

Darko Golek, univ. bacc. ing. geod. et geoinf. ▶ diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: dgolek@geof.hr
 Dino Dobrinić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf. ▶ diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: ddobrinić@geof.hr
 Branko Kordić, dipl. ing. geod. ▶ Katedra za hidrografiju, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: bkordic@geof.hr



Usporedba terestričkih laserskih skenera

SUDIONICI
RADIONICE

Lucija Baričević
Dino Dobrinić
Darko Golek
Ana Mihaljević
Matko Dubravčić

SAŽETAK: Terestričko lasersko skeniranje je tehnologija 3D izmjere koja omogućava prikupljanje velikog broja točaka u kratkom vremenu. Usmjeravanjem laserske zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini te rotacijom instrumenta oko svoje osi, terestrički laserski skeneri (TLS) mjere veliki broj točaka u 3D koordinatnom sustavu. Iako je osnovni princip mjerenja poznat, ne postoji jedan univerzalni terestrički laserski skener kojim bi se mogla obaviti sva mjerenja. Zbog toga postoje podjele laserskih skenera prema načinu mjerenja udaljenosti na pulsne, fazne i triangulacijske laserske skenera, dok se prema načinu snimanja dijele na kamera skenera, panoramske i hibridne skenera. Upravo zbog raznih podjela terestričkih laserskih skenera, nije moguća direktna usporedba tehničkih specifikacija instrumenata što otežava korisnicima odabir pravog skenera za određeni posao. Budući da još ne postoji standard za usmjeravanje laserske zrake, neophodno je istražiti terestričke laserske skenera za dobivanje nezavisne procjene preciznosti instrumenta, kao i zbog razvijanja standardiziranih kalibracijskih modela i postupaka. Stoga su u članku testirana četiri terestrička laserska skenera različitih proizvođača: Topcon GLS-1500, Faro Focus 3D, Trimble GX200 i Optech ILRIS 3₀D. Instrumenti korišteni u istraživanju razlikuju se prema načinu mjerenja udaljenosti te prema načinu snimanja. Cilj praktičnog dijela bio je utvrditi pogreške u očitavanju duljine koje se javljaju uslijed pogrešnog odbijanja laserske zrake od određene vrste materijala ili neke specifične boje. Dio analize odnosi se na ispitivanje mjerne ponovljivosti instrumenata gdje je u tri serije mjerenja opažano po pet orijentacijskih točaka te su analizirana odstupanja mjerenih koordinata kod ponovljenih mjerenja.

KLJUČNE RIJEČI: terestrički laserski skeneri, TLS, ispitivanje točnosti, oblak točaka, refleksivnost

Comparison of terrestrial laser scanners

SUMMARY: Terrestrial laser scanning is a technology that allows 3D measurements large amounts of points in a short time. By directing laser beam in the horizontal and vertical plane and rotation of the instrument around its axis, terrestrial laser scanners (TLS) measure a large number of points in a 3D coordinate system. Although the basic principle of measurement is known, there is no universal terrestrial laser scanner that could perform all types of measurements. Therefore, there are classifications of terrestrial laser scanners according to the principles that are used to measure the distance to the pulse, phase and triangulation laser scanners, as well as classification of TLS according to deflection of the laser beam to camera scanners, panoramic and hybrid scanners. Just because of the various classifications of terrestrial laser scanners, it is not possible to directly compare the technical specifications of the instruments which makes it difficult for customers to choose the right scanner for specific project. Since there is no standard for directing a laser beam, it is necessary to investigate the terrestrial laser scanners to obtain independent accuracy/precision estimates and develop standardized calibration models and procedures. Thus in the article we have tested four terrestrial laser scanners from different manufactures: Topcon GLS-1500, Faro Focus 3D, Trimble GX200 and Optech ILRIS 3₀D. Instruments used in research vary according to principle of different range measurement and according to deflection of the laser beam. In our experiments we concentrated on identifying distance measurement errors which appears due to erroneous laser beam reflection from some specific material or specific colour. Inspection of measurement repeatability also took part in our research. Five control points were observed in three series in order to analyze deviations of the measured coordinates of repeated measurements.

KEYWORDS: terrestrial laser scanners, TLS, accuracy test, point cloud, reflectivity

1. UVOD

Terestričko lasersko skeniranje relativno je nova tehnologija mjerenja (pojavila se tek krajem devedesetih godina dvadesetog stoljeća) koja se pored već tradicionalnih metoda u geodeziji kao što su tahimetrija, fotogrametrija i GPS, koristi kao metoda dobivanja koordinata traženih točaka u 3D prostoru (Kersten i dr., 2007). Instrumenti koji odašilju, prema unaprijed zadanom razmaku, niz laserskih impulsa kako bi izmjerili udaljenost te horizontalni i vertikalni kut do pojedine točke prostora nazivaju se terestrički laserski skeneri (TLS). Oni služe za bezdodirno prikupljanje prostornih podataka u veoma kratkom vremenskom razdoblju te naknadnu obradu podataka za modeliranje i vizualizaciju objekata (Matijević, 2002). Izmjereni objekt prekriven je velikom količinom detaljnih točaka te prepoznatljivi dijelovi objekta, kao što su rubovi kuće i ostali detalji, nisu direktno snimljeni, već su prikupljeni u oblak točaka (*eng. point cloud*). Rezultat laserskog skeniranja je oblak točaka koji predstavlja gusti točkasti prikaz vanjske površine izmjenjenog objekta. Dakle, laserskim skeniranjem dobije se digitalna snimka objekta koja je predstavljena skupom točaka u 3D prostoru. Spajanje oblaka točaka moguće je ako je isti objekt snimljen više puta s različitim stajališnih točaka te se naknadnom obradom, tj. spajanjem identičnih točaka unutar oblaka točaka i modeliranjem, dobivaju već poznati geometrijski oblici. Na taj način omogućena su različita mjerenja i izračuni elemenata objekata (Basa i dr., 2011).

Međutim, uporaba terestričkih laserskih skenera još uvijek je relativno ograničena. Iako je proces laserskog skeniranja u potpunosti automatiziran, naknadna obrada podataka znatno je zahtjevnija, dugotrajnija i kompleksnija od obrade klasičnih terenskih mjerenja. Nadalje, druge discipline povezane s geodezijom nisu u potpunosti upoznate s metodom laserskog skeniranja. Terestrički laserski skener vrlo je efikasan instrument, ali svoj puni potencijal pokazuje u integraciji s drugim sustavima. Takva integracija omogućuje korištenje prednosti svakog od sustava koji se koriste. Primjer je integracija TLS-a i digitalne kamere. Digitalna kamera snima sliku visoke rezolucije koja se može spojiti sa snimljenim oblakom točaka, čime se osim same geometrije objekta, dobiva i njegova tekstura (URL-11).

Specifikacije laserskih skenera, dobivene od njihovih proizvođača, odnose se na laboratorijske parametre te u velikoj mjeri ovise o uvjetima na terenu koji su dosta složeniji te na koje se ne može utjecati. U ranijim testovima dokazano je (Boehler i dr., 2003) da preciznost varira od instrumenta do instrumenta, na bazi njihove individualne kalibracije. Zbog toga su provedena istraživanja u kojima su ispitivani standardni parametri laserskih skenera (preciznost, gustoća, vrijeme) te neke značajke iz »realnih« uvjeta mjerenja koji ovise o odabiru laserskog skenera (preciznost mjerenja na različitim udaljenostima, vrijeme potrebno za prikupljanje detaljnih točaka, intenzitet povratnog signala odbijenog od različitog materijala objekta snimanja, sposobnost modeliranja jednostavnog ili složenog geometrijskog oblika objekta) (Adami i dr., 2007).

Stoga će se u nastavku dati osvrt na podjelu laserskih skenera i njihov princip rada te će se ukratko opisati provedeno ispitivanje laserskih skenera.

2. PRINCIP RADA TERESTRIČKIH LASERSKIH SKENERA

Princip rada laserskih skenera temelji se na određivanju polarnih koordinata detaljnih točaka, odnosno mjerenju horizontalnog i vertikalnog kuta te udaljenosti do pojedine točke prostora. Iz niza odaslanih laserskih impulsa instrument registrira ukupni pomak sustava u odnosu na njegov početni položaj te mjeri duljinu do objekta. Za usmjeravanje laserske zrake koristi se rotirajuće zrcalo (prizma) koje omogućava njen otklon u vertikalnom smjeru rotacijom oko horizontalne osi, dok se otklon u horizontalnom smjeru

postizuje rotacijom TLS-a oko vertikalne osi (Matijević, 2002).

Duljina do objekta određuje se na različite načine koji se međusobno razlikuju u točnosti jer su prilagođeni za mjerenja na određene udaljenosti. Tako postoje skeneri koji su namijenjeni za snimanje zatvorenih prostora i na manje udaljenosti (do 100 m), zatim skeneri koji su pogodniji za uporabu na terenu i na većim udaljenostima (preko 100 m) te skeneri koji se koriste na udaljenostima do nekoliko metara, uz visoku točnost snimanja (Froehlich, 2004). Odabir laserskog skenera ovisi o konkretnom zadatku za koji se koristi. Kako bi se postiglo trodimenzionalno skeniranje objekta, potrebno je, uz mjerenje duljine, dovoljno točno poznavati i horizontalni i vertikalni kut prema detaljnim točkama objekta. Laserski skeneri ne rade kao klasični geodetski instrumenti, na principu direktnog mjerenja kutova prema pojedinoj točki. Takva mjerenja nisu potrebna jer su pomaci u pojedinoj ravnini (H/V) stalni i unaprijed poznati. Dakle, vrijednost kutnog pomaka u odnosu na neki ishodišni položaj dobiva se za svaku mjerenu točku zbrajanjem prethodno izvedenih, konstantnih pomaka (Matijević, 2002). Na osnovi poznatih prostornih kutova i izmjerene udaljenosti, računaju se 3D koordinate točke u koordinatnom sustavu TLS-a (konverzija iz sfernog u Kartezijev koordinatni sustav).

Dakle, objekt je snimljen u horizontalnom i vertikalnom smislu, s tisućama točaka u sekundi, ovisno o udaljenosti od objekta i rezoluciji snimanja. Pritom se rezolucija snimanja definira kao prostorna udaljenost između susjednih snimljenih točaka unutar oblaka točaka pa je s današnjim laserskim skenerima moguće dobiti točke na objektu koje su međusobno udaljene tek jedan milimetar. Rezultat takvog snimanja je gust točkasti 3D model objekta.

Pored 3D koordinata točke objekta, laserskim skeniranjem dobiva se i amplituda povratnog laserskog signala (intenzitet signala). Svaka boja reflektira lasersku zraku drugačijim intenzitetom. Tako npr., bijela mat boja daje 80-postotni povratak signala, siva mat boja 40-postotni povratak signala, dok crna mat boja daje 5-postotni povratak signala (URL-11).

Pored intenziteta signala, terestrički laserski skeneri mogu prikupiti RGB (Red Green Blue) komponentu za svaku točku koja se dobije integriranjem unutarnje ili vanjske kamere. Na temelju kalibracije i orijentacije kamere te njene pozicije u odnosu na skener, slikovni zapis kamere upotrebljava se kako bi se svakoj izmjerenoj točki dodijelila RGB vrijednost. Prema tome, svaka izmjerena točka, uz pripadajuće koordinate, sadrži i podatak o boji te intenzitetu reflektirane zrake (Đapo i dr., 2007).

Trodimenzionalno lasersko skeniranje posebno je prikladna metoda snimanja u situacijama kad je objekt snimanja teško pristupačan te je nemoguće ostvariti direktan kontakt s detaljnim točkama objekta čije je koordinate potrebno odrediti. Također, moguće je snimati područja koja zbog visoke temperature ili nepovoljne koncentracije štetnih plinova nisu pogodna za boravak ljudi u njihovoj neposrednoj blizini. Tako se primjerice, za snimanje izgrađenih prometnica (mostovi, tuneli) i tvorničkih postrojenja (toplana, rafinerija), terestrički laserski skener može koristiti bez zaustavljanja prometa ili prekidanja proizvodnog procesa (Cvjetković, 2010).

2.1. KORIŠTENI TLS PREMA NAČINU MJERENJA UDALJENOSTI

Korišteni terestrički laserski skeneri, prema tehnologiji mjerenja udaljenosti, mogu se podijeliti na (URL-11):

- pulsne skenera
- fazne skenera.
- Pulsni skeneri – pulsna mjerenja temelje se na principu mjerenja vremenskog intervala putovanja elektromagnetskoga vala prema objektu snimanja te se direktno mjeri vrijeme potrebno za njegov povratak. Laserski odašiljač emitira kratki impuls koji se dijeli na dva dijela, prvi dio odašilje se u prijamnik i pokre-

će mjerenje vremena, a drugi dio podijeljenog signala šalje se prema objektu mjerenja. Za ovu se metodu mjerenja uobičajeno koristi kratica s engleskog jezika – TOF (Time Of Flight). Ova metoda mjerenja udaljenosti danas se najčešće koristi u praksi jer jednoznačno izmjerene duljine dobivamo u kratkom vremenskom razdoblju te omogućuje mjerenja bez posebnog reflektora na cilju. Pulsnom metodom mogu se ostvariti mjerenja na veće udaljenosti što je jedan od razloga korištenja za lasersko skeniranje iz zraka (eng. Airborne Laser Scanning – ALS)

- Fazni skeneri – udaljenost se računa iz fazne razlike između primljenog i odaslano vala, pri čemu se odaslana laserska zraka modulira harmonijskim valom. Točnost mjerenja ovom metodom je 1% duljine faze te se može povećati korištenjem više valnih duljina umjesto jedne, pri čemu najdulja valna duljina definira unificiranost mjerenja, dok najkraća valna duljina definira maksimalnu točnost koju je moguće postići. Snaga kontinuirane laserske zrake je limitirana te se zbog toga ova metoda mjerenja koristi na udaljenostima do 100 m, no točnosti koje se mogu postići ovom metodom jako su visoke – u granicama od nekoliko milimetara.

2.2. LASERSKI SKENERI PREMA NAČINU SNIMANJA

Snimanje okoline pomoću terestričkih laserskih skenera zahtijeva odklon laserske zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini jer su sirovi podaci mjerenja duljine i kutovi (horizontalni i vertikalni). Ovisno o prozoru snimanja (eng. Field Of View - FOV), korišteni terestrički laserski skeneri mogu se podijeliti na (Đapo i dr., 2007):

- kamera skenera
- hibridne skenera
- panoramske skenera.
- Kamera skeneri – registriraju sve što se nalazi u trenutačnom prozoru snimanja. To se postiže pomoću dva sinkronizirana ogledala, jedno ogledalo koristi se za refleksiju laserske zrake u horizontalnoj ravnini, dok se drugo ogledalo koristi za refleksiju laserske zrake u vertikalnoj ravnini. Prednost ovog načina snimanja je što se oba ogledala mogu individualno namjestiti, prema potrebi mjerenja, čime se postiže visoka točnost pri mjerenju horizontalnih i vertikalnih kutova. Nedostatak ovog načina snimanja je uzak prozor opažanja koji je jednak prozoru kamere te iznosi otprilike $60^\circ \times 60^\circ$, što zahtijeva dugotrajnije snimanje objekata. Taj nedostatak nadoknađuje se vrlo velikim dometom koji iznosi preko 1000 m u slučajevima korištenja pulsne metode mjerenja udaljenosti.
- Hibridni skeneri – kako bismo uklonili nedostatak kamera skenera razvijeni su hibridni skeneri kojima se ogledala za refleksiju laserske zrake automatski pozicioniraju. Hibridni skeneri snimaju sve u trenutnom smjeru gledanja, dok se

cijeli instrument (ili njegov dio) rotira oko svoje vertikalne osi, čime se dobiva snimak od $360^\circ \times 60^\circ$. Ovaj se tip skenera zbog svoje svestranosti najčešće koristi u praksi.

- Panoramski skeneri – snimaju sve oko sebe, osim područja ispod samog instrumenta što nije moguće zbog njihove mehaničke izvedbe. Prikupljanje podataka izvodi se rotacijom jednog zrcala koje reflektira lasersku zraku u vertikalnome smjeru te rotacijom cijeloga instrumenta (ili njegova dijela) oko svoje vertikalne osi. Ovim se načinom snimanja u vrlo kratkome vremenu snimi veliko područje i prikupi velika količina podataka. Panoramski skeneri uobičajeno koriste faznu metodu mjerenja udaljenosti te se zbog kratkog doмета najčešće koriste u zatvorenim prostorima.

3. SPECIFIKACIJE KORIŠTENIH LASERSKIH SKENERA

Proizvođači terestričkih laserskih skenera prilažu detaljne tehničke specifikacije za svaki instrument. Kao što je u prethodnom poglavlju navedeno, danas na tržištu postoji raznovrsna ponuda laserskih skenera koji nisu univerzalni za sve primjene, već se prema navedenim podjelama i načinu obrade podataka koriste za različite projektne zadatke. Dakle, ako se traži podatak o kvaliteti samih mjerenja, koji označava točnost 3D koordinata, on je teško dostupan jer ne može biti definiran usporedbom pojedinačnih mjerenja (točaka), kao što je slučaj kod mjernih (totalnih) stanica (Kersten i dr., 2007). Stoga su u ovom radu testirana četiri laserska skenera različitih proizvođača te su međusobno uspoređeni na temelju primjera u praksi. Korišteni su skeneri (tablica 3.1): Topcon GLS-1500, Faro Focus 3D, Trimble GX200 i Optech ILRIS 3_D.

Topcon GLS-1500 je terestrički laserski skener koji koristi pulsni način mjerenja duljina te uz 90% refleksivnosti okoline u kojoj se nalazi, može snimati i do 330 m. Za potrebe ovog rada skener je korišten za puno manje udaljenosti (do 15 m), no uglavnom se koristi za snimanja velikih površina i objekata. Prema načinu snimanja spada u hibridne laserske skenera s prozorom snimanja od $360^\circ \times 70^\circ$, no na samome skeneru postoje 3 metalna držača pomoću kojih se skener može okretati u vertikalnoj ravnini za gotovo 360° , osim područja sjene ispod stativa na kojemu se nalazi (slika 3.1) (URL-13).

Brzina snimanja je 30000 točaka u sekundi, s rezolucijom mjerenja od 1 mm na 100 m i točnošću mjerenja duljina od 4 mm na 150 m. Instrumentom se može upravljati putem prijenosnog računala ili dlanovnika spojenih pomoću LAN kabela, USB-a ili WiFi-a (slika 3.2). Snimanje se može izvoditi i sa samog instrumenta, tako da se grubim nišanom te vijcima za horizontalno i vertikalno pomicanje zrcala odabere područje snimanja. Topcon GLS-1500 već na terenu omogućuje vrlo precizno izdvajanje detalja koji su predmet snimanja što smanjuje obujam naknadne obrade podataka u uredu.

Prikupljeni podaci pohranjuju se na SD karticu instrumenta ili na računalo. RGB model boja snimljenih točaka dobiven je pomoću ugrađene kamere rezolucije 2 MPx. Postoji više načina na-

Tablica 3.1. Specifikacije korištenih laserskih skenera (URL-14,URL-16,URL-17,URL-18)

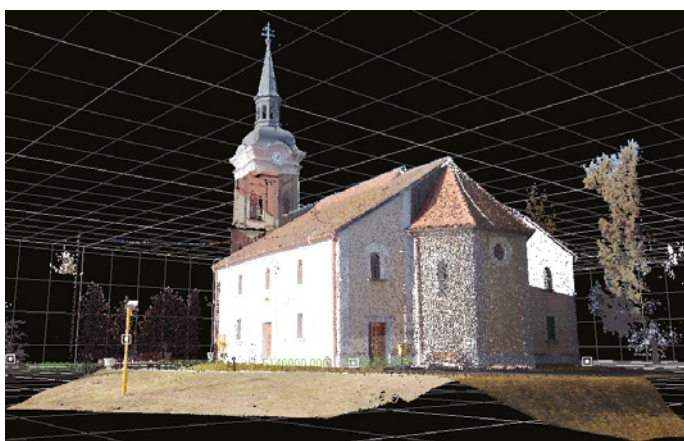
LASERSKI SKENER	TOPCON GLS - 1500	FARO FOCUS 3D	TRIMBLE GX200	OPTECH ILRIS 36D
Mjerenje duljina	Pulsno	Fazno	Pulsno	Pulsno
Prozor snimanja	$360^\circ \times 70^\circ$	$360^\circ \times 305^\circ$	$360^\circ \times 60^\circ$	$360^\circ \times 220^\circ$
Brzina skeniranja [točaka/s]	30 000	do 976 000	do 5000	2500
Kutna rezolucija	Horizontalna	0,006°	0,009°	0,0017°
	Vertikalna	0,006°	0,009°	0,0017°
Min/max duljina mjerenja [m]	1 - 330	0,6 - 120	1 - 300	3 - 1700
Točnost mjerenja duljina	4 mm na 150 m	2 mm na 25 m	1,5 mm na 50 m	4 mm na 100 m
Težina [kg]	17,6	5	13,6	13
CCD kamera	Da (interna)	Da (interna)	Da (interna)	Da (interna)



Slika 3.1. Prikaz držača za rotaciju skenera u vertikalnoj ravnini



Slika 3.2. Topcon GLS-1500 povezan pomoću USB-a na računalo



Slika 3.3. Oblak točaka crkve Svih svetih

pajanja instrumenta: pomoću kabela, vanjskog izvora energije (akumulator) ili četiri punjive baterije (po dvije sa svake strane instrumenta) koje su bile korištene pri mjerenjima te su se iskazale velikom izdržljivošću. Robustan izgledom, ovaj instrument pri snimanju na maksimalnoj rezoluciji daje veoma pouzdane podatke u kratkome vremenu te je idealan za snimanja velikih površina i nepristupačnih objekata s većim udaljenosti, pri čemu se instrument zbog svoje konstrukcijske izvedbe može zakretati i u vertikalnoj ravnini što olakšava snimanje cjelokupnog objekta (slika 3.3).

Faro Focus 3D (slika 3.4) je dimenzijama najmanji te najlakši laserski skener trenutno dostupan na tržištu koji koristi faznu metodu mjerenja duljina te može prikupiti i do 976000 točaka u sekundi. Zbog toga mu je domet mjerenja ograničen na 120 m na 90% refleksivnosti okoline te se najčešće koristi u zatvorenim prostorima i za objekte koji se protežu na manjem području. Točnost mjerenja duljina je 2 mm na 25 m.

Faro Focus 3D ima integriranu kameru s rezolucijom od 70 MPx koja omogućava rezoluciju mjerenja od 1 mm na 100 m. Skenerom se upravlja pomoću ekrana osjetljivog na dodir ili uređaja (prijenosno računalo, dlanovnik, smartphone) koji se bežično, preko IP adrese, povezuju sa samim skenerom (slika 3.5). Terenski dio posla može se obaviti u veoma kratkom vremenu te se naknadnom

obradom podataka u uredu od panoramskog prikaza veličine 360° x 305° obrade dijelovi potrebni za konkretni projektni zadatak.

Svi prikupljeni podaci spremaju se na SD karticu veličine 32 GB ili na uređaje s kojima je skener bežično povezan. Faro Focus 3D ima dvoosni kompenzator čime je onemogućeno naginjanje i usmjeravanje skenera u različitim smjerovima. Ovaj skener odlikuje se povoljnijom cijenom s obzirom na ostale skenera te je zbog panoramskog načina snimanja, faznog mjerenja duljina i svoje tehničke izvedbe značajno brži. Najširu primjenu nalazi u snimanju interijera, industrijskih postrojenja i objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini instrumenta (do 30 m) (slika 3.6).

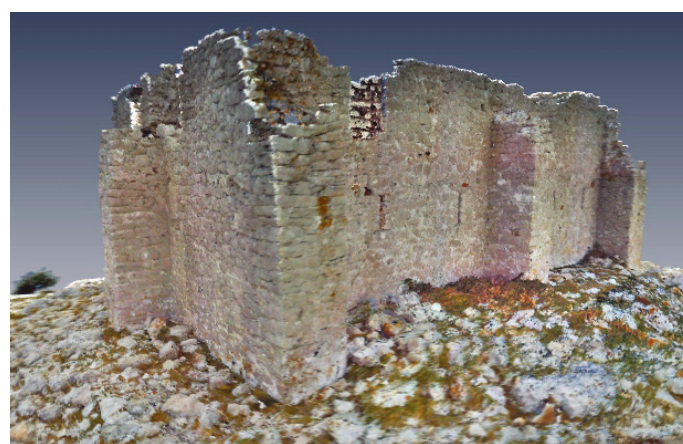
Trimble GX200 je pulsni hibridni terestrički laserski skener s



Slika 3.4. Faro Focus 3D



Slika 3.5. Prikaz oblaka točaka na mobilnom telefonu koji je bežično povezan s Focusom 3D



Slika 3.6. Oblak točaka utvrde

prozorom snimanja od 360° x 60°. U usporedbi s ostalim skenerima, osjetno sporije prikuplja podatke (5000 točaka/s), uz točnost mjerenja duljina od 3 mm na 100 m. Maksimalna duljina skeniranja je do 300 m što omogućava uporabu na otvorenim prostorima i snimanje većih objekata. Moguće ga je koristiti i u integraciji s GNSS metodom mjerenja (slika 3.7).

Trimble nudi dva različita tipa programa za upravljanje skenerom, Pocketscape je prilagođen radu na kontroleru, a Pointscape radu na prijenosnom računalo. Za potrebe testiranja skenera korišten je Pointscape u kojemu se sa zaslona monitora prijenosnog računala (slika 3.8), spojenog na skener pomoću LAN kabela, bira prozor opažanja,



Slika 3.7. Trimble GX200



Slika 3.8. Trimble GX200 povezan pomoću LAN kabela na računalo



Slika 3.9. Oblak točaka mosta Krka

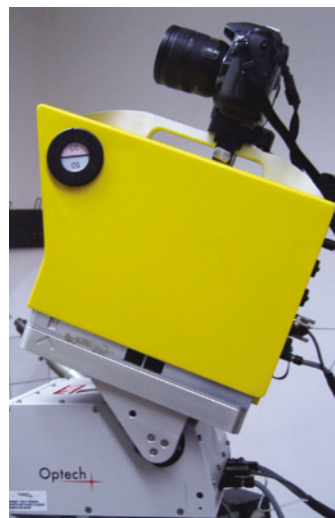
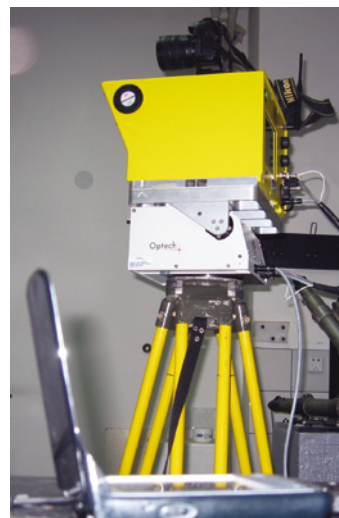
čime se smanjuje obujam naknadne obrade podataka.

Sam odabir objekata obavlja se na tri načina: iz slike, videosnimaka ili oblaka točaka. Pomoću integrirane kamere uzme se snimka veličine $60^\circ \times 60^\circ$ te se iz snimke odaberu željeni detalji. Odabir objekata iz videosnimke je najbrži. Preko zaslona prijenosnog računala skener se navodi na područje od interesa te se na videosnimci označavaju željeni objekti. Lasersko je skeniranje iz oblaka točaka najpreciznije: najprije se u gruboj rezoluciji i prozoru opažanja od 360° snimi oblak točaka, a zatim se iz njega odaberu potrebni detalji.

Trimble GX200 može se koristiti u inženjerskim projektnim zadacima (slika 3.9) te za potrebe snimanja kulturne baštine.

Optech Ilris 3₀D je pulsni kamera skener s prozorom snimanja od $40^\circ \times 40^\circ$, no postavljanjem »pan/tilt« baze, prozor snimanja iznosi $360^\circ \times 220^\circ$. ILRIS 3₀D dolazi opremljen s potpuno motoriziranom bazom koja u potpunosti omogućuje pokrivenost polja vidljivosti. Ona rotira skener oko vertikalne osi za puni krug dok se s »tilt« pločom (slika 3.10) skener rotira i oko horizontalne osi za $+90^\circ$ prema zenitu, odnosno -90° prema nadiru. Ovaj je dodatak modularan i moguće ga je odvojiti od osnovnog uređaja te se njime jednostavno upravlja preko kontrolnog softvera samog skenera (URL-12).

Skenerom se upravlja putem dlanovnika ili bilo kojeg drugog računala koje ima mogućnost spajanja bežičnom vezom (slika 3.11). Ima u sebi ugrađenu kameru, no moguće je pričvrstiti bilo koji vanjski fotoaparat za automatizirano bojanje oblaka točaka (slika 3.11), pod uvjetom da je obavljena kalibracija istog, odnosno da je korištena aplikacija za unutarnju i vanjsku orijentaciju. Područje interesa i status samog skeniranja prikazani su na LCD zaslonu, a podaci se direktno pohranjuju na vanjsku ili unutarnju memoriju. Područje interesa i gu-

Slika 3.10. Optech ILRIS 3₀D s »pan/tilt« pločom

Slika 3.11. Optech ILRIS 36D spojen na dlanovnik te s pričvršćenom kamerom



Slika 3.12. Oblak točaka dubrovačkih zidina i dijela grada

stoća podataka podesivi su od strane korisnika (Novak, 2007).

ILRIS 3₆D svoju primjenu nalazi u inženjerstvu, rudarstvu, snimanju industrijskih postrojenja, kriminalističkoj forenzici te u svim ostalim projektima koji zahtijevaju točnu 3D vizualizaciju prostora i prostornih objekata (slika 3.12). Spada u kategoriju dalekometnih skenera (mjerenje duljina i na više od 1500 m s rezolucijom od 2 cm), a da pritom nije opterećen mehaničkom rotacijom samoga instrumenta.

4. PRAKTIČNI DIO

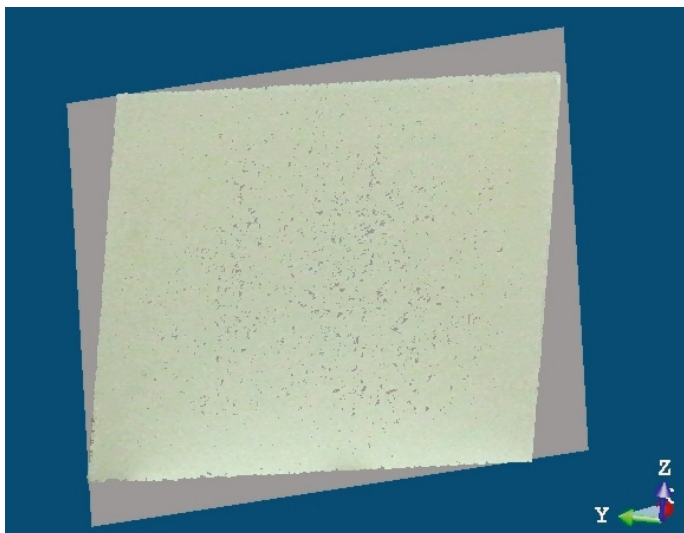
4.1. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Snimanje sa sva četiri navedena skenera provedeno je u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U prvom dijelu analizirane su karakteristike skenera s obzirom na snimljeni materijal. Provedeno je snimanje različitih materijala pravilnog oblika: kameni blok, opeka, željezni blok, drveni kvadar, suha i mokra keramička pločica, ultrapas ploča pod kutovima od 0°, 30°, 60° i 75°. U drugom dijelu snimljena je IT8 testna karta (slika 4.3b). IT8 je testna karta koja se izrađuje prema ISO 12641 standardu te se koristi kao referenca za kalibriranje boja na kamerama, skenerima, fotoaparatom i raznim drugim uređajima. Uobičajeno, testnu kartu potrebno je kupiti te se u tom slučaju ona izrađuje na posebnoj podlozi i s posebnim uređajima, no u našem slučaju, za prepoznavanje boja, zadovoljavajuću kvalitetu pružila je testna karta ispisana na pisaču HP DESIGNJET T790.

Cilj prvog i drugog dijela bio je utvrditi pogreške u očitavanju duljine koje se javljaju uslijed pogrešnog odbijanja laserske zrake od određene vrste materijala ili neke specifične boje. Treći dio analize odnosio se na ispitivanje mjerne ponovljivosti instrumenata gdje je u tri serije mjerenja opažano po pet orijentacijskih točaka te su analizirana odstupanja mjerenih koordinata kod ponovljenih mjerenja.

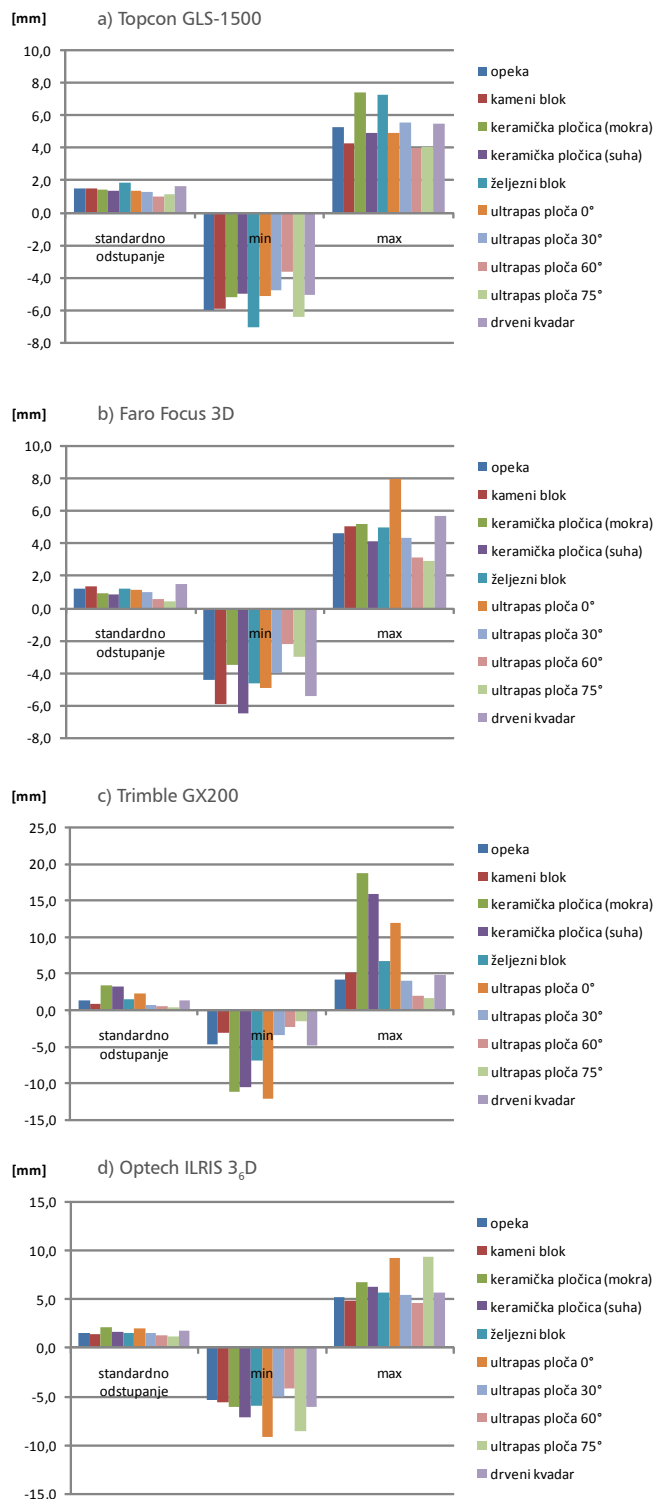
4.2. OBRADA PODATAKA

Proizvođači laserskih skenera uz svoje uređaje isporučuju i aplikacije za prikupljanje i obradu podataka. Za potrebe obrade podataka na raspolaganju su nam bile aplikacije FARO Scene, Topcon ScanMaster i Trimble RealWorks. Sve aplikacije u svojoj suštini pružaju slične mogućnosti obrade kao što su koloriranje oblaka točaka, filtriranje podataka, georeferenciranje i sl., no radi dobivanja homogenih i usporedivih rezultata, obradu i analize bilo je potrebno provesti u jedinstvenoj aplikaciji. Obrada podataka izvedena je u programu Trimble RealWorks v.6.3. S obzirom da svaki proizvođač razvija vlastiti format zapisa oblaka točaka, kako bi se omogućila razmjena podataka između programskih aplikacija, prikupljeni podaci spremeni su u tekstualnom obliku u ASCII *.xyz formatu.



Slika 4.1. Usporedba mjerene ravnine (bijelo) u odnosu na idealnu ravninu (sivo)

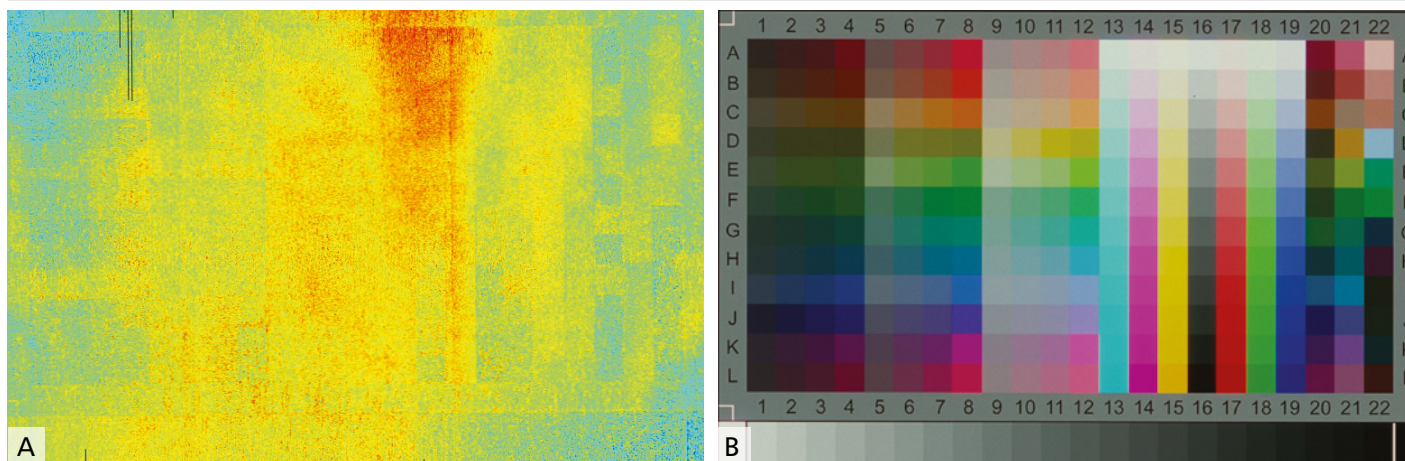
Prvi korak obrade podrazumijeva filtriranje podataka, odnosno uklanjanje šumova koji su sadržani u podacima mjerenja, a najčešće se javljaju na rubovima snimljenih objekata. U sklopu obrade rezultata baziralo se na utvrđivanju odstupanja oblaka točaka od ravnine koja definira pojedini materijal, odnosno ovisnosti odstupanja o vrsti materijala i boji skeniranog objekta. Odstupanja su izražena statističkim pokazateljima: minimumom, maksimumom i standardnim odstupanjem (slika 4.2). Za dobivanje navedenih podataka korištena je funkcija Fitting Tool. Fitting Tool je alat koji se koristi za uklapanje određenih geometrijskih elemenata (ravnina, kugla, valjak i sl.) u oblak točaka. U konkretnom slučaju, u oblak točaka uklopljena je ravnina te su spomenuti statistički pokazatelji dobiveni iz usporedbe mjerene ravnine od idealne (uklopljene) (slika 4.1). Za usporedbu mjerene ravnine u odnosu na idealnu, koristi se funkcija Inspection Map. Rezultat funk-



Slika 4.2. Statistički pokazatelji odstupanja oblaka točaka od idealne ravnine za TLS: a) Topcon GLS-1500 b) Faro Focus 3D c) Trimble GX200 d) Optech ILRIS 36D

Tablica 4.1. Statistički pokazatelji odstupanja oblaka točaka od idealne ravnine

MATERIJAL	TOPCON GLS - 1500			FARO FOCUS 3D			TRIMBLE GX200			OPTECH ILRIS 36D		
	standardno odstupanje [mm]	min [mm]	max [mm]	standardno odstupanje [mm]	min [mm]	max [mm]	standardno odstupanje [mm]	min [mm]	max [mm]	standardno odstupanje [mm]	min [mm]	max [mm]
opeka	1.5	-6.0	5.3	1.2	-4.5	4.6	1.4	-4.8	4.1	1.5	-5.4	5.2
kameni blok	1.5	-5.9	4.3	1.4	-5.9	5.1	0.8	-3.2	5.1	1.4	-5.6	4.9
keramička pločica (mokra)	1.4	-5.2	7.4	0.9	-3.5	5.2	3.5	-11.2	18.8	2.1	-6.1	6.8
keramička pločica (suha)	1.4	-5.0	5.0	0.8	-6.5	4.2	3.3	-10.5	16.0	1.7	-7.2	6.3
željezni blok	1.9	-7.1	7.3	1.2	-4.6	5.0	1.6	-6.9	6.8	1.5	-6.0	5.7
ultrapas ploča 0°	1.3	-5.2	4.9	1.1	-4.9	8.0	2.3	-12.2	12.0	2.0	-9.2	9.3
ultrapas ploča 30°	1.3	-4.8	5.6	1.0	-4.0	4.4	0.8	-3.4	4.1	1.5	-5.0	5.5
ultrapas ploča 60°	1.0	-3.6	4.0	0.6	-2.2	3.2	0.5	-2.3	2.0	1.3	-4.2	4.7
ultrapas ploča 75°	1.2	-6.5	4.1	0.4	-3.0	2.9	0.4	-1.6	1.7	1.2	-4.0	4.8
drveni kvadar	1.7	-5.1	5.5	1.5	-5.4	5.7	1.4	-4.9	4.8	1.8	-6.1	5.7



Slika 4.3. Prikaz odstupanja pojedine boje na IT8 testnoj karti snimljenoj skenerom: a) Trimble GX200 b) IT8 testna karta (URL-15)

cije Inspection Map dvodimenzionalni je prikaz mjerene plohe unutar kojeg su pikseli obojeni prema razlici (izraženoj u smislu visine) između mjerene i idealne ravnine. S desne strane prikaza nalazi se legenda koja svakoj vrijednosti visine pridružuje odgovarajuću boju.

4.3. REZULTATI

Točnost 3D koordinata prikupljenih laserskim skeniranjem ovisi o točnosti samog instrumenta i algoritmu unutar programske aplikacije Trimble RealWorks koji je korišten za uklapanje ravnine u oblak točaka. Minimalne i maksimalne vrijednosti odstupanja koordinata od idealne (uklopljene) ravnine nalaze se u intervalu od -12.2 mm do 18.8 mm (tablica 4.1).

Svi materijali korišteni u ispitivanju nalazili su se na udaljenosti od 7.3 m od instrumenta te pod približnim kutom od 0°, jedino se ultrapas ploča zakretala za 30°, 60° i 75° da bi se utvrdila ovisnost točnosti mjerenja duljine o povećanju upadnog kuta laserske zrake.

Daljnijim analizama utvrđeno je da skeneri različito reagiraju na pojedine boje što je vidljivo iz prikaza odstupanja pojedine boje na snimljenoj IT8 testnoj karti (slika 4.3a).

Iz rezultata provedenih ispitivanja vidljivo je da su za laserska skeniranja najpogodnije svijetle površine, dok se kod tamnijih i reflektivnih površina može javiti šum u mjerjenjima (slika 4.4).

Odstupanja koordinata kod ponovljenih mjerenja mjernih markica su reda veličine milimetra i prikazana su u tablici 4.2 (Δ je razlika između minimalne i maksimalne vrijednosti mjerene koordinate).

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su rezultati testiranja četiri terestrička laserska skenera. Lasersko skeniranje ne pruža neograničenu geometrijsku točnost i cjelovitost prilikom snimanja raznovrsnih objekata. Sustavi za skeniranje imaju minimalne i maksimalne domete u kojima su operativni (ovisno o tehničkim karakteristikama – tablica 3.1). Snimanje ispod ili iznad tih granica rezultira grubim pogreškama i registriranjem

netočnih podataka. Neki laserski sustavi mogu imati poteškoća s određenim materijalima kao što su mramor i reflektivne površine te u ovom slučaju keramička pločica. Prije pristupanja izradi samog projektnog zadatka potrebno se upoznati s karakteristikama TLS-a i njegovim mogućnostima kako bi se unutar prikupljenih podataka mogao razlikovati šum od samih mjerenja. TLS nisu zamjena za klasična geodetska mjerenja, već nadopunjuju njihove mogućnosti.

Zanimljivo je uočiti kako se pri snimanju ultrapas ploče, kod svih testiranih skenera, s povećanjem upadnog kuta zrake smanjuje standardno odstupanje, što potvrđuju i rezultati provedenih ispitivanja. Zbog smanjivanja prozora opažanja, smanjuje se pogreška mjerenja duljine, odnosno smanjuje se broj pogrešno određenih točaka unutar oblaka (Kremen i dr., 2007). Istraživanja pokazuju da su svi ispitani laserski skeneri pod utjecajem instrumentalnih pogrešaka. Stoga je potrebno definirati standarde za ispitivanje sustava za lasersko skeniranje s ciljem kalibracije instrumenata (Reshetyuk, 2006) i reduciranja utjecaja instrumentalnih pogrešaka na sama mjerenja.

Svi ispitani skeneri primjenjivi su pri rješavanju određenih projektnih



Slika 4.4. Šum u mjerjenjima uslijed laboratorijske rasvjete

zadataka. Optech ILRIS 3_D pogodan je za potrebe snimanja objekata na velikim udaljenostima, no može se koristiti i za snimanje unutrašnjosti objekata. Topcon GLS-1500 i Trimble GX200 su srednjodometni skeneri pogodni za snimanje većih objekata, ali i interijera, dok je Faro Focus 3D pogodan za snimanje interijera i za snimanje objekata na kraćim udaljenostima. Sam odabir skenera ovisi o tipu projektnog zadatka te o potrebama korisnika. Lasersko skeniranje nudi mogućnost integracije geodezije s ostalim strukturama, što pruža šire mogućnosti pri obavljanju različitih vrsta zadataka. Kako bi široke mogućnosti laserskog skeniranja i njegove integracije našle svoju potpunu primjenu, treba prilagoditi postojeću zakonsku regulativu i razmišljanja okrenuti prema 3D svijetu.

ZAHVALA

Zahvaljujemo prof. dr. sc. Bošku Pribičeviću, dipl. ing. geod., na posudbi opreme i ustupljenom računalu za obradu podataka.

Zahvaljujemo gosp. Đuri Zaloviću, dipl. ing. geod., i tvrtci Geocentar d.o.o. Čakovec na ustupljenom laserskom skeneru Topcon GLS-1500 i pomoći pri obradi podataka.

Zahvaljujemo gosp. Filipu Donliću i tvrtci Teximp d.o.o. Zagreb na ustupljenom laserskom skeneru Faro Focus 3D.

Zahvaljujemo gosp. Zlatanu Novaku, dipl. ing. geod., i tvrtci Geo3D d.o.o. Varaždin na ustupljenom laserskom skeneru Optech ILRIS 3_D i pomoći pri obradi podataka.

Zahvaljujemo gosp. Nenadu Smolčaku i tvrtci Geomatika Smolčak d.o.o. na ustupanju laserskom skeneru Trimble GX200

LITERATURA

- Adami, A., Guerra, F., Vernier, P. (2007): Laser Scanner and Architectural Accuracy Test, CIPA Symposium, vol. XXI, str. 1-5,

URL-1: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP003.pdf> (20. 1. 2012.)

- Basa, L., Juraj, I. (2011): Oblak točaka i AutoCAD Civil 3D 2011, Ekscentar, no. 14, str. 34-39, URL-2: <http://hrcak.srce.hr/file/106551> (20. 1. 2012.)
- Boehler, W., Marbs, A. (2003): Investigating Laser Scanner Accuracy, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, str. 1-15, URL-3: <http://dev.cyark.org/temp/i3mainzresults300305.pdf> (20. 1. 2012.)
- Cvjetković, N. (2010): Terestričko lasersko skeniranje pročelja muzeja Mimara, Diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
- Đapo, A., Kordić, B., Medved, I., Miler, M. (2007): Terestrički laserski skeneri, Ekscentar, no. 10, str. 35-38, URL-4: hrcak.srce.hr/file/32559 (20. 1. 2012.)
- Froehlich, C., Mettenleiter, M. (2004): Terrestrial Laser Scanning - New Perspectives in 3D Surveying, International Archives of Photogrammetry, vol. XXXVI, URL-5: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/FROEHLICH.pdf> (6. 3. 2012.)
- Kersten, T. P., Lindstaedt, M., Mechelke, K. (2007): Comparative Investigations into the Accuracy Behavior of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems, Optical 3D Measurements Techniques VIII, vol. I, str. 319-327, URL-6: <http://dev.cyark.org/temp/hcuhamburgmechelkeetal2007.pdf> (24. 1. 2012.)
- Kremen, T., Koska, B., Pospisil, J. (2006): Verification of Laser Systems Quality, FIG Congress, vol. XXIII, URL-7: http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts24/ts24_04_kremen_etal_0452.pdf (24. 1. 2012.)
- Matijević, H. (2002): Terestrički laserski skeneri, Seminarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, URL-8: <http://www.seminarskirad.biz/seminarski/terestricki%20laserski%20skeneri%20-%20hr.pdf> (6. 3. 2012.)
- Novak, Z. (2007): Optech LiDAR, Ekscentar, no. 10, str. 24-30, URL-9: http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=32557 (15. 3. 2012.)
- Reshetyuk, Y. (2006): Calibration of Terrestrial Laser Scanners for the Purposes of Geodetic Engineering, FIG Symposium, vol. XII, str. 1-3, 8-10, URL-10: http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/LS1/Reshetyuk.pdf (20. 1. 2012.)
- URL-11: <http://geoservis.ftn.uns.ac.rs/files/IntegralniSistemi/TLS.pdf> (24. 1. 2012.)
- URL-12: <http://www.geo3d.hr/> (15. 3. 2012.)
- URL-13: <http://geocentar.com/> (7. 3. 2012.)
- URL-14: <http://www.faro.com/> (20. 3. 2012.)
- URL-15: http://www.computer-darkroom.com/it8cal/it8_page_1.htm (20. 3. 2012.)
- URL-16: <http://global.topcon.com/> (7. 3. 2012.)
- URL-17: <http://www.trimble.com/> (20. 1. 2012.)
- URL-18: <http://www.optech.ca/> (15. 3. 2012.)

Tablica 4.2. Odstupanja koordinata kod ponovljenih mjerenja:

a) Topcon GLS-1500 b) Faro Focus 3D c) Trimble GX200 d) Optech ILRIS 36D

TOPCON GLS - 1500	I. SERIJA			II. SERIJA			III. SERIJA			Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]			
target1	-3,485	9,708	0,386	-3,485	9,708	0,386	-3,485	9,707	0,386	0,000	-0,001	0,000
target2	-3,833	1,618	0,127	-3,833	1,618	0,127	-3,833	1,618	0,127	0,000	0,000	0,000
target3	-1,037	-9,961	0,609	-1,037	-9,961	0,609	-1,037	-9,961	0,609	0,000	0,000	0,000
target4	2,994	-7,905	-0,262	2,994	-7,906	-0,262	2,994	-7,905	-0,262	0,000	-0,001	0,000
target5	4,121	-5,431	0,611	4,121	-5,430	0,611	4,121	-5,430	0,611	0,000	-0,001	0,000

FARO FOCUS 3D	I. SERIJA			II. SERIJA			III. SERIJA			Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]			
target1	-1.841	9.727	1.240	-1.842	9.727	1.241	-1.842	9.727	1.240	0.000	0.000	-0.001
target2	3.108	9.771	0.088	3.108	9.771	0.088	3.108	9.770	0.088	0.000	0.000	-0.001
target3	3.576	3.121	-0.126	3.576	3.121	-0.126	3.576	3.121	-0.126	0.000	0.000	0.000
target4	-1.784	-7.062	0.002	-1.784	-7.062	0.002	-1.784	-7.062	0.003	0.000	0.000	-0.001
target5	3.550	-0.614	-0.130	3.550	-0.614	-0.130	3.550	-0.614	-0.130	0.000	0.000	0.000

TRIMBLE GX200	I. SERIJA			II. SERIJA			III. SERIJA			Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]			
target1	-8.022	-2.655	0.009	-8.022	-2.655	0.009	-8.024	-2.655	0.009	-0.002	0.000	-0.001
target2	-9.973	2.916	0.663	-9.973	2.915	0.664	-9.973	2.916	0.663	0.000	-0.001	-0.001
target3	9.822	3.744	1.196	9.821	3.744	1.196	9.824	3.744	1.196	-0.003	-0.001	0.000
target4	8.377	2.482	0.024	8.376	2.483	0.024	8.376	2.483	0.024	-0.001	-0.001	0.000
target5	5.624	-3.610	0.607	5.624	-3.609	0.608	5.624	-3.610	0.608	0.000	-0.001	0.000

OPTECH ILRIS 36D	I. SERIJA			II. SERIJA			III. SERIJA			Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]			
target1	0.533	6.643	-0.021	0.533	6.642	-0.021	0.535	6.642	-0.021	-0.002	-0.001	0.000
target2	-6.653	4.137	-0.228	-6.653	4.137	-0.228	-6.653	4.139	-0.229	0.000	-0.002	-0.001
target3	-3.216	6.148	-1.414	-3.215	6.148	-1.414	-3.216	6.148	-1.414	-0.001	0.000	0.000
target4	-5.272	-0.779	-0.233	-5.273	-0.779	-0.233	-5.272	-0.779	-0.234	-0.001	0.000	-0.001