnovna zahteva kvaliteta. Prvi zahtev se odnosi na pojedinačni podatak iz uzorka merenja, koji u ovom slučaju predstavlja položajnu 3D tačnost pojedinačne tačke iz uzorka merenja koji se najčešće zove oblakom tačaka. Drugi zahtev se odnosi na mogućnost interpretacije objekta snimanja kao celine. Najčešće je vezan za prostornu rezoluciju oblaka tačaka. U svetlu tehnologije terestričkog laserskog skeniranja (TLS), oba zahteva su u velikoj meri zadovoljena, pa možemo govoriti o značajnom unapređenju ukupnog kvaliteta podataka u odnosu na klasične metode geodetskog opažanja.

Razvoju funkcionalne tehnologije TLS prethodila je pojava LIDAR-a ili LADAR-a (*Light Detecting And Ranging* ili *LAser Detection And Ranging*) sistema sedamdesetih godina dvadesetog veka. LIDAR je korišćen u oblastima daljinske detekcije Zemlje, a noseća platforma je uglavnom bila avion ili satelit, pa se danas LIDAR uglavnom terminološki vezuje za te sisteme. Tehnološki razlozi, odnosno teškoće postizanja centimetarske tačnosti, čak i na manjim rastojanjima, uslovile su kašnjenje tehnologije TLS od tridesetak godina. Devedesetih godina prethodnog veka pojavu terestričkog LIDAR-a, odnosno TLS, omogućio je napredak u tehnologiji izrade laserskih mikročipova i proizvodnji optičkih elemenata, razvoj mikro elektro-mehaničkih sistema, unapređenje performansi računara i razvoj specijalnih algoritama za obradu podataka skeniranja. Godine primene i razvoja TLS karakteriše permanentno usavršavanje u pogledu poboljšanja performansi skeniranja, tačnosti i pouzdanosti podataka, kao i dimenzija, težine i cene TLS. Sa druge strane, može se reći da razvoj softvera, odnosno posebnih algoritama za obradu podataka skeniranja u izvesnoj meri zaostaje za napretkom TLS i računarskog hardvera.

Na osnovu terestričkog laserskog skeniranja posredno se određuju geometrijske karakteristike objekta. Na osnovu specifičnih osobina objekta koji reflektuje svetlosnu energiju i usled visoke prostorne rezolucije skeniranja moguće je utvrditi dodatne karakteristike objekta. TLS uređaji vrše merenja sa određenom mernom nesigurnošću, a zapis je trodimenzionalni (3D) podatak koji se naziva oblak tačaka (Slika 1-1a.). Oblaku tačaka se može pridružiti dodatni atribut u vidu intenziteta povratnog zračenja za svaku tačku (Slika 1-1b.), koji zavisi od stepena reflektivnosti objekta i deo je sistema laserskog merenja. U praksi je čest slučaj da se svakoj skeniranoj tački pridružuje RGB (*Red Green Blue*) vrednost, na osnovu integrisanog CCD (*Charged Coupled Device*) senzora i odgovarajuće optike, koja je sastavni deo većine modela TLS, što pored oblika i dimenzija doprinosi stvaranju realnog modela objekta i po formi (Slika 1-1c.).

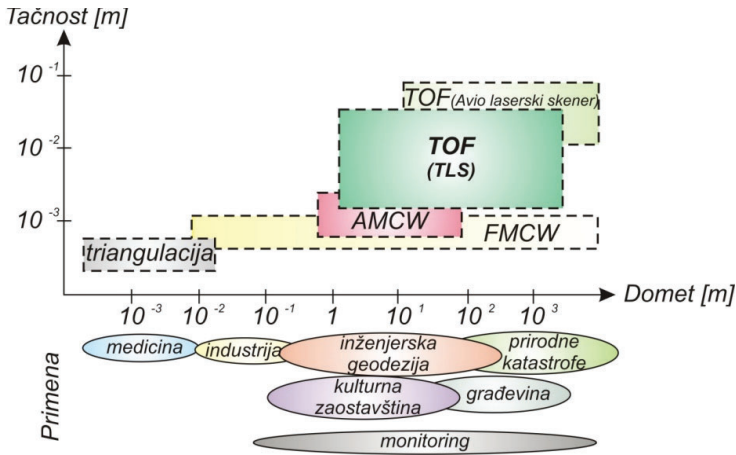
Za savremeni TLS se ne može reći da je automatska totalna stanica niti digitalna kamera. I pored dodirnih tačaka sa postojećim mernim sistemima u geodeziji, tehnologija TLS se izdvaja kao posebna klasa instrumenta sa sopstvenom metodologijom merenja i obrade podataka (detaljnije u poglavlju 2.1).



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

Dva osnovna sistema koja čine TLS su laserski daljinomer i uređaj za skretanje laserskog snopa (*beam deflection unit*). Laser obezbeđuje moduliranu informaciju potrebnu za određivanje rastojanja od emitera do objekta, koja se određuje na različite načine. Laseri se razlikuju po talasnoj dužini, divergenciji snopa, i snazi koja je ograničena do veličine koja u najvećem broju slučajeva ne oštećuje ljudsko oko. Skretanje laserskog snopa je neophodno da bi se postiglo kontinualno merenje (skeniranje) objekta, a najčešće se ostvaruje upotrebom oscilirajućih ili rotirajućih ogledala. Zahvaljujući toj činjenici kod TLS uređaja je nemoguće ostvariti viziranje pojedinačne tačke. Takođe, prostorna rezolucija skeniranja je direktno uslovljena uglovnom rezolucijom, odnosno veličinom skretanja laserskog snopa.

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



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

Kada se govori o tehnologiji TLS, važno je reći da se pod ovim terminom mogu podrazumevati i TLS koji nisu stacionarni, već su postavljeni na pokretne platforme. Obzirom da se instrument u toku merenja kreće, slično kao i kod skeniranja iz vazduha, sistem mora posedovati i dodatne uređaje poput GNSS senzora, inercijalnih sistema i inklinometara, na osnovu kojih se u realnom vremenu definišu pozicije i nagibi instrumenta. Međutim, zbog činjenice da se instrument nalazi na nestabilnoj platformi, i pored upotrebe kompleksnih senzora, kvalitet podataka skeniranja ovim instrumentima u vidu položajne tačnosti je na nižem nivou. Ovi instrumenti su uglavnom GIS orijentisani, ili se koriste u projektima gde položajna tačnost podataka nije osnovni prioritet, pa stoga nisu dalje razmatrani.

U inženjerskoj geodeziji se pretežno koriste stacionarni TOF i AMCW skeneri. Na tržištu je dostupno više tipova skenera zavisno od željenih karakteristika. Konstrukcija i tehničko rešenje TLS je uglavnom uslovljeno sa tri željena funkcionalna parametra: preciznost, domet i brzina skeniranja.

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

Model objekta u vidu oblaka tačaka (*point cloud model*) se izdvojio u praksi i literaturi kao posebna vrsta 3D modela objekata (Arayici, 2008; Foix i dr., 2010; Hu i dr., 2008; Nebiker i dr., 2010), zahvaljujući potencijalno veoma visokoj prostornoj rezoluciji skeniranja. Primenom TLS tehnologije, uglavnom ne postoji potreba za strukturiranjem oblaka tačaka karakterističnim prelomnim linijama. Zbog toga se sve češće postavlja pitanje potrebe 3D modeliranja oblaka tačaka. Sa druge strane, postoje značajni nedostaci modela objekta u vidu oblaka tačaka. Objekat skeniranja nije predstavljen na eksplicitan način, pa to u velikoj meri ograničava analize. Takođe, prilikom skeniranja industrijskih

objekata sa mnoštvom cevi i različitih mašinskih elemenata koji se međusobno zaklanjaju, često postoje „rupe“ u podacima. 3D modeliranjem oblaka tačaka nedostatak podataka se može nadomestiti. Takođe, količina podataka se smanjuje sa nekoliko miliona tačaka na nekoliko parametara izravnavajuće površi i dobija se kontinualna forma objekta pogodna za CAD obradu i analizu.

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

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

Kompanija *Cyra Technologies*, osnovana 1993. godine u Kaliforniji, posle 5 godina razvoja pravi prvi komercijalno dostupan TLS 1998. godine pod imenom *Cyrax 2400*. Skener je imao težinu 51 kg, standardno odstupanje pojedinačne tačke (1σ) 6 mm/50 m i prosečnu brzinu skeniranja od oko 800 tačaka u sekundi. Posle prvih nekoliko godina, koje je karakterisalo uglavnom početno ispitivanje tržišta, u februaru 2001. godine *Cyra Technologies* postaje deo kompanije *Leica Geosystems*, čime počinje realna primena tehnologije TLS u geodeziji. Prvi period razvoja TLS karakteriše njegovu primenu uglavnom tamo gde nije prioritet visoka položajna tačnost, odnosno najčešće za snimanje kulturno-istorijskih spomenika, fasada objekata, i za izradu topografskih podloga. Stalna poboljšanja u vidu funkcionalnosti, brzine, dometa i preciznosti, kao i trend opadanja njihove cene omogućuju nove horizonte u geodeziji i inženjerstvu uopšte. Moderni skeneri, pored visokih performansi skeniranja, imaju mogućnost centrisanja, orijentisanja i nivelisanja oblaka tačaka, odnosno sve više preuzimaju princip rada i u njih se ugrađuju uređaji slični onim kao kod klasičnih geodetskih instrumenta. Brzine skeniranja pojedinih visokopreciznih TLS prelaze i 2 miliona tačaka u sekundi, što je činjenica koja čini skeniranje metodom kakva do sada nije bila prisutna u geodetskom inženjerstvu. Postoje slučajevi u kojima TLS tehnologija još uvek ne može da zameni visokoprecizne geodetske metode (tahimetrija, nivelman). Sa druge strane, u slučajevima specifičnih inženjerskih objekata i projektnih zahteva, TLS već postaje standard, a naročito u modeliranju i utvrđivanju geometrije objekata poput brana, tunela, cevovoda i industrijskih postrojenja.