

# PRIMJENA SLAM TEHNOLOGIJE

## SAŽETAK:

Uz ubrzani razvoj laserske metode snimanja, bespilotne letjelice i terestičke laserske skenere, veliku pozornost zaslužuje razvoj brojnih mobilnih sustava koji omogućuju integraciju više senzora na pokretnim platformama te masovno prikupljanje trodimenzionalnih podataka u pokretu. Same metode masovnog prikupljanja podataka otvaraju velike poslovne mogućnosti u geodetskoj praksi. Jedna od takvih metoda je simultano (istovremeno) određivanje položaja i kartiranje (SLAM). To je metoda direktnog kartiranja nepoznatog područja pomoću jednog ili više senzora uz istovremeno određivanje položaja senzora. Trenutačno takva metoda najviše je orijentirana razvoju u robotici i autonomnom kretanju vozila, što ne znači da već sada takva tehnologija nije utjecala na promjenu i način prikupljanja podataka u geodeziji i geoinformatici. U ovom će članku biti opisan način i princip rada temeljen na SLAM algoritmu te uređaju GeoSLAM ZEB-REVO. Takva metoda omogućuje dinamičko skeniranje željenog prostora uz određivanje položaja (lokalizacije) mjernog sustava u realnom vremenu, koristeći HOKUYO 2D laserski skener i inercijalni navigacijski sustav (IMU), te se registracija skenova obavlja vrlo jednostavno, brzo i u potpunosti automatizirano.

**KLJUČNE RIJEČI: SLAM ALGORITAM, GEOSLAM, ZEB-REVO, 3D LASERSKO SKENIRANJE, „BLACK-BOX” PRINCIP, OBLAK TOČAKA**

## ABSTRACT:

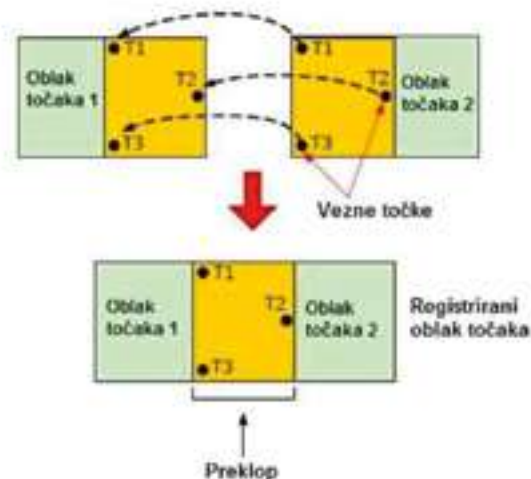
With rapid development of laser scanning methods, UAVs and terrestrial laser scanners, big attention deserves development of new mobile system technology which allows integration of more than one sensor for data collection on moving platforms. The methods of massive data collection provide big business opportunities in geodesy. One of those technologies is simultaneous Localization and Mapping (SLAM). SLAM method is determining position of sensor and measuring mapping its surrounding at the same time. Although these systems are primarily used for automated robot and vehicle movement, it doesn't mean that this type of technology hasn't already affect the ways of mass data collection in geodesy and geoinformatics. In this paper we are describing way and principle of SLAM algorithm on GeoSLAM ZEB-REVO system. This technology allows scanning object of interest in movement while simultaneously localizing itself in real time by using HOKUYO 2D laser scanner, and inertial navigation system (IMU). That way post processing registration of scans is made very simple, fast and fully automated.

**KEY WORDS: SLAM ALGORITHM, GEOSLAM, ZEB-REVO, 3D LASER SCANNING, „BLACK BOX” METHOD, POINT CLOUD**

# 1. Uvod

Ukratko će biti objašnjen princip rada laserskih sustava jer je to bitno za shvaćanje SLAM metode rada te razlike između njih. Prije samog objašnjenja principa rada bitno je znati što LASER kao takav znači. Riječ LASER engleska je skraćenica od Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, odnosno na hrvatskom, uređaj koji emitira snop fotona. Danas se takva tehnologija primjenjuje u više grana, medicini, vojsci, znanosti, industriji itd. (Kordić, 2016). Ono što nas zanima je kakvi laseri se koriste u geodeziji. Koriste se poluvodički laseri i laseri s čvrstom jezgrom, visoki intenzitet u kombinaciji s visokim stupnjem kolimacije. Svaki laser se sastoji od tri glavna dijela. Prvi dio lasera je materijal koji sadrži atome čiji elektroni mogu biti pobuđeni i podignuti na višu energetska razinu pod djelovanjem izvora zračenja. Drugi dio lasera je izvor koji omogućuje kontinuirano stvaranje energije. Postupak kontinuiranog stvaranja energije kod lasera s čvrstom jezgrom naziva se optičko „pumpanje“. Laseri s čvrstom jezgrom koriste diode kao izvor energije, dok se kod poluvodičkih lasera kao izvor energije koristi električna struja. Treći dio lasera su zrcala od kojih je jedno zrcalo u potpunosti reflektivno, dok je drugo zrcalo djelomično propusno (Kordić, 2016). Princip rada sličan je klasičnim geodetskim instrumentima, razlika je u brzini i količini prikupljanja podataka. Proces skeniranja s laserskim skenerom relativno je jednostavan, bitan je odabir pogodnog stajališta za skener te postavljanje mjernih meta (tzv. sfere ili crno-bijeli markeri), odabir parametara skeniranja (korišteni senzori, rezolucija, opcija bojanja skena, područje skena itd.) i samog procesa skeniranja koje traje ovisno o odabranim parametrima. Odabir pogodnog stajališta, kao i broja stajališta, ovisi o objektu koji se skenira, ali i o iskustvu operatera. Treba voditi računa da se zahvati cijeli objekt kako naposljetku ne bi bilo "rupa" u oblaku točaka. Također, vrlo je bitno unaprijed znati koja će se metoda registracije koristiti u naknadnoj obradi. Pod registracijom oblaka točaka podrazumijeva se translacija i rotacija više oblaka točaka u jedinstveni koordinatni sustav. Pošto je prvi svakom postavljanju skenera na odabranu lokaciju definiran novi lokalni sustav, registracija je prvi i neizostavni postupak u procesu obrade podataka. Naravno, pos-

toji više načina i vrsta registriranja, najpopularnija je pomoću meta i uklapanje skenova pomoću ploha (engl. Cloud-to-cloud metoda). Registriranje pomoću meta (sfera) koristi karakteristične točke koje softveri mogu automatski raspoznati na oblaku točaka za povezivanje dva susjedna skena. Bitno je osigurati da su minimalno 3 takve točke vidljive na oba skena kako bi bilo moguće provesti registraciju.



Slika 1. Osnovni princip registracije



Slika 2. Mjerne mete – sfere

## 2. SLAM metoda snimanja

Tehnološki razvoj omogućio je postavljanje laserskih skenera na pokretne platforme te njihovu integraciju s drugim mjernim uređajima. Naziv za takve sustave je mobilni sustavi za kartiranje (engl. Mobile Mapping System). Oni su omogućili detaljne izmjere velikih područja u kratkom vremenu, kao i mogućnost brzog ažuriranja podataka. Danas već pos-

toji iznimno veliki broj primjena koje mobilni sustavi pokrivaju. Nedostaci statičnih skenera su vremenska ograničenost snimanja, obrada podataka, težina uređaja te snimanje zahtjevnih objekata poput špilja, šuma itd.

Upravo zbog navedenih nedostataka pojavila se potreba za mobilnim sustavima, koji će biti praktičniji i jednostavniji za upotrebu, malih dimenzija i manje mase od klasičnih terestičkih, a kvaliteta i količina prikupljenih podataka neće biti znatno degradirana.

SLAM je prvobitno nastao u robotici za potrebe navigacije autonomnih vozila u nepoznatim prostorima bez sudaranja u zidove, ljude odnosno ostale prepreke. U zatvorenim prostorima nije se moguće oslanjati na GPS navigaciju stoga su inženjeri razvijali algoritme koji bi istovremeno kartirali i navigirali kroz prostor. SLAM uređaji koriste podatke senzora kako bi kreirali sliku prostora u kojem se nalaze kao i odredili svoju poziciju u tom okruženju. Takvi senzori mogu koristiti vizualne podatke (poput kamere) ili ljudskom oku nevidljive izvore (poput sonara, radara itd.) te se mogu pozicionirati koristeći odometriju (broj okretaja kotača) i kompas, inercijalni sustav (IMU – Inertial measurement unit) te ostale senzore. (URL 1.)

U ovome članku objasniti ćemo princip rada SLAM metode na mobilnom laserskom skeneru zvanom ZEB-REVO (slika 3). Komponente ručne jedinice uređaja čine HOKUYO UTM 30LX laserski 2D profiler, inercijalni mjerni sustav te GoPRO Hero 5 kamera. Uređaj ne sadrži integrirani GNSS prijemnik. Kratke specifikacije dane su u Tablici 1. Zeb-Revo je proizvod tvrtke Geo SLAM iz Velike Britanije temeljen na komercijaliziranoj verziji ZEBedee, 3D senzora razvijenog od strane Australijske nacionalne znanstvene agencije CSIRO (Zalović i dr. 2017). Možda niste upoznati s CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), ali ste sigurno upoznati s njihovim radom, izumili su Wi-Fi, dugotrajne kontaktne leće itd.



Slika 3. Uređaj GeoSLAM ZEB-REVO

Tablica 1. Specifikacije uređaja ZEB-REVO:

<b>Doseg skenera</b>	<b>30 m</b>	<b>Kapacitet pohrane</b>	<b>55 GB</b>
<b>Broj točaka/s</b>	43.200	<b>Veličina sirovih podataka</b>	10 MB / min skena
<b>Rezolucija skenera</b>	0,625°horizontalno 1,8°vertikalno	<b>Veličina obrađenih podataka</b>	8 MB / min skena
<b>Područje skena</b>	270° x 360°	<b>Relativna točnost</b>	2 – 3 cm
<b>Klasa skenera</b>	Klasa 1	<b>Apsolutna točnost</b>	3 – 30 cm
<b>Valna duljina</b>	905 nm	<b>IP klasa</b>	IP64
<b>Brzina rotacije skenera</b>	0,5 Hz	<b>Masa cijelog sustava</b>	4,1 kg (skener - 1 kg)
<b>Autonomija baterije</b>	4 sata	<b>Dimenzije</b>	86 x 113 x 287 mm

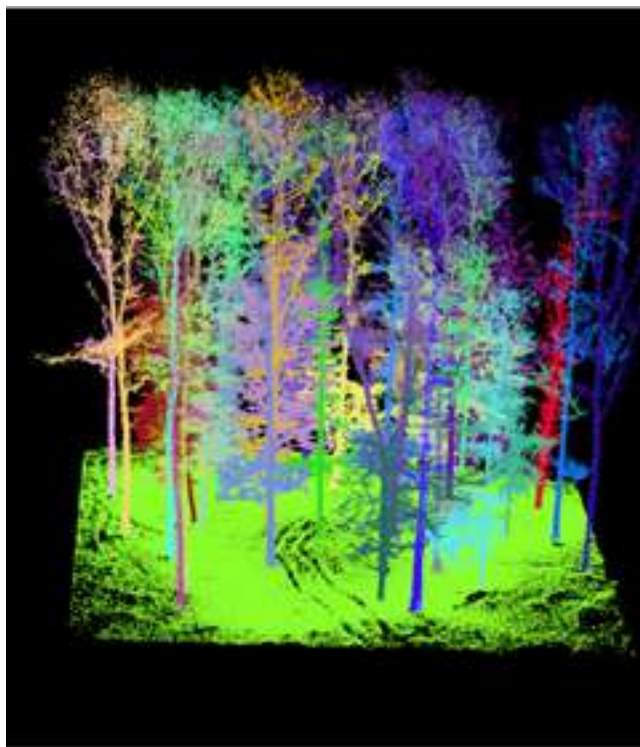
Specifičan princip rada mobilnog laserskog skenera i SLAM tehnologije je da skeniranje započinje i završava na otprilike istom mjestu, s uređajem postavljenim na ravnu plohu u horizontalnom položaju zbog procesa inicijalizacije. Kod skeniranja glava laserskog profilerla okreće se oko horizontalne osi dok je uređaj u pokretu. Laserski profiler emitira svjetlost u infracrvenom spektru te koristi tzv. „time-of-flight“ metodu mjerenja udaljenosti, što znači da mjeri udaljenost do objekta mjerenjem polovine vremena potrebnog da laserska zraka dođe do objekta i reflektira se natrag do prijemnika (Nocerino i dr. 2017). Uz korištenje podataka dobivenih inercijalnim sustavom profili se povezuju pomoću SLAM algoritma, koji određuje 6 stupnjeva slobode (3 translacije i 3 rotacije) kao funkciju vremena za potrebe transformacije iz koordinatnog sustava skenera u lokalni koordinatni sustav objekta te na osnovi toga kreira 3D oblak točaka (Bosse i dr. 2012). SLAM algoritam koristi ICP (engl. Iterative closest point) metodu također poznatu kao već navedena „cloud-to-cloud“ metoda. Algoritam iterativnim postupkom odredi trajektoriju kretanja te za svaku točku te trajektorije projiciranjem sirovih mjerenja stvara 3D oblak točaka. U svakom koraku registracije i određivanja trajektorije vremenski se prozor za obradu povećava za diferencijalno mali dio



bi otprilike trajala i sama obrada podataka. Konačni proizvodi su 3D oblaci točaka u \*.las formatu te prikaz prijedene trajektorije u \*.ply formatu.

## 4. Primjena SLAM-A

Područja primjene SLAM tehnologije vrlo su raznolika. Najbolji rezultati dobivaju se snimanjem područja na kojem postoji veliki broj specifičnih detalja kao što su područja unutrašnjosti zgrada, špilje, šume i slični objekti. Konkretan primjer za korištenje i obradu podataka dobivenih SLAM tehnologijom prikazan je za šume (slika 7).



Slika 7. 3D prikaz šume

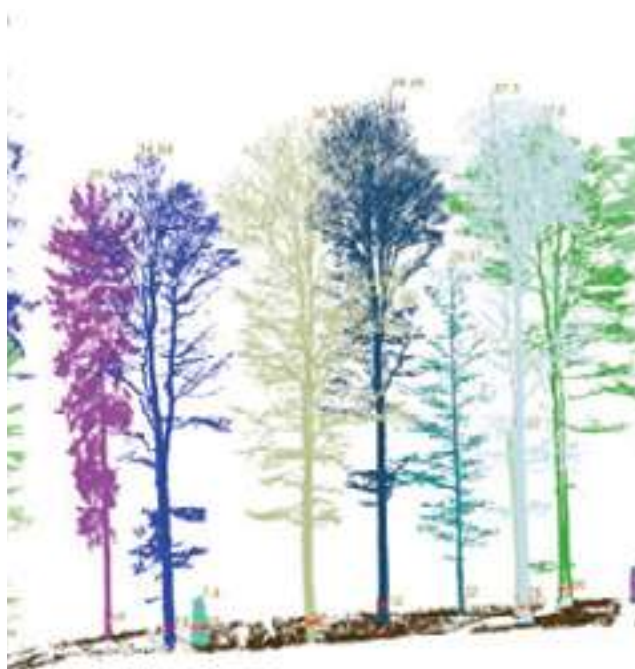
Putem besplatnog programa 3D Forest moguće je napraviti segmentaciju šume, vizualizaciju te izvući parametre za svako pojedinačno stablo. Program je napravila ekipa stručnjaka ekologa, šumara, GIS specijalista i programera iz Češke. Također, s istom aplikacijom moguće je izvući podatke kao što su opseg, visina, volumen stabla te se iz toga može zaključiti kako ono utječe na okolinu. Sa SLAM tehnologijom moguće je u kratkome vremenu snimiti veliko područje, u ovom slučaju veliki dio šume. Nakon snimanja podatci se vrlo lako i brzo prebacuju na računalo te je moguće napraviti kompletnu analizu

putem aplikacije (URL 2.). Kao rezultati analize dobiju se podatci (tablica 2.) na temelju kojih se može dobiti veliki broj informacija o snimljenom području.

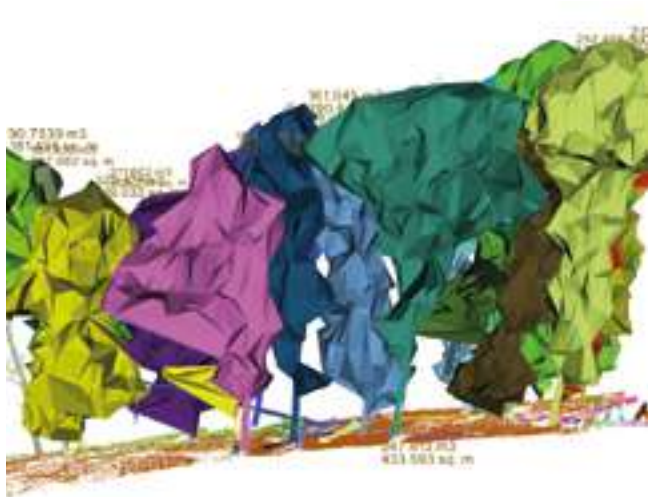
Tablica 2. Parametri područja šume (Slika 7)

Cloud_name	Points	X_coord_pos	Y_coord_pos	Z_coord_pos	Height	Length	DBH_HT	X_coord_HT	Y_coord_HT
ID_7.pcd	33655	20.900	-2.095	-0.265	30.910	31.020	34.400	20.901	-2.149
ID_13.pcd	37023	11.790	-25.871	-0.207	30.410	30.720	46.800	11.945	-26.052
ID_14.pcd	58691	13.940	-1.474	-0.255	31.140	31.200	45.600	14.081	-1.558
ID_18.pcd	35058	18.119	-9.809	-0.290	16.390	16.980	10.600	18.094	-9.894
ID_19.pcd	112138	4.870	-0.090	-0.159	30.620	30.610	36.600	5.174	-0.207
ID_39.pcd	27895	21.400	-10.155	-0.268	30.530	30.650	31.800	21.525	-10.298
ID_43.pcd	21357	10.020	-1.668	-0.207	16.120	16.180	13.400	9.949	-1.659
ID_52.pcd	90905	2.440	4.280	-0.067	31.370	31.530	52.400	2.443	4.304
ID_57.pcd	105882	14.491	1.540	-0.231	20.360	20.380	23.600	14.439	1.575
ID_63.pcd	15090	16.961	3.140	-0.239	30.850	30.870	33.800	17.077	3.283
ID_73.pcd	24816	15.920	-20.941	-0.239	19.580	19.670	18.400	15.977	-20.949
ID_80.pcd	18785	22.789	-17.258	-0.294	30.770	30.750	35.600	22.983	-17.457
ID_89.pcd	58650	10.400	-12.105	-0.159	31.970	32.200	50.400	10.115	-12.260
ID_95.pcd	17811	17.940	5.560	-0.221	22.460	22.500	16.200	18.085	5.560
ID_106.pcd	52307	-2.788	-4.455	-0.101	18.290	18.370	8.800	-2.841	-4.459
ID_112.pcd	45105	1.030	-9.188	-0.110	31.840	31.840	50.600	1.174	-9.325
ID_119.pcd	170669	1.620	-0.978	-0.217	20.080	20.230	15.600	1.707	-0.932
ID_122.pcd	65401	-3.962	0.630	-0.138	30.470	30.670	45.200	-4.017	0.767
ID_124.pcd	36181	13.321	-18.212	-0.143	28.910	29.000	31.600	13.062	-18.260
ID_126.pcd	33840	-3.013	-0.549	-0.118	16.170	16.410	12.000	-3.093	-0.577
ID_127.pcd	24481	14.850	-8.826	-0.198	30.490	30.460	25.800	14.753	-8.699
ID_129.pcd	28401	-3.944	-17.983	-0.017	29.990	30.060	42.400	-4.186	-18.180
ID_130.pcd	93925	0.740	-6.021	-0.092	19.530	19.640	24.000	0.782	-6.219
ID_146.pcd	52690	9.270	-8.276	-0.095	30.520	30.550	37.800	9.386	-8.433
ID_154.pcd	72173	-7.631	-1.726	0.058	30.520	30.510	45.200	-7.759	-1.815
ID_158.pcd	48215	-3.391	-10.842	-0.053	29.080	29.060	31.000	-3.299	-10.767
ID_177.pcd	42627	2.390	-18.980	-0.038	29.270	29.580	42.600	2.432	-18.756
ID_197.pcd	55632	9.821	-24.100	-0.045	17.180	17.190	18.600	9.755	-24.039
ID_204.pcd	22717	-1.814	-24.768	0.078	29.090	29.090	30.800	-1.984	-24.767
ID_207.pcd	13247	-1.553	-27.729	0.018	28.690	28.920	42.600	-1.794	-27.775
ID_208.pcd	19925	-10.974	-4.694	0.098	30.150	30.170	32.400	-11.100	-4.757
ID_226.pcd	24747	5.160	-13.778	0.080	28.920	29.090	29.200	5.170	-13.922
ID_243.pcd	27266	-7.852	-14.292	0.114	30.870	30.900	45.200	-7.964	-14.439
ID_247.pcd	32182	-5.401	-6.685	0.042	16.210	16.270	13.400	-5.542	-6.673
ID_301.pcd	36576	-3.513	-0.450	-0.100	11.370	12.940	11.400	-3.599	-0.509
ID_302.pcd	56669	-4.022	-10.579	-0.041	19.720	19.810	20.800	-4.086	-10.555

U nastavku se nalaze primjeri na kojima se jasnije vide rezultati analize kao što je vegetacija (slika 8.), volumen krošnje (slika 9.) te opseg i visina (slika 10.) pojedinog stabla.



Slika 8. Vegetacija šume



Slika 9. Volumen krošnje stabala



Slika 10. Parametri opsega i visine stabla

## 5. Zaključak

Bitno je još jednom napomenuti da je SLAM tehnologija nastala primarno za autonomna kretanja u prostoru, od robotike do automobila. Ali ipak takva metoda u budućnosti će sve više sudjelovati u geodetskoj izmjeri. Primarni cilj ovog članka bio je upoznati čitatelje sa SLAM tehnologijom te njezinim mogućnostima i primjenama. Takva metoda djeluje na „black-box“ principu rada, što znači da je vrlo jednostavna za upotrebu te je time omogućeno da veliki broj korisnika čija primarna struka možda uopće i nije masovno prikupljanje podataka, može to raditi bez puno muke. Za razliku od preciznog laserskog skeniranja koje je primarno statično, ovo nam pruža mogućnost veće mobilnosti, brzine i efikasnosti nauštrb točnosti, ali dobivena točnost je i dalje zadovoljavajuća za mnoga područja primjene. Broj aplikacija koje SLAM tehnologija trenutačno pokriva je prilično velik, samo neke su skeniranje

zgrada, šuma, špilja, škola i sličnih objekata. Naravno ukoliko je potrebno odraditi precizno i detaljno skeniranje arheoloških nalazišta ili industrijskih postrojenja, terestički skeneri imaju prednost. Ipak, SLAM tehnologija nudi mogućnost ekonomičnog masovnog prikupljanja geoprostornih podataka te geodetskoj struci pruža priliku da te podatke analizira te ih ispravno interpretira.

## LITERATURA

Bosse, M., Zlot, R., Flick, P. (2012): ZEBedee: Design of a spring-mounted 3-d rangesensor with application to mobile mapping, *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5), pp. 1104-1119 (2012).

Dutch, Michael (2016): *GeoSLAM Survey in Motion*

Kordić, Branko (2016): *Predavanja iz kolegija Trodimenzijalno lasersko skeniranje u geodeziji i geoinformatici*, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., Rodriguez-González, P. (2017): Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems, *SPIE Digital library*.

URL 1: GeoSLAM, <https://geoslam.com/blog-post/what-is-slam/>, (pristupljeno 13. 3. 2019.)

URL 2: 3D Forest, <http://www.3dforest.eu/>, (pristupljeno 18. 3. 2019.)

### AUTORI | AUTHORS

**Karlo Šćurić, preddiplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: kscuric@geof.hr.**