

Primjena i integracija sustava LiDAR tehnologije

Morić, Duško-Marijan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:801201>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

DUŠKO-MARIJAN MORIĆ

**PRIMJENA I INTEGRACIJA SUSTAVA LiDAR
TEHNOLOGIJE**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**PRIMJENA I INTEGRACIJA SUSTAVA LiDAR
TEHNOLOGIJE
APPLICATION AND INTEGRATION OF THE LiDAR
TECHNOLOGY SYSTEM**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Optoelektronički sustavi

Mentor: prof.dr.sc. Irena Jurdana

Komentor: doc.dr.sc. Nikola Lopac

Student: Duško-Marijan Morić

Studijski smjer: EITP

JMBAG: 0112056863

Rijeka, srpanj 2023.

Student: Duško-Marijan Morić

Studijski program: EITP

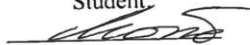
JMBAG: 0112056863

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom
Primjena i integracija sustava LiDAR tehnologije
izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Irena Jurdana
te komei rstvom doc. dr. sc. Nikola Lopac.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student:



Duško-Marijan Morić

Student: Duško-Marijan Morić

Studijski program: EITP

JMBAG: 0112056863

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student: Duško-Marijan Morić



SAŽETAK

LiDAR (*engl. Light Detection and Ranging*) je aktivna tehnologija istraživanja na daljinu koja koristi svjetlost u obliku laserskih impulsa za mjerenje udaljenosti. Svjetlosni impulsi, u kombinaciji s drugim točkama podataka koje generira sustav, stvaraju točne 3D informacije o objektu u odnosu na njegovu okolinu. LiDAR uređaj ima nekoliko komponenti: laserski skener, globalni sustav za identifikaciju pozicije (*engl. Global Positioning System – GPS*) i inercijski navigacijski sustav (*engl. Inertial Navigation System - INS*). Oprema se obično montira na mobilno vozilo, poput automobila, drona ili bespilotne letjelice. Funkcijski, postoje zračni i terestrički LiDAR sustavi.

Zračni LiDAR postavlja se na dron ili helikopter i služi aplikacijama za prikaz ogromnog područja iz ptičje perspektive. Dvije su vrste standardnog LiDAR-a: topografski, koji koristi infracrveni laser za mapiranje kopnenih površina i batimetrijski, koji za prodiranje u vodu koristi zeleno svjetlo za mapiranje podmorja.

Terestrički LiDAR djeluje na tlu i pomičan je ili statičan. Mobilni LiDAR sustavi montiraju se na pokretne platforme poput samostalnih vozila s aplikacijama umjetne inteligencije za identifikaciju objekata u voznom okruženju. Statički LiDAR postavlja se na nepomične strukture. Podaci LiDAR-a su točni, brzi i korisni za bilo koju lokaciju na kojoj se mora utvrditi struktura i oblik predmeta. Laserskim skeniranjem dobiva se skup podatkovnih točaka pod nazivom „oblak točaka“ (*engl. Point Cloud*). Oblak točaka se zatim pretvara u 3D sliku koja prikazuje razne površine, oblike terena, strukture i objekte.

Ključne riječi: LiDAR tehnologija, optoelektronički sustavi, skeniranje, zračni i terestrički LiDAR sustavi, topografski LiDAR, batimetrijski LiDAR

SUMMARY

LiDAR (Light Detection and Ranging) is an active remote sensing technology that uses laser light pulses to measure distances. The light pulses, combined with other data points generated by the system, create accurate 3D information about an object and its surroundings. A LiDAR device consists of several components: a laser scanner, a Global Positioning System (GPS), and an Inertial Navigation System (INS). This equipment is typically mounted on mobile vehicles such as cars, drones or unmanned aircraft. Functionally, there are airborne and terrestrial LiDAR systems.

Airborne LiDAR is installed on drones or helicopters and is used for applications that require a birds-eye view of a large area. There are two types of standard LiDAR: topographic LiDAR, which uses an infrared laser to map land surfaces and bathymetric LiDAR, which utilizes green light to penetrate water for underwater mapping.

Terrestrial LiDAR operates on the ground and can be either mobile or static. Mobile LiDAR systems are mounted on moving platforms like autonomous vehicles and employ artificial intelligence applications for object identification in a driving environment. Static LiDAR is placed on stationary structures. LiDAR data is accurate, fast and valuable for any location where the structure and shape of objects need to be determined. By laser scanning, a set of data points called a „point cloud“ is obtained. The point cloud is then converted into a 3D image that visualizes various surfaces, terrain features, structures and objects.

Keywords: LiDAR technology, optoelectronics systems, scanning, airborne and terrestrial LiDAR systems, topographic LiDAR, bathymetric LiDAR

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	II
SUMMARY.....	III
SADRŽAJ.....	IV
1. UVOD	1
1.1 PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	2
1.2. RADNA HIPOTEZA.....	2
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	3
1.4. ZNANSTVENE METODE.....	3
1.5. STRUKTURA RADA.....	3
2. TEORIJSKI PREGLED LiDAR TEHNOLOGIJE.....	4
2.1. OSNOVE LiDAR TEHNOLOGIJE.....	4
2.2.1. Načelo laserskog skeniranja sa zemlje - TLS.....	6
2.2.2. Načelo laserskog skeniranja iz zraka - ALS.....	7
2.2.3. Načelo laserskog skeniranja iz svemira - SLS.....	8
2.2. KOMPONENTE LiDAR SENZORA.....	10
2.3. PRINCIP PRIKUPLJANJA I OBRADE PODATAKA.....	12
2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI LiDAR TEHNOLOGIJE.....	14
3. VRSTE LiDAR-a.....	16
3.1. TOPOGRAFSKI LiDAR.....	16
3.2. BATIMETRIJSKI LiDAR.....	17
3.3. RAZLIKE IZMEĐU TOPOGRAFSKIH I BATIMETRIJSKIH LiDAR SUSTAVA	19
4. UPOTREBA I PRIMJENA LiDAR TEHNOLOGIJE.....	22
4.1. LiDAR U ATONOMNIM VOZILIMA.....	22
4.2. LiDAR U PROŠIRENOJ STVARNOSTI (AR).....	25

4.3. LiDAR U UBLAŽAVANJU KLIMATSKIH PROMJENA.....	29
4.4. LiDAR U GEODETSKOM MJERENJU.....	34
4.5. LiDAR U OCEANOGRAFIJI.....	39
5. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	47
KAZALO KRATICA.....	53
POPIS SLIKA.....	54
POPIS TABLICA.....	55

1. UVOD

Sve veći tehnološki napredak omogućio je dosad nezabilježene načine snimanja fizičkog svijeta u digitalnom obliku. Jedan od oblika je detekcija i raspon svjetlosti ili LiDAR. Ovu vrstu tehnologije usvojile su brojne industrije koje uključuju automatizaciju proizvodnje, sigurnost, poljoprivredu i drugo, te aplikacije koje imaju raspon snimanja od geografskog pregleda do 3D strukturnog mapiranja i prepoznavanja predmeta. Sve te aplikacije i industrije potaknule su LiDAR da smanji troškove, stvori sigurnija okruženja, poboljša učinkovitost ili učini stvari koje prethodno nisu bile moguće. Kako bi se što bolje razumio utjecaj LiDAR-a važno je objasniti što je ova tehnologija i što se LiDAR-om mjeri, odnosno radi.¹

LiDAR tehnologijom se može upravljati korištenjem različitih platformi poput satelita, zrakoplova i helikoptera, dronova, kopnenih vozila i tronožaca. Iako je osnovni princip tehnologije u svakom pojedinom slučaju isti, postoje neke razlike u postupcima prikupljanja, obrade i primjene podataka.

LiDAR podacima se bilježi naše fizičko okruženje. LiDAR je pokazao svoje prednosti u brojnim sektorima. U autonomnim vozilima LiDAR se koristi za otkrivanje i izbjegavanje prepreka kako bi se uz pomoć laserskih zraka lakše mogli kretati određenom putanjom. Također se koristi za dobivanje kontura kišnih oblaka, proučavanje aerosoli i kvantificiranje različitih atmosferskih komponenti. Na temelju takvih dobivenih informacija može se odrediti tlak na površini, emisije stakleničkih plinova, fotosinteza, požari i vlažnost zraka.

LiDAR-i se mogu klasificirati na temelju dimenzija kao što su 1D, 2D i 3D LiDAR-i. Radni princip svakog LiDAR-a je isti, ali razlika leži u korištenju mehanizama ciljanja i snimanja, sustavu skeniranja i broju korištenja laserskih zraka.²

¹ Pirc, T. Modern LiDAR Systems: Sensing for Every Industry, dostupno na: <https://www.analog.com/en/thought-leadership/modern-lidar-systems-sensing-for-every-industry.html>

² Neoge, S., Mehendale N. Review on LiDAR technology

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Ljudi su razvili razne tehnologije za promatranje i analizu okoline. Te tehnologije dolaze s različitim mogućnostima, ograničenjima i načinima upotrebe. Jedna od takvih tehnologija je LiDAR (detekcija i domet svjetlosti), koja se temelji na refleksiji laserskog svjetla. Iako je LiDAR dostupan više od 50 godina, njegov se puni potencijal i primjena još uvijek otkrivaju. Dok se LiDAR još uvijek suočava s izazovima u autonomnoj navigaciji vozila, ova tehnologija ima interesantan niz načina upotrebe i snažan je dodatak drugim metodama snimanja i otkrivanja objekata. LiDAR koristi lasersko svjetlo za mjerenje udaljenosti. Odašiljač emitira svjetlosne impulse koji se odbijaju od površina i vraćaju u prijamnik. Prijemnik bilježi vrijeme potrebno svakom svjetlosnom impulsu da se vrati što se koristi za izračunavanje udaljenosti koju je prešao svaki snop. Ta vremena i udaljenosti daju skup podatkovnih točaka pod nazivom „oblak točaka“. Oblak točaka se zatim može pretvoriti u 3D sliku koja prikazuje površine, oblike terena, strukture i objekte. LiDAR može detektirati razne materijale, uključujući tvrde predmete kao i kemijske spojeve i oblake. Lidarski skeneri mogu biti zračni ili zemaljski, topografski (ispitivanje suhog terena pomoću lasera bliskog infracrvenog) ili batimetrijski (mapiranje podvodnog terena korištenjem zelene svjetlosti koja prodire kroz vodu). Mogu biti mobilni (postavljeni na pokretni objekt kao što je vozilo ili dron) ili statični (postavljeni na nepokretnu površinu). Lidarsko mapiranje iznimno je precizno, prikazuje površine i objekte s točnošću od 2-3 cm čak i u primjenama na velikim udaljenostima. Budući da su otkrivanje i određivanje raspona objekata temeljni za toliko mnogo aplikacija, raznolikost načina upotrebe LiDAR-a je nevjerojatna. Danas se LiDAR primjenjuje u autonomnim vozilima, proširenoj stvarnosti, ublažavanju klimatskih promjena, geodetskom mjerenju, oceanografiji i drugim granama.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Upotreba podataka koji imaju nižu gustoću, odnosno rjeđi „oblak točaka“ su u korelaciji s većim visinama i brzinama letova prilikom snimanja što znači da se snimanjima obuhvaćaju i veća područja uz manje financijske izdatke. Izrađenim modelima se mogu dobiti rezultati koji su točni i precizni za traženu svrhu.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Zračno lasersko skeniranje dovodi do visoko preciznih trodimenzionalnih 3D oblaka točaka kojima se dobiva vertikalna struktura objekata. Cilj ovog diplomskog rada je objasniti kako dolazi do obrade 3D oblaka točaka, klasifikacije, vizualizacije i različitih načina korištenja tih podataka prilikom praćenja i izmjera u autonomnoj navigaciji vozila, proširenoj stvarnosti, ublažavanju klimatskih promjena, geodetskom mjerenju i oceanografiji.

1.4. ZNANSTVENE METODE

Znanstvene metode koje su se upotrebljavale u istraživanju, prikupljanju i izlaganju dobivenih rezultata koristile su se metode komparacije, deskripcije, analize i sinteze.

1.5. STRUKTURA RADA

Uvod u ovaj diplomski rad daje pogled na osnovne tehnike i mogućnosti LiDAR-a koje se upotrebljavaju kod prostornog skeniranja i praćenja biokemijskih procesa u zraku. U drugom poglavlju dan je teorijski pregled LiDAR tehnologije, navedene su komponente LiDAR senzora, principi prikupljanja i obrade podataka, područja primjene LiDAR tehnologije, te njene prednosti i nedostaci.

Treće poglavlje govori o topografskim i batimetrijskim LiDAR-ima i daje razlike između ta dva sustava.

U četvrtom poglavlju navedena je upotreba i primjena LiDAR tehnologije u različitim granama poput autoindustrije, arheologije i oceanografije, pri geodetskim mjerenjima, te pri ublažavanju klimatskih promjena.

Zadnje poglavlje daje finalnu analizu gore navedenog.

2. TEORIJSKI PREGLED LiDAR TEHNOLOGIJE

U ovom poglavlju prikazane su osnove LiDAR tehnologije s naglaskom na komponente LiDAR senzora, principa prikupljanja i obrade podataka, navedena su područja primjene LiDAR tehnologije, te njene prednosti i nedostaci.

2.1. OSNOVE LiDAR TEHNOLOGIJE

Lasersko skeniranje LiDAR je vrsta tehnologije kojom se prikupljaju i obrađuju prostorne informacije. Temelji se na prikupljanju tri različita skupa podataka. Položaj senzora se utvrđuje korištenjem GPS-a, dok se orijentacija određuje korištenjem inertne mjerne jedinice (*engl. Inertial Measurement Unit – IMU*). Laserskim skenerom kao posljednjom komponentom odašilje se infracrvena zraka prema tlu koja se reflektira na senzor. Vrijeme kojim se prenosi signal, znajući položaj i orijentaciju senzora, omogućuje precizan izračun trodimenzionalnih koordinata na Zemlji (3D).³

LiDAR senzor kojim se mjeri udaljenost do željenog objekta koristi laser. Da bi se naglasila primjena lasera, u početku je postojala intencija da se ova tehnologija nazove LADAR. Akronim LASER (ili laser) označava pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Laser (*engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) je sprava koja emitira svjetlost putem optičkog pojačanja koji je temeljen na stimuliranoj emisiji elektromagnetskog zračenja.⁴ Laserski sustavi, koji imaju iznimnu brzinu snimanja, mogu se koristiti za prikupljanje velikih količina 3D informacija o određenom terenu.

LiDAR se još naziva i optičkim radarom (svjetlosnim radarom) ili laserskim radarom. LiDAR funkcionira po principu radara i sonara, no umjesto radiovalova ili zvučnih valova upotrebljava laserske svjetlosne valove. Skeniranjem, odnosno snimanjem dobivaju se „oblaci točaka“, točnije skupovi podataka koji predstavljaju objekte ili prostor. Te točke označavaju geometrijske koordinate (X, Y, Z) jedne točke na temeljnoj površini koja predstavlja uzorak. Oblaci točaka su diskretni skup podatkovnih točaka u prostoru.⁵ Najčešće se dobivaju pomoću 3D laserskih skenera, te LiDAR tehnologije i tehnika. Naime, laserskim skeniranjem svaka

³ AAMHatch, 2006. Airborne Laser Scanning Technical Specifications, dostupno na: <http://www.aamhatch.com.au>

⁴ <https://simple.wiktionary.org/wiki/laser>

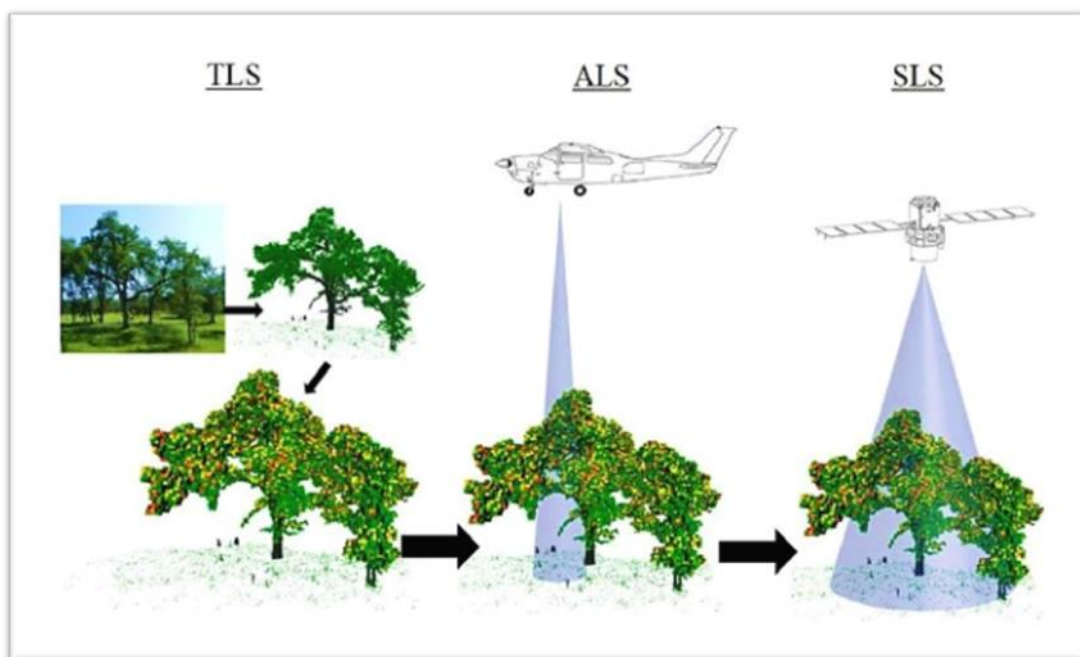
⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud

točka predstavlja jednu izmjeru. Kada se sve izmjere spoje, procesom „registracije“ dobiva se potpuno snimljena scena.⁶

U kombinaciji sa drugim podacima koje bilježi Globalni satelitski navigacijski sustav (GNSS) generiraju se precizne „trodimenzionalne geoprostorne informacije o objektu na Zemlji i njegovim površinskim značajkama“ poput oblika oblaka točaka. Općenito je prepoznat kao velika tehnološka revolucija nakon globalnog sustava određivanja položaja (pozicioniranja), a također je i vodeće istraživačko područje visoko preciznog geodetskog mjerenja i mapiranja.

Ovisno o vrsti platforme na koju je senzor postavljen, tehnologija laserskog skeniranja se dijeli na:

1. lasersko skeniranje sa zemlje (*engl. Terrestrial Laser Scanning - TLS*),
2. lasersko skeniranje iz zraka (*engl. Airborne Laser Scanning - ALS*)
3. lasersko skeniranje iz svemira (*engl. Spaceborne Laser Scanning - SLS*).



Slika 1. Podjela laserskog skeniranja

Izvor: Saarni, M. *New White Paper: On the Use of LiDAR Data at AmeriFlux Sites*, 2015.

<https://ameriflux.lbl.gov/new-white-paper-on-the-use-of-lidar-data-at-ameriflux-sites/>

Iako je LiDAR termin koji se često koristi u literaturi, prednost se daje laserskom skeneru ili laserskom daljinomjeru, što čini poveznicu s prošlim metodama (lasersko

⁶ Charles, T., Boehm, J. (2015) Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM, *Remote Sens.* 2015,7

određivanje udaljenosti i lasersko profiliranje). Lasersko skeniranje razvijeno je na dva načina, ovisno o položaju senzora: u zraku za ALS i na zemlji za TLS. Laserski skener sastoji se od odašiljača/prijemnika laserske zrake i uređaja za skeniranje. Moguće su dvije različite metode za određivanje dometa: fazna i pulsna metoda.⁷ Prva metoda omogućuje točnije određivanje raspona, ali ima ograničeni raspon.⁸ Alternativno, potonji dopušta veći raspon i stoga je implementiran u većini ALS i TLS koji se koriste za promatranje površine Zemlje.

2.1.1. Načelo laserskog skeniranja sa zemlje – TLS

Laserskim skeniranjem sa zemlje ili TLS, koje se također naziva terestrički ili topografski LiDAR dobivaju se XYZ koordinate brojnih točaka na kopnu emitiranjem laserskih impulsa prema tim točkama i mjerenjem udaljenosti od uređaja do mete. Moderni TLS uređaj može izmjeriti 10^4 – 10^6 točaka u sekundi s točnošću od 10^{-1} - 10^0 cm. Za upravljanje i analizu podataka, a zbog velike količine podataka pohranjenih u TLS oblaku točaka, potrebni su određeni softverski paketi. Oblak točaka može se pretvoriti u mrežni DEM (*engl. Digital Elevator Model*) kako bi se olakšala topografska kartografija i prostorne analize.⁹

TLS instrumenti se obično dijele u tri kategorije na temelju udaljenosti koju lasersko svjetlo može prijeći da bi zabilježilo točku u vidnom polju: skeneri kratkog, srednjeg i dugog dometa. TLS uređaji optimizirani za veliki domet (nekoliko stotina metara do kilometara) primijenjeni su za mjerenje prostorno većih područja.¹⁰ Skeneri kraćeg dometa mjere prostorno manja područja (do nekoliko stotina metara) s više detalja i točnosti, odražavajući balans između brzine impulsa i energije laserskog svjetla. Za skenere kratkog dometa, interval između susjednih mjernih točaka može biti do 1 mm, iako takve gustoće nisu praktične za sva osim za najmanja područja. Potencijalno ograničenje TLS pristupa u geomorfologiji je težina instrumenta (>20 kg uključujući bateriju), ali kao i kod mnogih tehnologija razvijaju se lakši uređaji.¹¹

⁷ Wehr A, Lohr U (1999) Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 54:68–82.

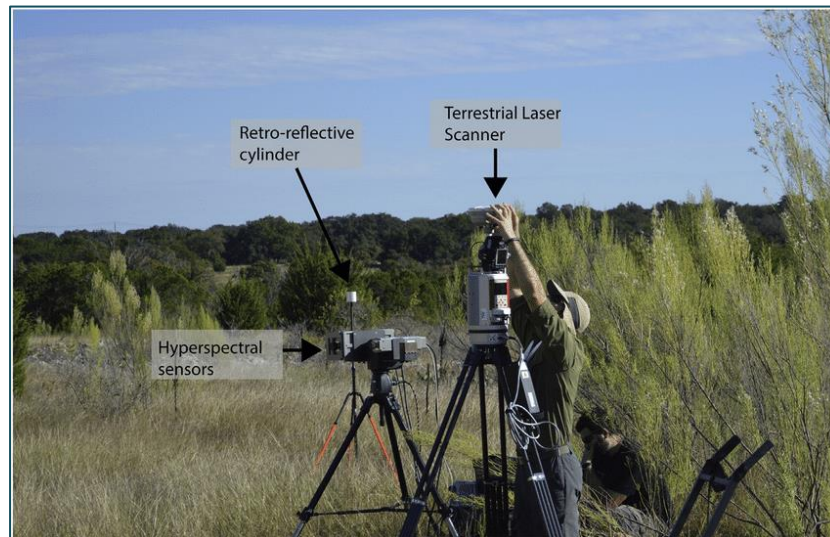
⁸ Petrie G, Toth CK (2008) I. Introduction to laser ranging, profiling and scanning, II. Airbone and spaceborne laser profiles and scanners, III. Terrestrial laser scanners (chapters 1 to 3). In: Shan J, Toth CK (eds) *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*, CRC Press, Taylor & Francis

⁹ Vosselman G., Maas H-G (2010) – *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press Taylor & Francis Group, Scotland (UK)

¹⁰ Abellan A, Vilaplana JM, Martinez J (2006) Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain). *Eng Geol* 88:136–148.

¹¹ Heritage GL, Large ARG (2009) *Laser scanning for the environmental sciences*. Wiley-Blackwell, London

Upotreba TLS-a u geomorfologiji potaknuta je potrebom za brзом izradom topografskih podataka koji su točni i precizni. Preciznost i točnost TLS tehnika omogućuje znanstvenicima da provode istraživanja koja su ključna za otkrivanje složenih prostorno-vremenskih varijacija u oblicima reljefa i krajolicima.



Slika 2. Primjer laserskog skeniranja sa zemlje

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Ground-based-hyperspectral-and-terrestrial-laser-scanner-data-collection-in-the-field_fig4_308860877

2.1.2. Načelo laserskoga skeniranja iz zraka – ALS

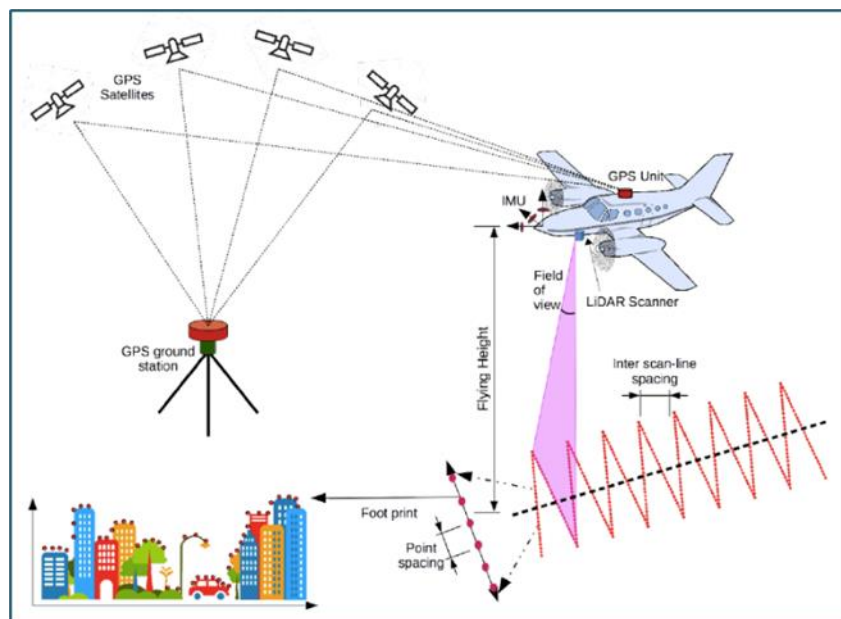
Lasersko skeniranje iz zraka je aktivna tehnika daljinskog očitavanja koja se koristi za snimanje površine zemlje, posebno topografije velikih područja i objekata koji se na njemu pojavljuju. NASA je 1970-ih koristila najranije lidarske sustave za daljinsko očitavanje za mapiranje ledom prekrivenih arktičkih i antarktičkih područja, no usprkos brojnim istraživačkim projektima daljinskog otkrivanja tijekom kasnih 1970-ih i 1980-ih godina, usvajanje u disciplinama izvan geomatike dogodilo se tek 1990-ih.¹²

Lasersko skeniranje iz zraka brza je i vrlo precizna metoda koja se koristi za mjerenje površine zemlje pomoću svjetlosnih impulsa i njihovih refleksija koje proizvodi laserski izvor svjetlosti. Ti impulsi svjetlosti emitiraju se iz 3D laserskog skenera koji je montiran na zračno vozilo, poput aviona i/ili helikoptera. Velika prednost laserskog skeniranja iz zraka je mogućnost pružanja podataka s terena i obilježja ispod krošnji šume. Izrada digitalnih modela

¹² <https://gmvc.cast.uark.edu/scanning-2/airborne-laser-scanning/>

terena i površine može se smatrati glavnom primjenom laserskog skeniranja iz zraka. Lasersko skeniranje iz zraka uglavnom se koristi u geodeziji, arheologiji, urbanom planiranju i upravljanju okolišem te istraživanjima u šumarstvu, geologiji, geomorfologiji i seizmologiji.¹³

Skeniranje iz zraka se primarno izvodilo pomoću zrakoplova ili helikoptera, dok u posljednje vrijeme sve više do izražaja dolaze bespilotne letjelice. Prednost njihova korištenja je jednostavnije izvođenje mjerenja i znatno manji trošak. Visine leta za potrebe laserskog skeniranja obično variraju od 20 m do 6 000 m. Bespilotne letjelice uglavnom lete na visini od 50 m, helikopteri su na visinama od 200 m do 300 m, dok su zrakoplovi na većim visinama, od 500 m do 1 000 m.¹⁴



Slika 3. Prikaz zračnog snimanja LiDAR-om. Crvene točke prikazuju podatke o objektima na tlu dobivene LiDAR-om.

Izvor: Lohani, B., Ghosh, S. *Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences volume 87, pages 567–579*
https://www.researchgate.net/figure/Airborne-LiDAR-data-capture-Red-dots-show-LiDAR-data-on-terrain-objects_fig2_321142803

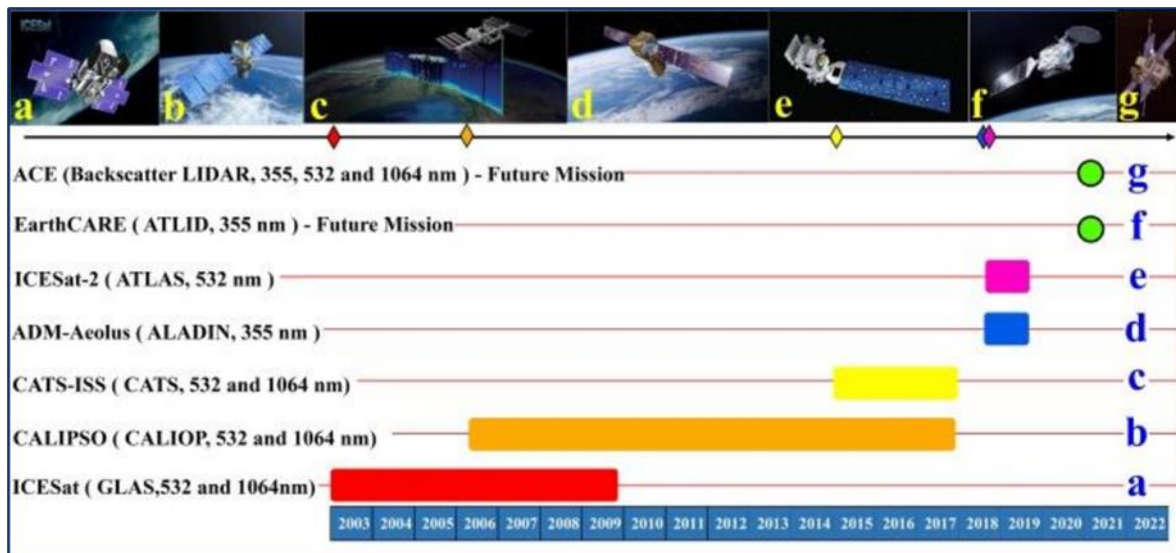
2.1.3. Načelo laserskog skeniranja iz svemira – SLS

Svemirski LiDAR sateliti pružaju jedinstvene informacije o različitim parametrima atmosfere na globalnoj razini. Mogu se podijeliti u tri kategorije: kompletna, trenutna i buduća

¹³ <https://geo-matching.com/airborne-laser-scanning>

¹⁴ Balenović, I., Alberti, G., Marjanović, H (2013) Airborne Laser Scanning - the Status and Perspectives for the Application in the South-East European Forestry. SEEFOR 4(2), str 59-79

misija.¹⁵ Vremensko razdoblje razvoja povijesnih, trenutnih i planiranih LiDAR satelita zajedno s njihovim karakteristikama prikazano je na Slici 4.



Slika 4. Povijesni razvoj LiDAR satelita

Izvor: Fouladinejad, F., Matkan A., Hajeb M, Brakhasi F. (2019) History and applications of space-borne lidars, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, 2019 GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12–14 October 2019, Karaj, Iran

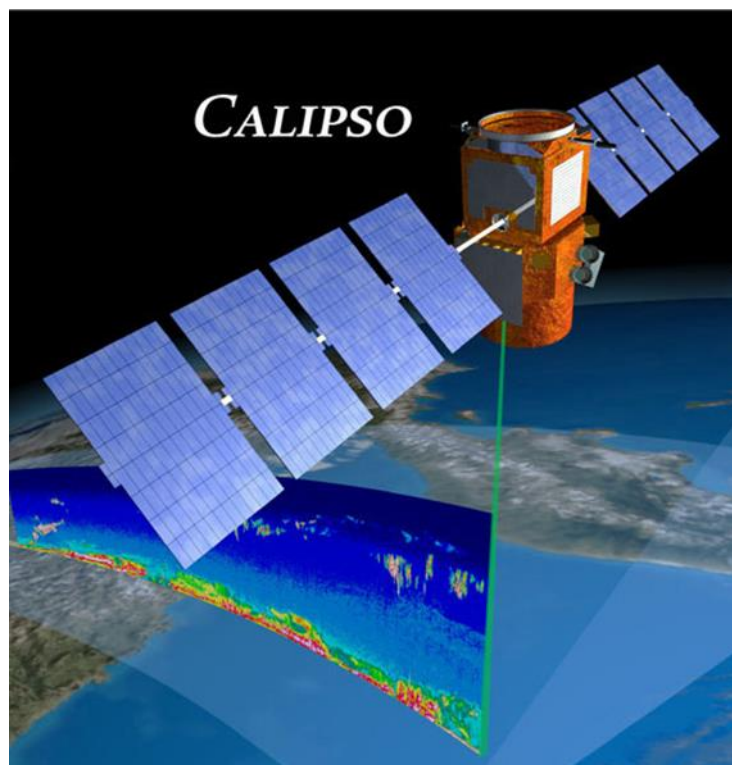
<https://www.semanticscholar.org/paper/HISTORY-AND-APPLICATIONS-OF-SPACE-BORNE-LIDARS-Fouladinejad-Matkan/ce6a9e30d19ae984ea67cf93e8a402057d968440/figure/0>

Mjerenje vertikalne raspodjele aerosola, oblaka, plinova, kao i njihov učinak na klimatski sustav može se dobiti uz pomoć LiDAR sustava. Svemirski LIDAR-i koriste se s visokom vremenskom rezolucijom na globalnoj razini za procjenu parametara koji se koriste u vremenskoj prognozi poput, primjerice, procjene promjene polarnog leda i oceana. Slijedeći neka od satelitskih ograničenja i izazova, drugi sateliti su dizajnirani i raspoređeni u orbiti kako bi nastavili s prethodnim misijama, te popunili određene praznine u mjerenjima.¹⁶

¹⁵ Fouladinejad, F., Matkan A., Hajeb M, Brakhasi F. (2019) History and applications of space-borne lidars, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, 2019 GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12–14 October 2019, Karaj, Iran

¹⁶ Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., Farrell, S., Fricker, H., Gardner, A., Harding, D., Jasinki, M., Kwok, R., Magruder, L., Lubin, D., Luthcke, S., Morison, J., Nelson, R., Neuenschwander, A., Palm, S., Popescu, S., Shum, CK., Schutz, Bob E., Smith, B., Yang, Y., Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. Remote Sensing of Environment, 190, 260–273.

Još jedan izazov predstavljala je neizvjesnost glede utjecaja aerosola o klimatskom sustavu koji je ograničavao ljudsko razumijevanje klimatskih promjena. Problem je s vremenom bio riješen CALIPSO satelitom.¹⁷ Svojevrsni disparitet CALIPSO-a pokriven je CATS-ISS promatranjem u stvarnom vremenu. Smatralo se da je to most između CALIPSO satelita i zemaljskog satelita, s ciljem proširenja zapisa CALIPSO podataka. Prikupljanje podataka satelitom CATS-ISS bilo je predviđeno na vrijeme od najviše 6 mjeseci i 3 godine, no na kraju, nakon 33 mjeseca, misija satelita bila je završena. Općenito, aktivni sateliti uključujući RADAR i LiDAR koji imaju kraći životni vijek u usporedbi s pasivnim i optičkim daljinskim očitavanjem. Što se tiče primjenjivosti, CALIPSO je poznat kao jedan od važnih satelita čiji povijesni podaci datiraju od 2006. godine. Najviše istraživanja provedeno je korištenjem LiDAR promatranjima iz CALIPSO-a i njihovim usporedbama s drugim svemirskim LiDAR satelitima.¹⁸



Slika 5. Svemirska letjelica CALIPSO

Izvor: https://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/mission/mission-objectives_prt.htm

¹⁷ Winker, D. M., Pelon, J. R., & McCormick, M. P., 2003. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds. *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*, 4893, 1.

¹⁸ <https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/bibliographies.php>

2.2. KOMPONENTE LiDAR SENZORA

Kompletan lidarski sustav sastoji se od nekoliko komponenti. Sve komponente rade zajedno kako bi se generirali, snimali i georeferencirali podaci. Glavne komponente su:

- 1) laserski izvor, laserski detektor i mehanizam za skeniranje - laserski izvor generira energiju impulsa. Infracrvena valna duljina koristi se za većinu zemaljskih lidarskih aplikacija. Plavo zelene valne duljine koriste se za batimetrijsko mapiranje budući da te valne duljine mogu prodrijeti u vodu dubine do 40 metara, ovisno o bistrini vode. Laseri koji se koriste u LiDAR sustavu imaju nisku energiju i sigurni su za oči. Laserski detektor ili prijemnik detektira impulse laserske svjetlosti koji se reflektiraju natrag od ciljanih objekata. Mehanizam za skeniranje dizajniran je za generiranje konzistentnog toka laserskih impulsa. Laserski impulsi se odbijaju od zrcala (bilo rotirajućeg ili skenirajućeg).
- 2) elektronički uređaj za mjerenje vremena - bilježi točno vrijeme kada laserski impuls odlazi i vraća se u skener. Elektronika za mjerenje vremena mora biti vrlo precizna kako bi proizvela točne podatke. Svaki odaslani impuls može imati višestruke povratne signale jer se odbija od objekata na površini. Svaki se povrat mora precizno odrediti kako bi se osigurala točna mjerenja za svaku točku.
- 3) globalni sustav za pozicioniranje (GPS) bilježi preciznu X,Y,Z lokaciju skenera. Za poboljšanje točnosti većina lidarskih sustava koristi fiksnu zemaljsku referentnu stanicu ili kontinuirano radnu referentnu stanicu (CORS). Podaci sa zemaljske stanice ili CORS-a imaju poznatu lokaciju i koriste se za ispravljanje i poboljšanje podataka koje prikuplja senzor. GPS podaci se kasnije naknadno obrađuju i može se izračunati točan položaj senzora otprilike svake sekunde tijekom leta, obično s minimalnom pogreškom (3 do 4 cm). GPS zajedno s IMU omogućuje izravno georeferenciranje točaka.
- 4) inercijalna mjerna jedinica - bilježi preciznu X,Y,Z lokaciju skenera. IMU sadrži senzore akcelerometra, žiroskopa i magnetometra koji mjere brzinu, orijentaciju i gravitacijske sile. IMB stalno bilježi nagib, okretanje i skretanje zrakoplova. Ovi se podaci koriste za određivanje preciznog kuta i lokacije lidarskog sustava kako bi se osiguralo ispravno izračunavanje udaljenosti do površina.
- 5) računalo - pouzdan računalni sustav osigurava ispravnost rada svih pojedinačnih komponenti sustava. Računalo integrira podatke iz laserskog sustava, GPS-a i IMU-a za izradu podataka o lidarskim točkama. Većina lidarskih sustava uključuje integrirani

računalni sustav zajedno sa softverom za planiranje leta, integriranje podataka IMG / GPS i pretvaranje podataka senzora u stvarne X, Y, Z koordinate.¹⁹

2.3. PRINCIP PRIKUPLJANJA I OBRADJE PODATAKA

Dok sustav za skeniranje prikuplja podatke o udaljenosti i lokaciji, foto - ili videokamera hvata boje u crveno-zeleno-plavom spektru (RGB) za svaku izmjerenu točku u „oblaku točaka“ i pohranjuje ih kao numeričku vrijednost u rasponu od 0– 255.²⁰ Zatim se boje mapiraju povezivanjem sa snimljenim XYZ koordinatama, pa je svaka točka obilježena sa sedam opisnih elemenata (X, Y, Z, R, G, B, I), a I predstavlja intenzitet. Također, često se provodi filtriranje podataka „oblaka točaka“ kako bi se smanjila veličina snimljenih datoteka jer one često zauzimaju puno prostora i zahtijevaju dosta procesorske snage. Filtriranje je korisno pri mjerenju na zavojitoj cesti ili usred raskrižja, gdje su izmjereni podaci vrlo gusti na strani prema kojoj se operater okreće, a rijetki na suprotnoj strani. U nekim slučajevima, kalibrirane slike mogu se preklopiti na „oblak točaka“ koji dodaje X, Y, Z podatke na 2D sliku.²¹ To korisnicima koji su navikli na rad u 2D okruženju pruža mogućnost transformacije 2D crteža u 3D.²²

Nakon registracije, podaci „oblaka točaka“ obično se filtriraju kako bi se eliminirale neželjene značajke, uključujući umjetne niske točke, objekte koji prolaze u prikazu skenera, neželjenu vegetaciju ili, općenito, sve što nije potrebno krajnjem korisniku. Filtriranje se također obično radi kako bi se smanjila veličina datoteke isporučivog „oblaka točaka“ budući da potpuni skup podataka može zahtijevati intenzivnu računalnu snagu i pohranu podataka. Neke uobičajene tehnike filtriranja uključuju: prvi, srednji i posljednji povrat, odabir svake točke, minimalnu odvojenost između točaka, prostornu hijerarhiju, nadmorsku visinu, raspon i intenzitet.²³

Neki znanstvenici predlažu dvije metode prikupljanja podataka - nivelirani histogram i obrnuta ponderirana udaljenost - kao sredstvo za uklanjanje nepotrebnih točaka, uz istovremeno očuvanje izvorne rezolucije i točnost podataka. Ova vrsta filtriranja je korisna kada se

¹⁹ http://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/lidar/components.html

²⁰ Williams, K.; Olsen, M.J.; Roe, G. V.; Glennie, C. (2013) Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR. Remote Sens. 2013, 5, 4652–4692.

²¹ Knaak, T. TopoDOT Calibrated Image Requirements (#1001); Certainty 3D: Orlando, FL, USA, 2010. Dostupno na: <http://www.certainty3d.com/pdf/technotes/CalibratedImageReq.pdf>

²² Lopac, N.; Jurdana, I.; Brnelić, A.; Krljan, T. (2022) Application of Laser Systems for Detection and Ranging in the Modern Road Transportation and Maritime Sector. Sensors, 2022, 22(16), 5946.

²³ Vosselman, G.; Maas, H.G. (2010) Airborne and Terrestrial Laser Scanning; Whittles: Caithness, UK

prikupljanje točaka počne grupirati. Primjerice, kada vozilo skreće točke s unutarnje strane zavoja postaju mnogo gušće od točaka s vanjske strane zavoja.²⁴

Sukladno dobivenim podacima „oblaka točaka“ matematički izračun nije lako izvesti. Obično se ovi „oblaci točaka“ modeliraju korištenjem tehnika triangulacije ili primjenom najmanjih kvadrata geometrijskih primitivnih oblika (npr. ravnine, kvadrata, pravokutnika, cilindra ili sfere) na strukture koje se nalaze u „oblaku točaka“. Modeliranje značajki u „oblaku točaka“ uključuje automatizirani ili poluautomatizirani algoritam segmentacije; ovaj algoritam predviđa točke koje se mogu modelirati u stvarni objekt, dopuštajući izdvajanje modelirane strukture.²⁵

Različiti izračuni i analize mogu se primijeniti na te modele kako bi se omogućili složeni izračuni kao što je promjena volumena.²⁶

Općenito, zahtjevi za softverske pakete koji se koriste za analizu skupova podataka MLS (*eng. Mobile Laser Scanning*) razlikuju se s obzirom na konačnu primjenu skupa podataka i raznolikost podataka senzora prikupljenih tijekom istraživanja. Međutim, kao temelj se izdvajaju četiri zadatka koja bi trebala biti moguća u različitim softverskim programima „oblaka točaka“:

- 1) svi podaci trebali bi biti organizirati u jedan projekt kako bi se mogli obraditi i arhivirati;
- 2) podaci bi se trebali vidjeti na različitim razinama, poput oblaka na mikro razini i cijelom području projekta;
- 3) softveri bi trebali omogućiti geometrijsku korekciju različitih senzora;
- 4) podaci bi se trebali moći prikazati u različitim formatima, uključujući standardizirane formate kao što su ASCII, LAS i E57, kako bi bili kompatibilni s drugim softverima.

Mnoge dostupne mogućnosti komercijalnih softvera mogu obavljati većinu tih četiriju zadataka. Konačna odluka o tome koji će se program koristiti uglavnom je osobna stvar pojedinca. Neki od najuobičajenijih softverskih proizvođači su: Maptek, Bentley, 3D, Autodesk, Trimble,

²⁴ Puttonen, E.; Lehtomäki, M.; Kaartinen, H.; Zhu, L.; Kukko, A.; Jaakkola, A. (2013) Improved sampling for terrestrial and mobile laser scanner point cloud data. *Remote Sens.* 2013, 5, 1754–1773.

²⁵ Vosselman, G.; Maas, H.G. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*; Whittles: Caithness, UK, 2010.

²⁶ Olsen, M.J.; Johnstone, E.; Driscoll, N.; Ashford, S.A.; Kuester, F. (2009) Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: Parameter analysis. *J. Surv. Eng.* 2009, 135, 161–169.

Leica Geosystems, ESRI, LAsTools, Terrasolid, Topcon, Innovmetric, Virtual Geomatics i Riegl.

Uobičajeni rezultati nakon projekata laserskog skeniranja uključuju „oblake točaka“, CAD modele i DTM-ove. Opcije, prednosti i nedostaci svake vrste isporuka mogu biti zbunjujući za nekoga bez iskustva u laserskom skeniranju.

Pružanje odgovarajućih metapodataka o korištenim metodama obrade i filtriranja može biti izazov. Osim toga, budući da se tehnologija i hardveri brzo razvijaju, razvoj softvera teško drži korak uz iste. U konvencionalnom mjerenju, točka je označena kodom za kasniju identifikaciju tijekom snimanja. Za razliku od toga, prilikom mobilnog skeniranja, prikupljene točke više nisu pojedinačno označene određenim referentnim informacijama; dodatne referentne informacije moraju se dodati pojedinim točkama poluautomatskim ili ručnim metodama.

S obzirom da je MLS tehnologija donijela mnoge prednosti u odnosu na tradicionalnu i statičnu TLS metodu, njezina je uporaba dovela do mnogih prednosti u transportnom sektoru, kao što su povećana sigurnost, učinkovitost, točnost, tehnička poboljšanja i niži troškovi. Većina komercijalnih MLS sustava temelji se na TOF metodi koja rezultira proširenim rasponom, dok TLS sustavi koriste fazni pomak čije karakteristike uključuju veću preciznost i veću gustoću skeniranih točaka.²⁷ Velodyne, Leica, LeddarTech, RIEGL, Blickfeld, Optech Lynx, DYNASCAN MDL, Sense Photonics, Innoviz, SICK i Trimble inačice su TOF skenera, dok se FARO i Z+F skeneri ističu među TLS sustavima koji se temelje na faznom pomaku.²⁸

2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI LiDAR TEHNOLOGIJE

U posljednjem desetljeću bilježi se značajan porast primjene LiDAR-a kao važnog instrumenta koji se može koristiti u svim domenama, od poljoprivrede do vojne opreme, autonomnih vozila, arheologije, mobitela i drugo.

Značajna prednost korištenja LiDAR lasera je njegova velika preciznost. Primjerice, sustav može detektirati objekte s okomitim dimenzijama od 5-15 cm i horizontalnim dimenzijama od 30-50 cm. S takvom preciznošću LiDAR se može koristiti za strukturno

²⁷ Guan, H.; Li, J.; Cao, S.; Yu, Y. (2016) Use of Mobile LiDAR in Road Information Inventory: A Review. *Int. J. Image Data Fusion* 2016, 7, 219–242.

²⁸ *Ibidem*

modeliranje i geodetsku izmjeru šumskih površina. Nadalje, rezultati LiDAR-a omogućuju izračun ne samo površine i razine tla, već i srednjih razina. U usporedbi s radarskom tehnologijom LiDAR ima daleko brže vrijeme prikupljanja i obrade podataka. Ova tehnologija može prikupiti, obraditi i prenijeti podatke u kontrolni centar velikom brzinom. Kada je u pitanju vojna oprema ili zrakoplovna industrija, gdje je vrijeme od presudne važnosti, brzo prikupljanje i obrada podataka su kritični. U ovim industrijama LiDAR doslovno mijenja pravila igre. Za razliku od fotogrametrije, GPS-a ili geodetskog mjerenja LiDAR ne zahtijeva previše ljudskog djelovanja jer je većina postupaka automatizirana. Na taj način omogućuje se postavljanje LiDAR-a na mjesta gdje ljudi ne mogu stalno živjeti zbog nepovoljnih vremenskih uvjeta, poput Sjevernog ili Južnog pola. Čak i uz minimalnu ljudsku pomoć LiDAR laser može raditi učinkovito. U situacijama kada su vremenski uvjeti ili uvjeti osvjetljenja loši, LiDAR tehnologija pruža precizno 3D mapiranje. Ova se tehnologija može integrirati s drugim tehnologijama na terenu kako bi se stvorio sveobuhvatan sustav mapiranja koji može pružiti pouzdanu analizu. Nadalje, ovaj sustav ne pruža samo precizne podatke o statičnim objektima, već također pruža točne podatke o pokretnim stvarima kao što su automobili, što je posebno impresivno kada su u pitanju autonomna vozila. Jedna od glavnih prednosti LiDAR lasera je i njegova sposobnost prikupljanja podataka o nadmorskoj visini kroz gusto lišće kao što su šumske krošnje. Višestruki laserski impulsi koje emitira LiDAR laser mogu detektirati praznine između lišća i grana, baš kao što se sunčeva svjetlost filtrira kroz krošnje šuma i nastavlja prema zemlji. Veća ekspanzija krošnje pruža veće mogućnosti poput otkrivanja ilegalnih farmi droge, provođenja vojnih operacija u gustim šumama i sl.²⁹

²⁹ <https://www.inphenix.com/en/advantages-of-lidar-laser/>

3. VRSTE LiDAR-a

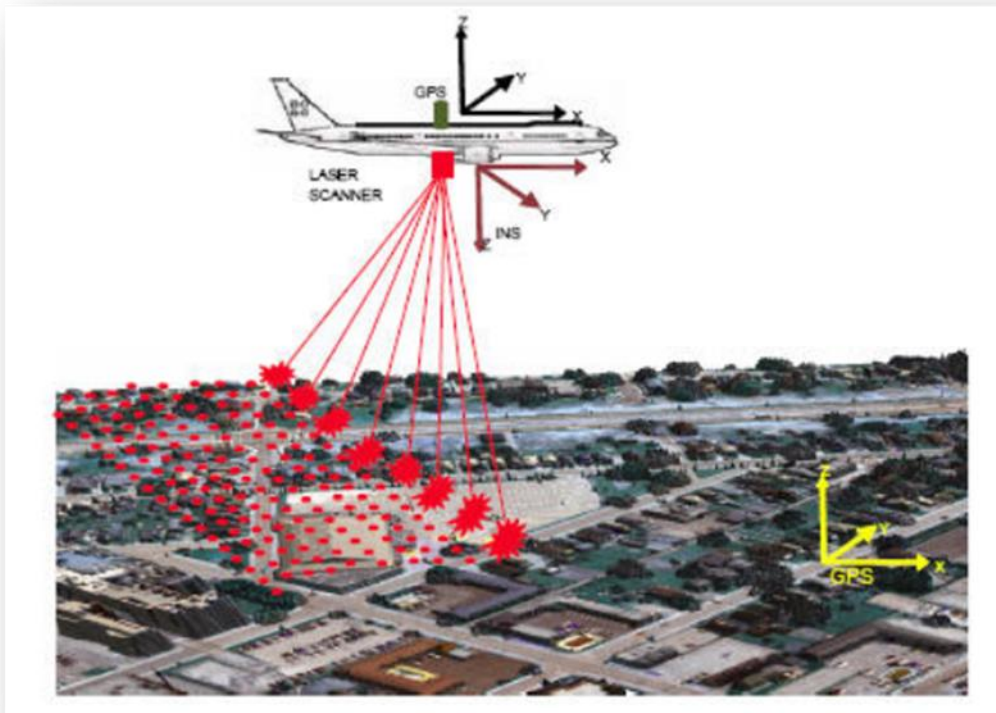
LiDAR sustavi i instrumenti mogu se kategorizirati prema nizu parametara. Jedna od glavnih razlika između različitih vrsta LiDAR-a je vrsta lasera koji se koristi. Iako postoje stotine različitih lasera različite snage i dometa, jedna od glavnih razlika jest da li je LiDAR laser topografski ili batimetrijski.

3.1. TOPOGRAFSKI LiDAR

Topografski LiDAR se češće upotrebljava, koristi laser blizu infracrvenog zračenja za mapiranje zemlje, drveća, zgrada i drugih objekata.

Naime, na Slici 6. prikazani su različiti senzori i mehanizmi kojima se skeniraju i prikupljaju podaci LiDAR-om. Osnovni koncepti LiDAR mapiranja u zraku su jednostavni. Pulsirajući laser optički je spojen s usmjerivačem snopa koji skenira laserske impulse preko pojasa terena, koji je obično usredotočen na putanju leta zrakoplova na kojem je sustav montiran i kolinearan s njom, a smjer skeniranja je okomit na putanja leta. Vremena povratnog putovanja laserskih impulsa od zrakoplova do zemlje mjere se preciznim intervalnim mjeračem vremena, a vremenski intervali se pretvaraju u mjerenja dometa znajući brzinu svjetlosti. Položaj zrakoplova u epohi svakog mjerenja određen je kinematičkim GPS-om fazne razlike. Rotacijski položaji usmjerivača zrake kombiniraju se s vrijednostima nagiba i smjera zrakoplova određenim inercijskim navigacijskim sustavom (INS) i s mjerenjima dometa, kako bi se dobili vektori od zrakoplova do točaka na tlu. Kada se ovi vektori dodaju lokacijama zrakoplova oni daju točne koordinate točaka na površini terena.³⁰

³⁰ http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Topographic%20LiDAR.htm



Slika 6. Princip topografskog LiDAR-a

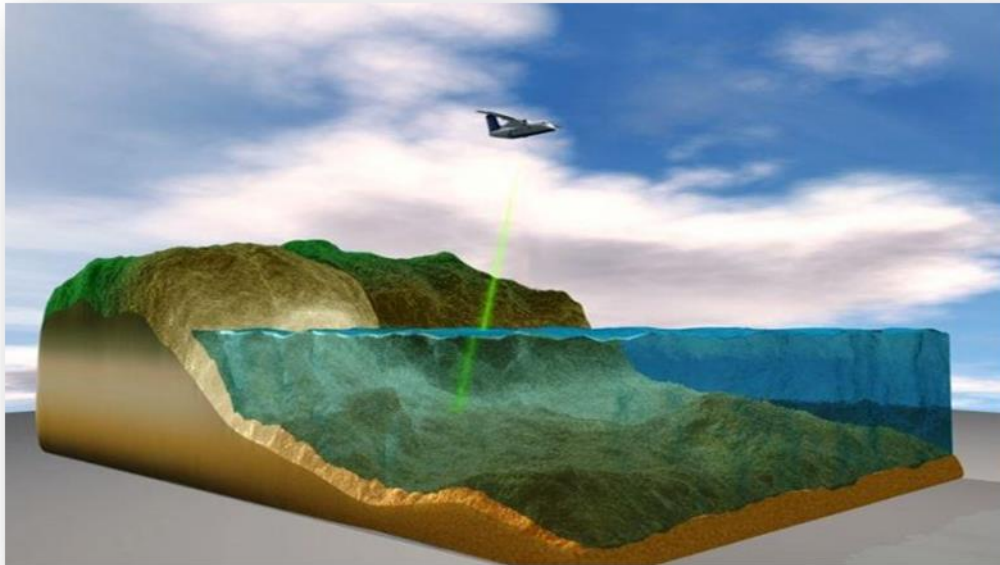
Izvor: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Topographic%20LiDAR.htm

3.2. BATIMETRIJSKI LiDAR

Batimetrijski LiDAR je rjeđi tip, koristi zeleno svjetlo koje prodire kroz vodu za mjerenje stvari poput dubine morskog dna, visine potoka i nadmorske visine riječnog korita.

Trenutno se koriste različite metode za prikupljanje batimetrijskih podataka, uključujući hidrografske metode koje koriste hidroakustičke senzore na razini vode ili ispod nje, te metode daljinskog istraživanja s platforme ili satelita. Tradicionalne hidrografske metode uključuju širok raspon tehnika istraživanja, od stupova za mjerenje preko jednozračnih ehosonda (*engl. Single Beam Echosounders - SBES*) do naprednih hidroakustičkih tehnika kao što su višezračne ehosonde (*engl. Multibeam Echosounders - MBES*). Metode daljinskog istraživanja uključuju obradu multispektralnih zračnih i satelitskih slika i batimetrijska mjerenja pomoću LiDAR-a. Vrijedno je napomenuti da se USV (*engl. Unmanned Surface Vehicle*) sve više koriste za mnoge geodetske tehnike kako bi se smanjilo opterećenje operatera i omogućilo izvođenje mjerenja u plitkim i ograničenim vodama. Bepilotne letjelice (*engl. Unmanned Aerial Vehicle - UAV*) se koriste i kao fotogrametrijska i kao LiDAR platforma. Postoje i hibridna rješenja koja

omogućuju dobivanje batimetrije pomoću ehosonde koja vuče niskoletuća UAV ili integrirani radar koji prodire u zemlju (GPR). Mnoga rješenja za hidrografska istraživanja koja koriste USV platforme također se sve više koriste.³¹



Slika 7. Primjer batimetrijskog LiDAR-a

Izvor: <https://www.hydro-international.com/content/article/technology-in-focus-bathymetric-lidar>

Ove metode imaju ograničeno djelovanje koje najbolje funkcionira u različitim uvjetima i vrstama vodenih tijela. U slučaju hidroakustičkih istraživanja, glavno ograničenje je dubina vode kako bi se omogućio siguran prolaz hidrografske jedinice, dok su u slučaju daljinskog istraživanja parametri vode i vodnog tijela glavna briga, kao što je prozirnost, dubina vode ili vrsta dna. Iz tog se razloga podaci iz različitih izvora često kombiniraju u procesu spajanja kako bi se proizveo integrirani batimetrijski model koji pokriva cijelo područje istraživanja.

Kada je riječ o korištenju fotogrametrije i daljinskog istraživanja dva su posebna područja, plitke i ultraplitke vode, koje su obično nedostupne hidrografskim jedinicama. Za učinkovito mjerenje u ovim vodama potrebno je kombinirati hidrografske i fotogrametrijske metode. Nažalost, različiti skupovi podataka dobiveni različitim sensorima imaju različite raspone i strukture, povezane s gustoćom točaka, njihovom količinom ili prostornom

³¹ Development of Digital Bathymetric Models from Hydroacoustic and Photogrammetric Data | Hydro International (hydro-international.com)

raspodjelom i pogreškama mjerenja. Ispravna integracija podataka stoga zahtijeva razvoj posebnih tehnika.

3.3. RAZLIKE IZMEĐU TOPOGRAFSKIH I BATIMETRIJSKIH LiDAR SUSTAVA

Jedan od ključnih napredaka u razvoju batimetrijskih LiDAR sustava je mogućnost snimanja preko obalne zone putem dobivanja obalne topografije i batimetrije s jednim sustavom. Stoga se postavlja pitanje zašto se batimetrijska LiDAR tehnologija ne koristi češće za snimanje terena iznad vodene linije. Za odgovor na ovo pitanje potrebno je ispitati razlike između topografskih i batimetrijskih LiDAR sustava.³²

Karakteristike hardvera koje se koriste za svaki sustav utječu na horizontalni razmak podataka. Laserska snaga potrebna za batimetrijska mjerenja znatno je veća od one potrebne za topografska mjerenja, što rezultira manjim brojem mjerenja u sekundi i nižom brzinom pulsa. Nadalje, u batimetrijskim istraživanjima visina leta općenito je niža, ali zbog dizajna sustava ima minimalan utjecaj na točnost, veličinu laserskog otiska i širinu pojasa, dok u topografskim istraživanjima visina leta izravno utječe na sve ove čimbenike. U svrhu usporedbe koristila se tipična visina letenja za topografski LiDAR od oko 1100-1200 m. Ova visina leta rezultira većom rezolucijom, manjim otiskom lasera i većom širinom otkosa za topografski LiDAR, pokazujući prednost namjenskih topografskih LiDAR sustava nad batimetrijskim LiDAR sustavima koji se koriste za mjerenje zemaljskog okoliša. Još jedna razlika je da je vertikalna točnost od ± 15 cm za topografski LiDAR znatno bolja od ± 1 m za batimetrijske LiDAR sustave koji mjere teren.³³

U konačnici, vertikalna točnost bilo kojeg LiDAR sustava ovisi o strategiji obrade podataka. Na primjer, visine terena iz batimetrijskog LiDAR-a općenito se izvode iz prvog povratnog laserskog signala. U morskom okruženju ovaj pristup će dati najmanju dubinu vode što je općenito ono što je od interesa za hidrografsko mjerenje. Međutim, u zemaljskom okruženju obrada prvog povratnog signala često će dati visinu vegetacije ili zgrada, a ne tla. Stoga se za topografske primjene treba koristiti zadnji rezultat kako bi se odredile stvarne visine

³² Irish, J.L. and White, T.E. (1998) Coastal Engineering Applications of High-Resolution LiDAR Bathymetry. Coastal Engineering, Vol. 35, No., pp. 47-71.

³³ Quadros N. D., Collier P. A. and Fraser C.S. (2008) The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing

tla. Ovo je pristup koji se koristi u obradi podataka iz namjenski izgrađenih topografskih LiDAR sustava kada je potreban zemaljski DEM.³⁴

S obzirom da svako okruženje pruža drugačije izazove postoje i različiti LiDAR sustavi koji se koriste za batimetrijsko i topografsko mapiranje. Iako se u budućnosti razvojem tehnoloških inovacija situacija može promijeniti, trenutno za svaku aplikaciju postoje zasebni sustavi. S obzirom na cilj stvaranja besprijekornog DEM-a koji obuhvaća područje dodira kopna i mora postavlja se pitanje kako se dobiveni preklapajući topografski i batimetrijski LiDAR podaci mogu kombinirati na optimalan način.³⁵

Problem koji se javlja pri pokušaju kombiniranja topografskih i batimetrijskih podataka LiDAR-a je da se koriste vrlo različiti pristupi za određivanje vertikalnih podataka. U batimetrijskom LiDAR-u, sve visine/dubine su inicijalno povezane s lokalnim datumom plime i oseke. To se postiže mjerenjem visine ravnine iznad srednje morske površine u vrijeme promatranja i poznavanjem odnosa između srednje morske površine i datuma plime iz obližnjih promatranja mareografa. Ako se visine/dubine izvedene pomoću LiDAR-a moraju izraziti u odnosu na nacionalni podatak o visini, određuje se jednostavna transformacija između podatka o visini i podatka o plimi i oseci i primjenjuje se na područje istraživanja. Najveći nedostatak ovog pristupa je taj što je praktički nemoguće točno utvrditi izmjerene dubine, iako se topografske visine mogu provjeriti.³⁶

Pristup koji se koristi za određivanje vertikalnog podatka za topografski LiDAR prilično je drugačiji. Model geoida koristi se za pretvorbu elipsoidnih visina izvedenih iz kinematičkog GPS-a u ortometrijske visine (visine iznad geoida). Nakon toga, referentne vrijednosti se koriste za provjeru bilo kakvih lokaliziranih odstupanja između nacionalnog podatka o visini i izvedenih ortometrijskih visina. Tamo gdje se pronađu značajne (>0,1 m) razlike koristi se modeliranje ravninske površine kako bi se skenirane visine dodatno ispravile prema lokalnoj referentnoj visini.³⁷

³⁴ Quadros N. D., Collier P. A. and Fraser C.S. (2008) The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing

³⁵ Ibidem

³⁶ Barker, R., 2007. Discussion of ALB Trial Tenix, AAMHatch, Victorian DSE. Melbourne. Emery, W.J. and Thomson, R.E., 2001. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier Science B.V.: Amsterdam, The Netherlands, pp. 317.

³⁷ Quadros N. D., Collier P. A. and Fraser C.S. (2008) The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing

Iako bi konceptualno ova dva pristupa trebala dati usporedive rezultate, u praksi se pokazuju razlike u podacima koje se moraju rješavati tijekom procesa integracije podataka. Tehnika utvrđivanja referentne vrijednosti koja se upotrebljava za topografski LiDAR u osnovi je točnija i preciznija od batimetrijskog pristupa i to treba uzeti u obzir prilikom izračuna integracije.³⁸

Naposljetku, treba istaknuti da su batimetrijski LiDAR sustavi prvenstveno dizajnirani za pružanje podataka za hidrografske karte. U tom kontekstu oni vraćaju dubinu najviše značajke unutar granica laserske točke. Stoga se nazivaju „pristranim plićacima“. Budući da je laserska točka prilično velika u usporedbi s topografskim LiDAR sustavom često će se dogoditi da će, u području preklapanja, batimetrijski LiDAR prikazati veću visinu terena od one koju daje topografski laserski skener.³⁹

³⁸ Quadros N. D., Collier P. A. and Fraser C.S. (2008) The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing

³⁹ Ibidem

4. UPOTREBA I PRIMJENA LiDAR TEHNOLOGIJE

4.1. LiDAR U ATONOMNIM VOZILIMA

U kontekstu autonomne vožnje sustav percepcije pruža računalnu interpretaciju okoliša oko vozila. Iz perspektive korisnika rezultat sustava percepcije obuhvaća sljedeće tri razine informacija:

- 1) fizički opis: položaj, brzina i oblik objekta;
- 2) semantički opis: kategorije objekata;
- 3) predviđanje namjere: vjerojatnost ponašanja objekta.⁴⁰

Stoga se dobiveni LiDAR podaci koriste za otkrivanje, klasifikaciju, praćenje i predvidljivost kao odgovor na različite razine razmjena informacija. Zbog premoći LiDAR-a, kada je riječ o točnosti određivanja raspona, dobivena fizička informacija vrlo je pouzdana. Iako je semantička informacija koju pruža LiDAR više ili manje teža u odnosu na informaciju dobivenu iz kamere kontekstualni senzor dobar je prilikom prepoznavanja predmeta.

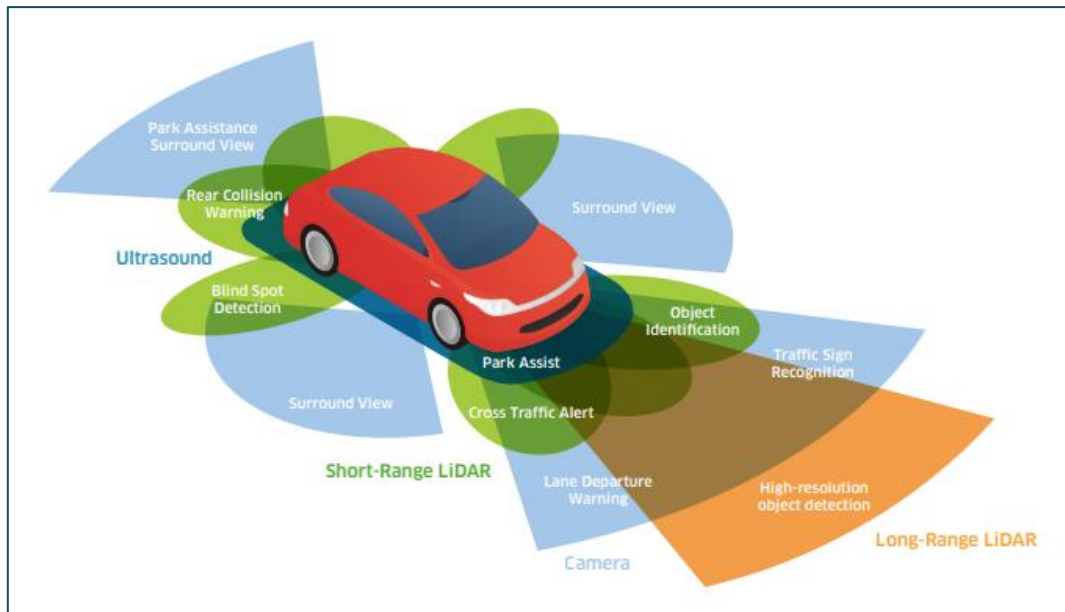
U praksi, LiDAR-i se kombiniraju s kamerama kako bi se međusobno nadopunjavali.⁴¹ Naime, kamera je loša u procjeni udaljenosti, dok LiDAR nije adekvatan za prepoznavanje predmeta. Precizne fizičke i semantičke informacije, zajedno s kartografskim informacijama, mogu poboljšati predviđene namjere bez ikakvih dvojbi.

Klasični LiDAR radi po principu skeniranja svog vidnog polja (*engl. Field of View - FoV*) pomoću jedne ili više laserskih zraka. Laserska zraka dobiva se putem amplitudno modulirane laserske diode koja emitira na bliskoj infracrvenoj valnoj duljini (*engl. Near-infrared – NIR*). Lasersku zraku natrag do skenera reflektira okolina, a povratni signal prima foto detektor. Računalo filtrira signal i mjeri razliku između prenesenih i primljenih signala koji su proporcionalnih udaljenosti. Raspon se procjenjuje iz modela senzora na temelju te razlike. Razlika u varijacijama reflektirane energije, koja se pojavljuje zbog površinskih materijala i stanja sredine između odašiljača i prijarnika, nadoknađuje se obradom signala. Rezultati

⁴⁰ Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems

⁴¹ Li, Y. (2013) Stereo vision and LIDAR based dynamic occupancy grid mapping: Application to scenes analysis for intelligent vehicles, Ph.D. dissertation, Univ. Technol. Belfort-Montbeliard

LiDAR-a uključuju 3D „oblake točaka“ koji se podudaraju sa skeniranim okruženjem i intenzitetima reflektiranih laserskih energija.⁴²



Slika 8. Senzorski sustav autonomnog vozila

Izvor: <https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-library-items/diodelaservehicle-wp-cl-ae.pdf>

Lidarski sustav može se podijeliti na sustav laserskog daljinomjera i sustav skeniranja.

Laserski daljinomjer sastoji se od:

- 1) laserskog odašiljača koji osvjetljava cilj moduliranim valom;
- 2) foto detektora koji generira elektronički signal iz reflektiranih fotona nakon optičke obrade i fotoelektrične konverzije;
- 3) optike koja podešava emitirani laser i usmjerava reflektirani signal na foto detektor i
- 4) elektronike za obradu signala koja procjenjuje udaljenost između izvora lasera i reflektirajuće površine, na temelju primljenog signala.⁴³

Sustav za skeniranje obično upravlja laserskim zrakama prema različitim vodoravnim i horizontalnim kutovima.

⁴² Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems

⁴³ Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems



Slika 9. Primjer prototipa autonomnog vozila koji je razvila Grupa Renault za projekt EVAPS sa senzorom Velodyne UltraPuck LiDAR na vrhu

Izvor: Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems

<https://www.semanticscholar.org/paper/Lidar-for-Autonomous-Driving%3A-The-Principles%2C-and-Li-Iba%3%B1ez-Guzm%3%A1n/586e90ae16e480217709e735f5aa0752aedc8e62/figure/0>

Autonomna vozila oslanjaju se na svoje sustave percepcije kako bi prikupila informacije o svom neposrednom okruženju. Potrebno je detektirati prisutnost drugih vozila, pješaka i drugih relevantnih subjekata. Sigurnosni problemi i potreba za točnim procjenama doveli su do uvođenja LiDAR sustava kao dopune sustavima percepcije koji se temelje na kameri ili radaru.⁴⁴

Daljinomjer koji laserskom zrakom mjeri udaljenost do objekta zove se laserski daljinomjer. Način na koji radi ovisi o vrsti modulacije signala koja se koristi u laserskoj zruci. Pulsirajući laseri se koriste kako bi se mjerilo vrijeme njihovog leta (*engl. Time of Flight - TOF*), a poznati su i kao laserski daljinomjeri s izravnom detekcijom. Uz to, laserski signal može se koristiti i kao frekvencijski modulirani kontinuirani val (*engl. Frequency-Modulated Continuous Wave - FMCW*) koji indirektno mjeri udaljenost i brzinu. Ovi valovi poznati su kao laserski daljinomjeri koherentne detekcije.⁴⁵

⁴⁴ Ibidem

⁴⁵ Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems

Poslani laser najprije se smanjuje pomoću prijenosnog medija, a zatim raspršuje kako se reflektira od ciljne površine. Djelomično ga snimaju prijemne optike, dok ga na kraju foto detektor pretvara u električni signal.⁴⁶

Na sadašnjem tržištu automobilskih LiDAR-a prevladavaju TOF LiDAR-i zbog svoje jednostavne strukture i metoda obrade signala. Međutim, mogućnost povećanja njihova maksimalnog raspona ograničena je određenom snagom prijenosa zbog zaštite očiju. Kod TOF LiDAR-a povratni signal može predstavljati smetnju zbog jake sunčeve svjetlosti ili laserskih zraka od ostalih TOF LiDAR-a. LiDAR, kao sustav sa usmjerenom percepcijom, sazrijevati će za algoritme temeljene na modelu obrade. Međutim, novonastale DL metode mijenjat će ovo područje. Tradicionalne metode obrade podataka dobivenih putem LiDAR sustava jednostavne su za primjenu. DL metode utemeljene na podacima pokazale su nevjerojatne mogućnosti u pružanju semantičkih informacija, što je slaba točka tradicionalnih metoda.⁴⁷

4.2. LiDAR U PROŠIRENOJ STVARNOSTI (AR)

Proširena stvarnost (*engl. Augmented Reality - AR*) je prošireni, odnosno uvećani prikaz stvarnosti koji nastaje preklapanjem digitalnih informacija na slici predmeta koji se vide kroz uređaj.⁴⁸ Tehnike umjetne inteligencije – UI (*engl. Artificial Intelligence - AI*) doživjele su dosad nezabilježan rast i primjenjuju se u raznim industrijama. Kombinacija AR-a i umjetne inteligencije sljedeći je istaknuti smjer u nadolazećim godinama u kojem mnoge industrije i akademska zajednica prepoznaju važnost njihova usvajanja. Uz pomoć umjetne inteligencije mnoge industrije će povećati svoj potencijal kako bi ubrzale i poboljšale proizvodnju, rukovanje pogreškama, proces sastavljanja i pakiranja, te educirale radnu snagu.⁴⁹

Zahtjevi industrije mijenjaju se svake godine jer globalna svjetska konkurencija potiče stalan tehnološki napredak. Proširena stvarnost (AR) je jedna od vodećih tehnoloških aplikacija u različitim područjima.⁵⁰ AR su računalno generirane virtualne informacije koje se preklapaju sa stvarnom scenom koja se naziva renderiranje što je proces realnog prikazivanja digitalnih informacija tako da se čini dijelom stvarne okoline.⁵¹ Nedavno je došlo do revolucionarnog

⁴⁶ Ibidem

⁴⁷ Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems

⁴⁸ Jeevan S. Devagiri J. S., Sidike Paheding S., Quamar Niyaz Q., Yang X., Smith S. (2022) Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges, Volume 207

⁴⁹ Ibidem

⁵⁰ Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M. et al. (2011) Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimed Tools Appl* 51, 341–377

⁵¹ Dubois, E., Nigay, L. (2000) Augmented reality: which augmentation for which reality?

razvoja u području proširene stvarnosti, a široko je prihvaćena u brojnim industrijama uključujući videoigre, obrazovanje i zabavu. Programeri stvaraju inpute u digitalnom svijetu koji se prilagođavaju promjenama u korisnikovom okruženju u stvarnom vremenu, poput pokreta, grafika i prikaz GPS podataka. Proširena stvarnost ili skraćeno AR smatra se znatno korisnom sve u smislu kako bi se popravila djelotvornost i učinkovitost kod industrijskih operacija.⁵²

Mješovita stvarnost (*engl. Mixed Reality - MR*) ukrštava fizičku stvarnost s virtualnom u kojoj fizički i virtualni svjetovi mogu međusobno djelovati, dok se AR javlja u fizičkom okruženju, ali s informacijama koje se dodaju virtualno. Iskustva mješovite stvarnosti mogu se ostvariti putem naočala kao što su holografski uređaji. S druge strane, AR se može se iskusiti putem raznih uređaja, uključujući AR naočale i pametne telefone/tablete. Zbog popularnosti uređaja AR se pojavljuje kao dio četvrte industrijske revolucije.⁵³

Četvrta industrijska revolucija opisuje trenutno stanje u proizvodnoj industriji. Mehanizacija, masovna proizvodnja i automatizacija bile su ključne ideje za prvu, drugu i treću industrijsku revoluciju. Poznata i kao pametna proizvodnja, ova industrijska revolucija temelji se na tehnologijama čiji je cilj:

- 1) ubrzati preostali posao koji zahtijeva ljudsko stručno znanje i vještine;
- 2) kombinirati inteligenciju s automatiziranom infrastrukturom kako bi robotski sustavi postali autonomni i sposobni donositi odluke na temelju podataka⁵⁴

Tehnike umjetne inteligencije (AI) i ML obećavaju poboljšanje fleksibilnosti i učinkovitosti AR sustava. Ogroman uspjeh AI/ML u otkrivanju predmeta i srodnim zadacima pokazuje njihove primjene u AR domeni. AI ima potencijal revolucionirati AR aplikacije na isti način na koji je AR revolucionirao proizvodnju. Umjetna inteligencija već je ostvarila znatna poboljšanja u proizvodnim industrijama te se u aplikacije može uvesti više primjena, kao što su kontrola i upravljanje informacijama za materijale.⁵⁵

⁵² Fraga-Lamas, P. et al. (2018) A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard IEEE Access

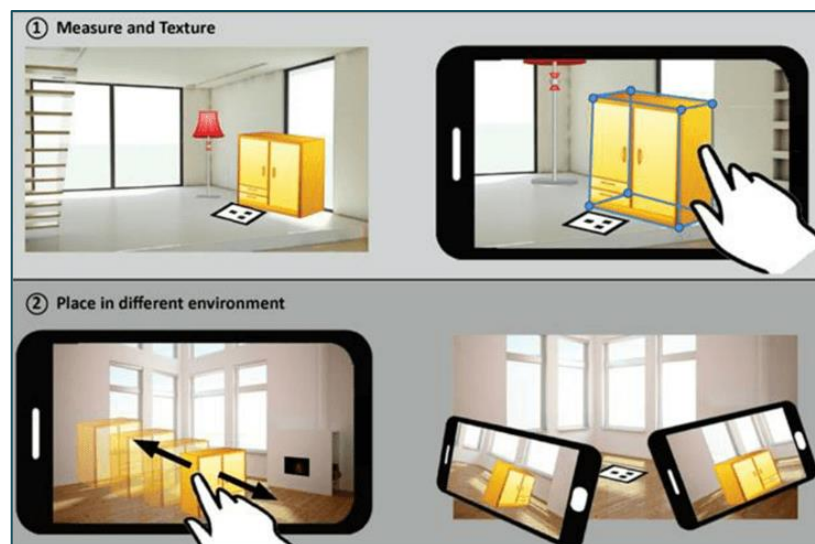
⁵³ Francesco De Pace, F., Manuri, F., Sanna A. (2018) Augmented Reality in Industry 4.0

⁵⁴ Rießmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015) Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.

https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries

⁵⁵ Furini, F., Rai, R., Smith, B., Colombo, G., and Krovi, V. (2016) Development of a manufacturing ontology for functionally graded materials. In ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers

Pametni telefoni danas su najpopularniji i najčešći uređaji zbog prednosti koje imaju. Integriraju se s najnovijom tehnologijom kako bi pružili najbolje moguće aplikacije. Trenutno je fokus istraživača i industrije iskoristiti mogućnosti mobitela kako bi ponudili nešto izvan stvarnosti, a to je mobilni sustav proširene stvarnosti – MSPS (*engl. Mobile Augmented Reality System - MARS*). Ovom tehnologijom korisnik može dobiti informacije o području ispred svog mobilnog uređaja što mu pomaže da dobije pojedinosti o lokaciji, nazivu ulice i druge relevantne informacije koje su mu dostupne. Ovo je jedan od primjera mobilne AR aplikacije koja pruža podatke o lokaciji. Drugi primjer je kada korisnik može vizualizirati predmet koji želi kupiti. Primjerice, korisnik može imati ideju kako će pokućstvo izgledati postavljanjem kamere u tom položaju, a AR pruža pogled na scenu s pokućstvom koje tamo zapravo nije ni bilo.⁵⁶



Slika 10. Primjer proširene stvarnosti tehnologijom mobilne aplikacije

Izvor: <https://hr.myservername.com/what-is-augmented-reality-technology>

Mobilna proširena stvarnost primjenjuje se i u navigacijskim sustavima integriranjem geoprostornih podataka s ovom vrstom tehnologije. Navigacija pomoću mobilnih AR lokacijskih servisa iznimno je popularna jer korisnik može vidjeti virtualno okruženje koje omogućava navigaciju na svom mobilnom uređaju. Osim navigacijskih usluga, korisnik može dobiti više podataka o svojoj okolini. Najčešći predmeti na koje korisnik nailazi u svojoj okolini

⁵⁶ Lohani, B. (2014) Augmented Reality System Using Lidar Point Cloud Data For Displaying Dimensional Information Of Objects On Mobile Phones, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5, 2014ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy

su zgrade, električni ili telefonski stupovi, drveće, natpisne ploče, znamenitosti i sl. Ove značajke moguće je trenutno prepoznati po nazivu i lokaciji koristeći usluge popularne mobilne karte. Mobilni korisnik će više cijeniti takve usluge ukoliko bude u mogućnost znati veličinu tih objekata na licu mjesta.⁵⁷



Slika 11. Navigacija pomoću mobilnog AR lokacijskog servisa

Izvor: <https://preporucamo.com/najbolje-android-navigacije/2015/07/05/>

Problem određivanja dimenzija objekata koji se vide na mobilnom uređaju rješava se korištenjem LiDAR „oblakom točaka“. Naime, „oblak točaka“ može se dobiti laserskim skeniranjem bilo kojeg izvora. Dimenzije između dviju točaka u LiDAR 3D „oblaku točaka“ lako se mogu izračunati. LiDAR podaci sa zemaljskog i/ili mobilnog laserskog skenera pružaju 3D „oblake točaka“ određenog mjesta zajedno s intenzitetom svake točke. Cilj je dobiti dimenziju zgrada i drugih objekata putem snimljene mobilne slike koristeći LiDAR „oblake točaka“ koji su pohranjeni na poslužitelju.⁵⁸

Tijekom procesa nastajanja slike koju je snimio pametni telefon dobiva se RGB slika i njezine se karakteristike razlikuju od podataka u „oblaku točaka“ koji su dobiveni zemaljskim/mobilnim laserskim skenerom. Nadalje, postoji i razlika u rezoluciji skupova podataka. Mobilna slika ima drugačiju rezoluciju od 2D prikaza podatkovnih točaka. Sukladno

⁵⁷ Ibidem

⁵⁸ Ibidem

tome, odabrana metodologija trebala bi biti takva da dovede do pouzdanih rezultata bez obzira na razliku u rezoluciji. Još jedan važan problem je dostupnost oštrih pozicija i orijentacijskih informacija mobilne kamere. S obzirom na navedeno, glavni izazov je dobiti odgovarajuću „komunikaciju“ između mobilne slike i podataka koje daje LiDAR.⁵⁹

U pametne telefone integrirane su različite vrste senzora poput GPS-a, mjerača akceleracije, magnetometra i žiroskopa koji omogućuju akceleraciju i orijentaciju mobilne kamere u bilo kojem trenutku u svjetskom koordinatnom sustavu. Pretpostavlja se da je pametni telefon svjestan svoje lokacije i orijentacije u takvom okruženju. Ovi podaci su priloženi unutar EXIF oznaka mobilnih uređaja.⁶⁰

Tri su modula pomoću kojih se može riješiti postojeći problem. Prvi modul koristi parametre mobilne kamere kako bi se odredila lokacija i opseg LiDAR „oblaka točaka“ koji odgovaraju mobilnoj slici i koji projiciraju dobivene podatke na 2D ravninu. Vrijednosti intenziteta LiDAR „oblaka točaka“ koriste se kako bi se dobili digitalni brojevi za istu i kojima se stvara prividan intenzitet slike koji odgovara mobilnoj slici. U drugom modulu detektiraju se odgovarajući pikseli između prividne i mobilne slike. Naposljetku, u trećem modulu odgovarajuće točke iz oba skupa podataka upotrebljavaju se za dobivanje modela kojim će se jedna slika transformirati u drugu. Nakon transformacije, točke koje odgovaraju pikselima slike biraju se iz LiDAR podataka i koriste za izračunavanje dimenzija.⁶¹

4.3. LiDAR U UBLAŽAVANJU KLIMATSKIH PROMJENA

Biološka raznolikost, opći pojam koji se odnosi na raznolikost i promjenjivost života na Zemlji, važan je čimbenik koji utječe na usluge ekosustava koje donose dobrobit čovječanstvu, naročito javno reguliranim uslugama.⁶²

Međutim, zbog sve većeg pritiska antropogenih aktivnosti i klimatskih promjena, stopa izumiranja globalne biološke raznolikosti je oko 100-1000 puta veća nego prije ljudske dominacije Zemljom.⁶³ Iako su uloženi brojni naporu u očuvanju biološke raznolikosti, nedavna

⁵⁹ Lohani, B. (2014) Augmented Reality System Using Lidar Point Cloud Data For Displaying Dimensional Information Of Objects On Mobile Phones, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5, 2014ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy

⁶⁰ Ibidem

⁶¹ Ibidem

⁶² Cardinale, B. J., J. E. Duffy, A. Gonzalez, D. U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, et al. 2012. Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity. *Nature* 486: 59–67.

⁶³ Pimm, S. L., G. J. Russell, J. L. Gittleman, and T. M. Brooks. 1995. The Future of Biodiversity. *Science* 269: 347–350.

je studija pokazala da nema pokazatelja koji dokazuju da se stopa gubitka biološke raznolikosti znatno smanjila.⁶⁴ Točne procjene trodimenzionalnih (3D) vegetacijskih struktura i terenskih podataka preduvjeti su za studije bioraznolikosti. Tradicionalno, vegetacijski parametri i digitalni podaci o terenu dobivaju se „in situ“ mjerenjima.⁶⁵ Uz prihvatljive troškove i manje napore, daljinskim istraživanjima mogu se prikupiti kontinuirana prostorna promatranja površine zemljišta što predstavlja alternativni način mapiranja parametara šuma i digitalnih podataka o terenu.

LiDAR, najsuvremenija aktivna tehnologija za daljinsko očitavanje, koristi usmjereni laserski impuls za mjerenje raspona do ciljanog objekta na površini Zemlje. Može učinkovito prodrijeti u krošnju šume i stoga se koristi za precizno mapiranje 3D vegetacijskih struktura i dobivanje digitalnih informacija o prostoru.⁶⁶ Trenutno su zrakoplovi najčešće korištene platforme na koje se postavljaju LiDAR senzori. Brojne studije uspješno su ih koristile za mapiranje parametara vegetacije diljem ekosustava i digitalnih informacija o terenu, a ti su se parametri pokazali vrlo vrijednima u istraživanjima biološke raznolikosti.⁶⁷ Međutim, visoki troškovi prikupljanja zrakoplovnih lidarskih podataka i ograničenja u pogledu trajanja i sigurnosti misije ograničili su njihovu upotrebu u studijama o biološkoj raznolikosti.

Bespilotne letjelice pružaju alternativnu, jeftiniju verziju platforme na koju se postavljaju LiDAR senzori i koji se upotrebljavaju kao važni alati za istraživanje bioraznolikosti u cijelom ekosustavu. No, „oblak točaka“ visoke preciznosti zahtijeva vrlo stabilnu platformu i vrlo precizne informacije o smjeru leta i putanji, a koje je teško dobiti putem bespilotnih letjelica.⁶⁸

⁶⁴ Butchart, S. H. M., M. Walpole, B. Collen, A. Van Strien, J. P. W. Scharlemann, R. E. A. Almond, J. E. M. Baillie, et al. 2010. Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science* 328: 1164–1168.

⁶⁵ Houghton, R. 2005. “Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* 11 (6): 945–958.

⁶⁶ Lohr, U. (1998) Digital Elevation Models by Laser Scanning. *The Photogrammetric Record* 16: 105–109

⁶⁷ Bergen, K. M., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Henebry, G. M., Hunsaker, C. T., Imhoff, M. L., Nelson, R. F., Parker, G. G. and Radeloff, V. C. (2009) Remote Sensing of Vegetation 3-D Structure for Biodiversity and Habitat: Review and Implications for Lidar and Radar Spaceborne Missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 114 (G2)

⁶⁸ Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. and Turner, D. (2012) Development of a UAV-Lidar System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing* 4: 1519–1543



Slika 12. Snimka iz drona koja otkriva žličarke i sive čaplje na gnijezdima

Izvor: <https://www.biom.hr/foto-istrazivanje-dronom-otkrilo-je-vrijedne-nalaze-na-cesmi-i-vranskom-jezeru/>

Još uvijek ne postoji sustavno rješenje za korištenje LiDAR senzora postavljenih na bespilotne letjelice kojima se istražuje bioraznolikost, od hardvera do softvera, od prikupljanja do naknadne obrade podataka.

Zrakoplovni i svemirski podaci daljinskog očitavanja generirani iz različitih optičkih senzorskih i aktivnih mikro softverskih sustava poput radara i GIS tehnologije (tehnologija geografskog informacijskog sustava) u velikoj se mjeri koriste za pripremu šumskog inventara i analitičku studiju šumskog pokrova tijekom određenog razdoblja, kao i za procjenu krčenja i degradaciju šuma. Međutim, podaci iz LiDAR-a u velikoj su mjeri korišteni u procjeni šumske biomase za ublažavanje klimatskih promjena u mnogim dijelovima svijeta. Činjenica je da su LiDAR sustavi isplativiji, svestraniji, operativno fleksibilniji i pouzdaniji alati za dobivanje uzoraka u svrhu gospodarenja šumama.⁶⁹

Primjerice, posljednjih nekoliko desetljeća u Nepal u se intenzivno koristila tehnika daljinskog istraživanja, posebno fotogrametrija iz zraka u šumarskom sektoru. Prvo sustavno istraživanje šuma provedeno je u razdoblju od 1963. do 1967. godine korištenjem crno-bijelih zračnih fotografija snimljenih 1963, i 1964. godine. Istraživanje je, međutim, bilo ograničeno

⁶⁹ Lim, S, Trinder, J. C., Turner, R. (2010) Full Waveform Lidar Remote Sensing for Forest Inventory in New South Wales, Australia. School of Surveying and Spatial Information Systems, UNSW, Sydney, NSW 2052, Australia.

na Terai i brdsko-planinska područja zemlje generiranjem podataka/inventara o prirodnim šumama namijenjenim u komercijalne svrhe.⁷⁰

Godine 1986., projektom mapiranja zemljišnih resursa, pripremljene su zemljopisne karte o korištenju zemljišta na području cijelog Nepala u omjeru 1:50 000 korištenjem fotografija iz zraka iz razdoblja 1978./79. godine s opsežnim provjerama tla. Dobiveni podaci su poslužili za procjenu šumske biomase i pripreme osnovnog inventara šumskih resursa. Projektom mapiranja zemljišnih resursa stavio se poseban naglasak na šume, grmlje, poljoprivredu i travnjake. Šumske jedinice su dodatno bile razvrstane na razne komponente poput šumskih pokrova, povezanih vrsta, gustoće krošnji i kategorija zrelosti. Informacije iz projekta korištene su u šumarskom sektoru Nepala 1989. godine.⁷¹

Isto tako, 2000. godine provedeno je mapiranje šumskog pokrova cijeloga Nepala pomoću podataka dobivenih indijskom daljinskom detekcijom u suradnji sa JAFTA-om (*engl. Japan Forest Technology Association*). Štoviše, 2001. godine Odjel za istraživanje Vlade Nepala izradio je topografske karte cijele zemlje. Jedna od glavnih komponenti ovih karata bile su prikupljene informacije o zemljišnom pokrovu koje su bile vrlo korisne za procjenu šumske biomase u svrhu studije o klimatskim promjenama. Za regiju Terai i središnje brdske regije Nepala, a na temelju snimaka dobivenih iz zraka 1992. i 1996. godine, izrađene su topografske karte u omjeru 1:25 000. U razdoblju od 1996. do 1997. godine za brdsko planinska područja i područje Himalaje izrađene su topografske karte u omjeru 1: 50 000. Baze podataka stvorene su 2002. godine pomoću ARC/INFO GIS softverskog programa kao vrijednog alata u svrhu pripreme nacionalnog inventara šume i procjene šumske biomase.⁷²

Godine 2009. globalno mapiranje šume je bilo završeno. Jedan od glavnih ciljeva mapiranja je bio dobivanje informacija o opsegu šumskog pokrova. Godine 2010., u suradnji sa finskom vladom, pokrenut je petogodišnji projekt procjene šumskih resursa i šumskog inventara Nepala. Projekt je vodio Zavod za zaštitu šuma i tla, a provedbena agencija bio je Odjel za istraživanje i izmjeru šuma. Glavni ciljevi ovog projekta odnosili su se na dobivanje podataka o stanju postojećeg šumskog pokrova, rasta zaliha, drvenih proizvoda, šuma u zaštićenim područjima, resursa stabala izvan šumskih područja, biološke raznolikosti, biomase

⁷⁰ Rabindra Man Tamrakar Impacts of Climate Change and Remote Sensing Technology in its Mitigation Options through Forest Management, Nepalese Journal on Geoinformatics - 10, 2068

⁷¹ Ibidem

⁷² Rabindra Man Tamrakar Impacts of Climate Change and Remote Sensing Technology in its Mitigation Options through Forest Management, Nepalese Journal on Geoinformatics - 10, 2068

iznad tla i razine ugljika u tlu. Za potrebe projekta, odnosno dobivanja baze podataka potrebnih šumskih resursa za programe REDD-A, koristile su se satelitske snimke visoke razlučivosti. Također, s obzirom na korištenje LiDAR tehnologije, projektom su se dobile trodimenzionalne informacije o šumskim strukturama koje su bile potrebne za izračune biomase za studiju ublažavanja klimatskih promjena.⁷³

Iako je u Nepal u LiDAR tehnologija uvedena tek 2010. godine, njegova primjena u ove svrhe počela se koristiti puno ranije.

Jedan od glavnih razloga korištenja ove tehnologije je njena sposobnost bilježenja vremenski promjenjivih povratnih signala koji pružaju informacije o strukturi drveća, uključujući visinu drveća i visinu površine tla.⁷⁴ LiDAR može prodrijeti kroz gornji sloj krošnji stabala i pružiti potrebne informacije o podzemnim slojevima. Istraživanja su također pokazala da su procjene visina krošnji koje se dobivaju putem LiDAR tehnologije identične terenskim izmjerama. Nadalje, podaci dobiveni Lidar-om rješavaju glavnu problematiku vezanu uz optičke podatke koji nisu u mogućnosti razlikovati donje od gornjih vegetacijskih pokrova.⁷⁵ Još jedna prednost korištenja LiDAR tehnologije jest da se njeni sustavi temelje na aktivnim daljinskim sustavima koji jednostavno koriste impulse laserske svjetlosti. Na taj način mogu se čak i noću zabilježiti biofizički podaci.⁷⁶

Iako podaci dobiveni putem LiDAR tehnologije imaju značajnu prednost u odnosu na optičke podatke, naročito kada se radi o procjeni strukture šume i biomase, potrebno je provesti daljnja istraživanja o intenzitetu LiDAR-a i utjecajima uzrokovanim kutom senzora, vrsti površine ili atmosferskim prilikama.⁷⁷

Efekt staklenika uzrokuje globalno zatopljenje i njegova glavna posljedica su klimatske promjene. Unatoč tome, doprinos ukupnih emisija stakleničkih plinova koje Nepal šalje globalnoj zajednici je beznačajna u usporedbi s razvijenim zemljama. Nepal se već susreo s nekoliko negativnih učinaka zbog globalnih klimatskih promjena što je dovelo do otapanja

⁷³ Ibidem

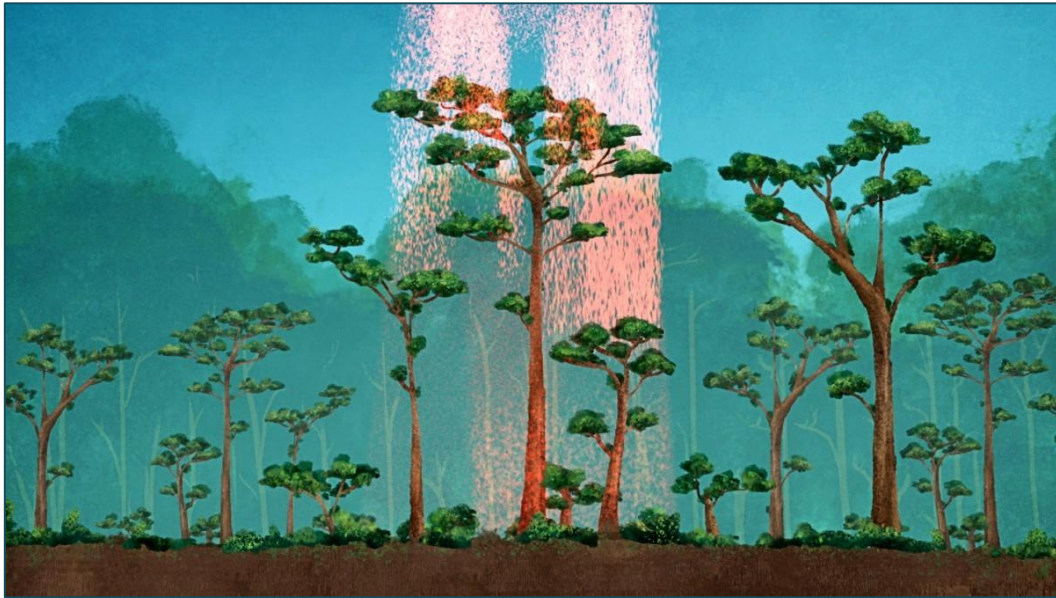
⁷⁴ Zhang, Z., W. Ni, A. Fu, Z. Guo, Guoqing Sun, and D. Wang, 2008. "Estimation of Forest Structural Parameters from LiDAR and SAR data," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008

⁷⁵ Tickle, P. K., Witte, C., Lee, A., Lucas, R. M., Jones, K. and Austin, J. (2002) *Use of Airborne Scanning Lidar and Large-Scale Photography within a Strategic Forest Inventory and Monitoring Framework*. Bureau of Rural Sciences and Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, Kingston, Australia

⁷⁶ Rabindra Man Tamrakar *Impacts of Climate Change and Remote Sensing Technology in its Mitigation Options through Forest Management*, Nepalese Journal on Geoinformatics - 10, 2068

⁷⁷ Ibidem

ledenjaka na Himalaji, smanjena poljoprivredne proizvodnje, gubitka biološke raznolikosti i ekosustava, povećanja dezertifikacije, poplava, stočarske proizvodnje i promjena u društvenoj strukturi. Propadanje i krčenje šuma znatno je doprinijelo količini globalnih emisija stakleničkih plinova. Zbog toga postoji i visok rizik od ispuštanja CO₂ plina izvorno uskladištenog u šumskoj biomasi. Održivo gospodarenje šumama obavezno je kako bi se ublažio utjecaj klimatskih promjena u Nepal u kao jednoj od zemalja u razvoju.⁷⁸



Slika 13. Prikaz korištenja reflektirane energije u svrhe mapiranja šuma u 3D (prikaz visine, gustoće krošnji i sadržaja CO₂)

Izvor: <https://www.bug.hr/tehnologije/laserima-iz-svemira-nadziru-krčenje-suma-na-zemlji-28515>

Podaci dobiveni daljinskim istraživanjima, uključujući podatke iz LiDAR-a, korisni su za pripremu inventara šuma kao i za procjenu šumske biomase koja je ključna za provedbu i praćenje programa REDD-A za ublažavanje klimatskih promjena u Nepal u.⁷⁹

4.4. LiDAR U GEODETSKOM MJERENJU

Primjena LiDAR tehnologije u istraživanju zemljišnih resursa obuhvaća geodetska mjerenja i mapiranja, istraživanja i eksploataciju mineralnih resursa, paćenje i rano otkrivanje geoloških katastrofa. Geodetska mjerenja i mapiranja obuhvaćaju različita područja poput korištenja i klasifikacije zemljišta, topografskog mapiranja, otkrivanja urbanističkih promjena, urbanističko 3D modeliranje i urbanističko planiranje i projektiranje. LiDAR tehnologijom

⁷⁸ Ibidem

⁷⁹ Ibidem

riješili su se problemi brojnih tradicionalnih metoda mjerenja i preciznog nadziranja što predstavlja velik značaj za istraživanje i upravljanje zemljišnim resursima.⁸⁰

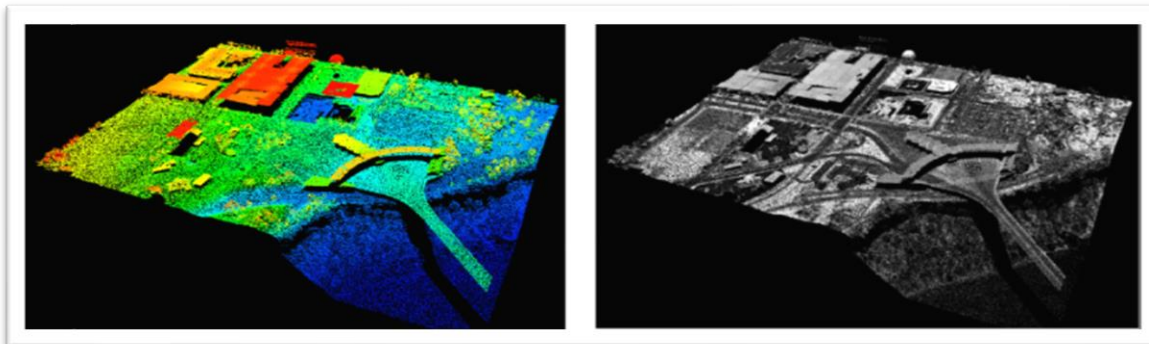
LiDAR sustav dobiva trenutne informacije o položaju lasera putem dinamičkog diferencijalnog GPS prijemnika. Dobivaju se podaci o položaju leta sukladno IMU navigaciji i bilježi se vrijeme impulsa kružnog kretanja putem laserskog uređaja za skeniranje za udaljenost između laserskih otisaka i referentnih točaka. Na temelju koordinatnog sustava, a sukladno principu prostorne triangulacije, dobivaju se informacije o 3D koordinatama ciljne točke. Kada se putem lociranja odašiljača LiDAR-a dobiju 3D koordinate ciljne točke u proces konverzije uključeno je više koordinatnih sustava. G-točka je projekcijsko središte laserskog skenera, a podatke o lokaciji pruža diferencijalni GPS. Svaka koordinata predstavlja parametar položaja, odnosno nagib, skretanje i okretanje. Informacija o 3D koordinatama „oblaka točaka“ dobivene LiDAR sustavom bespilotne letjelice teško može ispuniti svoju svrhu zbog čega je potrebno prethodno obraditi izvorne podatke „oblaka točaka“. Prethodna obrada laserskog „oblaka točaka“ pruža potpune i dobre izvorne podatke za primjenu dobivenih podataka „oblaka točaka“. Proces se sastoji od četiri dijela: prethodna obrada podataka iz „oblaka točaka“, rutinska provjera podataka iz „oblaka točaka“ nakon prethodne obrade, spajanje podataka iz „oblaka točaka“ i uklanjanje zvuka iz „oblaka točaka“.⁸¹

Za prethodnu obradu podataka često se koristi komercijalni softver. Kao prvo, dekodiraju se originalni laserski podaci i datum orijentacije poput POS, DGPS i IMU podataka. Nakon toga se dobivaju GPS i IMU datoteke, te datoteke „oblaka točaka“ dobivene laserskim skeniranjem. Naposljetku, jedinstvena mjera dobiva se konvertiranjem podataka iz „oblaka točaka“ u format. Format *.las integriran je s naknadno obrađenim podacima lokacijske orijentacije kako bi se dobile terenske koordinate. Podaci „oblaka točaka“ konvertiraju se u standardni *.las format i implementiraju s naknadno obrađenim podacima lokacije. Na taj način dobivaju se koordinate tla.⁸²

⁸⁰ Jianxin Wei, J. and Guo Y. (2018) The application of LiDAR in land resources survey, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 382, Issue 5

⁸¹ Ibidem

⁸² Ibidem



Slika 14. Primjer LiDAR podataka. Lijeva slika prikazuje obojani „oblak točaka“ po visini, dok je prikaz slike noću slika korespondencije intenziteta

Izvor: Lohani, B., Ghosh, S. Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences volume 87, pages 567–579 https://www.researchgate.net/figure/Example-of-LiDAR-data-Image-on-left-shows-point-cloud-colored-as-per-height-while-image_fig1_321142803

Nakon prethodne obrade podataka iz „oblaka točaka“ potrebno je provesti rutinsku provjeru samog „oblaka točaka“ koja uključuje provjeru njihovog opsega i dosega, njihovu gustoću i podudaranje između navigacijskih traka. Obično se koristi poseban softver za obradu koji obavlja rutinske provjere podataka „oblaka točaka“. Primjerice, softver LiDAR360 ispituje gustoću „oblaka točaka“.⁸³

Pri primjeni LiDAR sustava na bespilotnoj letjelici potrebno je odrediti više pravaca zbog velikog raspona mjernog područja ili nepropusnosti ciljnog objekta. Međutim, na preklapanje dviju susjednih ruta utječu vanjski čimbenici tako da se preklapanje podataka ne mora nužno podudarati. To nesumnjivo može utjecati na ukupnu raspoređenost gustoće „oblaka točaka“ i naknadnu uporabu. Stoga nije potrebno povezivati podatke „oblaka točaka“ prije praktične primjene.⁸⁴

Neizbježno je da će pri primjeni LiDAR sustava na bespilotnoj letjelici za dobivanje podataka „oblaka točaka“ utjecati različiti čimbenici. To može biti buka (poput nečistih i povremenih zvukova) ili velike vodene površine koje stvaraju šupljine u podacima „oblaka točaka“.⁸⁵

⁸³ Jianxin Wei, J. and Guo Y. (2018) The application of LiDAR in land resources survey, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 382, Issue 5

⁸⁴ Ibidem

⁸⁵ Ibidem

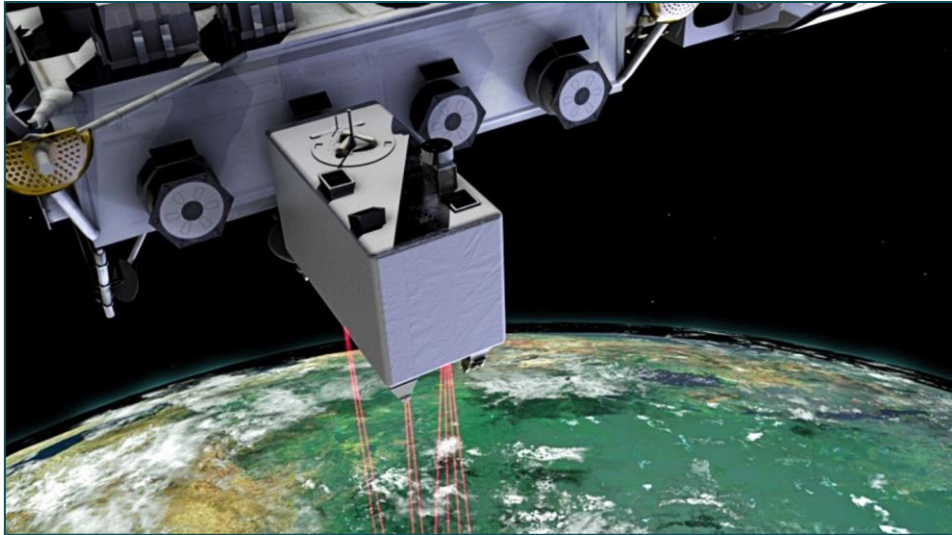


Slika 15. Prikaz 3D objekta

Izvor: <https://www.gzr.hr/usluge/3d-point-cloud/>

LiDAR tehnologija ima karakteristike dobivanja bogatih i kratkih informacija o određenom objektu uopće. Stoga ima važnu ulogu u upotrebi i evaluaciji zemljišnih resursa. LiDAR tehnologija može se koristiti za izgradnju zemlje korištenjem baza podataka. Bazom podataka mogu se pratiti informacije u stvarnom vremenu kao što su ukupni podaci o svakom zemljištu, njegovom opsegu, lokaciji i površini. Također je moguće provesti izmjeru zemljišnih promjena koje se mogu obraditi u stvarnom vremenu. Vrlo je korisno što se s LiDAR-om može uspostaviti informacijski sustav zaštite poljoprivrednog zemljišta. Sustav može pratiti korištenje poljoprivrednog zemljišta u stvarnom vremenu i spriječiti njegovo neopravdano iskorištavanje. S LiDAR-om je vrlo korisno uspostaviti sustav planiranja korištenja zemljišta. Sustav također može navoditi osoblje na racionalnu upotrebu, praćenje i evaluaciju zemljišta s ciljem ispravljanja pogrešaka ili neopravdanog ponašanja. Geoprostorni podaci dobiveni LiDAR tehnologijom korisni su za provođenje nadzora, procjene i kontrolu geoloških opasnosti i minimiziranja štete uzrokovane geološkim katastrofama kako bi se učinkovito zaštitili ljudski životi i njihova imovina.⁸⁶

⁸⁶ Jianxin Wei, J. and Guo Y. (2018) The application of LiDAR in land resources survey, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 382, Issue 5



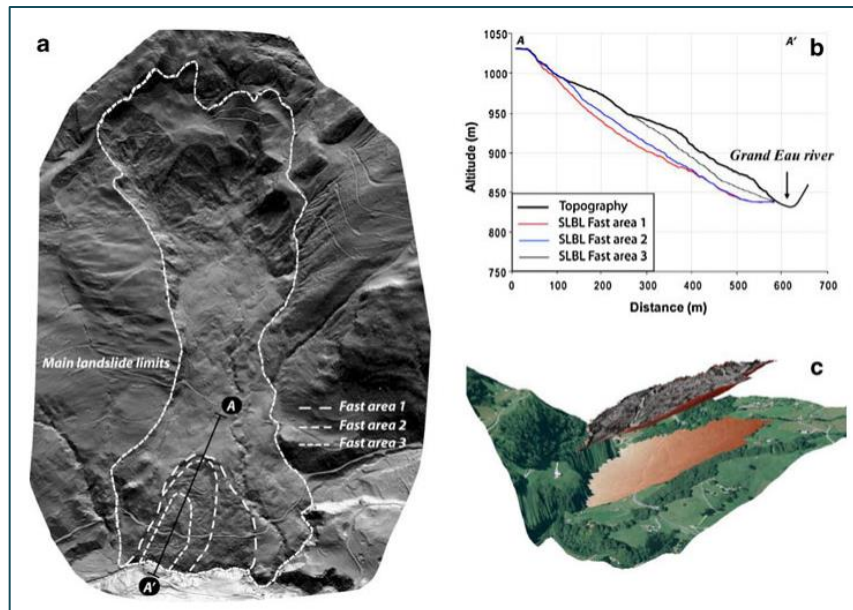
Slika 16. Prikaz nadzora krčenja šuma laserom iz svemira

Izvor: <https://www.bug.hr/tehnologije/laserima-iz-svemira-nadziru-krčenje-suma-na-zemlji-28515>

Primjerice, laserskim skeniranjem iz zraka provodi se mapiranje i snimanje klizišta i općenito geološko mapiranje povećanjem rezolucije kontura klizišta čime se identificiraju nagibi i razmješteni materijali.⁸⁷ Unatoč tome, još uvijek se koriste iste konceptualne metode za otkrivanje klizišta. Morfološke karakteristike klizišta (primjerice strmine, pokretni materijali, otisci) lako je razgraničiti na temelju brežuljaka dobivenih analizom podataka HRDEM (*engl. The High Resolution Digital Elevation Model*) LiDAR-a.⁸⁸

⁸⁷ Borlat C, Epard JL, Jaboyedoff M. (2007) Use of a laser-DTM for geological survey, structural interpretation and update of existing maps: example in the Jura Mountains (Switzerland). *Geophys Res Abst* 9:07424

⁸⁸ Carter W, Shrestha R, Tuell D, Bloomquist D, Sartori M. (2001) Airborne laser swath mapping shines new light on earth's topography. *Eos, Trans, Am Geophys Union* 82(46):549, 550, 555



Slika 17. Klizište La Frasse u Švicarskoj; a) 3D prikaz osjenčanog reljefa glavne površine klizišta. Tri dijela koja se kreću brže od okolnih područja identificirana su na vrhovima klizišta; b) presjek područja gdje je kretanje brže i gdje su prikazani lomove na površini korištenjem SLBL metode (engl. Sloping Local Base Level Method); c) 3D prikaz volumena područja

Izvor: Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abella'n A., Derron M-C., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini A. (2012) *Use of LIDAR in landslide investigations: A Review Nat Hazards*, 61:5–28

Detekcija se može provesti ručno (detekcijom oka) ili automatski (topografski prikaz zakrivljenosti ili neravnine).

4.5. LiDAR U OCEANOGRAFIJI

Vrlo je malo mogućnosti skeniranja unutrašnjosti oceana iz daljine. Iako se uvelike koriste aktivni i pasivni zvukovi (zvučni valovi), isti su ograničeni potpunim odrazom svoje energije na graničnoj površini vode i zraka. Stoga zvučni sustavi moraju biti u doticaju sa vodom. Elektromagnetski sustavi ograničeni su visokom apsorpcijom morske vode osim uskog područja u plavo-zelenom dijelu vidljivog spektra, a razvijeni su i aktivni i pasivni senzori za djelovanje u tom spektralnom području. Optički sustavi korisni su ne samo kao alternativa za zračne i satelitske senzore, već i na mjestima gdje bi se mogli primijeniti zvučni sustavi, s obzirom da reagiraju na različite komponente u vodi.⁸⁹

⁸⁹ Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

Sposobnost mjerenja boje oceana iz satelita revolucionirala je znanstveno razumijevanje biogeokemije gornjeg sloja oceana na globalnoj razini, a na temelju ukupno dobivene koncentracije klorofila sadržanog u fitoplanktonu. U ovim istraživanjima opisane su globalne prostorne raspodjele, sezonski ciklusi i desetogodišnji trendovi u koncentracijama fitoplanktona. Zajedno sa drugim dobivenim informacijama, boja oceana dobivena procjenom koncentracije klorofila može se upotrijebiti kako se bi se procijenila primarna učinkovitost oceana u istim vremenskim i prostornim uvjetima, a to je stopa pretvorbe CO₂ u organsku tvar. Mjerenje boje oceana može pružiti samo ograničene informacije o dubinskoj rasprostranjenosti sastavnih dijelova oceana.⁹⁰

Najčešća vrsta LiDAR-a koja se primjenjuje u oceanografiji koristi zeleno polarizirano svjetlo. Takav LiDAR može biti sastavljen od komercijalnih komponenti i kao takav biti vrlo snažan i otporan za primjenu i rad u otežanim uvjetima. Može biti projektirani za rad s malim zrakoplovom, budući da zahtijeva snagu do 1 kW težinu do 100 kg i volumen do 0,5 m³. Osnovne komponente LiDAR odašiljača su laser i standardna optika koja oblikuje snop. Najčešći izvor je Nd:YAG laser s krutom jezgrom, Q-prekidačem i udvostručenom frekvencijom koji radi pri valnoj duljini od 532 nm. Duljina pulsa obično iznosi 1 do 10 ns, što odgovara razlučivosti od 0,11 do 1,1 m u morskoj vodi. Laseri koji imaju čvrstu jezgru najčešće upotrebljavaju lasersku pumpu i bljeskalice te mogu proizvesti 100 do 500 mJ impulsa pri brzini ponavljanja od 10 do 100 Hz. Također su dostupni i diodni laseri koji su prikladniji kada se želi postići veća stopa ponavljanja pri nižoj energiji impulsa. Uglavnom se odabire valna duljina od 532 nm zbog dostupnosti učinkovitog, kompaktnog i robusnog lasera.⁹¹ Apsorpcija svjetlosti u čistoj morskoj vodi ima najnižu vrijednost na valnoj duljini od 450 nm, što je 0,3 puta veća vrijednost od 532 nm.⁹² Kako se povećava koncentracija drugih sastojaka poput fitoplanktona, obojenog otopljenog organskog materijala (engl. Colored Dissolved Organic Material - CDOM) i organskog otpada, prelazi na zeleno. Koncentracija CDOM-a i organskog otpada je 3 puta veća pri 450 nm i 2,5 puta veća od odgovarajućih vrijednosti pri 532 nm.⁹³

Jedan od najkritičnijih parametara na strani prijemnika LiDAR-a je dinamički raspon. Drugi parametar koji treba ozbiljno razmotriti je vidno polje. Količina pozadinskog svjetla koju

⁹⁰ Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

⁹¹ Morel, A. (1991) Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications, *Prog. Oceanogr.* 26(3), 263–306

⁹² Mobley, C. D. (1994) *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego

⁹³ Bricaud, A., Morel, A. and Preiur, L. (1981) Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains, *Limnol. Oceanogr.* 26(1), 43–53

prikuplja prijemnik niska je kada se koriste vrlo usko vidno polje i uskopojasni filter za interferenciju. Međutim, ova konfiguracija dovodi do smanjenja LiDAR signala.⁹⁴

Polarizacija se pokazala važnim alatom u oceanografskom LiDAR-u. Postoje dva fenomena koji depolariziraju LiDAR signal kada je izvorni laser polariziran. Mnoge raspršene čestice u oceanu nisu homogene, već su dovoljno nepravilne da će raspršeno svjetlo biti djelomično depolarizirano, čak i pod raspršenim kutom od 180 stupnjeva. Pod tim se podrazumijevaju ribe, zooplanktoni i fitoplanktoni. Osim toga, višestruko raspršivanje prema naprijed djelomično će depolarizirati svjetlost čak i za idealno homogena područja.⁹⁵

Oceanografski LiDAR-i rade s intenzivnim pulsevima vidljivog svjetla, te se mora uzeti u obzir sigurnost očiju. Ukoliko bi izloženost bila iznad graničnih vrijednosti trebao bi se ograničiti pristup istom ili bi se trebala upotrebljavati zaštitna oprema za oči. Često i sam promatrač može zaustaviti laserski prijenos ukoliko netko pristupi opasnoj zoni. Za avione koji lete na manjim visinama i nose LiDAR-e sustav je dizajniran tako da na površini mora bude siguran za oči, dok je pilot opskrbljen laserskim zatvaračem na daljinsko upravljanje ukoliko se zrakoplov nađe ispod apsolutne visine leta.⁹⁶

U području istraživanja jedan od problema u nizu predstavljaju i morski sisavci. Kako bi se spriječilo uznemiravanje morskih sisavaca postoje propisi i za brodske i zrakoplovne operacije. Za razliku od čovjeka, morski sisavci manje su podložni oštećenjima vida. Stoga sustav koji se koristi i koji ne može naštetiti ljudskom oku, a sukladno normama, nije štetan ni za morske sisavce.⁹⁷

Prednosti zračnog LiDAR-a za istraživanja u području ribarstva jesu ta da se, prije premještanja ribe, velika područja brzo mogu pokriti i to po nižim troškovima nego s površinskim plovilom.⁹⁸

Mogućnost otkrivanja jata riba pomoću zračnog LiDAR-a istraživalo se 1974. godine.⁹⁹ Godine 1976. zrakoplovni LiDAR američke mornarice koristio se za otkrivanje ribe južno od

⁹⁴ Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

⁹⁵ Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

⁹⁶ Ibidem

⁹⁷ Zorn, H. M., Churnside, J. H. and Oliver, C. W. (2000) Laser safety thresholds for cetaceans and pinnipeds, *Mar. Mammal Sci.* 16(1), 186–200

⁹⁸ Churnside J. H. and Wilson, J. J. (2001) Airborne lidar for fisheries applications, *Opt. Eng.* 40(3), 406–414

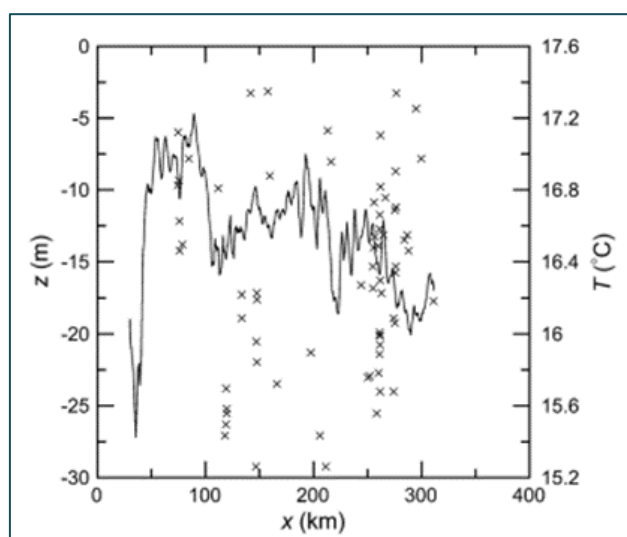
⁹⁹ Murphree, D. L., Taylor, C. D. and McClendon R. W. (1974) Mathematical modeling for the detection of fish by an airborne laser, *AIAA J.* 12(12), 1686–1692

Floride.¹⁰⁰ Već sljedeće godine istim sustavom mjerili su se vertikalni profili jata riba u blizini New Jerseya. Godine 1978. LiDAR postavljen na brodu koristio se za otkrivanje ribe u kavezima. Samim time pokazalo se koliko je korisna primjena LiDAR-a u ribarstvu.¹⁰¹

Na slici 18. prikazane su dubine i položaji 69 pojedinačnih riba koje su otkrivene unakrsno polariziranim lidarskim signalom noću uz obalu Oregona.¹⁰² Tijekom dana, na istoj putanji leta, otkrivene su samo dvije pojedinačne ribe, što upućuje na vrstu koja je danju na dubini, a noću blizu površine. Na području unutar 40 km od obale, gdje je more bilo hladno, a morske struje uzlazne, nije uočena niti jedna riba. Ove značajke upućuju na to da je većina te riba vjerojatno bila dugoperajna tuna (*lat. thunnus alalunga*).

Tablica 1. Prikaz položaja otkrivenih riba

Na lijevoj crti označena je dubina z (izražena u metrima), a na donjoj položaj x (izražen u kilometrima) od obale duž 46° sjeverne geografske širine gdje su otkrivene pojedine ribe. Na desnoj crti označena je temperatura površine mora T



Izvor: Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

Slične metode koristile su se za otkrivanje velikog zooplanktona iako su pojedini o korištenom filtriranju i pragovima drugačiji. Odgovarajućom obradom dobivena je korelacija

¹⁰⁰ Squire J. L. and Krumboltz, H. (1981) Profiling pelagic fish schools using airborne optical lasers and other remote sensing techniques," *Mar. Tech. Soc. J.* 15(4), 29–31

¹⁰¹ Churnside, J. H., Sawada, K. and Okumura, T. (2005) A comparison of lidar and echo sounder performance in fisheries, *J. Mar. Acoust. Soc. Jpn.* 28(3), 175–187

¹⁰² Churnside J. H. et al. (2011) Comparisons of lidar, acoustic and trawl data on two scales in the Northeast Pacific Ocean, *CalCOFI Rep.*

od 0,78 metodom između mjerenja LiDAR-om i mjerenja zvuka veslonožaca na području zaljeva Aljaske.¹⁰³

Osim za procjenu biomase, LiDAR se može upotrebljavati i za istraživanje aspekata ponašanja riba. Primjerice, podaci LiDAR-a korišteni su zajedno sa podacima s infracrvenog radiometra s istog zrakoplova kako bi se pokazalo da su srdele povezane s termalnim područjima sjeveroistočnog dijela Tihog oceana, čime su se potvrdile ranije pretpostavke.¹⁰⁴

Podaci iz LiDAR-a koristili su se zajedno s vizualnim opažanjima kako bi se prikazao razvoj procesa hranidbe kitova, morskih ptica i haringi na području jugoistočnog dijela Beringovog mora.¹⁰⁵ Sukladno drugim metodama, također se dokazalo da ribe blizu površine mora izbjegavaju istraživačka plovila koja istražuju njihovu zastupljenost u moru.¹⁰⁶

LIDAR također može profilirati optičke raspršene slojeve na gornjim slojevima oceana, bilo da se nalazi na brodu ili zrakoplovu. Većina ovih slojeva je fitoplankton koji se sastoji od velikih stanica algi. Posebno su važni tanki slojevi planktona u čijem su pojedinačnom tankom sloju pronađene hranjive tvari i fitoplanktoni koji se često povezuju s piknoklinom. Ti slojevi mogu biti debljine do 10 cm, dugi i do jednog kilometra i postojati danima. Takvi koncentrirani slojevi mogu utjecati na biogeokemijske procese na gornjem sloju oceana, uključujući primarnu produktivnost i stvaranje pojave cvjetanja algi.¹⁰⁷

LiDAR podaci dobiveni iz zraka korišteni su za istraživanje tankih slojeva i mehanizma njihovih stvaranja. Dobiveni rezultati pokazali su da su slojevi povezani s uzlaznim morskim strujama nošenim vjetrom, priljevom svježeg mora i morskim vrtlozima koji imaju tople jezgre. Na slici 6. prikazan je primjer sloja planktona unutar anticiklonalnog vrtloga s toplom jezgrom u zaljevu Aljaske.¹⁰⁸

¹⁰³ Churnside, J. H., Sawada, K. and Okumura, T. (2001) A comparison of lidar and echo sounder performance in fisheries, *J. Mar. Acoust. Soc. Jpn.* 28(3), 175–187

¹⁰⁴ Gauldie, R. W., Sharma, S. K. and Helsley, C. E. (1996) Lidar applications to fisheries monitoring problems, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56(6), 1459–1468

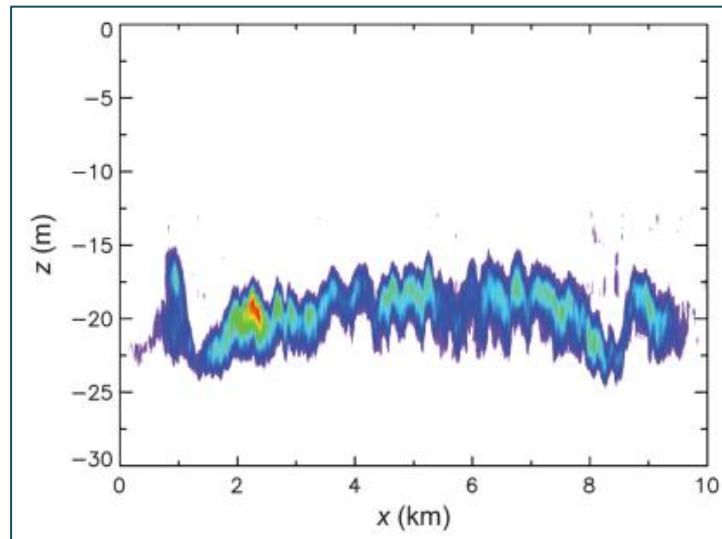
¹⁰⁵ Churnside J. H. et al. (2011) Comparisons of lidar, acoustic and trawl data on two scales in the Northeast Pacific Ocean, *CalCOFI Rep.*

¹⁰⁶ De Robertis A. and Handegard, N. O. (2013) Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review, *ICES J. Mar. Sci.* 70(1), 34–45

¹⁰⁷ Durham W. M. and Stocker, R. (2012) Thin phytoplankton layers: characteristics, mechanisms, and consequences, *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4(1), 177–207

¹⁰⁸ Churnside J. H. and Donaghay, P. L. (2009) Thin scattering layers observed by airborne lidar, *ICES J. Mar. Sci.* 66(4), 778–789

Tablica 2. Tanki planktonski sloj unutar toplog ruba u zaljevu Aljaske; u odnosu na dubinu z izraženu u metrima i udaljenost duž putanje leta x izražene u kilometrima



Izvor: Churnside, J. H. Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405 (2017)

Mjehurići blizu površine oceana, koji nastaju lomljenjem valova, utječu na niz važnih procesa. Olakšavaju razmjenu plinova između atmosfere i oceana i aerosola u koji nastaju kondenzacijom oblaka. Mjehurići proizvode zvuk u oceanu i utječu na njegovo širenje. Također raspršuju svjetlost. Dok se većina mjehurića nalazi na visini 1 do 2 m oceana, lomljivi valovi mogu proizvesti plimu koja se prostire do 20 m. Povratak LiDAR-a iz mjehura teoretski se procjenjuje pomoću simulacije Monte-Carlo i geometrijske optike. Povratak kopolariziranog LiDAR-a proporcionalan je ukupnom zračnom volumenu unutar osvijetljenog područja, neovisno o raspodjeli veličine mjehurića dok god su mjehurići okrugli i gustoća dovoljno mala kako bi se zanemarilo višestruko raspršivanje. U laboratoriju se provjerava linearna ovisnost LiDAR signala o koncentraciji broja mjehurića. Dobiveni podaci upućuju na činjenicu da prijamnik kopolariziranog LiDAR-a može predvidjeti profile prazne frakcije mjehurića što je neizmjerljivo važno u istraživanjima koja se bave izmjenama procesa zračnog/morskog plina.¹⁰⁹

¹⁰⁹Li W. et al. (2009) Influence of characteristics of micro-bubble clouds on backscatter lidar signal, *Opt. Express* 17(20), 17772–17783

5. ZAKLJUČAK

LiDAR tehnologija je svestrana, no ne samo kao tehnika daljinskog otkrivanja putem senzora već i kao metoda koja omogućuje i podupire razvoj ostalih tehnika daljinskog opažanja i aplikacija globalnih satelitskih navigacijskih sustava. Unatoč činjenici što se razvio u isto vrijeme kad i radar, LiDAR nije sazio poput drugih oblika daljinskih istraživanja.

Međutim, eksponencijalni rast razvojnih tehnologija (laseri, foto detektori, senzor položaja) kao i algoritama za obradu podataka LiDAR-a u zadnja dva desetljeća ubrzava proces njegovog sazrijevanja. Daljnji tehnički razvoj trebao bi dovesti do izuma novih aplikacija, a povećanjem razvojnog prostora samog LiDAR-a veliki napredak očekuje se i od sinergijskog pristupa kombiniranja s drugim oblicima aktivnih i pasivnih tehnika daljinskog istraživanja.

Danas su LiDAR sustavi vrlo popularni u autonomnim vozilima gdje se LiDAR koristi kao glavni senzor koji detektira moguće prepreke. Uz to, postoje višestruke LiDAR aplikacije poput zračnog LiDAR sustava kojim se provodi mapiranje nekog područja. Zračni LiDAR-i uglavnom se upotrebljavaju u studijama utjecaja na okoliš, za predviđanje kiše, mapiranje dubine mora, navigaciju brodova i drugo. Energija pulsa LiDAR-a može biti vrlo niska i u osnovi odlučuje do koje udaljenosti LiDAR može baciti i natrag primiti signal. Za tipičan LiDAR sustav srednja vrijednost kvadratne pogreške leži u nekoliko centimetara. Za precizne LiDAR sustave ona može iznositi i do mikrometra. Točnost LiDAR-a obično bi trebala prelaziti 90%, dok u aplikacijama koje su kritične, poput autonomnih vozila, trebala bi prelaziti 95%. Postoje LiDAR sustavi čija točnost doseže i do 99%. U prijenosu raspona vidljive svjetlosti valna duljina LiDAR-a iznosi 400 do 700 nm, no njegov preferirani raspon iznosi 1064 nm koji predstavlja infracrveno područje.

Još uvijek postoje određeni programski kodovi i tehnički problemi u primjeni zrakoplovnih LiDAR podataka. S LiDAR-om kao izvorom podataka za istraživanje zemljišta mogu se provesti opsežna i dubinska istraživanja. Osim dobivanja tehnički bogatijih katastarskih izmjera primjenom LiDAR tehnologije otkrivat će se nove metode i ideje u različitim područjima.

Za razumijevanje dobivenih podataka korišteni su različiti pristupi putem njihove kategorizacije. Međutim, velik dio obrade podataka i dalje ovisi o njihovom ručnom unosu. Očekuje se da će putem umjetne inteligencije i raznih istraživačko-spoznajnih tehnika pronaći više modela za korištenje i razumijevanje dobivenih podataka iz LiDAR sustava. LiDAR podaci

mogu se prikazati kroz brojne različite kategorije koje se temelje na lokalnim i globalnim geometrijskim parametrima.

Općenito govoreći, na tržištu su danas dostupni jeftini LiDAR sustavi, no vjeruje se da će trend LiDAR-a kao senzora u skorijoj budućnosti doživjeti eksponencijalni rast.

LITERATURA

1. AAMHatch (2006) Airborne Laser Scanning Technical Specifications, dostupno na: <http://www.aamhatch.com.au>
2. Abellan A., Vilaplana JM., Martinez J. (2006) Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nuria (Eastern Pyrenees, Spain). *Eng Geol* 88:136–148.
3. Balenović, I., Alberti, G., Marjanović, H (2013) Airborne Laser Scanning - the Status and Perspectives for the Application in the South-East European Forestry. *SEEFOR* 4(2), str 59-79
4. Barker, R., (2007) Discussion of ALB Trial Tenix, AAMHatch, Victorian DSE. Melbourne. Emery, W.J. and Thomson, R.E., 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier Science B.V.: Amsterdam, The Netherlands, pp. 317.
5. Bergen, K. M., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Henebry, G. M., Hunsaker, C. T., Imhoff, M. L., Nelson, R. F., Parker, G. G. and Radeloff, V. C. (2009) Remote Sensing of Vegetation 3-D Structure for Biodiversity and Habitat: Review and Implications for Lidar and Radar Spaceborne Missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 114 (G2)
6. Borlat C, Epard JL, Jaboyedoff M. (2007) Use of a laser-DTM for geological survey, structural interpretation and update of existing maps: example in the Jura Mountains (Switzerland). *Geophys Res Abst* 9:07424
7. Bricaud, A., Morel, A. and Preiur, L. (1981) Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains, *Limnol. Oceanogr.* 26(1), 43–53
8. Butchart, S. H. M., Walpole, B. Collen, A. Van Strien, J. P. W. Scharlemann, R. E. Almond, J. E. M. Baillie, et al. (2010) Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science* 328: 1164–1168.
9. Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, D. U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, et al. (2012) Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity. *Nature* 486: 59–67.
10. Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M. et al. (2011) Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimed Tools Appl* 51, 341–377

11. Carter W, Shrestha R, Tuell D, Bloomquist D, Sartori M (2001) Airborne laser swath mapping shines new light on earth's topography. *Eos, Trans, Am Geophys Union* 82(46):549, 550, 555
12. Charles, T., Boehm, J. (2015) Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM, *Remote Sens.* 2015,7
13. Churnside J. H. and Donaghay, P. L. (2009) Thin scattering layers observed by airborne lidar, *ICES J. Mar. Sci.* 66(4), 778–789
14. Churnside J. H. and Wilson, J. J. (2001) Airborne lidar for fisheries applications, *Opt. Eng.* 40(3), 406–414
15. Churnside J. H. et al. (2011) Airborne remote sensing of a biological hot spot in the South-eastern Bering Sea, *Remote Sens.* 3(3), 621–637
16. Churnside J. H. et al. Comparisons of lidar, acoustic and trawl data on two scales in the Northeast Pacific Ocean, *CalCOFI Rep.*
17. Churnside, J. H. (2017) Review of profiling oceanographic lidar, *Opt. Eng.* 53(5), 051405
18. Churnside, J. H., Sawada, K. and Okumura, T. (2005) A comparison of lidar and echo sounder performance in fisheries, *J. Mar. Acoust. Soc. Jpn.* 28(3), 175–187
19. De Robertis A. and Handegard, N. O. (2013) Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review, *ICES J. Mar. Sci.* 70(1), 34–45
20. Development of Digital Bathymetric Models from Hydroacoustic and Photogrammetric Data | Hydro International (hydro-international.com)
dostupno na:
dostupno na: <http://www.certainty3d.com/pdf/technotes/CalibratedImageReq.pdf>
21. Dubois, E., Nigay, L. (2000) Augmented reality: which augmentation for which reality?
22. Durham W. M. and Stocker, R. (2012) Thin phytoplankton layers: characteristics, mechanisms, and consequences, *Ann. Rev. Mar. Sci.* 4(1), 177–207
23. Fouladinejad, F., Matkan A., Hajeb M, Brakhasi F. (2019) History and applications of space-borne lidars, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, 2019 GeoSpatial Conference 2019 – Joint Conferences of SMPR and GI Research, 12–14 October 2019, Karaj, Iran*
24. Fraga-Lamas, P. et al. (2018) A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard *IEEE Access*
25. Francesco De Pace, F., Manuri, F., Sanna A. (2018) *Augmented Reality in Industry 4.0, Published 2018*

26. Furini, F., Rai, R., Smith, B., Colombo, G., and Krovi, V. (2016) Development of a manufacturing ontology for functionally graded materials. In ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers
27. Gauldie, R. W., Sharma, S. K. and Helsley, C. E. (1996) Lidar applications to fisheries monitoring problems, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56(6), 1459–1468
28. Guan, H.; Li, J.; Cao, S.; Yu, Y. (2016) Use of Mobile LiDAR in Road Information Inventory: A Review. *Int. J. Image Data Fusion* 2016, 7, 219–242.
29. Heritage GL., Large ARG. (2009) *Laser scanning for the environmental sciences.* Wiley-Blackwell, London
30. Houghton, R. (2005) Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* 11 (6): 945–958.
31. http://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/lidar/components.html
32. http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Topographic%20LiDAR.htm
33. https://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud<https://geo-matching.com/airborne-laser-scanning>
34. <https://gmvcast.uark.edu/scanning-2/airborne-laser-scanning/>
35. <https://hr.myservername.com/what-is-augmented-reality-technology>
36. <https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-library-items/diodelaservehicle-wp-cl-ae.pdf>
37. <https://simple.wiktionary.org/wiki/laser>
38. https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries
39. <https://www.gzr.hr/usluge/3d-point-cloud/>
40. <https://www.inphenix.com/en/advantages-of-lidar-laser/>
41. https://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/mission/mission-objectives_prt.htm
42. https://www.researchgate.net/figure/Ground-based-hyperspectral-and-terrestrial-laser-scanner-data-collection-in-the-field_fig4_308860877
43. <https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/bibliographies.php>
44. Irish, J.L. and White, T.E., (1998) Coastal Engineering Applications of High-Resolution LIDAR Bathymetry. *Coastal Engineering*, Vol. 35, No., pp. 47-71.
45. Jeevan S. Devagiri J. S., Sidike Paheding S., Quamar Niyaz Q., Yang X., Smith S. (2022) Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges, Volume 207

46. Jianxin Wei, J. and Guo Y. (2018) The application of LiDAR in land resources survey, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 382, Issue 5
47. Knaak, T. TopoDOT Calibrated Image Requirements (#1001); Certainty 3D: Orlando, FL, USA, 2010.
48. Li W. et al. (2009) Influence of characteristics of micro-bubble clouds on backscatter lidar signal, *Opt. Express* 17(20), 17772–17783
49. Li, Y. and Ibanez-Guzman J. (2020) Lidar for Autonomous Driving, The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems
50. Lim, S, Trinder, J. C., Turner, R. (2010) Full Waveform Lidar Remote Sensing for Forest Inventory in New South Wales, Australia. School of Surveying and Spatial Information Systems, UNSW, Sydney, NSW 2052, Australia
51. Lohani, B. (2014) Augmented Reality System Using Lidar Point Cloud Data For Displaying Dimensional Information Of Objects On Mobile Phones, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5, 2014ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy
52. Lohani, B., Ghosh, S. Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences volume 87, pages 567–579
53. Lohr, U. (1998) Digital Elevation Models by Laser Scanning. *The Photogrammetric Record* 16: 105–109
54. Lopac, N.; Jurdana, I.; Brnelić, A.; Krljan, T. (2022) Application of Laser Systems for Detection and Ranging in the Modern Road Transportation and Maritime Sector. *Sensors*, 2022, 22(16), 5946.
55. Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., Farrell, S., Fricker, H., Gardner, A., Harding, D., Jasinki, M., Kwok, R., Magruder, L., Lubin, D., Luthcke, S., Morison, J., Nelson, R., Neuenschwander, A., Palm, S., Popescu, S., Shum, CK., Schutz, Bob E., Smith, B., Yang, Y., Zwally, J. (2017) The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation4. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273.
56. Mobley, C. D. (1994) *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego
57. Morel, A. (1991) Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications, *Prog. Oceanogr.*26(3), 263–306

58. Murphree, D. L., Taylor, C. D. and McClendon, R. W. (1974) Mathematical modeling for the detection of fish by an airborne laser, *AIAA J.* 12(12), 1686–1692
59. Neoge, S., Mehendale N. Review on LiDAR technology
60. Olsen, M.J.; Johnstone, E.; Driscoll, N.; Ashford, S.A.; Kuester, F. (2009) Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: Parameter analysis. *J. Surv. Eng.* 2009, 135, 161–169.
61. Petrie G, Toth CK. (2008) I. Introduction to laser ranging, profiling and scanning, II. Airborne and spaceborne laser profiles and scanners, III. Terrestrial laser scanners (chapters 1 to 3). In: Shan J, Toth CK (eds) *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*, CRC Press, Taylor & Francis
62. Pimm, S. L., G. J. Russell, J. L. Gittleman, and T. M. Brooks. (1995) The Future of Biodiversity. *Science* 269: 347–350.
63. Pirc, T. Modern LiDAR Systems: Sensing for Every Industry, dostupno na: <https://www.analog.com/en/thought-leadership/modern-lidar-systems-sensing-for-every-industry.html>
64. Puttonen, E.; Lehtomäki, M.; Kaartinen, H.; Zhu, L.; Kukko, A.; Jaakkola, A. (2013) Improved sampling for terrestrial and mobile laser scanner point cloud data. *Remote Sens.* 2013, 5, 1754–1773.
65. Quadros N. D., Collier P. A. and Fraser C.S. (2008) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8.* Beijing
66. Rabindra Man Tamrakar Impacts of Climate Change and Remote Sensing Technology in its Mitigation Options through Forest Management, *Nepalese Journal on Geoinformatics - 10*, 2068
67. Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015) Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.
68. Saarni, M. (2015) New White Paper: On the Use of LiDAR Data at AmeriFlux Sites
69. Squire J. L. and Krumboltz, H. (1981) Profiling pelagic fish schools using airborne optical lasers and other remote sensing techniques,” *Mar. Tech. Soc. J.* 15(4), 29–31
70. Tickle, P. K., Witte, C., Lee, A., Lucas, R. M., Jones, K. and Austin, J. (2002) Use of Airborne Scanning Lidar and Large-Scale Photography within a Strategic Forest Inventory and Monitoring Framework. Bureau of Rural Sciences and Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, Kingston, Australia

71. Vosselman G., Maas H-G. (2010) – Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press Taylor & Francis Group, Scotland (UK)
72. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. and Turner. D. (2012) Development of a UAV-Lidar System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing* 4: 1519–1543.
73. Wehr A, Lohr U (1999) Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 54:68–82.
74. Williams, K.; Olsen, M.J.; Roe, G. V.; Glennie, C. (2013) Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR. *Remote Sens.* 2013, 5, 4652–4692.
75. Winker, D. M., Pelon, J. R., & McCormick, M. P., 2003. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds. *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*, 4893, 1.
76. Zhang, Z., Ni, W., Fu, A., Guo, Z., Guoqing Sun, and Wang, D. (2008) Estimation of Forest Structural Parameters from LiDAR and SAR data, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008
77. Zorn, H. M., Churnside, J. H. and Oliver, C. W. (2000) Laser safety thresholds for cetaceans and pinnipeds, *Mar. Mammal Sci.* 16(1), 186–200
78. Jaboyedoff, M, Oppikofer, T., Abella'n A., Derron M-C., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini A. (2012) Use of LIDAR in landslide investigations: A Review *Nat Hazards*, 61:5–28

KAZALO KRATICA

1. **AI** (engl. Artificial Intelligence) - umjetna inteligencija – UI
2. **ALS** (engl. Airborne Laser Scanning) - lasersko skeniranje iz zraka
3. **AR** (engl. Augmented Reality) - proširena stvarnost
4. **CDOM** (engl. Colored Dissolved Organic Material) - obojeni otopljeni organski materijal
5. **DEM** (engl. Digital Elevator Model) – digitalni model površine
6. **FMCW** (engl. Frequency-Modulated Continuous Wave) - frekvencijski modulirani kontinuirani val
7. **FoV** (engl. Field of View) - vidno polje
8. **GNSS** (engl. Global Navigation Satellite System) - Globalni satelitski navigacijski sustav
9. **GPS** (engl. Global Positioning System) - globalni sustav za pozicioniranje
10. **HRDEM** (engl. The High Resolution Digital Elevation Model) – digitalni model visoke razlučivosti
11. **IMU** (engl. Inertial Measurement Unit) - inercijalna mjerna jedinica
12. **INS** (engl. Inertial Navigation System) - inercijski navigacijski sustav
13. **JAFTA** (engl. Japan Forest Technology Association)
14. **Laser** (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
15. **LiDAR** (engl. Light Detection and Ranging)
16. **MARS** (engl. Mobile Augmented Reality System) - mobilni sustav proširene stvarnosti – MSPS
17. **MBES** (engl. Multibeam Echosounders) - višezračna ehosonda
18. **MLS** (engl. Mobile Laser Scanning) – mobilno lasersko skeniranje
19. **MR** (engl. Mixed Reality) mješovita stvarnost
20. **NIR** (engl. Near-infrared) - infracrvena valna duljina
21. **NOAA** (engl. National Oceanic and Atmospheric Administration) - Američka Nacionalna agencija za istraživanje oceana i atmosfere
22. **RGB** - crveno-zeleno-plavi spektar
23. **SBES** (engl. Single Beam Echosounders) - jednozračna ehosonda
24. **SLS** (engl. Spaceborne Laser Scanning) - lasersko skeniranje iz svemira
25. **TLS** (engl. Terrestrial Laser Scanning) - lasersko skeniranje sa zemlje
26. **TOF** (engl. Time of Flight) - vrijeme leta

- 27. **UAV** (engl. Unmanned Aerial Vehicle) - bespilotna letjelica
- 28. **USV** (engl. Unmanned Surface Vehicle) – neimenovano površinsko vozilo

POPIS SLIKA

- *Slika 1. Podjela laserskog skeniranja*
- *Slika 2. Primjer laserskog skeniranja sa zemlje*
- *Slika 3. Prikaz zračnog snimanja LiDAR-om. Crvene točke prikazuju podatke o objektima na tlu dobivene LiDAR-om.*
- *Slika 4. Povijesni razvoj LiDAR satelita*
- *Slika 5. Svemirska letjelica CALIPSO*
- *Slika 6. Princip topografskog LiDAR-a*
- *Slika 7. Primjer batimetrijskog LiDAR-a*
- *Slika 8. Senzorski sustav autonomnog vozila*
- *Slika 9. Primjer prototipa autonomnog vozila koji je razvila Grupa Renault za projekt EVAPS sa senzorom Velodyne UltraPuck LiDAR na vrhu*
- *Slika 10. Primjer proširene stvarnosti tehnologijom mobilne aplikacije*
- *Slika 11. Navigacija pomoću mobilnog AR lokacijskog servisa*
- *Slika 12. Snimka iz drona koja otkriva žličarke i sive čaplje na gnijezdima*
- *Slika 13. Prikaz korištenja reflektirane energije u svrhe mapiranja šuma u 3D (prikaz visine, gustoće krošnji i sadržaja CO₂)*
- *Slika 14. Primjer LiDAR podataka. Lijeva slika prikazuje obojani „oblak točaka“ po visini, dok je prikaz slike noću slika korespondencije intenziteta*
- *Slika 15. Prikaz 3D objekta*
- *Slika 16. Prikaz nadzora krčenja šuma laserom iz svemira*
- *Slika 17. Klizište La Frasse u Švicarskoj*

POPIS TABLICA

- *Tablica 1. Prikaz položaja otkrivenih riba*
- *Tablica 2. Tanki planktonski sloj unutar toplog ruba u zaljevu Aljaske*