

UDK 528.517.8:681.783.25:004.352  
Pregledni znanstveni članak

# Terestrički laserski skaneri

Hrvoje MATIJEVIĆ, Miodrag ROIĆ – Zagreb\*

*SAŽETAK.* Mjerenje duljina impulsnom metodom primjenjuje se u geodeziji već više od desetak godina, a u posljednjih nekoliko godina tehnologija je omogućila dobivanje podataka milimetarskom točnošću bez uporabe reflektora na cilju. Strelovit rast procesorske snage PC-a s dostupnošću vrhunskih 3D grafičkih ubrzivača širem krugu korisnika otvorio je nove mogućnosti primjene 3D modeliranja stvarnog svijeta s pomoću računala. Te dvije činjenice omogućile su pojavu terestričkih laserskih skanera. U radu je opisan princip njihova rada, uz analizu četiriju njihova predstavnika.

*Ključne riječi:* Terestrički laserski skaneri, bezreflektorno mjerenje duljina, "kao izgrađeno", pogonski katastri.

## 1. Uvod

Mjerenje duljina elektromagnetskim valovima intenzivno se primjenjuje u geodetskoj struci već više od trideset godina. Zbog tehnoloških ograničenja u početku su se takvi sustavi temeljili isključivo na principu mjerenja faznog pomaka odaslane i primljene elektromagnetske energije, a na cilju su zahtijevali reflektor. No napredak u mjernoj i mikroprocesorskoj tehnologiji omogućio je već sredinom 1980-ih godina pojavu prvih sustava za mjerenje duljina koji ne trebaju reflektor na cilju. Oni rade s pomoću impulsnog principa mjerenja duljina. U posljednjih nekoliko godina takvi su daljinomjeri postali široko dostupni, čak i u ručnoj izvedbi.

Ako se radi bez reflektora, domet ovisi o refleksnoj sposobnosti cilja, svjetloći polja oko cilja, uglačanosti površine, vrsti materijala i nagibu plohe cilja prema snopu infra zračenja (najbolje je ako je ploha okomita na snop zračenja) (Solarić i Benčić 1987).

Istodobno s pojavom laserskog mjerenja duljina, povećanje primjene doživjeli su i CAD/CAM sustavi. I njihov je razvoj bio uvjetovan tehnološkim napretkom. Iako u

\*Hrvoje Matijević, dipl. ing. i prof. dr. sc. Miodrag Roić, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zavod za inženjersku geodeziju i upravljanje prostornim informacijama, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: hmatijev@geof.hr i mroić@geof.hr.

početku ograničeni na specijaliziran i skup hardver, s popularizacijom PC računalne arhitekture uvukli su se duboko u sve pore inženjerskih struka. Kako mogućnosti širim krugovima dostupnog hardvera do pred nekoliko godina nisu dopuštale intenzivniju uporabu potencijala CAD sustava u pogledu 3D modeliranja, on je bio privilegij rijetkih.

Strelovito povećanje procesorske snage PC-a koja se danas mjeri u GHz, povezano sa značajnim sniženjem cijena specijaliziranih 3D grafičkih ubrzivača, omogućili su obradu velike količine 3D podataka u stvarnom vremenu te njihovo uključivanje u vrlo popularne *Facility Management* sustave. U posljednje vrijeme vrlo popularan pojam "kao izgrađeno" (*as built*) temelji se na jakom računalnom hardveru ali i velikoj količini točnih 3D podataka o prostoru i objektima u njemu.

Razvoj modernih računala sa sve većim mogućnostima uz pristupačne cijene dopušta već i 3D modeliranje (Roić i Matijević 1997). No postavlja se pitanje kako što jednostavnije, brže i ekonomičnije prikupiti tolike podatke. Iako fotogrametrija već dugo daje odgovor na to pitanje, laserski skaneri u nekim pogledima daju bolje rezultate. 3D lasersko skaniranje može prikupiti izravno, brzo i točno 3D oblake točaka x, y, z, koordinata (Lemmens i van den Heuvel 2001).

Iako su u početku relativno velika investicija (100 do 200 tisuća €), mogu se vrlo brzo isplatiti. U modernom društvu, gdje svaka minuta stajanja pogona i strojeva košta puno, svaki sat manje proveden u tom stanju čista je dobit. Pruže li nam laserski skaneri podatke koji su brzo dostupni te dovoljno točni i precizni čime skraćuju vrijeme praznog hoda pogona, njihova bi nabavka mogla biti i više nego opravdana.

## 2. Laser

Etimologija riječi laser potječe iz angloameričkoga govornog područja (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja) (Benčić 1990). Laseri emitiraju elektromagnetsko zračenje u nevidljivom (100 – 400 nm i 700 nm – 1 mm) i vidljivom (400 – 700 nm) dijelu spektra.

### 2.1. Sigurnosne klase

Isto ono svojstvo koje lasersko zračenje čini toliko privlačnim za različite znanstvene, tehničke i medicinske primjene, je istovremeno razlog zbog kojeg je ono sposobno uzrokovati ozbiljne ozljede oka i kože. Naime velika količina optičkog zračenja može biti koncentrirana na malom ciljnom području u kratkom vremenskom razdoblju (URL 1).

Kako bi korisnici uređaja temeljenih na laserskom zračenju bili svjesni rizika što ga oni predstavljaju za sebe i okolinu proizvođači su dužni svrstati svoj proizvod u jednu od sigurnosnih skupina. Trenutačno postoje dva glavna standarda za lasersku sigurnost, i to američki FDA 21 CFR part 1040 sec. 1040.10 i međunarodni 60825-1 IEC:1993+A1:1997 (Kishimoto 2001). Iako između njih postoje razlike, općenita podjela u četiri glavne skupine te njihove definicije uglavnom se podudaraju (tablica 1), a najjednostavnije ih je razlikovati prema oznakama jer međunarodni upotrebljava arapske, a američki rimske brojeve.

Tablica 1. *Sigurnosne klase lasera prema (URL 2)*

Klasa	Značenje
1 (I)	Potpuno sigurni prema trenutačnim medicinskim saznanjima.
2 (II)	Samo za vidljive lasere. Zaštita oka refleksom treptaja (< 0.25 s). Namjerno produženo izlaganje oka smatra se rizičnim.
3 (III)	Bilo koje valne duljine. Nema opasnosti od difuzne refleksije osim kod produženog izlaganja oka.
4 (IV)	Opasni za kožu i oko. Sposobni izazvati vatru. Upotreba samo u kontroliranim uvjetima.

Dodatno je veoma važno naglasiti kako za sve lasere koji rade u vidljivom dijelu spektra navedene postavke vrijede samo ako je interakcija s okom uslijedila bez dodatnih optičkih pomagala (dalekozori, durbini ...). Ako to nije slučaj, laseri klasa 2 i 3 postaju opasni i izvan navedenih granica.

Ovisno o tome koja je valna duljina zračenja koje emitiraju te njegova izlazna snaga određeni su glavni parametri interakcije laserskog zračenja s tkivom koje ga apsorbira u nekom vremenskom razdoblju. Tako nastala oštećenja tkiva mogu biti termalne (promjene na tkivu zbog prelaska kritične temperature) i fotokemijske naravi (energija fotona je velika pa može uzrokovati promjene na makromolekularnoj razini).

## 2.2. Elektrooptičko mjerenje duljina

Dvije su osnovne metode mjerenja duljina pri kojima se upotrebljava elektromagnetska energija. Fazna metoda mjerenja pojavila se prije i premda je u počecima bila opterećena nekim problemima (jednoznačnost rezultata mjerenja) utrla je put modernizaciji mjerenja duljina u geodeziji. Pojava i popularizacija impulsne metode omogućila je bezreflektorno mjerenje duljina, što je činilo glavnu pretpostavku za pojavu laserskih skanera.

Obje metode temelje se na vrlo jednostavnom osnovnom principu. Ako su poznati brzina svjetlosti  $c$  i vrijeme  $t$  u kojem ona prijeđe dvostruki put između dviju točaka može se po formuli (1) izračunati i udaljenost  $D$  između njih.

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t. \quad (1)$$

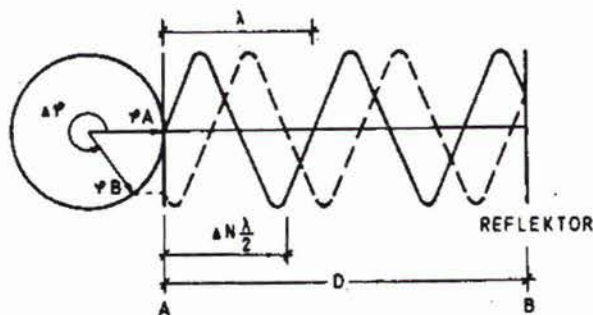
Kako je brzina svjetlosti poznata i konstantna, mjerenje duljine svedeno je samo na dovoljno točno određivanje vremenskog intervala potrebnoga elektromagnetskom valu za prelazak puta od odašiljača do reflektora i natrag.

### 2.2.1. Fazna metoda

Dok moderna tehnologija nije omogućila neposredno mjerenje vrlo malih vremenskih intervala koji su potrebni za mjerenje duljine impulsnom metodom, primjenjivao se u geodeziji uglavnom fazni princip. Pri faznom načinu mjerenja odabrana je



posredna metoda mjerenja vremenskog intervala na osnovi mjerenja fazne razlike između odaslanog i primljenog signala (Benčić 1990). Elektronički uređaj šalje modulirani val nositelj prema reflektoru od kojeg se ovaj odbija. Povratni val je, kao što je na slici 1 vidljivo, pomaknut u odnosu na odaslani. Iz cijelog broja valnih duljina te faznog pomaka možemo dobiti duljinu.



Slika 1. Mjerenje duljine faznom metodom (Benčić 1990).

Za točno mjerenje duljine potrebna je čim veća frekvencija moduliranog vala, a kako bi se riješio problem nejednoznačnosti mjerenih vrijednosti, u mjerenju se upotrebljava više valnih duljina odnosno frekvencija. Tako najviše frekvencije služe za mjerenje milimetarskog reda veličine, a one niže metarskoga i većega. Zbrajanjem podataka u svakom mjernom području dobiva se konačni rezultat. U literaturi s engleskoga govornog područja ta je metoda poznata kao CW (continuous wave).

Narav te metode mjerenja postavlja kao preduvjet dostatni intenzitet povratnog signala te poznavanje fizikalnih svojstava reflektirajuće plohe. Upravo je zbog toga pri tom načinu mjerenja obavezno postavljanje reflektora na cilju.

### 2.2.2. Impulsna metoda

Pri impulsnoj metodi mjerenja duljina elektronički sklop šalje u vrlo kratkom vremenu elektromagnetski impuls prema cilju te se neposredno mjeri vrijeme potrebno za njegov povratak. Iz izmjerenog vremena može se prema formuli (1) izračunati duljina. U literaturi s engleskoga govornog područja često se za ovu metodu susreće i kratica TOF (Time of Flight). Iako je teoretski dovoljno upotrijebiti jedan, najčešće se šalje slijed impulsa s jednakim vremenskim razmakom kako bi se otklonila mogućnost grube pogreške te povećala točnost mjerenja.

Impulsni način mjerenja duljina ima pred faznim nekoliko prednosti:

- kraće trajanje mjerenja,
- jednoznačnost dobivene duljine,
- potrebna manja prosječna izlazna snaga odašiljača u odnosu na fazni te,
- mogućnost mjerenja bez posebnog reflektora na cilju.

Najzanimljivija je ovdje, dakako, posljednja navedena činjenica. Uporabom dovoljno jakog odašiljača impulsa (lasera) izbjegava se potreba za reflektorom na cilju.

Točnost mjerenja duljine laserom najvažniji je čimbenik u određivanju općenite točnosti laserskog skanera, pa joj treba posvetiti posebnu pažnju. Osim vrlo točnog mjerenja vremenskog intervala potrebnog za vraćanje odaslanog impulsa, mjerna elektronika mora biti u stanju dovoljnom točnošću odrediti isti relativni položaj na odaslanom i primljenom signalu. Tako, primjerice, tipični impuls širine 10 ns ima vrijeme podizanja od oko 1 ns, što odgovara 15 cm jednostrukog puta svjetla.

Osim toga visokom točnošću mora biti poznata radna frekvencija oscilatora odnosno brojača jer njezina odstupanja od teoretskih vrijednosti također utječu na točnost mjerenja.

### 3. Laserski skaneri

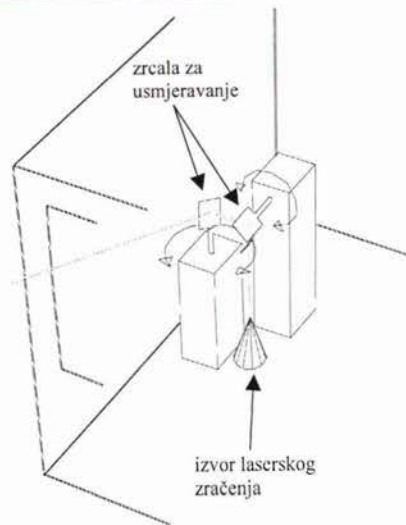
Približavanjem širem krugu korisnika računala dovoljno jakih za obradu velike količine 3D podataka, te evolucijom tehnike bezreflektornog mjerenja duljina visoke točnosti, pojavili su se prije nekoliko godina prvi terestrički laserski skaneri.

#### 3.1. Osnovni princip rada

Princip rada laserskih skanera temelji se na mjerenju polarnih koordinata odnosno horizontalnoga i vertikalnoga kuta te udaljenosti do pojedine točke prostora. Instrument šalje, prema unaprijed zadanom razmaku, slijed laserskih impulsa. Registrirajući ukupni pomak sustava u odnosu na njegov početni položaj te izmjerenu duljinu, računa prostorne koordinate svake točke. Kako bi se postigla veća točnost, mjerenje udaljenosti do svake točke moguće je obaviti u određenom broju ponavljanja.

Veoma važan dio konstrukcije laserskog skanera je rješenje usmjeravanja laserske zrake. Kako bi se moglo postići skaniranje, odnosno izmjera željenog objekta mjerenjem velikog broja točaka u 3D koordinatnom sustavu, potrebno je uz mjerenje duljine dovoljno točno poznavati i horizontalni i vertikalni kut prema njima. Laserski skaneri ne rade kao klasični geodetski instrumenti, na principu neposrednog mjerenja kutova prema pojedinoj točki. To nije potrebno 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.

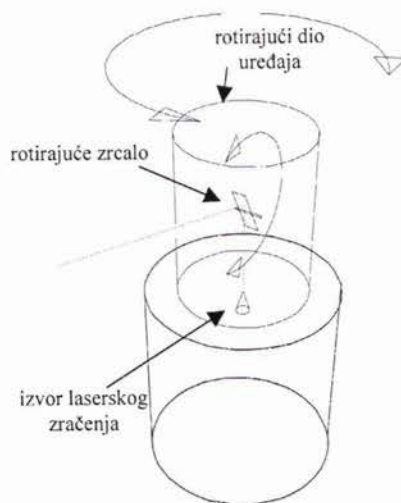
Ovisno o izvedbi laserska se zraka usmjerava u prostoru s pomoću okretanja oko dvije osi. Okretanje oko jedne od njih odvija se puno većom brzinom pa okretanje druge nastupa kada prva završi cijeli zadani ciklus. Dvije su glavne vrste izvedbe tih okretanja, što čini i glavne vrste izvedbe uređaja. Prva od njih temelji se na usmjeravanju zrake s pomoću dvaju zrcala koja se mogu okretati (slika 2). Prvo zrcalo usmjerava zraku u vertikalnoj ravnini i okreće se manjom brzinom. Za svaki postav prvoga, drugo zrcalo prelazi cijeli zadani pojas koji treba izmjeriti te određuje položaj zrake u trenutačnoj horizontalnoj ravnini. Pomak jednog i drugog zrcala moguće je unaprijed odrediti, a ograničen je rezolucijom odnosno najmanjim pomakom sustava sa servo motorima koji ih okreću.



Slika 2. Usmjeravanje zrake pomoću dva zrcala (Cyrax 2500).

Nedostatak je takvog rješenja ograničeno područje koje se može izmjeriti jednim postavom instrumenta. Instrumenti temeljeni na takvom rješenju nisu pogodni za izmjeru unutrašnjosti građevina.

Druga skupina sličnih skanera temelji se na okretanju jednog zrcala dok je pomak u horizontalnom smislu izveden okretanjem dijela uređaja (slika 3). Zbog mogućnosti izmjere većeg područja u jednom postavi takvi su instrumenti pogodni na primjer za upotrebu u unutrašnjosti građevina, gdje je potrebno izmjeriti područje u cijelom krugu oko stajališta.



Slika 3. Usmjeravanje zrake jednim zrcalom (Riegl LMS-Z210).



Osim okretanjem (za puni krug), usmjeravanje laserske zrake u vertikalnoj ravnini moguće je izvesti i osciliranjem zrcala odnosno njegovim okretanjem u jednom i drugom smjeru naizmjenice kako bi se pokrilo samo određeno područje. Neki od trenutno dostupnih uređaja na tržištu (Riegl LMS-Z... serija) nude operateru izbor između tih dvaju načina usmjeravanja zrake čime je moguće mijenjati broj mjerenja u jedinici vremena.

Za neke posebne primjene razvijeni su hibridni sustavi temeljeni na kombinaciji TOF-a i metode triangulacije vidljivim laserskim svjetlom čime, je formiran sustav dopunske milimetarske točnosti na kratkim udaljenostima. Rezultati su pokazali kako je prototip upotrebljavajući 15 mW laserski izvor na 15  $\mu\text{m}$  učinkovit na udaljenostima do 20 m u triangulacijskome modu, a dalje domet može biti povećan uporabom viših laserskih izvora ili TOF načinom rada (Blais i dr. 2000).

### 3.2. Metode određivanja koordinata

Za razliku od geodetskih instrumenata koji služe za, posredno ili neposredno, određivanje prostornih koordinata, laserski skaneri nisu opremljeni uređajima za točno pozicioniranje (centriranje, horizontiranje i orijentiranje). Iako neki proizvođači svoje uređaje (Riegl LMS-Z... serija) opremaju nekim osnovnim dodacima takve prirode (libela za horizontiranje), oni nisu dostatni za navedenu svrhu.

Kao jedno od djelomičnih rješenja problema može poslužiti integracija s GPS uređajem, kojega se senzor ugrađuje na skaner (slika 4), no pretpostavka za to je točno poznavanje odnosa njihovih središta, što kod laserskih skanera često nije dostupno. Uz to takvim pristupom nisu riješeni svi stupnjevi slobode mjerenja u nekom globalnom referentnom sustavu pa ono može poslužiti samo kao dodatak ili u kombinaciji s drugim rješenjima.



Slika 4. Laserski skaner s GPS senzorom (URL 3).

Relativno jednostavnim transformacijskim postupcima moguće je mjerenja obavljena s više stajališta i položaja instrumenta prevesti u zajednički koordinatni sustav. Preduvjet za to je dakako postojanje “preklopa”, odnosno identičnih točaka mjerenih u različitim fazama postupka mjerenja. Ako su pak dovoljnom broju točaka poznate i koordinate u globalnom referentnom sustavu, moguće je daljnje prevodenje dobivenih podataka poznatim postupcima.

Postupak prevodenja uključuje identificiranje zajedničkih točaka u svakom preklapajućem oblaku točaka te njihovo transformiranje u jedinstveni koordinatni sustav uporabom 6-parametarske (*rigid body*) transformacije (Gordon i dr. 2001).

Želimo li izračunati koordinate optičkog središta skanera primjerice za potrebe kalibracije, kao logično rješenje nameće se dobro poznat postupak prostornog presijecanja natrag. Moguće je, ako poznajemo prostorne koordinate dovoljnog broja mjerenih točaka, navedenim postupkom dobiti sve elemente (koordinate optičkog središta uređaja i orijentaciju u traženom koordinatnom sustavu) potrebne za neposredno određivanje koordinata svih ostalih mjerenih točaka.

Za mjerenja koja zahtijevaju visoku točnost i preciznost potrebno je prije postupka mjerenja obaviti i kalibraciju skanera. Postupak se temelji na višestruko ponovljenom mjerenju točaka s poznatim prostornim koordinatama, te na izjednačenju dobivenih rezultata, čime se daje ocjena točnosti. Kalibracija uključuje rješavanje unutarnjih parametara skanera (npr. određivanje optičkog središta) te određivanje njegove mjerne točnosti i preciznosti (Gordon i dr. 2001).

### 3.3. Elementi točnosti i razlučivosti mjerenja

Točnost određivanja 3D koordinata ovisi o mnogim čimbenicima. Glavni su čimbenici točnost (a) udaljenosti, (b) položaja uređaja i (c) smjera laserske zrake (Baltsavias 1999). Svi dijelovi sustava koji čine laserski skaner, ponajprije zbog metode mjerenja duljina, moraju vremenski biti veoma dobro usklađeni jer u suprotnom dolazi do nejednoznačnosti mjerenja, odnosno linearna i kutna mjerenja se ne odnose na istu točku.

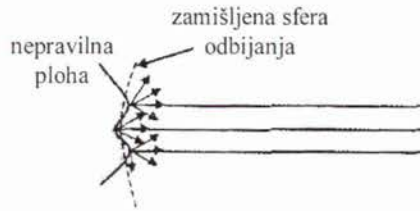
Ograničimo li se na određivanje koordinata u lokalnom sustavu skanera, odnosno ako zanemarimo točnost određivanja njegova položaja i orijentacije u nekom referentnom sustavu, te uz pretpostavku poznavanja modela ponašanja optomehaničkog sustava za usmjeravanje zrake, laserski duljinomjerni sustav ostaje glavni čimbenik koji određuje njegovu ukupnu točnost.

Njegove su osobine, uz dio što ga čini kvaliteta i mogućnosti mjernog elektroničkog sklopovlja, određene i fizikalnim svojstvima laserske svjetlosti odnosno optičkog dijela duljinomjernog sustava. Ako se pri laserskome mjerenju duljina ne upotrebljava reflektor na cilju, reflektirani signal nije određen jednom točkom jer reflektirajuća ploha u obično nije pravilna (slika 5). Izmjerena duljina biti će srednja vrijednost površine od koje se svjetlo odbija (Kishimoto 2001).

Zbog toga veličina područja koje reflektira laserski impuls uvelike određuje i točnost izmjerene duljine, a ona je dana formulom (2), gdje je  $Z$  udaljenost do reflektirajuće plohe, a  $\Delta\theta$  kut rasapa laserske zrake. U engleskoj stručnoj terminologiji ta je veličina poznata kao *laser footprint* (otisak lasera).

$$\text{otisak lasera} = 2 \cdot Z \cdot \tan(\Delta\theta). \quad (2)$$





Slika 5. Odbijanje od nepravilne plohe (Kishimoto 2001).

Tako 1 mrad kuta rasapa daje otisak od približno 10 cm na 100 m udaljenosti do reflektirajuće plohe. Iz toga je logično zaključiti kako točnost mjerenja duljine između ostalog ovisi i o karakteristikama reflektirajuće plohe. Amplituda primljenog signala ovisna je o stupnju refleksnosti cilja te o njegovoj lokalnoj normali (nagnutost u odnosu na dolazeću zraku). Veća vertikalna razvedenost ciljne plohe u okviru osvijetljene površine također umanjuje točnost dobivenih rezultata zbog teže identifikacije istog mjesta na odaslanom i primljenom impulsu, koja nastaje kao posljedica nepovoljnijeg odnosa signal/šum. Tu je vrlo važno spomenuti neovisnost točnosti o udaljenosti odnosno o otisku zrake u slučaju slabo vertikalno strukturirane ciljne površine.

Razlučivost je drugi važan čimbenik koji određuje mogućnosti laserskog skanera. Ona je neposredno ovisna o najmanjem pomaku (razlučivosti) optomehaničkog sustava za usmjeravanje zrake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Analogno otisku zrake i razlučivost je obrnuto proporcionalna udaljenosti do reflektirajuće plohe te diferencijalnom pomaku zrake u pojedinoj ravnini.

U nekim slučajevima važno je znati dimenzije najmanjeg uređaja prepoznatljivog objekta. Najmanji prepoznatljivi objekt u okviru laserskog otiska ne ovisi o njegovoj veličini nego ponajprije o njegovu koeficijentu refleksnosti (Baltsavias 1999). Pretpostavimo da je daljinomjer sposoban mjeriti udaljenost do ravne plohe površine  $A$  koeficijenta refleksije 5%. Analogno bi najmanji prepoznatljivi objekt na istoj udaljenosti ali koeficijenta refleksije 100% morao imati površinu  $A/20$ . Osim navedenoga na određivanje najmanjeg objekta utječe još dosta čimbenika (valna duljina lasera, nagib plohe, osjetljivost detektora i dr.) koji ovdje nisu uzeti u obzir.

U konkretnoj analizi uređaja upotrijebljeni su podaci koje za svoj uređaj navodi pojedini proizvođač, a oni se kod svih odnose na točnost (accuracy) iako bi možda opravdanije bilo govoriti o unutarnjoj točnosti, odnosno preciznosti. Za točnost, bias i preciznost moraju biti dani kao mjera sposobnosti sustava (Beraldin i dr. 1993).

### 3.4. Dodatne mogućnosti

Većina terestričkih laserskih skanera koji se mogu upotrebljavati u geodetske svrhe opremljena je, uz standardne mogućnosti, i nekim dodacima. Jedan od veoma važnih je ugrađena (CCD) kamera za vizualni izbor objekta mjerenja. Takav će dodatak uvelike olakšati izbor područja mjerenja te općenito upravljanje uređajem. Podaci prikupljeni laserskim skanerima mogu se rabiti i za vizualizaciju. Veoma važna informacija o objektu koji želimo prikazati je boja svake odnosno sva-

ke mjerene točke, pa neki uređaji i nju registriraju upotrebom ugrađene CCD kamere .

Osim navedenoga većina skanera omogućuje bilježenje jačine povratnog signala. Povezivanjem podataka o položaju s onima o jačini signala moguće je dobiti pseudokolorne prikaze kao na slici 6.



Slika 6. Fotografija i pseudokolorni prikaz Državne Opere u Beču (URL 3).

### 3.5. Obrada podataka skaniranja

Laserskim skaniranjem otvara se mogućnost prikupljanja velike količine 3D podataka o objektu iz prirode. Skup točaka u 3D koordinatnom sustavu naziva se oblak točaka (*point cloud*). Za neke od primjena bit će dostatno koristiti se podacima u njihovu izvornom obliku, bez ili s minimalnom naknadnom obradom. Iz izmjerenog oblaka točaka moguće je gotovo trenutačno obavljati mjerenja s pomoću računala bez fizičkog pristupa konkretnom objektu.

Za jednostavnije vizualizacije ili prezentacije dovoljno je iz prikupljenih geometrijskih podataka jednostavnim automatskim algoritmima generirati topologiju izmjerenih objekata (nepravilne plohe) čime se dobivaju njihovi vrlo vjerni modeli. Svi proizvođači laserskih skanera uz svoje uređaje isporučuju i softver s tim mogućnostima

No, želimo li podatke dovesti na višu razinu, odnosno s pomoću oblaka točaka modelirati jednostavne 3D grafičke elemente te ih time učiniti pogodnim temeljem za formiranje različitih informacijskih sustava, potrebna je opsežna naknadna obrada i kompleksniji specijalizirani softver. Algoritmi za automatsko segmentiranje (odjeljivanje) mjerenih podataka te računanje najboljeg uklapanja u 3D grafičke elemente koji su povoljni za izgradnju informacijskog sustava još uvijek nisu dostigli razinu potrebnu za potpuno preuzimanje toga dijela posla. Čak i kada se koriste alati za automatsko segmentiranje potrebno je puno manualne obrade (Lemmens i van den Heuvel 2001).

Ipak i trenutačna razina nekih od njih stručnjaku uvelike olakšava naknadnu obradu obavljanjem manualnog dijela posla. Princip poluautomatske obrade temelji se, uopćeno, na zadavanju praga tolerancije odjeljivanja segmenata te izboru 3D grafičkih elemenata koji će svakim od njih biti modeliran. Njegov položaj u prostoru i dimenzije određeni su geometrijom promatranog segmenta podataka.

### 3.6. Prikaz terestričkih laserskih skanera na tržištu

Prije eventualne nabavke svakog instrumenta takvog cjenovnog razreda potrebno je dobro odrediti potrebe za vrstom i kakvoćom podataka koji će njime biti prikupljeni. Među njih svakako pripada točnost podataka, vremenski uvjeti rada, rad na otvorenom ili zatvorenom, vrste objekata koji će biti mjereni i slično. Sljedeći prikaz nekoliko laserskih skanera trenutno dostupnih na tržištu sastavljen je isključivo na osnovi proizvođačkih specifikacija, dok su njihove osnovne karakteristike prikazane u tablici 2.

Instrument CyraX 2500 tvrtke Cyra Technologies incorporated pripada u skupinu usmjerenih laserskih skanera, odnosno nema mogućnost okretanja cijelog nosača skanirajućeg sustava, pa mu je mjerni raspon, u jednom postavu, ograničen na 40° u horizontalnom i vertikalnom smislu. Upotrebljava laser klase 2, koji emitira vid-

Tablica 2. Usporedni prikaz karakteristika laserskih skanera.

	Cyrex 2500	Riegl LMS-Z360	Callidus 1.1	Iris 3D	GS 100
Proizvođač	Cyra Tech. inc (URL 4)	Riegl LMS (URL 3)	Callidus Precision Systems (URL 5)	Opetch inc. (URL 6)	Mensi corp. (URL 7)
Laser	klasa 2	klasa 1	klasa 1	klasa 1	klasa 2
nesigurnost(mm) @ udaljenosti(m)	6@50 1 $\sigma$	12@200 1 $\sigma$	5@32	10@100	6@?
mjerno područje (m)	100	2–200	–80	3–350	2–100
vel.točke(mm)@ udaljenosti(m)	6@50	200@100	?	20@100	0.3 – 8@ ?
mjerni raspon H/V	40/40	360/90	360/180	?	360/60
rezolucija mm/m	0.25 @ 50	?	?	20@100	?
registriranje intenziteta	D	D	N	?	?
registracija boje	?	D	?	?	D
Software/modeler	D	D	D	D	D
Slika					



ljivo svjetlo zelene boje, a najveća udaljenost mjerenja duljina iznosi oko 100 m, ali je preporučljiva do 50-ak, gdje postiže nesigurnost od 6 mm. Osim glavnog sustava za 3D skaniranje u uređaj su ugrađeni i moduli za registraciju intenziteta povratnog signala te CCD kamera koja služi za usmjeravanje uređaja te izbor područja skaniranja. Navedena tvrtka proizvodi i kvalitetni softver za vizualizaciju i upravljanje neobrađenim podacima mjerenja, ali i veoma kvalitetan dodatak za 3D modeliranje s mogućnošću poluatوماتске segmentacije (odjeljivanje) zasebnih objekata.

Tvrtka Riegl Laser Measurement Systems proizvodi tri modela laserskih skanera, a po svojstvima je u sredini LMS-Z360. Horizontalni pomak skanirajuće laserske zrake ostvaruje se okretanjem nosača sustava za 360°, dok je vertikalni raspon 80°, i to  $\pm 40^\circ$  od horizontalne ravnine. Takva konstrukcija omogućava izmjeru velikog područja u jednom postavu instrumenta. Daljinomjerni dio sustava upotrebljava laser klase 1 (nevidljivi), a na 200 m postiže nesigurnost mjerenja duljina od 12 mm. Osim podatka o intenzitetu povratnog signala taj instrument može za svaku mjerenju točku registrirati i boju svjetlosti, što uvelike poboljšava dojam pri vizualizaciji s pomoću oblaka točaka. Softverski dodaci sastoje se od sučelja za izbor parametara skaniranja te sustava za 3D modeliranje, ali na nižoj razini automatizacije od konkurentnog proizvoda tvrtke Cyra.

Calidus 1.1 je još jedan od predstavnika skupine laserskih skanera koji horizontalni pomak skanerske zrake rješavaju okretanjem jednog dijela instrumenta. Pokretni dio može se okrenuti za puni krug (360°), dok vertikalni pojas skaniranja iznosi 180°. Nešto drugačija konstrukcija u odnosu na LMS-Z360 omogućava tom instrumentu izmjeru cijelog područja iznad instrumenta, a nepokriven ostaje tek dio tla oko stajališta. U instrument je ugrađen daljinomjer temeljen na laseru klase 1 s nesigurnošću određivanja duljina od 5 mm na 30-ak metara. Ugrađena CCD kamera s mogućnošću optičkog povećanja (zoom) omogućava slikanje mjerenog objekta ili prostora, koje ovisno o količini svjetlosti može biti crno-bijelo ili u boji. Uz taj instrument se također može kupiti softver za upravljanjem preko računala te dodaci za upravljanje i osnovnu obradu mjerenih podataka.

Konstrukcijski vrlo sličan Cyraxu 2500 je i skaner Iliris 3D kanadske tvrtke Optech incorporated. Ugrađeni duljinomjerni dio sustava temelji se na laseru klase 1, što ga čini potpuno sigurnim čak i uz uporabu optičkih pomagala (durbini i dr.) na području mjerenja. Prema proizvođačkim podacima točnost je jednakog reda veličine kao i konkurentski proizvod tvrtke Cyra unatoč upotrijebljenom laseru niže klase. Ugrađena CCD kamera služi kao pomagalo za određivanje radnog područja, dok je upravljanje i postavljanje mjernih parametara osigurano preko računala. Uz uređaj je osiguran i softver za sjedinjavanje podataka više postava instrumenta u zajednički koordinatni sustav te njihovu obradu.

Vrlo je sličan, kako konstrukcijski tako i po mogućnostima, i GS-100 tvrtke Mensi corp. Područje mjerenja u jednom postavu instrumenta je veliko zbog mogućnosti okretanja oko vertikalne osi za 360°, dok je vertikalno vidno polje manje te iznosi 60°. Upotrijebljeni je laser, klase 1, po mogućnostima sličan ostalim uređajima, a korisniku je na raspolaganju i mogućnost bilježenja informacije o boji svake mjerenne točke s pomoću ugrađene CCD kamere. Tvrtka Mensi nudi i cijelu programsku podršku kako za upravljanje mjerenim podacima (oblak točaka) tako i za 3D modeliranje.

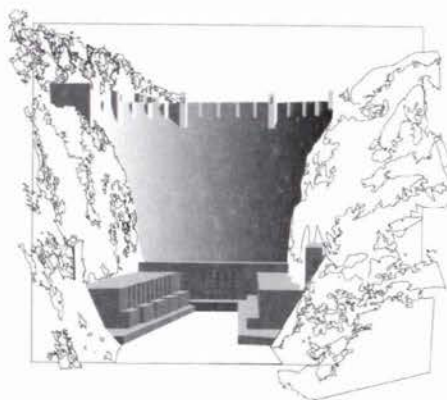
## 4. Primjena

Mogućnosti primjene velike količine točnih podataka prikupljenih terestričkim laserskim skanerima već su i sada veoma velike, a stalno povećavanje procesne snage modernih računala praktički svakodnevno otvara i nove.

Mnoštvo točnih 3D prostornih podataka prikupljenih u, slobodno možemo reći, jednom trenutku postojanja nekog objekta (građevine) pandan su fotografiji. Razlika između njih je dakako za cijelu jednu dimenziju u korist prvih. Njihovom naknadnom obradom moguće je izvoditi uopćene modele s obzirom na konkretne potrebe, a izvorni podaci mjerenja ostaju kao bogat i brzo dostupan izvor informacija o promatranom objektu ili cijelom sustavu.

### 4.1. Mjerenje deformacija

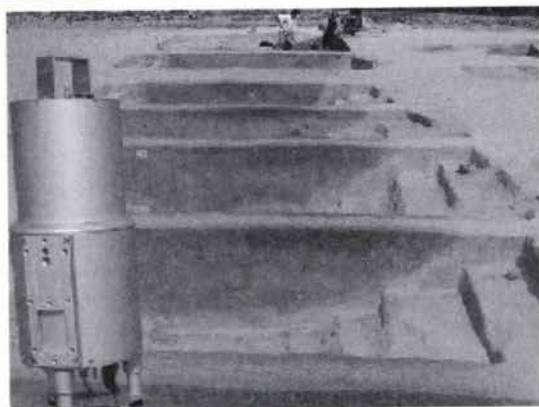
Pri strukturalnom nadgledanju lasersko skaniranje može se smatrati naprednijim od geodetskih metoda (izmjera, GPS) koje mogu pratiti deformaciju na samo ograničenom broju točaka, dok skaner može mjeriti deformacijsku plohu (Lichti i dr. 2000). Laserski su skaneri više nego pogodni za praćenje deformacija na kapitalnim građevnim objektima poput brana (slika 7), mostova i sl. Automatska 3D izmjera različitih objekata bez dodira postala je jedna od važnih zadaća inženjerske geodezije (Roić 1996).



Slika 7. Mjerenje deformacija na branama s pomoću laserskog skanera (URL 6).

### 4.2. Topografska izmjera

Opsežni radovi na detaljnoj topografskoj izmjeri mogu biti izvedeni laserskim skanerima. Izmjera npr. arheoloških iskopina za potrebe dokumentacije zahtijeva visoku točnost i gustoću mjerenja, a to je upravo ono što laserski skaneri pružaju (slika 8).



Slika 8. Topografska izmjera arheoloških iskopina (URL 3).

### 4.3. Industrijska izmjera

Laserski skaneri našli su svoje mjesto u svakoj grani ljudske djelatnosti koja zahtijeva prikupljanje velike količine točnih 3D podataka o objektima i prostoru. Jedna od njih je svakako i zrakoplovna industrija (slika 9), gdje ih se može naći već neko vrijeme.



Slika 9. Model zrakoplova dobiven laserskim skanerom (URL 3).

### 4.4. Izmjera objekata kulturnog naslijeđa

Prilikom izmjere pročelja (slika 10) i ostalih dijelova zgrada kulturnog naslijeđa, lasersko skaniranje daje samostalno ili u kombinaciji s metodama terestričke fotogrametrije veoma dobar odnos uložena i dobivena. Vrlo detaljan i brzo dostupan digitalni visinski model pročelja uvelike će olakšati proces dobivanja odgovarajućeg 3D digitalnog ortofota.





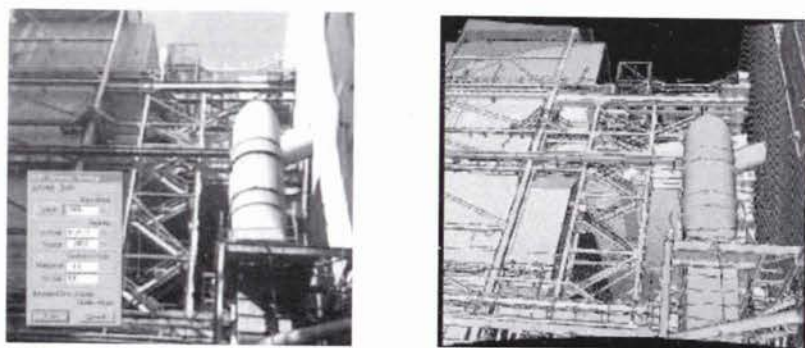
Slika 10. Detalj pročelja dvorca Schönbrunn u Beču dobiven laserskim skanerom (URL 3).

#### 4.5. 3D pogonski katastri

Na kraju, ali nikako najmanje važno, svakako treba spomenuti i “kao izgrađeno” modele. Izrada modela iz mjerenih podataka ( $x, y, z$ ) rezultira mogućnošću vjernog prikaza objekta te se taj postupak naziva *as built* ili “kao izgrađeno” (Roić i dr. 2001).

“Kao izgrađeno” je pojam koji se u posljednje vrijeme vrlo često spominje u različitim područjima. Svaki put kada se želi naglasiti kako model nekog objekta iz prirode prikazuje njegov izgrađeni oblik, a ne neki projektirani ili teoretski, upotrebljava se upravo taj pojam. S druge strane, kada neki model svojom detaljnošću vjerno prikazuje original iz prirode nazivamo ga “kao izgrađeno”.

Neovisno o tome treba li nam “kao izgrađeno” model za potrebe pogonskoga katastra, projekta remonta pogona ili nešto treće, najlakše ćemo ga pribaviti laserskim skaniranjem, uz iznimno povoljan omjer uloženoga i dobivenoga. Za industrijske primjene, vrijeme potrebno za izmjeru vrlo je važan činitelj jer treba izbjegavati duža razdoblja zaustavljanja pogona (Stephan i dr. 2002). Prilikom izmjere rafinerija ili sličnih pogona s mnoštvom vodoravno i uspravno razvedenih geometrijskih oblika (cijevi, kotlovi i dr.) lasersko je skaniranje posebno isplativo (slika 11).



Slika 11. Fotografija i rezultat mjerenja Monroe elektrane (URL 8).

## 5. Zaključak

Laserski skaneri te velika količina brzo dostupnih i točnih podataka o prostoru i objektima u njemu kao proizvod njihova rada otvaraju nove mogućnosti izmjere. Geodetskom stručnjaku oni mogu olakšati postojeće zadatke, ali i otvoriti nova područja.

Prikupljanje velike količine podataka o prostoru moguće je već duže vrijeme obaviti različitim fotogrametrijskim i drugim geodetskim metodama. No, do pojave laserskih skanera ti su postupci ipak zahtijevali za nekoliko redova veličine dugotrajniji postupak od izmjere preko obrade podataka do informacije kao krajnjeg rezultata. Iako su trenutačno za naše uvjete još preskupi, s proširivanjem ponude na tržištu kroz uključivanje sve većeg broja tvrtki koje ih proizvode zasigurno će im se smanjiti i cijena. To će ih pak učiniti veoma zanimljivima i širem krugu korisnika.

Pogonski katastri vrlo su važan dio gospodarski isplativog sustava za upravljanje industrijskim i drugim postrojenjima. Činjenica da se njihova kvaliteta ogleda kroz ažurnost, točnost i dostupnost podataka nije dvojbena. Priroda industrijskih i drugih pogona u pogledu njihova oblika, složenosti i nepristupačnosti rezultira potrebom za što učinkovitijim sustavom za prikupljanje podataka o njima. Geodeti već dugo primjenjuju klasične metode izmjere prilikom mjerenja za potrebe pogonskih katastarsa, a laserski im skaneri pri tome nude novu dimenziju učinkovitosti.

## Literatura

- Baltsavias, E.P. (1999): Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 2–3, 199–214.
- Benčić, D. (1990): Geodetski instrumenti. Školska knjiga, Zagreb.
- Beraldin, J.-A., El-Hakim, S.F., Cournoyer, L. (1993): Practical range camera calibration. SPIE Proceedings, Videometrics II. Vol 2067: 21–31. Boston, MA. September 7–10.
- Blais, F., Beraldin, J.-A., El-Hakim, S.F. (2000): Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation, and Photogrammetric 3D Laser Scanning System. SPIE Proceedings, AeroSense, Orlando, FL, vol. 4035.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. (2001): Application of a High-Resolution, Ground-Based Laser Scanner for Deformation Measurements. Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurement, Orange, California, SAD.
- Kishimoto, H. (2001): Precise Reflectorless Distance Measurement. GIM international, Vol. 15, No. 9.
- Lemmens, M., van den Heuvel, F. (2001): 3d Close-range Laser Mapping Systems. GIM international, Vol. 15, No. 1, 30–33.
- Lichti, D., Stewart, M., Tsakiri, A., Snow, A. (2000): Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. Geomatics Research Australasia, No. 72.
- Roić, M., Mastelić Ivić, S., Matijević, H. (2001): Moderni pogonski katastri – as built. U Zborniku radova Drugog Hrvatskog kongresa o katastru, urednici Roić/Kapović, 161–170, Zagreb.

- Roić, M. (1996): Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Geowissenschaftliche Mitteilungen – TU Wien, (Dissertation), Heft 43, 1–78, Wien.
- Roić, M., Matijević, H. (1997): Računalom podržano upravljanje prostorom. Zbornik radova Prvog Hrvatskog kongresa o katastru, urednici Roić/Kapović, Zagreb.
- Stephan, A., Heinz, I., Mettenleiter, M., Härtl, F., Fröhlich, C., Dalton, G., Hines, D. (2002): Laser Sensors for As-Built-documentation. Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and structural Engineering, Kahmen/Niemeier/Retscher (Eds).
- Solarić, N., Benčić, D. (1987): Razvoj novih elektrooptičkih daljinomjera s posebnim osvrtom na impulsne daljinomjere. Geodetski list, 10–12, 319–328.

URL 1: <http://www.tuwien.ac.at/islt/safety/>

URL 2: <http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfPCD/ShowCFR.cfm?FR =1040.10>

URL 3: <http://www.riegl.com/>

URL 4: <http://www.cyra.com>

URL 5: <http://www.callidus.de>

URL 6: <http://www.optech.on.ca/>

URL 7: <http://www.mensi.com>

URL 8: <http://www.msmonline.com/>

## Ground based laser scanners

*ABSTRACT. Time of flight lasers are being used for distance measuring in surveying for over ten years, and in the last few years even without target reflector in millimeter order of magnitude. Steep curve of increase in raw processor power, together with all-round availability of high-end 3D graphic accelerators, opened a whole lot of new 3D modeling application areas. Based on these two facts, first ground based laser scanners appeared. This work describes, through analysis of four exemplars, their basic operation principles.*

*Keywords: Ground based laser scanners, reflectorless distance measuring, as built, utility cadastre.*

*Primljeno: 2002-6-7*