

Terestrički laserski skeneri

Mario Miler*, Almin Đapo**, Branko Kordić***, Ivan Medved****

SAŽETAK. Ovaj članak opisuje relativno novu tehnologiju snimanja prostora i objekata u njemu i njezinu upotrebu stvarnom životu. Također, opisana je razlika između pojedinih tipova terestričkih laserskih skenera, koje su im bitne karakteristike i na što treba obratiti pozornost pri odabiru instrumenta za pojedini projekt.

KLJUČNE RIJEČI: Terestrički laserski skener, TLS, LiDAR, oblak točaka.

KLASIFIKACIJA prema COBISS-u: 1.05

1. Uvod

Otkako su se početkom devedesetih godina na tržištu pojavili prvi terestrički laserski 3D sustavi, došlo je do značajnog tehničkog napretka na tom području. U posljednje je vrijeme sve aktualnija ta nova tehnologija snimanja prostora. Tehnologija je zasnovana na laserskoj tehnologiji, a instrumenti koji je primjenjuju su terestrički laserski skeneri (TLS). To je relativno nova i vrlo učinkovita metoda pridobivanja detaljnih digitalnih snimaka velikih objekata, pa čak i cijelih područja manjeg i srednjeg protezanja. Princip rada je vrlo sličan današnjim klasičnim geodetskim instrumentima s laserom koji su u upotrebi već godinama. Laserska zraka odaslana iz mjernog instrumenta se reflektira od objekta snimanja i vraća natrag do mjernog instrumenta. Kombinacija izmjerene udaljenosti i kuta s određenog stajališta daje koordinate tražene točke u 3D prostoru.

Razlika između ove nove tehnologije i klasičnog mjerenja laserskom zrakom je u brzini izvođenja mjerenja i, u nekim slučajevima, preciznosti. Ova karakteristika omogućava znatno manji obujam terenskog posla i povećanje količine mjernih podataka što rezultira detaljnijom izmjerom željenog objekta ili područja. Princip rada

terestričkog laserskog skenera je relativno jednostavan i poznat već duže vrijeme, ali je glavna zapreka u izvedbi takvog sustava bila tehničke prirode: sama konstrukcijska izvedba takvog preciznog sustava.

Kako ova tehnologija postaje sve pristupačnija, prednosti ovakvog načina prikupljanja podataka uvidjeli su i geodetski stručnjaci koji na 3D lasersko skeniranje počinju gledati kao na novi alat za budućnost i proširenje poslovnih mogućnosti. Trenutačno na tržištu postoji nekoliko tipova laserskih skenera različitih proizvođača, ali direktna usporedba ovih instrumenata nije moguća zbog razlika u njihovim tehničkim specifikacijama i fizičkim mjernim osobinama.

2. Lasersko skeniranje

Lasersko skeniranje nije zamjena za postojeće tehnike geodetskog snimanja, ali je alternativa koja se može upotrijebiti u većini geodetskih poslova. Skeniranje se odvija već poznatom metodom registracije udaljenosti i kuta do određene točke u području snimanja. Rezultat ovakvog načina snimanja je skup trodimenzionalnih XYZ točaka koji se naziva oblak točaka. Prostorna udaljenost između susjednih snimljenih točaka unutar oblaka točaka

ovisi o blizini objekta snimanja i tehničkoj specifikaciji samog instrumenta. Većina današnjih skenera može snimiti vrlo guste oblake točaka, pa je tako moguće dobiti točke na snimljenom objektu međusobno udaljene tek jedan milimetar. Oblak točaka može uz svoje prostorne, relativne ili apsolutne, koordinate sadržavati i intenzitet RGB (Red Green Blue) model boje reflektirane površine. To znači, reflektira li se laserska zraka od zelenog lista na drvetu, ta točka će uz pripadajuće koordinate sadržavati i podatak o boji i intenzitetu reflektirane zrake. RGB model boje dobiven je unutarnjom (ugradenom) ili vanjskom (kombinacija) kamerom, dok se vrijednost intenziteta dobiva iz jačine odbijenog signala.

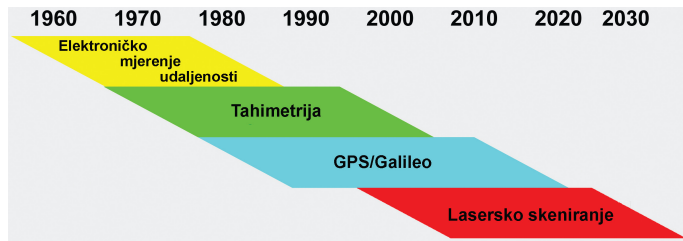
Budući da se laserskim skenerom često prikupi i više milijuna točaka po stajalištu, vođenje detaljne skice je nepotrebno jer se iz oblaka točaka može dobiti i više nego dovoljno informacija za identifikaciju svih snimljenih objekata i izradu plana situacije. Kao primjer izvrsno može poslužiti snimljena (skenirana) cesta i uz cestu postavljena ploča na kojoj piše ime ulice. Iz oblaka točaka lako je pročitati naziv ulice na ploči jer je uz nekoliko stotina točaka dobiven oblik i informacija o boji (npr. bijela slova na plavoj podlozi).

[*] Mario Miler, dipl. ing. geod., Katedra za geoinformatiku, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: mmiler@geof.hr

[**] mr. sc. Almin Đapo, dipl. ing. geod., Katedra za hidrografiju, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: adapo@geof.hr

[***] Branko Kordić, dipl. ing. geod., Katedra za hidrografiju, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: bkordic@geof.hr

[****] Ivan Medved, dipl. ing. geod., Katedra za geoinformatiku, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: imedved@geof.hr



Slika 1. Povijesni razvoj tehnologije za snimanje prostora

3. Podjela skenera prema načinu snimanja

U današnje vrijeme je moguće razlikovati tri vrste TLS-a prema načinu snimanja, međutim još ne postoji standard za usmjerenje laserske zrake, tako da svaki proizvođač ima svoj sustav za posebne aplikacije. Tri uobičajene vrste skenera prema načinu snimanja su:

- skeneri-kamere: ograničeni prozor snimanja - FOV (Field Of View) npr. $40^\circ \times 40^\circ$. Može se usporediti s fotogrametrijskim kamerama, što znači da skeniraju sve što se nalazi u trenutačnom prozoru snimanja, npr. CYRA 2500 (Leica) ili ILIRIS 3D (OPTECH). Snimanje se izvodi pomoću dva sinkronizirana ogledala (horizontalno i vertikalno) koja usmjeravaju lasersku zraku. Ovaj način snimanja zna biti vrlo nepraktičan zbog uskog područja snimanja, ali često ovaj tip skenera ima vrlo veliki domet (i više od 1000 m), što nadoknađuje navedeni nedostatak.

- panoramski skeneri: FOV je limitiran samo bazom instrumenta, što znači da skenira sve oko sebe, osim područja ispod postolja na kojem se nalazi u trenutku skeniranja, npr. IMAGER 5003 (Zoller + Frohlich) ili HDS4500 (LEICA). Snimanje se izvodi rotacijom jednog ogledala koje usmjerava lasersku zraku u vertikalnom kutu od otprilike 310° i rotacijom cijelog postolja instrumenta za 360° oko vertikalne osi. Na taj se način dobiva snimak od 310°

x 360° . Prednost ovog tipa skenera je u njihovoj brzini prikupljanja podataka i veličini područja skeniranja. Nedostatak je kratki domet i uporaba im je u većini slučajeva ograničena na interijere objekata.

- hibridni skeneri: FOV u horizontalnoj osi je 360° , dok je po vertikalnoj osi limitiran na otprilike 60° . Ovaj tip skenera sadrži rotacijsku prizmu ili ogledalo, koji se rotiraju oko horizontalne osi. Skenira sve u vertikalnom kutu od 60° , u trenutnom smjeru gledanja. Cijeli se instrument (ili njegov dio) rotira oko vertikalne osi za 360° , npr. GX (TRIMBLE) ili LMS Z 360 (RIEGEL). Na taj se način dobiva snimak od $60^\circ \times 360^\circ$. Ovaj se tip instrumenta zbog svoje svestranosti najčešće koristi u praksi.

Jedinstvenu kategorizaciju TLS-a je vrlo teško napraviti jer se primijenjena tehnologija bitno razlikuje od modela do modela. Vrlo je važno naglasiti da ne postoji univerzalni skener za sve primjene. S obzirom na njihovu tehničku izvedbu i tehničke specifikacije kojima se odlikuju, neki skeneri su bolji za interijere i detalje, dok su drugi bolji za eksterijere i velike objekte.

4. Podjela skenera prema načinu mjerenja udaljenosti

Terestričke je laserske skenere moguće kategorizirati i po načinu mjerenja udaljenosti. Tehnologija mjerenja udaljenosti izravno utječe na domet i točnost skeniranja. Danas se koriste tri različite tehnologije

mjerenja udaljenosti laserskim skenerima - pulsna, fazna i triangulacijska metoda. Navedene se tehničke izvedbe obično koriste samostalno, ali moguće ih je kombinirati kako bi se dobio raznovrsni sustav za skeniranje.

Terestrički laserski skeneri kategorizirani po načinu mjerenja udaljenosti su:

- Pulsni (eng. TOF - Time Of Flight) - radi na principu mjerenja vremena između odaslanog i primljenog signala. Domet ovog načina mjerenja udaljenosti može biti preko 1 km. Prednost ostvarena mjerenjem velike udaljenosti nažalost podrazumijeva i smanjenu točnost.

- Fazni (eng. phase) - radi na principu mjerenja razlike u fazi između odaslanog i primljenog signala. Nedostatak je ograničenost dometa na stotinjak metara, ali točnost ovog načina mjerenja udaljenosti je u granicama od nekoliko milimetara.

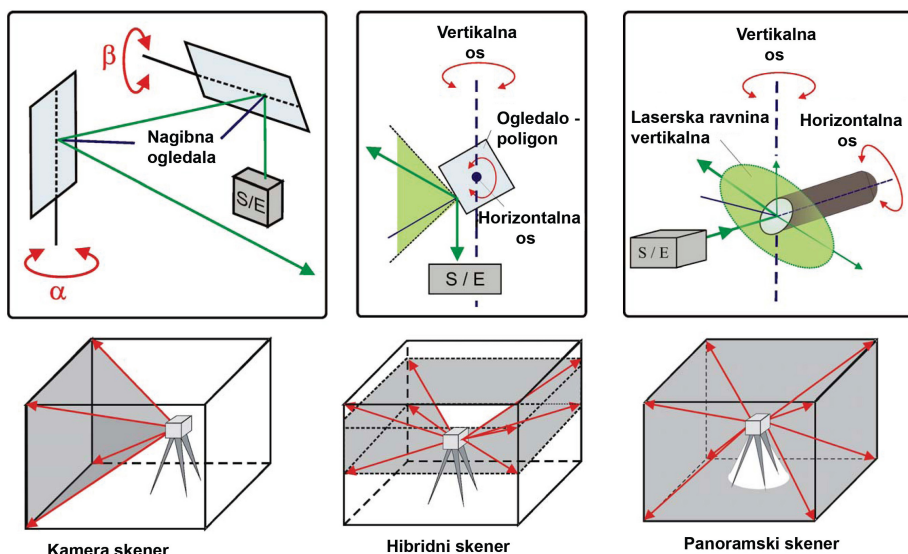
- Triangulacijski (eng. triangulation) - radi na principu optičke triangulacije. Laserska se zraka projicira na objekt i registri se na senzoru koji je smješten na poznatoj udaljenosti od izvora zrake. Ovaj način mjerenja udaljenost nema veliku korisnost u geodetskoj izmjeri jer je domet ograničen na nekoliko metara, ali su zato točnosti koje se mogu postići ovom metodom u granicama mikrometra.

Od navedenih načina mjerenja, pulsno mjerenje udaljenosti se najviše koristi u terestričkoj laserskoj izmjeri. Dobivena udaljenost se kombinira s izmjerenim prostornim kutovima (horizontalni i vertikalni) za dobivanje trodimenzionalnih koordinata.

5. Podjela skenera prema načinu prikupljanja oblaka točaka

Skeneri se također mogu podijeliti po načinu prikupljanja podataka, tj. oblaka točaka. Naime, postoje dva tipa oblaka točaka: absolutni (georeferencirani) i relativni (lokalni) oblak točaka. Većina skenera nije prvotno radena za geodetske potrebe, pa direktno georeferenciranje nije ni bilo potrebno.

U današnje se vrijeme pojavila potreba za direktnim georeferenciranjem podataka na terenu, pa određeni skeneri novije generacije imaju tu mogućnost (Trimble GX, Leica ScanStation). Bitna novost kod ovih skenera je što imaju ugrađene horizontalne i vertikalne kompenzatore, kao i klasični geodetski instrumenti. Ova tehnička izvedba ima određenih prednosti, ali i nedostataka u usporedbi sa skenerima bez kompenzatora. Prednost ovakvih skenera je u tome što omogućuju mjerenja na jednak način kao i klasični geodetski instrumenti - razvijanje poligonskog vlaka,



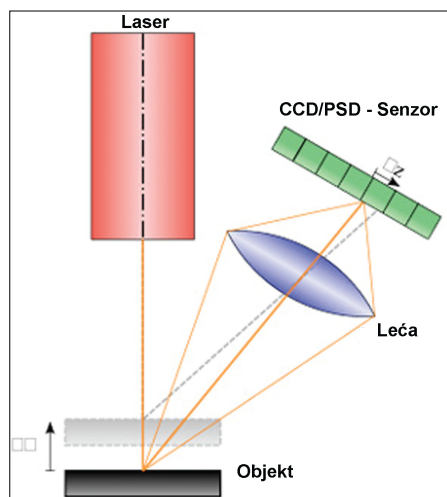
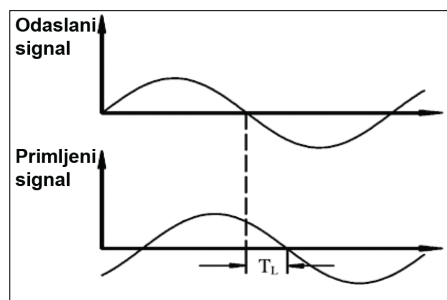
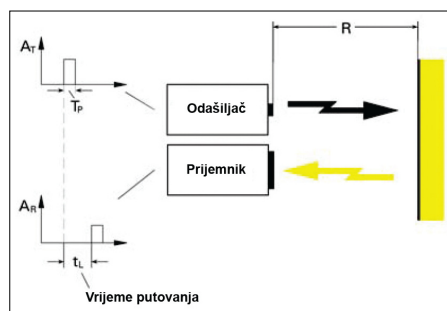
Slika 2. Shematski prikaz tri uobičajene vrste skenera prema načinu snimanja

iskolčenje točaka, mjerenje samo jedne karakteristične točke i sl. Tako prikupljeni podaci (oblak točaka) mogu se georeferencirati već na terenu i nije potrebno uklapanje snimljenih oblaka točaka naknadnom obradom. To ne znači da skeneri koji nemaju direktno georeferenciranje ne mogu imati georeferencirani oblak točaka, već samo da se taj postupak, bez većih poteškoća, radi naknado u obradi.

Budući skeneri, koji imaju ugrađen kompenzator i mjere na klasični geodetski način, moraju ispuniti zahtjev da vertikalna os bude vertikalna u prostoru. Time je, međutim, onemogućeno naginjanje i usmjeravanje skenera u različitim smjerovima. Također, upravo su zbog prisutnosti kompenzatora puno osjetljiviji na podrhtavanja u okolini.

6. Prikupljanje i obrada podataka

Kod većine se skenera prikupljanje podataka vrši uz pomoć računalnog pro-



Slika 3. Shematski prikaz pulsne (a), faznog (b) i triangulacijskog (c) načina mjerenja udaljenosti kod različitih izvedbi terestričkih laserskih skenera

grama (aplikacije) isporučenog zajedno sa skenerom. Aplikacija je instalirana na prijenosnom računaru ili dlanovniku i putem mrežnog kabela ili bežične veze se spaja na skener. Svaka aplikacija za prikupljanje podataka je drugačija, ali rezultat je na kraju isti: oblak točaka. Većina skenera prikuplja lokalne oblake točaka koji se naknadnom obradom moraju spojiti zajedno i, ako je potrebno, georeferencirati. Spajanje oblaka točaka se najčešće vrši pomoću spajanja identičnih točaka unutar oblaka točaka. Postoje i algoritmi koji mogu automatski prepoznati geometrijske oblike unutar oblaka točaka. Međutim, zbog složenosti nisu uvijek primjenjivi, pa se ovaj način rijetko koristi u praksi. Kod skenera koji imaju mogućnost izravnog georeferenciranja nema potrebe za ovim korakom, jer oblaci točaka dobiveni na ovaj način su već na terenu postavljeni u stvarni prostor. Sam postupak spajanja oblaka točaka i georeferenciranja nije kompleksan i često se već poluautomatski izvodi na terenu.

Mora se naglasiti da je hardver skenera drastično napredovao posljednjih godina i svake godine dolaze skeneri koji u sve kraćem vremenu prikupljaju sve više sve točnijih podataka. Problem nastaje u

obradi podataka, tj. u aplikacijama kojima se obrađuju oblaci točaka. Često se događa slučaj da uopće nije bitno koji ste skener koristili pri prikupljanju podataka, već problem nastaje kada se ti podaci trebaju obraditi. Aplikacije za obradu podataka su još uvijek u početku razvoja, barem što se tiče geodetske struke. Ukratko rečeno, tehnički razvoj skenera puno brže napreduje nego što to mogu pratiti algoritmi za obradu. Tako, na primjer modeliranje mosta ili nekog industrijskog objekta može zahtijevati jako puno obrade, bez obzira kako su snimljeni podaci na terenu. Većinom se obrada sastoji od manualnog modeliranja objekata u prostoru iz snimljenog oblaka točaka. Postoje algoritmi koji ubrzavaju neke procese, ali isti još uvijek nisu na zavidnoj razini.

7. O čemu razmišljati pri kupovini TLS-a (Odabir i kupovina TLS-a)

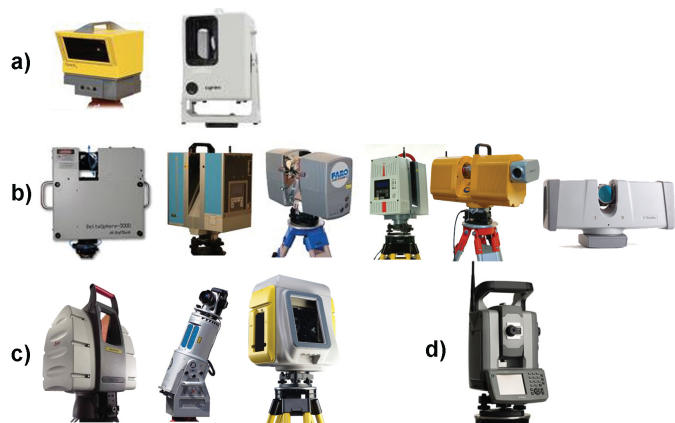
S obzirom na raznovrsnu ponudu terestričkih skenera na tržištu, ne može se reći da postoji jedan univerzalni uređaj koji je najbolji za sve primjene. Postoje samo instrumenti koji su iz ovog ili onog

Tablica 1. Usporedba TLS-a s klasičnom mjernom stanicom

Klasična mjerna stanica	Terestrički laserski skener
<ul style="list-style-type: none"> mjerenje karakterističnih točaka mного truda za malo točaka uloženi trud po točki je velik geometrija snimljenih točaka je deskriptivna točke snimanja odabiru se na terenu (iskustvo) odabir snimljenih točaka određuje kvalitetu snimka 	<ul style="list-style-type: none"> pojedinačna mjerenja: ne mjere se karakteristične točke nekontroliran odabir točaka snimka nema geometrijskog značenja (simbolika) uloženi trud po točki je mali odabir snimljenih točaka u uredu (postprocessing) kvaliteta je opisnog karaktera - ovisi o snimljenim elementima

Tablica 2. Primjena TLS-a

	Zahtjevi	Primjeri
Građevina i industrijska izmjera	3D modeli objekta Detekcija i praćenje pomaka i deformacija Određivanje količine i veličine materijala/objekata 2D crteži	Tuneli, mostovi, autoceste, brane... Tvornice, industrijska postrojenja, platforme... Avioindustrija, brodogradnja... Visoke građevine
Dokumentacija i očuvanje kulturne baštine	2D crteži Teksturirani »mesh« 3D modeli	Fasade i interijeri građevina Statue i arheologija...
Urbana topografija	3D modeli 2D crteži	Urbana infrastruktura
Rudnici i zemljani iskopi	Izračun volumena Lociranje razlika zemljanih ploha	Rudnici Zemljani radovi svih vrsta
Forenzika	3D reprezentacija događaja 2D crteži Dokaz o događaju	Analiza nesreće Kriminalistička obrada
Animacija	3D modeli	Animacije



Slika 4. Primjeri: kamera skeneri (a), panoramski skeneri (b), hibridni skeneri (c) i robotska totalna stanica sa ugrađenom mogućnosti laserskog skeniranja (d)

razloga bolji za pojedinu primjenu.

Primjerice, potrebno je snimiti neku veliku površinu na litici brda u svrhu izrade studije klizanja tla ili sl. Mogao bi se koristiti bilo koji skener koji može doseći liticu, ali postavlja se pitanje utrošenog vremena i truda na npr. skeniranje skenerom dometa 70 m i skenerom dometa 1km. U ovom slučaju, neka visoka točnost ispod centimetra nam nije potrebna, pa će nas zadovoljiti neki dalekometni skener kojim ćemo puno brže i kvalitetnije obaviti posao (cost-benefit).

Međutim, snimanje kipa u svrhu njegove restauracije ili arhiviranja, gdje se zahtijeva milimetarska točnost, neki skener s točnošću od nekoliko centimetara neće zadovoljiti postavljene kriterije.

Osim kriterija točnosti, potrebno je obratiti pažnju i na brzinu skeniranja. Možda se čini da je brzina od 2000 točaka u sekundi puno, ali da bi se dobio kvalitetan i točan model iz oblaka točaka često je potrebno prikupiti nekoliko milijuna točaka. Panoramski skeneri su najbrži zbog svoje tehničke izvedbe, dok su hibridni sporiji, a korištenjem hibridnih skenera s kompenzatorom brzina skeniranja drastično opada.

Kao što je ranije u tekstu spomenuto, jedan od rezultata skeniranja je i RGB model boja snimljene točke. Boja je dobivena kamerom, bilo unutarnjom (ugradenom) ili vanjskom (kombinacija).

Ako projektni zadatak zahtijeva kvalitetni ortofoto ili kvalitetno obojani oblak točaka u svrhu vizualizacije ili prezentacije, potrebno je koristiti skener s opcijom vanjske kamere. Razlika u kvaliteti između unutarnjih i vanjskih kamera je velika i ne smije se nikako zanemariti. Kvaliteta boje kod vanjskih kamera je izuzetna jer se često koristi profesionalna DSLR (Digital Single-Lens Reflex) tehnologija. Neki tipovi skenera nemaju mogućnost ugradnje vanjske kamere, pa se bojanje točaka može izvesti posebnim al-



Slika 5. Fotografija skeniranja tunela (gore) i dobiveni oblak točaka (dolje)

goritmima unutar različitih aplikacija, što naravno iziskuje dodatni rad na terenu, a posebno kasnije u uredu, a često ne daje tako kvalitetan rezultat.

Robusnost i radna temperatura su također bitni kod odabira skenera. Terestrički skeneri su u većini slučajeva vrlo osjetljivi na okolinu. Jedna od bitnijih stvari o kojoj treba voditi računa pri odabiru skenera je okolina u kojoj će se izvoditi radovi. Rad u tunelima na + 10°C ne bi trebao predstavljati problem nijednoj izvedbi skenera, ali rad pri + 40°C na gradskom asfaltu mogao bi nekim izvedbama predstavljati problem.

Kupnja skenera u samo jednu svrhu je preskupa i neisplativa investicija, pa tako na tržištu postoje skeneri koji će dobro odraditi većinu poslova, ali nisu najbolji izbor za svaki od njih. U današnje vrijeme je na tržištu prisutan veći broj terestričkih skenera, pa odluka pri kupnji nije laka, osobito uzme li se u obzir njegova nemala cijena (rang 100.000 € i više). Uvijek je potrebno uzeti u obzir zadatke koji će se izvoditi i prema tome odabrati tip skenera. Odabir skenera se nikako ne smije napraviti na osnovu toga što je proizvođač već otprije poznat kao proizvođač geodetske opreme.

Literatura

- Staiger, R. (2003): Terrestrial Laser-scanning Scanners and Methods, URL-1: <http://www.rgz.sr.gov.yu/DocF/Files/intergeo-east-2007/n48.pdf> (10.12.2007.)
- Staiger, R. (2003): Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications, URL-2: http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS12/TS12_3_staiger.pdf (10.12.2007.)
- Lemmens, M. (2007): Terrestrial Laser Scanners, URL-3: http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdf-document_18.pdf (10.12.2007.)
- Thiel, K.H., Wehr, A. (2004): Performance Capabilities Of Laser Scanners - An Overview And Measurement Principle Analysis, URL-4: http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/THIEL.pdf (10.12.2007.)
- Bornaz, L., Rinaudo, F. (2004): Terrestrial Laser Scanner Data Processing, URL-5: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm5/papers/608.pdf> (10.12.2007.)
- Medak, D., Pribičević, B., Medved, I., Miler, M., Odobašić, D. (2007): Terestričko lasersko skeniranje i trodimenzionalno projektiranje, HGD - Simpozij o inženjerskoj geodeziji, Beli Manastir, svibanj 2007. 