

Primena tehnologije terestričkog laserskog skeniranja u geodeziji

MARKO PEJIĆ, Građevinski fakultet, Beograd
Univerziteta u Beogradu

Stručni rad
UDC:523.516.517

U radu se predstavlja relativno nova tehnologija terestričkog laserskog skeniranja i razmatraju njene mogućnosti u geodetskim oblastima primene. Ukratko su nabrojane komponente sistema za stacionarno lasersko skeniranje, predstavljene specifičnosti u odnosu na konvencionalne terestričke merne tehnike, prikazan matematički model skeniranja i nabrojani glavni izvori grešaka i tačnost terestričkih laserskih skenera.

Ključne reči: Terestrički laserski skener (TLS), oblak tačaka, model objekta, geodezija, tačnost

1. UVOD

Tehnologija terestričkog laserskog skeniranja je prisutna u geodeziji od ranih 90-tih godina, a nagli razvoj je ostvaren tek nakon 2000. godine. Glavna prednost ove u odnosu na konvencionalne terestričke merne tehnike je u činjenici da se za kratko vreme može prikupiti velika količina podataka, što ima za posledicu značajno smanjenje obima radova na terenu. Osim toga, objekat se diskretizuje sa velikim brojem tačaka, čijim modelovanjem je moguće dobiti vizuelno veran trodimenzionalni model.

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

- stvaranje realnog modela objekta po formi i obliku,
- visoka 3D geometrijska tačnost modela objekta.
- Prvi zahtev se odnosi na vizuelnu interpretaciju objekta snimanja i mogućnost dokumentovanja izvedenog stanja u tom smislu, dok je drugi interesantniji sa geodetskog stanovišta.

Oblasti geodetske primene stacionarne tehnologije laserskog skeniranja su u radovima gde nije prioritet ostvariti milimetarsku položajnu tačnost, odnosno za snimanje kulturno istorijskih spomenika, fasada objekata, a neretko i za izradu topografskih podloga. U poslednje vreme su prisutni pionirski radovi na ispitivanju ove tehnologije u praćenju deformacija inženjerskih struktura, gde se apriori zahteva visoka geometrijska tačnost modela objekta.

Adresa autora: Marko Pejić, Građevinski fakultet,
Beograd, Bul. Kralja Aleksandra 73
Rad primljen: 15. 01. 2010.

2. KOMPONENTE SISTEMA TLS

Sistem za stacionarno terestričko lasersko skeniranje podrazumeva sledeće komponente (slika 1):

- jedinicu za skeniranje (skener),
- kontrolnu jedinicu,
- izvor napajanja i
- stativ sa postoljem.

Najvažnija komponenta je sam skener koji se sastoji od:

- laserskog daljinomera i
- uređaja za skretanje laserskog snopa.

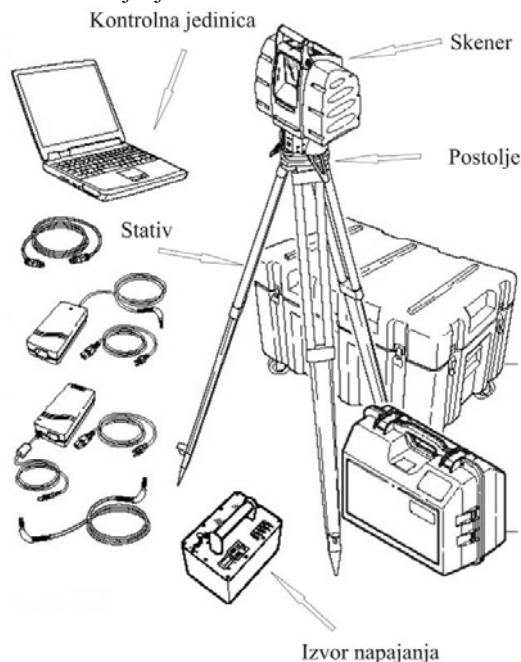
2.1. Laserski daljinomeri kod TLS

Tri osnovna tipa laserskih daljinomera se koriste kod TLS. Klasifikacija je uspostavljena na osnovu metoda određivanja rastojanja, a to mogu biti metodom triangulacije, metodom faznih razlika i impulsnom metodom.

Metod triangulacije karakteriše princip određivanja rastojanja na osnovu merenja paralaktičkog ugla sa poznate baze. Laserski zrak se emituje preko ogledala pod određenim uglom, zatim se odbija od objekta i detektuje pomoću svetlosno osetljive diode. Na osnovu date dužine baze i dva ugla, moguće je odrediti dužinu do objekta. Tačnost merenja dužine je određena odnosom veličine baze i rastojanja do objekta. Šum (merna nesigurnost) se kreće od 0.3 mm do 30 mm za dužine do objekta od 2 m do 25 m. Ovaj tip laserskih daljinomera koristi se najčešće u blisko predmetnom skeniranju.

Metod faznih razlika podrazumeva definisanje rastojanja merenjem fazne razlike mernog signala između trenutka emitovanja i prijema odbijenog signala. Fazna razlika jeste zbir registrovane veličine u okviru jedne talasne dužine i celobrojne neodređenosti (broj celih talasnih dužina se rešava na osnovu speci-

jalnih algoritama). Ovaj metod se koristi za merenje dužina do 80 m. Tačnost merenja dužine je oko 3 mm na 25 m rastojanja.



Slika 1 – Komponente sistema TLS [17]

Kod impulsnog merenja, osnovna merna veličina je vreme putovanja laserskog impulsa. Impuls se emituje sa poznatom brzinom prostiranja, reflektuje se od objekta i detektuje. Na osnovu vremenskog intervala od emitovanja do detekcije određuje se rastojanje. U odnosu na metod faznih razlika doomet je veći i kreće se od 400 m do čak 1500 m. Šum se kreće u rasponu od 2 mm do 5 mm na 50 m dužine. Ove karakteristike čine metodu impulsnog laserskog merenja najzastupljenijom u geodetskim primenama.

2.2. Uređaj za skretanje laserskog snopa

Za obezbeđenje prostornog trodimenzionalnog merenja ovaj uređaj registruje horizontalni i vertikalni ugaoni otklon elektronske ose daljinomera. Glavni deo ovog uređaja je skenirajuće ogledalo. Postoje tri osnovna tipa ogledala:

- rotirajuće ravno ogledalo
- rotirajuće prizmatično ogledalo i
- oscilatorno ogledalo.

3. SPECIFIČNOSTI TEHNOLOGIJE TLS

Princip merenja tehnologijom TLS se zasniva na permanentnoj registraciji dužine od skenera do objekta i registraciji horizontalnog i vertikalnog uglovnog pomaka (skretanja laserskog snopa). Sličan princip je primenjen kod merenja totalnom stanicom (TS) gde

su merene veličine kosa dužina, horizontalni i vertikalni ugao.

Specifičnost tehnologije TLS je da se umesto merenja pojedinačnih tačaka koje zahtevaju ponavljanje postupka viziranja i očitavanja, ovde autonomno registruje tzv. „oblak tačaka“ na osnovu definisane rezolucije skeniranja. Uz to, svaka registrovana tačka poseduje atribut reflektivnosti površine od koje se odbio laserski zrak (intenzitet povratnog zračenja). Pojedini skeneri su opremljeni i sa CCD kamerom koja omogućuje dodeljivanje svakoj skeniranoj tački vrednost registrovanog elektromagnetnog zračenja u vidljivom delu spektra, odnosno pikselnu RGB (red, green, blue) vrednost.

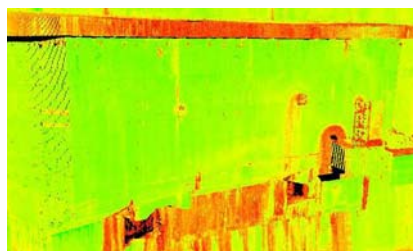
Na slici 2a ilustrovan je oblak tačaka sa odgovarajućim foto vrednostima galerije na brani HE Piva u Mratinju, a na slici 2b prikazane su dodeljene vrednosti reflektivnosti zraka na istom objektu.

Naknadno se odgovarajućim algoritmima uz postavljanje ključnih kriterijuma vrši filtriranje oblaka tačaka. Tu je osnovni zadatak otkloniti šumove koji su uglavnom u određenoj meri prisutni u uzorku prikupljenih podataka.

Poslednja faza je modelovanje objekata gde se na osnovu skupa tačaka modeluje površ koja konačno predstavlja 3D model objekta. Ovde se uglavnom ne mogu primeniti standardni softverski alati za kreiranje digitalnog modela terena, obzirom da se u najvećem broju slučajeva objekat ne može u potpunosti predstaviti projekcijom na izabranu ravan (tunel, brana, stenoviti odsek itd.). Otuda standardni algoritmi kreiranja mreže tzv. iregularnih trouglova (TIN) i raster-skog grida, ovde u velikoj meri moraju biti modifikovani.



Slika 2a – Oblak tačaka sa dodeljenim RGB vrednostima



Slika 2b – Oblak tačaka sa dodeljenim vrednostima refleksije objekta

4. MATEMATIČKI MODEL

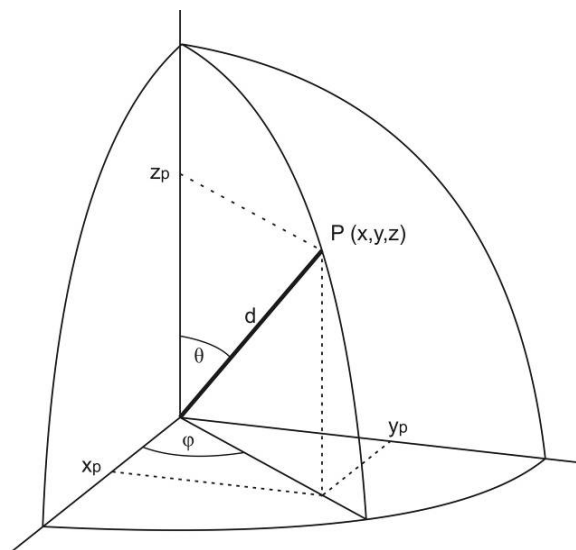
Osnovne veličine koje se registruju pri skeniranju su dužina d , ugao φ i ugao θ koje zajedno čine skup sfernih koordinata tačke na objektu. Ako se jednoj tački unutar konstrukcije skenera dodeli trodimenzionalna vrednost $X=0$, $Y=0$ i $Z=0$, onda je odnos sfernih i pravouglinih koordinata u koordinatnom sistemu skenera kao na slici 3.

Ovaj odnos može se izraziti na osnovu poznate relacije:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ d \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ d \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

odnosno obratno:

$$\begin{bmatrix} d \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arccos\left(\frac{z}{d}\right) \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$



Slika 3 – Sferne i pravouglice koordinate tačke na objektu

Često je nemoguće da se objekat u potpunosti skenira sa jedne stajne tačke, odnosno u okviru jedne scene (slika 4). U takvoj situaciji postavlja se uslov da „oblaci tačaka“ budu u jedinstvenom koordinatnom sistemu (KS).

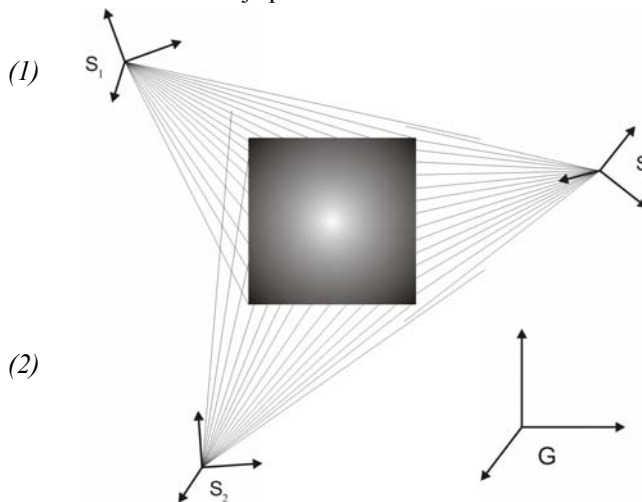
Namene za koju se vrši skeniranje opredeljuje pristup kod georeferenciranja objekta. U skladu sa slikom 4, tu su moguća tri scenarija:

Indirektan pristup. Koordinate tačaka se transformacijom indirektno prevode u:

- KS prve ili jedne od n scena ili
- KS datumske geodetske mreže G .

Direktan pristup. Koordinate svake scene se direktno u procesu merenja dobijaju u KS datumske geodetske mreže G .

Kombinacija prva dva.



Slika 4 – Odnos KS skenera (S_1 , S_2 ili S_3) i KS datumske mreže G [5]

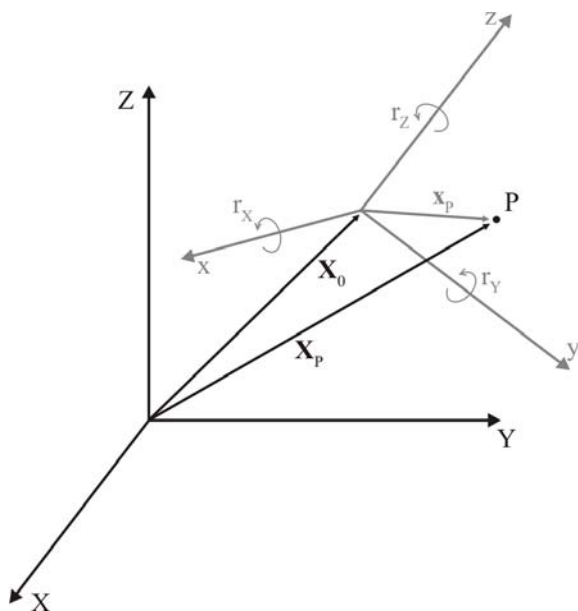
U prvom slučaju se na osnovu identičnih tačaka na objektu, naknadno koordinate tačaka transformišu u jedinstven KS objekta. Ovde takođe od namene skeniranja zavisi da li će to biti KS jedne od scena ($S_1, S_2 \dots S_n$) ili KS datumske mreže G .

Ukoliko se radi o snimanju za potrebe izrade topografskih podloga ili objekta za koji je neophodno da je pozicioniran u državnom koordinatnom sistemu, svakako je potrebno da se koordinate identičnih tačaka prethodno odrede, nekom drugom geodetskom metodom, sa datumske geodetske mreže, a da se naknadno u postupku transformacije objekat realizuje u KS tih datumskih tačaka. Ukoliko se snimanje realizuje za potrebe dokumentovanja stanja kulturno istorijskih spomenika ili generalno objekata gde nije od prevashodne važnosti njihova apsolutna pozicija, već samo prostorni odnos elemenata objekta, prihvatljivo je da KS objekta realizuje jedna od scena ($S_1, S_2 \dots S_n$).

Pristup u prvom scenariju takođe determiniše željena geometrijska tačnost modela objekta. U radovima u oblasti inženjerske geodezije, kada se zahteva milimetarska položajna tačnost, neophodno je na terenu uspostaviti lokalnu geodetsku mrežu koja se rea-

lizuje postavljanjem dovoljnog broja tipskih markica na objekat. Koordinate markica tada igraju dvostruku ulogu: u kalibraciji rezultata merenja i u transformaciji rezultata skeniranja u datumski KS.

Matematički model transformacije iz KS skenera (x, y, z) u KS objekta (X, Y, Z) svodi se na problem kao na slici 5.



Slika 5 – Transformacija koordinata skeniranih tačaka [5]

Opšti izraz transformacije koordinata podrazumeva tri rotacije $\mathbf{R}(r_x, r_y, r_z)$, tri translacije (X_0, Y_0, Z_0) i urazmeravanje m . Vektor tačke P u KS objekta ima oblik:

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}_p, \quad (3)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_p. \quad (4)$$

Vektor rotacije \mathbf{R} glasi:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

pri čemu je:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & \sin r_x \\ 0 & -\sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_y &= \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & -\sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_z &= \begin{bmatrix} \cos r_z & \sin r_z & 0 \\ -\sin r_z & \cos r_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Za konkretne koordinate n tačaka, $i = 1, 2, \dots, n$, na osnovu izraza (2) i (4) sledi:

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + m \cdot (r_{11}x_i + r_{12}y_i + r_{13}z_i), \\ Y_i &= Y_0 + m \cdot (r_{21}x_i + r_{22}y_i + r_{23}z_i), \\ Z_i &= Z_0 + m \cdot (r_{31}x_i + r_{32}y_i + r_{33}z_i). \end{aligned} \quad (7)$$

Drugi scenario se koristi najčešće. Princip je veoma jednostavan. Nema transformacije rezultata, odnosno „oblak skeniranih tačaka“ je direktno georeferenciran u toku procesa skeniranja. Da bi ovo bilo moguće, većina skenera poseduje mogućnost određivanja koordinatnog početka skenera (jedna tačka unutar skenera) na osnovu poznate stajne tačke i orijentacionog ugla, presecanja pravaca ili lučnim presekom. Ovaj pristup se koristi isključivo kada položajna tačnost modela objekta nije prioritet, odnosno tada je ona u najboljem slučaju na nivou od nekoliko centimetara.

Naravno, u praktičnim primenama su moguće kombinacije prva dva scenarija.

5. TAČNOST TLS I GLAVNI IZVORI GREŠAKA

Kada se govori o tačnosti TLS, moraju se razlikovati sledeći pojmovi:

- tačnost „sirovih“ podataka,
- tačnost obrađenih podataka, i
- tačnost 3D modela objekta.

Preciznost izmerene dužine, a naročito uglovna preciznost kod TLS je manja od preciznosti kod TS. Osnovni razlog za to su ograničenja konstrukcije servo motora, odnosno njihova visoka inertnost usled velike brzine rada. Ustvari, ovde je prisutan očigledan kompromis između količine prikupljenih podataka i položajne tačnosti pojedinačnih 3D koordinata registrovanih tačaka. Ova mana TLS se može značajno kompenzovati velikim uzorkom izmerenih tačaka, čijim se filtriranjem može dobiti tačniji model skeniranog objekta.

Izvori grešaka koji utiču na geometrijsku tačnost modela objekta su različito koncipirani, zavisno od autora.

Po [13] izvori grešaka modela objekta se dele na:

- instrumentalne,
- objektno zavisne,
- atmosfere i
- greške metode merenja.

TLS poslednje generacije, zavisno od proizvođača poseduju tačnost merenja dužine pojedinačne tačke na nivou od oko 5 mm. Tačnost registracije horizontalnog i vertikalnog otklona kreće se od 60 μ rad i više. U tabeli 1 mogu se sagledati osnovne karakteristike nekoliko komercijalnih laserskih skenera. Po prethodnoj klasifikaciji, ovako deklarirana tačnost je instrumentalne prirode, a naknadno je opterećena dodatnim uticajima od kojih će se najvažniji ukratko nabrojati.

Uticaji koji su u korelaciji sa objektom skeniranja (objektno zavisni), obuhvataju sledeće faktore [13]:

- električna i magnetna provodljivost objekta,
- boja površi,
- talasna dužina lasera,
- ugao laserskog zraka u odnosu na objekat,
- hrapavost površi objekta,
- polarizacija,
- temperatura objekta i
- vlažnost objekta.

Atmosferski uticaji su vezani za sredinu kroz koju laserski zrak prolazi i rezultiraju distorzijom i slabljenjem laserskog zraka. Mogu se svrstati u nekoliko kategorija, i to:

- skup uticaja temperature, pritiska, relativne vlažnosti i nivoa CO₂ u atmosferi,
- magla, sneg i kiša i
- drugi dominantni izvori svetlosti.

Tabela 1 - Tehničke karakteristike stacionarnih TLS poslednje generacije

	Trimble GX	Leica ScanStation C10	Leica HDS 6000
Talasna dužina lasera, nm	532	650 - 690	650 - 690
Uređaj sa skretanje laserskog snopa	Rotirajuće ogledalo + servo motor	Rotirajuće ogledalo + servo motor	Rotirajuće ogledalo + servo motor
Tačnost pojedinačne tačke:			
Pozicija, mm	12 (100 m)	6 (1 - 50 m)	10 (25 - 50 m)
Rastojanje, mm	7 (100 m)	4 (1 - 50 m)	5 (25 - 50 m)
Horiz./vert. ugao, stepeni	0.0034 / 0.0040	0.0034 / 0.0034	0.0072 / 0.0072
Tačnost modela, mm	2	2	4 (25 - 50 m)
Tačnost registrovanja tipskih markica, mm	1	2	2
Rezolucija skeniranja	Mogućnost korisničkog podešavanja		
	Maks. gustina grida 3 mm (50 m)	Maks. Horiz. / Vert. 1"	Maks. Horiz. / Vert. 1.5"
Vidno polje, horiz. / vert, stepeni	360/60	360/270	360/310

Greške metode merenja obuhvataju:

- greške indirektnog pristupa transformaciji koordinata tačaka (obuhvataju sve prethodne uticaje i dodatno greške datih veličina, datumske markere na objektu i greške modela transformacije), i
- greške direktnog pristupa transformaciji koordinata tačaka (pored navedenih izvora grešaka uzima se u obzir i tačnost određivanja pozicije skenera, tačnost orijentacionog ugla, položajna tačnost datih tačaka, tačnost centrisanja i određivanja visine instrumenta).

Pored prethodne klasifikacije, izvori grešaka se mogu razmatrati i jednostavnije. Po [12] greške se dele na:

- unutrašnje (skener) i
- spoljašnje (uslovi sredine kroz koju zrak prolazi),

Klasifikacija koja najbolje ukazuje na glavne izvore grešaka obuhvata:

- greške merenja dužine i
- uglovne greške (vertikalna i horizontalna komponenta),

U okviru ove dve kategorije sadržani su svi ostali uticaji prikazani u prethodnim klasifikacijama. Rezultiraju kao greške dužine i dva ugla, koje ustvari predstavljaju osnovne veličine koje instrument registruje tokom skeniranja.

6. ZAKLJUČAK

Pored činjenice da TLS za sada ima visoku cenu, prednosti ove tehnologije u odnosu na klasične terestričke merne tehnike u geodeziji su očigledne. Vreme-

nom će TLS biti pristupačan većem delu korisnika, a njegova upotreba sve zastupljenija. Za očekivati je da će se TLS u budućnosti dominantno koristiti za potrebe izrade topografskih podloga, snimanja objekta i nepristupačnih terena.

Takođe važno je napomenuti da primena u geodetskim radovima visoke tačnosti tek predstoji. U ovom trenutku pojedini autori ([1], [6], [7], [8], [14] i [16] i drugi) su realizovali istraživanja i dokazali da se ova tehnologija može koristiti u deformacionoj analizi inženjerskih objekata poput brana i mostova. U praksi je to zadatak koji se još uvek realizuje klasičnim metodima i instrumentima.

LITERATURA

- [1] Alba M.; Fregonese L.; Prandi F.; Scaioni M.; Valgoi P. (2006): Structural Monitoring of a large Dam by Terrestrial Laser Scanning. IAPRS Volume XXXVI, Part 5.
- [2] Balis V.; Karamitsos S.; Kotsis I.; Liapakis C.; Nikos Simpas N. (2004): 3D - Laser Scanning: Integration of Point Cloud and CCD Camera Video Data for the Production of High Resolution and Precision RGB Textured. FIG Working Week 2004, WSA 2.5.
- [3] Baltasvias E. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, 199 – 214.
- [4] Barnea S.; Filin S. (2008): Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds. ISPRS 63 19-35.
- [5] Bornaz L.; Rinaudo, F. (2004): Terrestrial laser scanner data processing. ISPRS, Commission V, WG V/4.
- [6] Eling D.; Kutterer H. (2006): Terrestrisches Laser-scanning für die Deformationsanalyse an Talsperren. Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida Nr. 1, S. 31-40.
- [7] Eling D.; Kutterer H. (2007): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung am Beispiel einer Talsperre. In: F. K. Brunner (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2007. Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 119-130.
- [8] Gordon S.; Lichti D.; Franke J.; Stewart M. (2004): Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, TS 3.2.
- [9] Höfle B.; Pfeifer N. (2007): Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. ISPRS 62 415-433.
- [10] Kersten T.; Sternberg H.; Stiemer, E. (2005): First experiences with terrestrial laser scanning for indoor cultural heritage applications using two different scanning systems. IAPRS, Vol. XXXVI, PART 5/W8.
- [11] Lichti D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. ISPRS 61 307-324.
- [12] Lichti D.; Gordon, S. (2004): Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In Proceedings of FIG Working Week. Athens, Greece, May 22 – 27
- [13] Reshetyuk Y. (2009): Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Trita-TEC-PHD, ISSN 1653-4468; 09-001, ISBN 978-91-85539-34-5.
- [14] Roberts G.; Hirst L. (2005): Deformation Monitoring and Analysis of Structures Using Laser Scanners. FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 38.2.
- [15] Staiger R. (2003): Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications. 2nd FIG Regional Conference TS 12.3.
- [16] Tsakiri M.; Lichti D.; Pfeifer N. (2006): Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. 3rd IAG / 12th FIG Symposium
- [17] www.leica-geosystems.com
- [18] www.trimble.com

SUMMARY

TERRESTRIAL LASER SCANNING TECHNOLOGY IN GEODESY

This paper represents a relatively new terrestrial laser scanning technology and discusses its potential in the geodetic applications. In short, this work describes components of stationary laser scanning system, comparison to conventional terrestrial measuring techniques, mathematical model of scanning and the main sources of errors and accuracy of laser scanner.

Key words: *terrestrial laser scanner (TLS), point cloud, objects model, geodesy, accuracy*