

Osnove laserskog skeniranja iz zraka

Dubravko Gajski*

SAŽETAK. Ovaj članak popularno-znanstvenog karaktera obrađuje osnove laserskog skeniranja s naglaskom na lasersko skeniranje iz zraka (eng. Airborne Laser Scanning - ALS): princip, matematički model, komponente i podjele skenera. Navedeni su i princip obrade ALS podataka i njihove primjene, kao i kratak osvrt na odnos s aerofotogrametrijom.

KLJUČNE RIJEČI: LiDAR, ALS, DMR, fotogrametrija.

KLASIFIKACIJA prema COBISS-u: 1.05

1. Uvod

Opisivanje trodimenzionalnih svojstava realnih objekata u našem okruženju i njihova pohrana u digitalnom obliku su postali stvarnost u mnogim područjima ljudske aktivnosti. Osim toga, stalni napredak računalne tehnike i njezina sve šira rasprostranjenost dovode do potražnje za sve većom količinom kvalitetnih i detaljnih podataka, osobito o prostoru ljudske aktivnosti i objektima koji ih okružuju. S obzirom na njihovu kompleksnost i izvanrednu raznolikost, prije svega u geometrijskom smislu, za kvalitetno je opisivanje potrebna izuzetno velika količina mjerenih podataka. Toliku količinu podataka ne bi bilo moguće prikupiti dovodenjem mjerne naprave u fizički kontakt s objektom za svaku mjerenju točku. Stoga se već čitavo stoljeće kao efikasan i kvalitetan način izmjere bez neposrednog kontakta s objektom koristi fotogrametrija. Posljednjih se desetak godina afirmirala i tehnologija prostornog laserskog skeniranja kao potpuno automatizirana i izuzetno efikasna metoda prikupljanja prostornih podataka. Ova se tehnologija uobičajeno označava pojmom LiDAR, od engl. Light Detection and Ranging, iako je bilo sugestija da se uvede pojam LADAR (eng. LAsER Detection and Ranging, Wehr i Lohr, 1999), zbog naglašavanja da se radi

o primjeni lasera. Radi velike učestalosti mjerenja i do 200 kHz, u kratkom je vremenu moguće detaljno izmjeriti oblik površine terena i objekata na njoj. Općenito se može reći da je **LiDAR potpuno automatiziran, aktivan, optičko-mehanički postupak prikupljanja prostornih podataka dostupnih s aktualnih snimališta**. Zbog najbolje dostupnosti većih površina terena skeniranju i mogućnosti velike pokretljivosti skenera, najčešće se skeniranje vrši korištenjem aviona kao platforme koja nosi skener. Ograničena područja, osobito strmih površina terena, izrada detaljnih modela zgrada i pojedinačnih skulptura i ostalih predmeta, pogodniji su za skeniranje s nepomičnih snimališta. Zbog toga se i tehnologija prostornog laserskog skeniranja dijeli na:

- lasersko skeniranje iz zraka (eng. Airborne Laser Scanning - ALS)
- lasersko skeniranje sa zemlje (eng. Terrestrial

Laser Scanning - TLS)

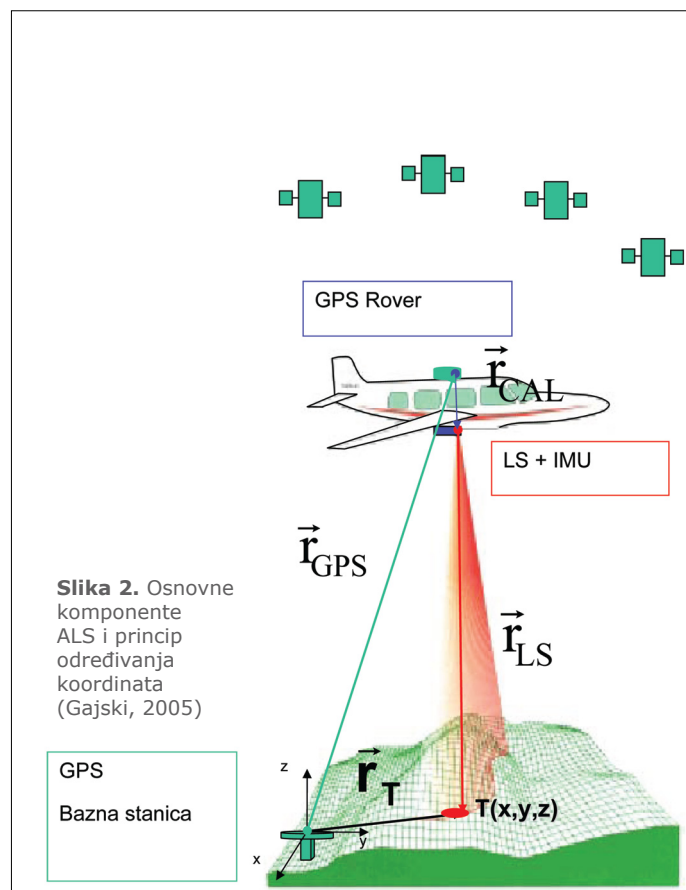
Iako je osnovni princip određivanja koordinata mjerenih točaka (polarno određivanje) isti, tehnologije se bitno razlikuju. Stoga će se u ovom radu dati poseban pregled ALS tehnologije.

Zanimljivo je napomenuti da se LiDAR ne koristi samo za prostorno skeniranje, već i za praćenje fizikalnih procesa u atmosferi jer omogućuje vrlo precizno mjerenje brzine, smjera kretanja i gustoće čestica u atmosferi. Ova se tehnologija obilježava kraticom DIAL (Differential Absorption LIDAR).



Slika 1. Princip snimanja u nizovima (Gajski, 2005)

[*] doc. dr. sc. Dubravko Gajski, dipl. ing. geod., Katedra za fotogrametriju i daljinska istraživanja, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb



Slika 3. LEICA ALS50-II, kompletan sustav za lasersko skeniranje iz zraka s integriranim POS-sustavom, računalom za akviziciju i navigaciju, terminalom za upravljanje i terminalom za navigaciju. (Rohrbach, 2007)



Slika 4. IGI AEROControl II POS (URL-3)

2. Lasersko skeniranje iz zraka (ALS)

2.1 Princip

Područje koje je predmet izmjere se nadlijeće zrakoplovom koji s donje strane nosi LiDAR. Ovisno o vidnom kutu skenera (engl. Field of View - FOV) i visini leta je tijekom jednog preleta moguće izmjeriti pojas na terenu odgovarajuće širine, tj. jedan niz. Cijelo se područje prema potrebi nadlijeće više puta kako bi se snimilo s potrebnim brojem nizova. Da se osigura pokrivanje cjelokupnog područja izmjere i izjednačenje svih nizova u bloku, visinski i položajno, između nizova se ostavlja preklap. (Slika 1)

2.2 Matematički model

Prostorne se koordinate svake mjerene točke određuju polarnom metodom. Stoga se za svaku mjerenu točku mora poznavati prostorna pozicija pola skenera i prostorni vektor od pola do mjerene točke \vec{r}_{LS} (Slika 2).

Prostorna se pozicija pola skenera u referentnom koordinatnom sustavu (X,Y,Z) određuje GPS RTK mjerenjima integriranim s inercijalnim mjernim sustavom (engl. Inertial Measuring Unit - IMU) radi boljeg praćenja kinematike kretanja pola laserskog skenera (LS) u prostoru. Osim toga, IMU mjeri trenutne kutne komponente (ω, ϕ, κ) referentne osi

LS u prostoru. Trenutni otklon laserske zrake od referentne osi LS određuje uređaj za skeniranje. Time je određeno hvatište i smjer vektora \vec{r}_{LS} , a njegova duljina se mjeri laserskim daljinomjerom (Slika 2). Budući da se ALS smješta na donju stranu zrakoplova, a GPS antena mora biti na gornjoj strani, potrebno je odrediti i vektor \vec{r}_{CAL} , koji ima hvatište u faznom centru GPS antene i vrh u polu skenera. Ovaj se vektor određuje u postupku kalibracije cjelokupnog sustava. Matematički se ovi odnosi mogu izraziti kao:

$$(1) \quad \vec{r}_T = \vec{r}_{GPS} + \vec{r}_{CAL} + \vec{r}_{LS}$$

Iz gore navedenog tipa određivanja koordinata i slike 2, očito je da je ALS sustav u kojem su integrirane tri osnovne komponente: GPS, IMU i LS.

IMU i GPS se najčešće nude u jedin-stvenom tzv. POS (Position and Orientation System) rješenju, zbog potrebe izuzetno tijesne integracije na hardverskoj, ali i softverskoj razini, kako bi se dobili kvalitetni elementi vanjske orijentacije senzora

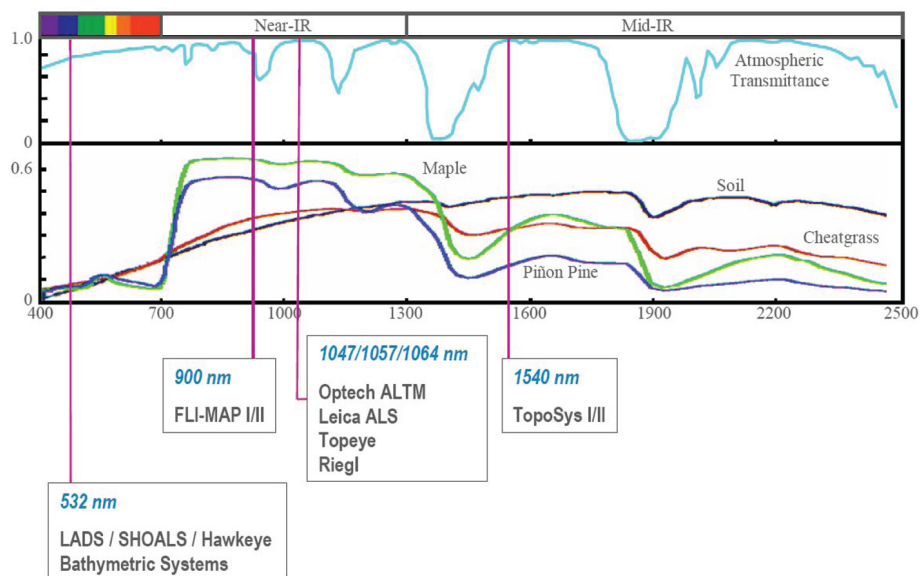
neophodni za direktno georeferenciranje mjerenih podataka. Osim ovih elemenata, za efikasno upravljanje postupkom skeniranja, sustav se dopunjuje upravljačkim terminalom koji omogućuje potpunu kontrolu rada LiDAR-a i navigacijskim terminalom u pilotskoj kabini za što vjerniju realizaciju plana leta (Slika 3).

2.3 GPS + IMU komponente

Radi točnog određivanja trenutne pozicije i orijentacije ALS, za svaku je mjerenu prostornu točku potrebno vrlo kvalitetno izvršiti integraciju GPS + IMU u tzv. POS. Stoga pojedine tvrtke nude uređaje s već integriranim rješenjima (Applanix, IGI, iMAR) i softverskom podrškom za naknadnu obradu rezultata mjerenja radi postizanja najviše moguće točnosti. Podaci o točnosti određivanja parametara vanjske orijentacije za najznačajnije POS-senzore nalaze se u donjoj tablici.

Tablica 1. Karakteristike nekih POS senzora koji se primjenjuju za ALS (prema URL-2, URL-3 i URL-4)

točnost parametara	Applanix POS/AV 510	IGI AEROControl II	iMAR iALS-3D
Pozicija (m)	0.05-0.30	< 0.1	0.02
brzina (m/s)	0.005	0.005	0.005
uzd. i pop. nagib (°)	0.005	0.004	0.0015
azimut (°)	0.008	0.01	0.006

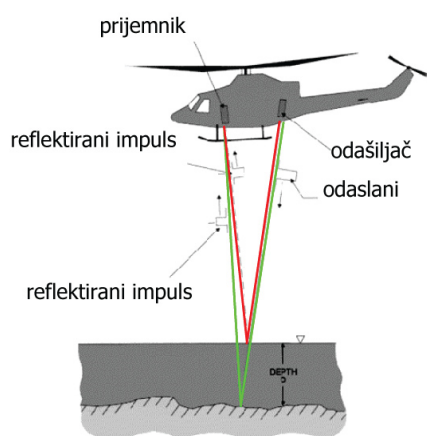


Slika 5. Dijagram zračenja LiDAR-a, spektralnih karakteristika atmosfere (gornji dio), tla i biljnog pokrova (donji dio), (Rohrbach, 2007)

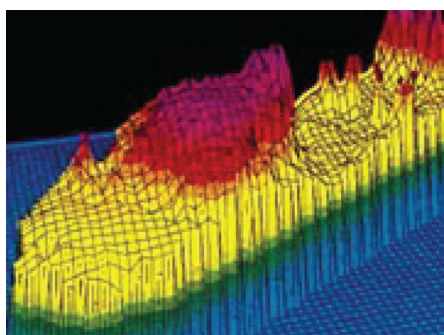
2.4 Laserski skener

Udaljenost od senzora do mjerene točke određuje na osnovu mjerenja vremena koje je potrebno da laserski impuls stigne do objekta i reflektira se nazad. Laserski skener se sastoji od sljedećih glavnih dijelova:

- impulsnog lasera, čija se učestalost pulsiranja može mijenjati
- mehanizma za skeniranje
- prijemnog senzora sa sklopom za mjerenje vremena putovanja laserskog impulsa



Slika 6. Princip batimetrijskog LiDAR-a

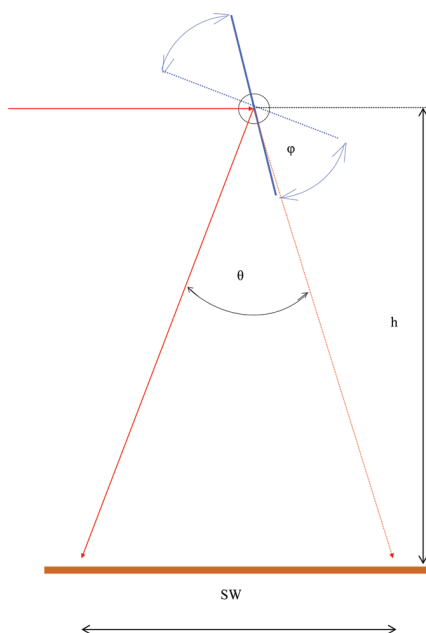


Slika 7. Prikaz potopljenog broda dobiven batimetrijskim LiDAR-om (prema URL-1)

2.4.1 Impulsni laser

Impulsni laseri općenito omogućuju daleko veće snage odaslanog impulsa, koje u topografskim primjenama mogu ići čak do 2MW (Wehr, Lohr, 1999). Imaju vrlo dobru usmjerenost i koherenciju, a najčešće se koristi Nd:YAG laser, koji emitira svjetlost valne duljine $\lambda=1064\text{nm}$ (blisko IC-područje). Blisko IC-područje se prije svega koristi zato što ljudsko oko nije osjetljivo na taj dio spektra EM-zračenja i stoga se mogu koristiti puno veće snage laserskog zračenja, bez opasnosti po oštećenje vida. Frekvencije zračenja se odabiru u području maksimalne propusnosti atmosfere kako bi se što više smanjilo prigušenje mjernog signala na putu od senzora do objekta i nazad (Slika 5).

Zbog toga što voda snažno upija IC-zračenje, prodiranje IC-zračenja kroz vodu i mjerenje terena ispod površine vode je



Slika 8. Skener s njišućim zrcalom - princip skeniranja (Gajski, 2005)

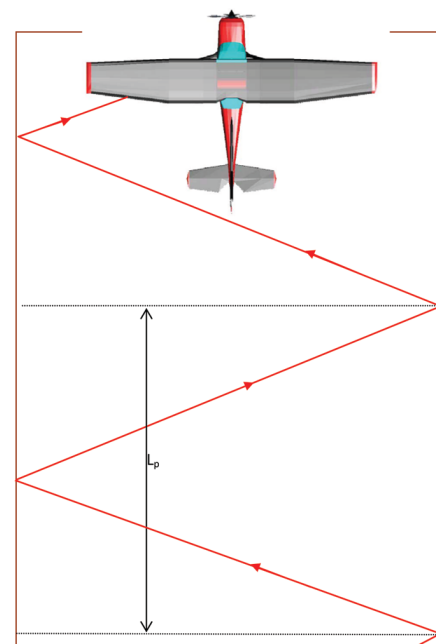
gotovo onemogućeno. Stoga se za takve primjene koristi zračenje valne duljine $\lambda=532\text{nm}$ (zelena svjetlost), koje se dobiva udvostručavanjem osnovne frekvencije zračenja Nd:YAG lasera. Batimetrijski LiDAR koristi obje frekvencije istodobno kako bi uz digitalni model dna odredio i razinu vodnog lica i iz njihove razlike direktno odredio dubinu.

Laserska se zraka namjerno divergira od 0.3 do 2 mrad, kako bi pokrila područje od oko 0.3 do ~2 m s relativne visine leta od 900 m (uobičajena visina za skeniranje). Na taj se način omogućava da dio laserske zrake dopre kroz lišće i granje do terena i da se nazad reflektira senzoru. Vremenskom je klasifikacijom reflektivnog zračenja moguće odrediti točku na terenu, iako je zaklonjena nekim raslinjem (ne pregustim). Detaljnije o ovome u 3. poglavlju.

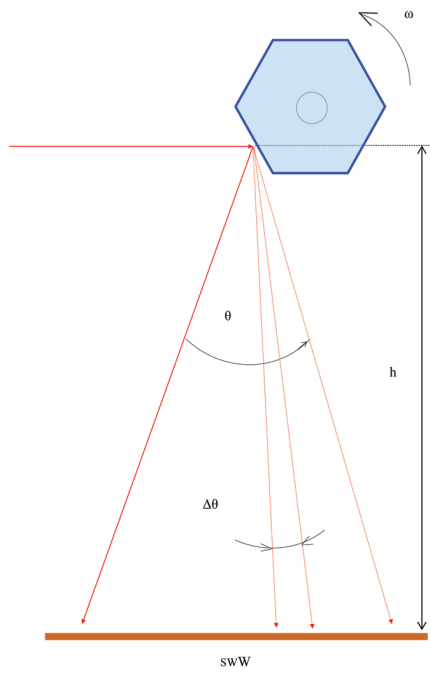
2.4.2 Mehanizam za skeniranje

Mehanizam za skeniranje otklanja lasersku zraku od referentne osi LS tako da se omogući izmjera što šireg područja sa što gušćim rasporedom točaka u jednom preletu. Budući da zrakoplov nosi LiDAR u snjenu leta, dovoljno je otklanjati lasersku zraku samo u poprečnom smjeru a da se ipak postigne plošno pokrivanje. Stoga se kod ALS u pravilu primjenjuju jednoosni skeneri. Postoji više različitih konstrukcija mehanizama za skeniranje od kojih svaki ima specifičnu geometriju skeniranja. Danas se najčešće upotrebljavaju sljedeće konstrukcije:

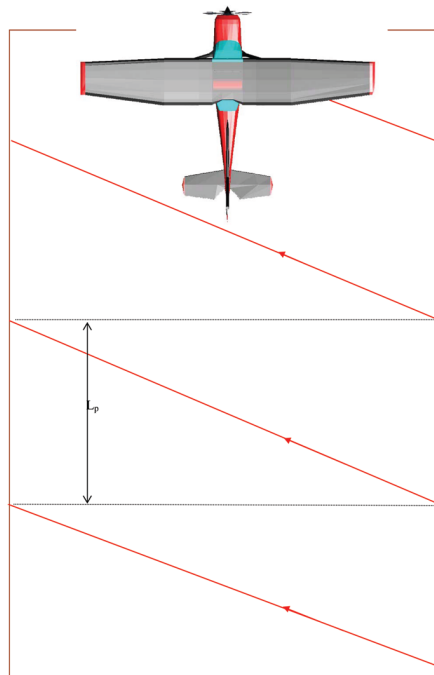
- skener s njišućim zrcalom
- skener s rotirajućom prizmom
- skener s optičkim vlaknima (fiber-scanner)



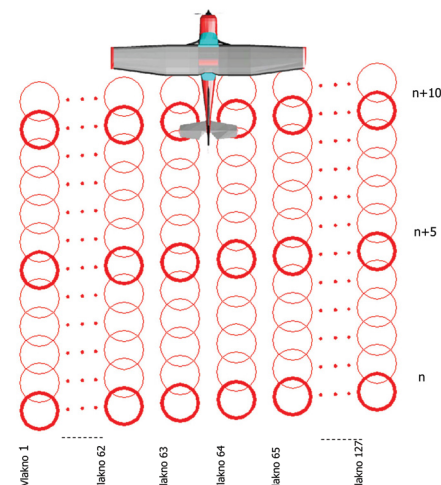
Slika 9. Skener s njišućim zrcalom - geometrija skeniranja (Gajski, 2005)



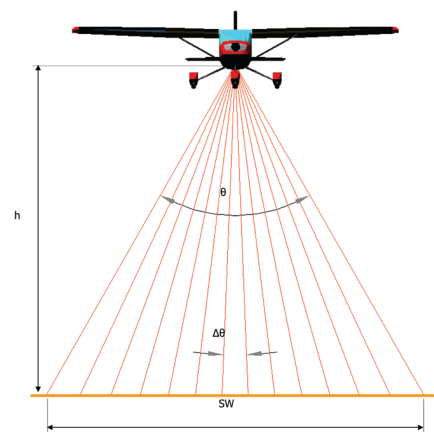
Slika 10. Skener s rotirajućom prizmom - princip skeniranja (Gajski, 2005)



Slika 11. Skener s rotirajućom prizmom - geometrija skeniranja (Gajski, 2005)



Slika 12. Skener sa staklenim vlaknima - princip skeniranja (Gajski, 2005)



Slika 13. Skener sa staklenim vlaknima - geometrija skeniranja (Gajski, 2005)

2.4.2.2 Skener s rotirajućom prizmom

U putu laserske zrake nalazi se prizma sa zrcalnim plohamo po obodu, koja se okreće kutnom brzinom ω , oko svoje uzdužne osi (Slika 10). Skeniranje terena je uvijek u istom smjeru, a gustoća i raspored skeniranih točaka mijenja se promjenom brzine vrtnje prizme i promjenom frekvencije pulsiranja lasera (Slika 11). Ovakvi sustavi omogućuju znatno brže skeniranje od skenera s njišućim zrcalom, jer se izbjegao utjecaj tromosti aktivnog elementa koji vrši skeniranje.

2.4.2.3 Skener s optičkim vlaknima (fiber-scanner)

Kod ovog je skenera smjer svake laserske zrake fiksno utvrđen smjerom dotičnog staklenog vlakna, koja su smještena u jednoj lepezi, postavljenoj okomito na smjer leta (Slika 12). Na taj se način postižu oštre granice u opažanju niza i pravilan, vrlo gusti raspored skeniranih točaka (Slika 13). Međutim nije moguće mijenjati ni širinu vidnog polja, niti broj skeniranih točaka poprečno na smjer niza. Ovakav uređaj primjenjuje tvrtka TopoSys, a sastoji se od 127 staklenih vlakana. Vidno polje Θ iznosi 14° , a kutna razlika susjednih vlakana iznosi 1.9 mrad.

2.4.3 Prijemni senzor

Kod laserskog skeniranja iz zraka odašlje se impuls laserskog zračenja ka tlu. Na tom putu laserska se zraka rasprši na vegetaciji i ostalim objektima i, na poslijetku, od površine terena. U tom se slučaju energija laserskog zračenja širi u svim smjerovima i jedan mali njezin dio se bilježi u senzoru. Količina reflektiranog zračenja, zabilježenog u senzoru ovisi, pored intenziteta izračene energije i od trenutnog kuta skeniranja te supnja refleksije trenutno skeniranih objekata.

Vidljivo je da tamne površine, kao npr. crni neopren, lava (ali i svježi asfalt!) snažno upijaju lasersko zračenje. U tom slučaju je energija vraćena senzoru premala za njenu zabilježbu. Stoga se vrlo često događa da na ovakvim plohamo nema izmjerenih podataka. Kod mirnih vodenih površina uglavnom dolazi do totalne refleksije odaslanog zračenja i izmjeri je moguća samo neposredno ispod senzora (tipično $\pm 3^\circ$ u odnosu na os nadira skenera). Pri planiranju projekta skeniranja iz zraka o ovim svojstvima svakako treba voditi računa.

U suvremenim se aero-skenerima za

mase zrcala koje se njiše (Slika 9).

Zbog moguće kontinuirane promjene brzine skeniranja i promjene vidnog polja Θ , ovakvi se skeneri danas najčešće primjenjuju kod suvremenih ALS-a. Standardno ih primjenjuju tvrtke Riegl i Optech inc. za sve svoje uređaje.

Tablica 2. Tipična refleksivna svojstva različitih materijala za koherentno zračenje valne duljine 900 nm (prema URL-5)

Materijal	koeficijent refleksije
Bijeli papir	do 100%
Snijeg	80-90%
Bijeli zid	85%
Listopadna šuma	60%
Crnogorica	30%
Glatke betonske površine	24%
Lava	8%
Crni neopren (sintetički kaučuk)	5%
Uzburkana voda	20%

2.4.2.1. Skener s njišućim zrcalom

U putu laserske zrake nalazi se njišuće zrcalo koje otklanja zraku dolje, okomito na smjer leta (Slika 8). Skeniranje se provodi u oba smjera. Frekvencija skeniranja je relativno mala, zbog relativno velike

Tablica 3. Utjecaj komponenti ALS-a na apsolutnu točnost mjerenja pojedine točke

Komponenta	Izvor pogrešaka	σ_{XY} (cm)	σ_Z (cm)
GPS		5 ... 10	5 ... 20
INS	Senzori ubrzanja	2	2
INS	Senzori nagiba	7	
skener	Laserski daljinomjer		6
skener	Difuzna refleksija		5
Ukupno		10 ... 15	10 ... 25

zabilježbu elektromagnetskog zračenja koriste uglavnom diode s lavinskim efektom (eng. Avalanche-PhotoDiode APD). Više o tome u URL-6.

2.5 Utjecaj pojedinih komponenti ALS na točnost mjerenja

Uzimajući u obzir realne mogućnosti pojedinih komponenata, te superponirajući njihov utjecaj na točnost cjelokupnog sustava temeljem zakona o prirastu pogrešaka, dolazi se do sljedećih teoretskih vrijednosti točnosti određivanja mjerenih koordinata za svaku pojedinu mjerenu točku.

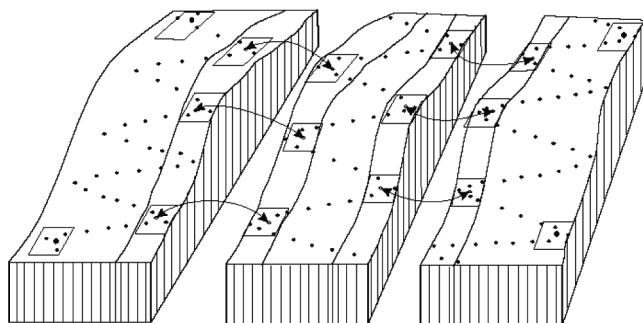
Iz navedene je tablice vidljivo da najveći utjecaj na točnost mjerenja koordinata pojedinačne točke ima GPS-komponenta, posebno u visinskom smislu. Stoga se značajnije povećanje apsolutne točnosti ALS-a očekuje napretkom GPS metoda.

Uvođenjem pretpostavki o morfološkim svojstvima mjerene plohe i primjenama tehnika filtriranja mjerenih podataka, mogu se prije svega ukloniti slučajne pogreške iz rezultata mjerenja i na taj način bitno povećati točnost ALS izmjere. (Gajski, 2000)

3. Princip obrade ALS podataka

Tijekom leta, ALS prikuplja podatke sa svakog od svojih senzora zasebno, najčešće u tzv. sirovom formatu, kako bi se što više smanjilo vrijeme potrebno za procesiranje i povećala propusnost i kapacitet ALS sustava. Radi objedinjavanja podataka sa svih senzora, izuzetno točna njihova međusobna vremenska sinhronizacija je od najvećeg značaja za točnost cjelokupnog sustava. Objedinjavanje mjerenih podataka se stoga radi nakon leta i obuhvaća sljedeće faze:

1. Direktno georeferenciranje mjerenih podataka
2. Izjednačenje



Slika 14. Princip visinskog izjednačenja susjednih nizova ALS podataka (Kraus i Pfeifer, 2001)

nizova i kalibracija ALS sustava

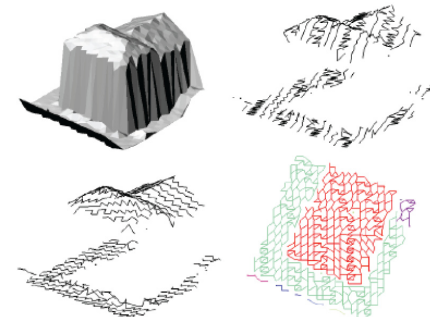
3. Segmentacija oblaka točaka
4. Klasifikacija i filtriranje
5. Prorjeđivanje podataka (Data thinning)

3.1 Direktno georeferenciranje

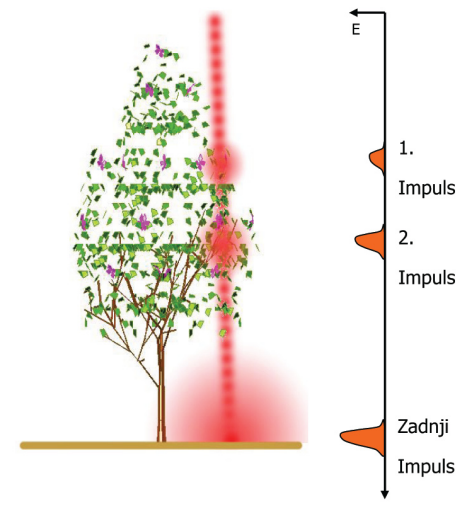
Najprije se računaju približne pozicije skeniranih točaka temeljem objedinjenih podataka POS (GPS+IMU) senzora i laserskog skenera. Tijekom ove faze računaju se definitivne koordinate faznog centra GPS antene tijekom leta i objedinjavaju se s IMU podacima upotrebom kalmanovog filtera. Zatim se prema (1) računaju približne koordinate svake mjerene točke.

3.2 Izjednačenja nizova i kalibracije sustava

Izjednačenje se ALS podataka provodi, u visinskom smislu minimiziranjem visinskih odstupanja unutar homolognih uzoraka (engl. patches) susjednih nizova (Slika 14). Ovi se uzorci odabiru automatski unutar područja preklopa nizova uz uvjet da ploha terena na području uzorka bude što sličnija horizontalnoj ravnini, jer u tom slučaju položajne pogreške ne utječu na izjednačenje visina. Postupak se provodi automatski, a uzorci se odabiru tako da sadrže oko 20 mjerenih točaka. Početni se



Slika 15. Princip segmentacije oblaka točaka građevine (Vosselman *et al*, 2004)



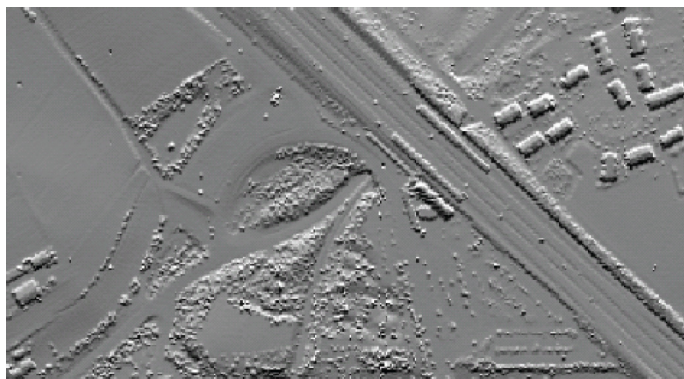
Slika 16. Princip »First pulse -Last pulse« klasifikacije (Gajski, 2005)

elementi kalibracije sustava određuju neposredno nakon instalacije sustava u avion, i to linearnim i kutnim mjerenjima. Definitivni se elementi određuju istovremeno s izjednačenjem nizova, naročito na odabranim test poljima. Za test-polja se standardno koriste velike ravne, horizontalne površine (aerodromi, stadioni).

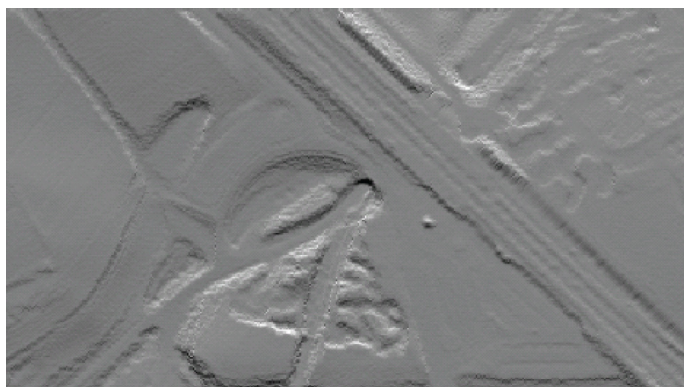
3.3 Segmentacija oblaka točaka

Radi efikasnije kasnije klasifikacije i filtriranja ALS podataka potrebno je grupirati podatke prema geometrijskim karakteristikama objekta na koji se odnose. Pri tome su presudna dva osnovna kriterija: susjedstvo i morfološka sličnost. Primjer segmentacije je na slici 15, na kojoj su objedinjene informacije dva skupa podataka (gornji desni i donji lijevi ugao) i konačan rezultat sa razlučenim podacima koji potječu od krova, podloge i bočnih strana zgrade.

Zbog ogromne količine podataka je u pojedinom skupu moguće ovaj postupak provoditi potpuno automatizirano. Budući da se radi o izuzetno kompleksnoj problematici, danas su metode segmentacije oblaka točaka predmet intenzivnog razvoja.



Slika 17. Originalni podaci ALS (Kraus i Pfeifer, 2001)



Slika 18. Filtrirani podaci ALS (Kraus i Pfeifer, 2001)

3.4 Klasifikacija i filtriranje ALS podataka

Općeniti zadatak filtriranja je izdvajanje korisnih informacija od neželjenih, a klasifikacijom se korisne informacije razvrstavaju u razrede (klase). Kod topografskih se primjena ALS-a danas najčešće koriste tri klase: vegetacija, građevine i teren. Već za vrijeme skeniranja bilježi se prijemni signal, digitaliziran u vremenskoj domeni, što omogućava provođenje tzv. »first pulse - last pulse« klasifikacije.

Laserska zraka se nanjerno divergira 0.2 - 1 mrad, kako bi s relativne visine od 1000 m obasjavala na terenu krug promjera 0.2 - 1 m. Svi manji objekti reflektirati će zračenje samo djelomično i omogućiti laserskoj zruci da dopre do terena. Na slici 16 je vidljivo da se prvi impuls u tom slučaju reflektira od krošanja stabala (odnosno drugih objekata iznad terena), a zadnji reflektirani impuls odgovara mjerenju s površine terena. Složenije metode klasifikacije i filtriranja uglavnom se dijele prema tome manipuliraju li sa sirovim podacima (npr. progresivno morfološko filtriranje, Zhang *et al*, 2002.), ili koriste interpolaciju ploha iz mjerenih podataka u postupku filtriranja (npr. »robust linear prediction«, Kraus i Pfeifer, 2001). Rezultat primjene ovog filtra pokazuju slika 17 i slika 18.

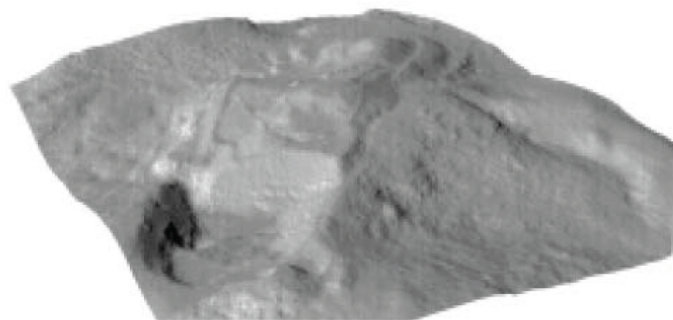
3.5 Prorjeđivanje podataka

Osnovni problem ALS skupa podataka leži u količini podataka sadržanih u nje-

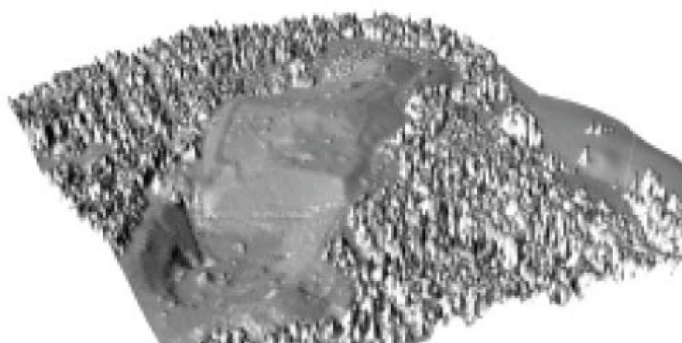
mu. Time je jako ograničena primjena ovih mjerenja, jer količina podataka nadilazi kapacitet uobičajene računalne i softverske opreme. Standardni CAD softver ne može niti učitati toliku količinu podataka bez dodatnih softverskih rješenja (tzv. plugin -ova). Stoga je zadatak prorjeđivanja podataka da se zadrži minimalni skup podataka, koji još uvijek mogu (ovisno o primjeni) opisati predmet izmjere zadovoljavajućom kvalitetom. U tu svrhu postoje brojni algoritmi, a njihov pregled se može naći u Pauluy *et al* 2002.

4. Primjene ALS-a

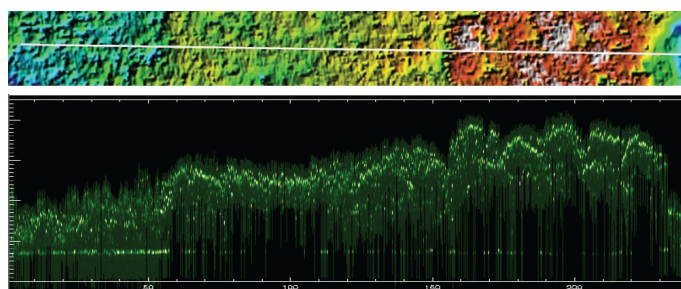
U početku je razvoja ALS-a prvenstvena namjena bila da omogući kvalitetnu izmjeru područja, kod kojih je primjena



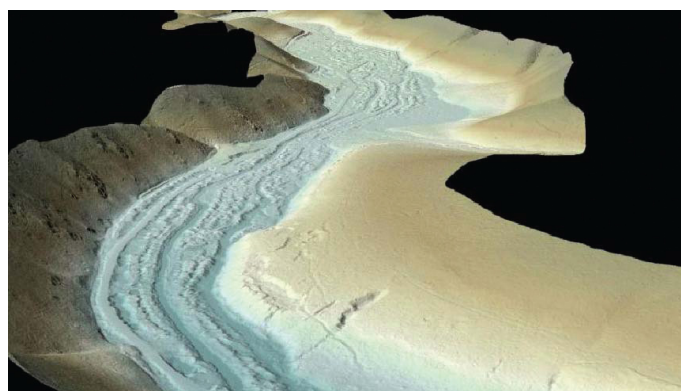
Slika 19. Digitalni model terena šumovitog područja (sa Slika 13)



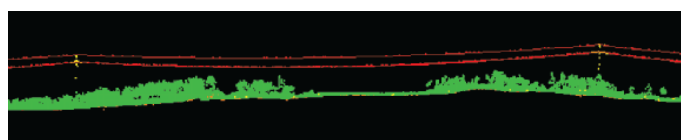
Slika 20. Digitalni model vegetacije, dobiven zabilježbom prvog impulsa (Knorr, 2001)



Slika 21. Digitalni model visina vegetacije (gore) s profilom visine i gustoće vegetacije, dobivenim digitalizacijom cjelokupnog reflektiranog zračenja - eng. full waveform digitizing (URL-7)

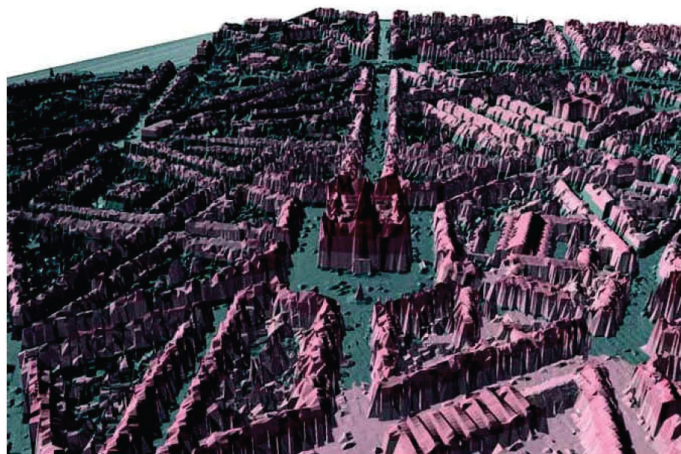


Slika 22. Digitalni model terena s jasno izraženom erozijom (Rohrbach, 2007)

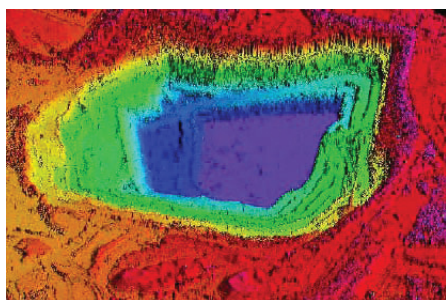


Slika 23. Procjena ugroženosti dalekovoda vegetacijom (Rohrbach, 2007)

klasičnih fotogrametrijskih metoda izmjere otežana ili nemoguća. Stoga su prve primjene ALS-a uglavnom bile koncentrirane na topografsku izmjeru šumovitih područja i područja neizražajne teksture (pješčane



Slika 24. Digitalni model gradske jezgre iz ALS podataka (Knorr, 2001)



Slika 25. Bojom kodirani visinski prikaz područja otvorenog kopa u svrhu praćenja kubatura iskopanog materijala (Rohrbach, 2007)

pustinje, područja pod snijegom i ledom). Napretkom tehnologije ALS-a proširilo se područje primjene i danas uglavnom obuhvaća prostorno modeliranje, prostornu vizualizaciju i detekciju promjena (Rohrbach, 2007). Najčešći zadaci ALS-a su:

- topografska izmjera (Slika 19)
- određivanje visine vegetacije i količine biomase (Slika 20 i 21)
- izmjera obalnih područja
- praćenje erozije, zaštita od lavina (Slika 22)
- izmjera ledenjaka
- digitalni modeli gradova (Slika 24)
- praćenje ugroženosti dalekovoda vegetacijom (Slika 23)
- praćenje kubatura kod otvorenih kopova i deponija otpada (Slika 25)

5. Zaključak

Već 18 godina operativne upotrebe ALS-a ukazuje na svojevrstnu »punoljetnost« u primjeni ove metode. U tom vremenu ALS se etablirao kao pouzdana i izuzetno efikasna metoda prikupljanja podataka (do 200 kHz!). Osnovna prednost prema standardnim fotogrametrijskim metodama leži u tome da je za izmjeru neke točke dovoljno prikupiti podatke samo jednog snimališta. Nije potreban uvid u istu točku i sa susjednog snimališta u nizu, kao što je to slučaj kod aerofotogrametrije. Na taj način je moguće posebno kvalitetno izmjeriti plihu

terena u šumovitim područjima i gradovima. Osim toga, ALS je aktivni postupak, što znači da je skeniranje neovisno od svjetlosnih uvjeta, doba dana i noći. Važna prednost je i u tome da je visinska točnost neovisna od visine leta. Ipak, uz nabrojane najvažnije prednosti, ALS ima i dosta nedostataka. Prije svega, postupak izmjere je zbog vrlo visoke automatizacije potpuno neselektivan. Nije moguće mjeriti pojedine karakteristične točke objekta, već se velikom gustoćom mjerenih točaka po objektu nastoji prikupiti dovoljno informacija za interpolaciju traženih karakterističnih točaka, neophodnih za modeliranje snimljenog objekta. Rezultat skeniranja su nezgrapne i velike datoteke mjerenih podataka, izuzetno nespretne za manipulaciju. Neophodno je provesti dosta složene i računalno zahtjevne faze obrade mjerenih podataka kako bi se dobio prihvatljiv rezultat za konačnu upotrebu. Prostorna rezolucija prikupljenih podataka kreće se do 10 točaka po m², dok se fotogrametrijskim kamerama istom širinom niza postižu daleko veće prostorne rezolucije. U frekvencijskoj domeni, LiDAR bilježi intenzitet reflektivnog zračenja u izuzetno uskom frekvencijskom pojasu (frekvencija lasera), stoga su ostale spektralne karakteristike snimanog objekta gotovo u potpunosti neistražene. Sve su to razlozi zbog kojih ALS ne istiskuje klasične fotogrametrijske metode, već se ove dvije tehnologije izvanredno dopunjuju i proizvođači ALS sustava nude rješenja s integriranim fotogrametrijskim kamerama (npr. integracija ALS50-II sa ADS40 tvrtke Leica, Slika 26).

Literatura

- Gajski, D. (2005): Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen, Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- Knorr, F. (2001): Airborn-Laser-Scanning, LMV GMBH
- Kraus, K., Pfeifer, N. (2001): Advanced DTM generation from LIDAR data, ISPRS Commission III, WG 3
- Pauly, M., Gross, M., Kobbelt, L. (2002): Efficient simplification of point-sampled surfaces. Proceedings of the Conference of Visualisation, Boston 2002., pp. 163-170
- Rohrbach, A. (2007): Basics of Airborne LIDAR Sensing Technology, LIDAR Workshop, ISPRS Commission 1 Ljubljana, 2. srpnja 2007.
- Vosselman, G., Gorte, B.G.H., Sithole, G., Rabbani, T. (2004): Recognising structure in laser scanner point clouds, IAPRS, XXXVI, 8W2, Freiburg, Germany
- Wehr, A., Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 1999., pp. 68-82
- Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C. (2002): A Progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne lidar data, Journal of LaTeX class files, vol. 1, no. 8
- URL-1: <http://www.optech.ca/prodaltm.htm> (10.12.2007.)
- URL-2: <http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/POSAV%20Specs.pdf> (10.12.2007.)
- URL-3: http://www.igi-systems.com/downloads/brochures/brochure_aerocontrol.pdf (10.12.2007.)
- URL-4: <http://www.imar-naviga-tion.de/> (10.12.2007.)
- URL-5: <http://www.riegl.com/principles/> (10.12.2007.)
- URL-6: [http://www.ce.ufl.edu/nsf/Presentations/Bill Carter/Carter.ppt](http://www.ce.ufl.edu/nsf/Presentations/Bill%20Carter/Carter.ppt) (10.12.2007.)



Slika 26. Leica ALS50-II integriran s ADS40 u kabini aviona (Rohrbach, 2007)