

3D mobilno kartiranje pomoću MandEye sustava prikupljanja i obrade prostornih podataka

Biloš, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

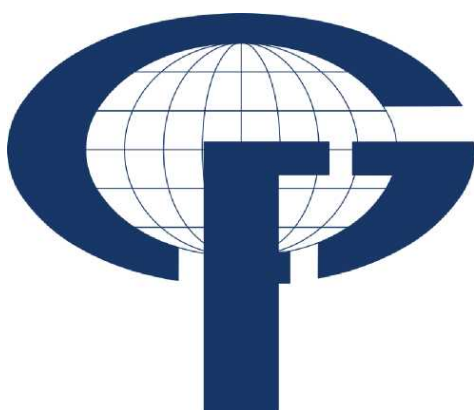
2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geodesy / Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:256:468447>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

repozitorij.geof.unizg.hr/en



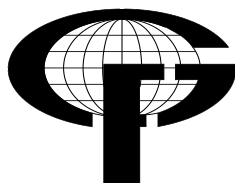
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET



Josip Biloš

**3D mobilno kartiranje pomoću MandEye
sustava prikupljanja i obrade prostornih
podataka**

Diplomski rad



Zagreb, 2024.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF GEODESY



Josip Biloš

3D mobile mapping with MandEye geodata collection and processing system

Diploma Thesis



Zagreb, 2024

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br.: 1_349_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26. 10. 2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog / specijalističkog / doktorskog rada koji se vrednuju na diplomskom, specijalističkom studiju i poslijediplomskom doktorskome studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenta te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

IZJAVLJUJEM

Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

20. 09. 2024.

Ime i prezime:

Josip Biloš

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEODETSKI FAKULTET
ZAVOD ZA PRIMIJENJENU GEODEZIJU
KATEDRA ZA ZEMLJOMJERSTVO
STUDENT: Josip Biloš

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

U sklopu diplomskog rada bilo je potrebno izvršiti testiranje rada mobilnog sustava za prikupljanje prostornih podataka, obraditi prikupljene podatke u odgovarajućim softverima te prezentirati dobivene rezultate.

U tu svrhu bilo je potrebno obraditi sljedeće:

- sastaviti sustav mobilnog prikupljanja podataka,
- proučiti lokacije za prikupljanje podataka,
- sastaviti plan mjerenja,
- prikupiti podatke,
- softverski obraditi prikupljene podatke,
- vizualizirati i analizirati dobivene podatke.

U Zagrebu 26. veljače 2024.

Mentor:

doc. dr. sc. Loris Redovniković

I. AUTOR	
Ime i prezime:	Josip Biloš
Datum i mjesto rođenja:	15.05.1996., Imotski, Republika Hrvatska
II. DIPLOMSKI RAD	
Naslov:	3D mobilno kartiranje pomoću MandEye sustava prikupljanja i obrade prostornih podataka
Mentor:	doc. dr. sc. Loris Redovniković
Drugi mentor:	
Voditelj:	Jurica Jagetić, mag. ing. geod. et geoinf.
III. OCJENA I OBRANA	
Datum zadavanja zadatka:	26. veljače 2024.
Datum obrane:	20. rujna 2024.
Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:	doc. dr. sc. Loris Redovniković prof. dr. sc. Đuro Barković prof. dr. sc. Mladen Zrinjski

3D mobilno kartiranje pomoću MandEye sustava prikupljanja i obrade prostornih podataka

SAŽETAK. Rad se bavi proučavanjem lidar sustava za prikupljanje i obradu prostornih podataka koji se temelji na tehnologiji otvorenog hardvera i softveru otvorenog koda. Nakon sastavljanja napravljen je plan lokacija na kojima će se prikupljati podatci te planom kretanja na svakoj lokaciji tokom prikupljanja podataka. Nadalje, detaljno je opisana softverska obrada prikupljenih podataka gdje su jasno vidljivi koraci koji vode do konačnog rezultata. Kada su obrađeni svi prikupljeni prostorni podaci, izrađena je analiza dobivenih rezultata. Gdje je to bilo moguće napravljena je usporedba s prijašnjim mjerenjima te je na kraju dan osobni osvrt na softver.

Ključne riječi: mobilno kartiranje, prostorni podaci, LiDAR, senzor, speleologija, jame, špilje,

3D mobile mapping with MandEye geodata collection and processing system

ABSTRACT. The paper deals with the study of the LiDAR system for collecting and processing spatial data, which is based on open hardware technology and open source software. After the parts have been connected into a complete system, a plan of locations where data will be collected was made and also for each location a movement plan was made for data collection. Furthermore, the software for processing of the collected data is described in detail, where the steps leading to the final result are clearly visible. When all the collected spatial data were processed, an analysis of the obtained results was made. Where possible, a comparison with previous measurements was made and at the end a personal review of the software was given.

Keywords: mobile mapping, spatial data, LiDAR, sensor, speleology, pits, caves, cave system.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Mobilno kartiranje	3
2.1 Definicija	3
2.2 Proces mobilnog kartiranja.....	4
2.3 Primjena.....	5
2.4 Prednosti i nedostaci	6
3. MandEye sustav mobilnog kartiranja	8
3.1 Opis sustava.....	8
3.2 Hardver.....	8
3.3 Softver	11
4. Primjena MandEye sustava prikupljanja podataka u speleologiji.....	13
4.1 Speleologija	13
4.2 Mijatova jama	14
4.3 Prikupljanje podataka	15
4.4 Obrada podataka.....	16
4.5 Presentacija rezultata.....	22
5. Ostale primjene MandEye sustava.....	27
5.1 3D mobilno kartiranje rudnika u Tehničkom muzeju Nikola Tesla u Zagrebu	27
5.1.1. O lokaciji.....	27
5.1.2. Prikupljanje podataka	28
5.1.3. Obrada podataka.....	29
5.1.4. Presentacija rezultata.....	32
5.2. 3D mobilno kartiranje tunelskog sustava i ostataka vile Rebar	34
5.2.1. O lokaciji.....	34
5.2.2. Prikupljanje podataka	36
5.2.3. Obrada podataka.....	37
5.2.4. Presentacija rezultata.....	41
6. Analiza rezultata	44
7. Zaključak	48

Popis literature.....	49
Popis slika.....	50

1. Uvod

Prikupljanje prostornih podataka ima bogatu povijest koja prati razvoj ljudske civilizacije. Od najranijih vremena, ljudi su osjećali potrebu za razumijevanjem i bilježenjem okoline koja ih okružuje. Ova potreba je potaknula razvoj različitih tehnologija i metoda prikupljanja prostornih podataka, koje su se kroz povijest kontinuirano unapređivale. Razlozi za prikupljanje prostornih podataka su se također mijenjali i prilagođavali potrebama društva, od osnovne navigacije i upravljanja resursima do složenih znanstvenih istraživanja i urbanističkog planiranja. U drevnim civilizacijama, prikupljanje prostornih podataka imalo je primarnu svrhu navigacije i teritorijalne organizacije. Primjerice, Babilonci su koristili glinene pločice kako bi zabilježili geografske informacije o svojim teritorijima, a Egipćani su izrađivali karte koje su prikazivale dolinu Nila i okolna područja kako bi olakšali poljoprivredne aktivnosti i upravljanje resursima. U srednjem vijeku, Rimljani su uveli katastarske sustave za dokumentiranje zemljišta u svrhu ubiranja poreza, koristeći osnovne geodetske metode, dok se tijekom renesanse zahvaljujući znanstvenom napretku i razvoju triangulacijske metode dobilo na preciznosti kartiranja. Era otkrića u 15. i 16. stoljeću donijela je novu potrebu za preciznim kartama zbog proširenja trgovinskih ruta i kolonizacije novih teritorija. Kartografi su počeli izrađivati detaljnije karte koje su prikazivale otkrivene zemlje, obale i oceane, olakšavajući tako planiranje trgovačkih i vojnih ekspedicija. Industrijska revolucija u 18. i 19. stoljeću donijela je napredak u tehnologiji prikupljanja podataka, uključujući izume poput teodolita i daljinomjera, što je omogućilo još preciznije geodetske izmjere. Uvođenje željeznica i cestovnih mreža zahtijevalo je još detaljnije topografske karte, što je dodatno potaknulo razvoj kartografskih tehnika. U 20. stoljeću, lansiranje prvih satelita označilo je početak nove ere u prikupljanju prostornih podataka. Satelitsko snimanje omogućilo je globalno prikupljanje podataka o Zemljinoj površini, atmosferskim uvjetima i oceanskim strujama, što je postalo ključno za praćenje klimatskih promjena i predviđanje prirodnih katastrofa.

U današnje vrijeme, prikupljanje prostornih podataka postalo je još sofisticiranije zahvaljujući tehnologijama poput LiDAR-a i mobilnog kartiranja. LiDAR (Light Detection and Ranging) koristi laserske zrake za stvaranje trodimenzionalnih modela terena i struktura, omogućavajući detaljno kartiranje teško dostupnih područja. Mobilno kartiranje, koje koristi pokretne platforme kao što su vozila i dronovi opremljeni sensorima, omogućava vrlo brzo, detaljno i prilično precizno prikupljanje podataka na velikim područjima. Ove tehnologije

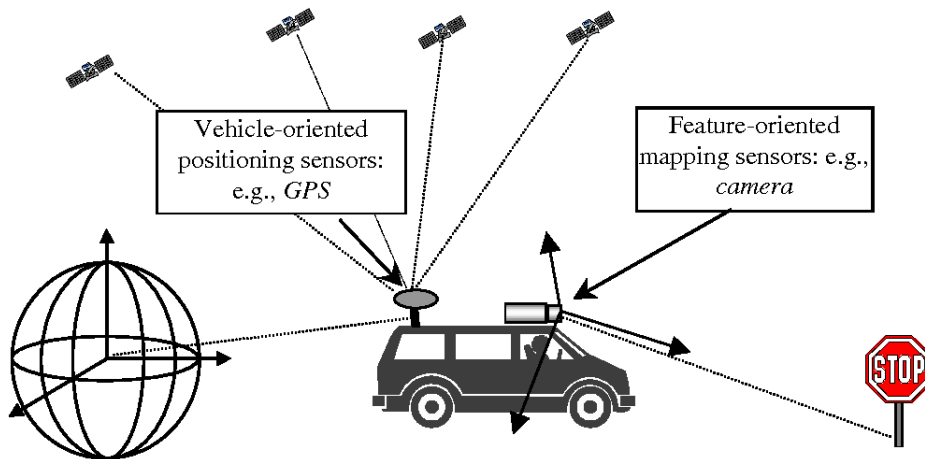
omogućavaju stvaranje vrlo detaljnih prostornih baza podataka koje su važne za urbanističko planiranje, inženjering, ekologiju i mnoge druge discipline. Integracijom raznih senzora, masovno prikupljanje prostornih podataka postaje još brže i efikasnije. U ovom radu objasnit će se jedan od LiDAR sustava za prikupljanje i obradu prostornih podataka. Sustav koji je u početnoj fazi razvoja, biti će testiran u različitim uvjetima te će bit podvrgnut različitim provjerama kvalitete konačnog rezultata.

2. Mobilno kartiranje

2.1 Definicija

Mobilni sustav kartiranja (mobile mapping system – MMS) je tehnologija koja je posljednjih godina značajno promijenila način na koji prikupljamo i analiziramo geografske podatke. El-Sheimy (2005.) definira mobilni sustav kartiranja kao mobilni više-senzorski sustav koji se koristi za brzo prikupljanje direktno geo-referenciranih podataka prikupljenih daljinskim opažanjem. Sama riječ „sustav“ govori kako je riječ o kombinaciji, integraciji, različitih komponenti koji tvore smislenu cjelinu. Jedan od ključnih aspekata razvoja mobilnog kartiranja je evolucija tehnologija koje su omogućile njegovu implementaciju. GNSS, inercijalni senzori, laserski skeneri i kamere postali su ključni dijelovi mobilnih sustava koji omogućuju precizno geoprostorno lociranje i snimanje okoline. Osim toga, napredni algoritmi obrade podataka omogućuju generiranje detaljnih 3D modela i karata prostora. Ova tehnologija koristi mobilne platforme, kao što su vozila, dronovi i ručni uređaji, opremljene različitim sensorima, uključujući kamere, globalni pozicijski sustav (GPS), inercijalne mjerne jedinice (IMU) i LiDAR. Mobilni sustav kartiranja oslanja se na senzore koji prikupljaju detaljne podatke o okruženju. GPS omogućava točno određivanje lokacije mobilne platforme, dok IMU mjeri promjenu ubrzanja i rotacije po tri osi. Kamere snimaju slike koje se koriste za vizualnu analizu, dok LiDAR emitira laserske zrake i mjeri vrijeme do njihovog povratka, odnosno mjeri udaljenosti do objekata u okruženju. Rezultat mobilnog kartiranja može nastati na temelju samo jednog ili integracijom više senzora. Izlazni podatak sustava za mobilno kartiranje je uglavnom oblak točaka (point cloud) ili 3D model (3d mesh). Podaci se uglavnom prikupljaju u lokalnom koordinatnom sustavu pojedinog senzora, a ukoliko koristimo GNSS ili unaprijed određene koordinate stabiliziranih točaka moguće je u konačnici dobiti koordinate u globalnom koordinatnom sustavu. Taj postupak naziva se georeferenciranje.

Potreba za razvojem mobilnih sustava kartiranja pojavila se usred masovne potražnje za prostornim podacima koja nastaje zbog užurbanog načina poslovanja, pružanja usluga te samog načina života. Masovno prikupljanje prostornih podataka polako izbacuje tradicionalne metode izmjere (npr. tahimetrija) zbog uštede vremena, odnosno novca, a okreću se novoj metodi koja je trenutno manje točna, ali se pomoću nje u kratkom roku može prikupiti puno više prostornih podataka. Na razvoj mobilnih sustava kartiranja utječe razvoj informatičkih znanosti koje svakodnevno unaprjeđuju kako hardverski tako i softverski dio sustava.



Slika 1. Ilustracija MMS sustava iz C. Tao (2000.): Mobile mapping technology for road network data acquisition

2.2 Proces mobilnog kartiranja

Postoje tri uvjeta koja sustav mobilnog kartiranja treba zadovoljiti kako bi bio kompletan i spreman za rad:

1. Sustav treba biti mobilan, odnosno treba se nalaziti na pokretnoj platformi (automobil, letjelica, čovjek,...)
2. Sustav treba imati minimalno jedan senzor za daljinsko opažanje objekata (LiDAR, fotosenzor, RADAR,...)
3. Na sustav trebaju biti montirani navigacijski senzori (GPS, IMU, senzori nagiba, odometri,...), od kojih je GPS obavezan, kako bi prikupljeni podatak bio direktno georeferenciran, (Bačić, 2023.)

Proces mobilnog kartiranja je složen i detaljan postupak koji uključuje nekoliko ključnih koraka kako bi se osiguralo precizno i učinkovito prikupljanje i analiza geografskih podataka. Prvi korak je planiranje misije, što podrazumijeva određivanje specifičnog područja koje će se kartirati, definiranje konkretnih ciljeva misije i pažljivo planiranje rute koju će mobilna platforma pratiti. Tijekom ovog koraka odabire se odgovarajuća oprema i senzori, kao što su GNSS, IMU, kamere, LiDAR-i i sl. GNSS uređaji omogućuju precizno određivanje lokacije mobilne platforme, dok IMU senzori mjere ubrzanje i rotaciju, prateći sve promjene u kretanju i orijentaciji uređaja. Kamere snimaju slike koje se koriste za bojanje oblaka točaka ili vizualnu analizu, dok LiDAR emitira laserske zrake i mjeri vrijeme njihovog povratka kako bi stvorio precizne trodimenzionalne oblake točaka. Prilikom odabira opreme provodi se priprema, koja uključuje temeljitu kalibraciju svih senzora kako bi se osigurala njihova točnost

i pouzdanost tijekom prikupljanja podataka. Tijekom prikupljanja podataka, mobilna platforma – koja može biti vozilo, dron ili ručni uređaj – kreće se po planiranoj ruti, a senzori kontinuirano bilježe podatke o okolini. Svi prikupljeni podaci pohranjuju se u digitalnom formatu na uređaje za pohranu podataka, pri čemu je važno osigurati dovoljno prostora za pohranu velikih količina podataka te izraditi sigurnosne kopije kako bi se spriječio gubitak informacija.

Nakon prikupljanja, podaci se prenose u računala gdje se obrađuju specijaliziranim softverom. Obrada podataka uključuje filtriranje šuma, kalibraciju podataka, spajanje različitih skupova podataka te kreiranje preciznih trodimenzionalnih modela. Softver za obradu koristi napredne algoritme za kombiniranje podataka iz različitih senzora, čime se stvara točna i detaljna karta (3D prikaz) koja se može koristiti za razne svrhe i na temelju koje se mogu provoditi različite prostorne analize. Podaci prikupljeni sustavom za mobilno kartiranje zahtijevaju veliku količinu memorije te jača računala kako bi se obrada odvijala bez prekida i odradila u prihvatljivom vremenskom intervalu. Prilikom same obrade podaci se analiziraju i interpretiraju kako bi se u konačnici dobili relevantni podaci vezani uz prostor izmjere. Ova faza uključuje pregled trodimenzionalnih modela, analizu snimljenih slika te identifikaciju specifičnih karakteristika ili problema na terenu. Nakon analize, izrađuju se konačni proizvodi, uključujući oblake točaka, 3D modele, izvještaje i razne vizualizacije. Ovi proizvodi prilagođavaju se specifičnim potrebama korisnika i mogu uključivati karte infrastrukture, analize okoliša ili planove urbanog razvoja. Konačni proizvodi se distribuiraju korisnicima kao što su urbanisti, ekolozi, inženjeri ili arheolozi, najčešće u digitalnom obliku. Ovi korisnici koriste rezultate mobilnog kartiranja za razne svrhe, uključujući planiranje novih projekata, praćenje stanja infrastrukture, istraživanje okoliša i zaštitu kulturne baštine. Proces mobilnog kartiranja tako omogućuje bolje razumijevanje i upravljanje našim okruženjem, pružajući ključne informacije za donošenje valjanih odluka.

2.3 Primjena

Sposobnost prikupljanja preciznih i detaljnih geografskih podataka u kratkom vremenu omogućuje upotrebu mobilnih sustava kartiranja u različitim sektorima i industrijama. Sama pomisao na izmjeru, odnosno prikupljanje prostornih podataka, najčešće asocira na urbanističko planiranje, građenje i razvoj infrastrukture. Tako je najčešća primjena rezultata mobilnog kartiranja u tim sektorima. Dobiveni oblak točaka ili 3D model omogućuje

projektantima da precizno analiziraju postojeću infrastrukturu i planiraju nove projekte. 3D modeli gradova pomažu u vizualizaciji prostora, analiziranju potencijalnih razvojnih područja i optimizaciji korištenja zemljišta. To uključuje planiranje novih stambenih naselja, komercijalnih objekata, prometnica i zelenih površina. Inženjeri i građevinske tvrtke koriste mobilno kartiranje za izgradnju i održavanje infrastrukture poput cesta, mostova, željeznica i tunela. Precizni podaci omogućuju točno određivanje lokacije, analizu terena i identifikaciju potencijalnih problema prije početka građevinskih radova. Tijekom izgradnje, mobilni sustavi kartiranja omogućuju praćenje napretka i osiguranje usklađenosti s projektom.

Kada su ekologija i poljoprivreda u pitanju, mobilni sustavi kartiranja donose veliki napredak u fazi upravljanja. Poljoprivrednici koriste mobilne sustave kartiranja za optimizaciju upravljanja poljoprivrednim zemljištem. Precizne karte i 3D modeli omogućuju analizu tla, praćenje stanja usjeva i planiranje navodnjavanja. Ovi podaci pomažu u povećanju produktivnosti, smanjenju troškova i održivom upravljanju resursima. Ekolozi i znanstvenici koriste mobilne sustave kartiranja za praćenje promjena u okolišu, procjenu stanja ekosustava i planiranje mjera zaštite prirode. Precizni podaci o topografiji, vegetaciji i vodenim tijelima omogućuju analizu utjecaja klimatskih promjena, erozije tla, deforestacije i drugih ekoloških problema.

Mobilni sustavi kartiranja igraju ključnu ulogu u hitnim situacijama i upravljanju katastrofama. Tijekom prirodnih katastrofa poput poplava, potresa ili požara, mobilno kartiranje omogućuje brzo prikupljanje podataka o pogođenim područjima, identificiranje kritičnih točaka i planiranje operacija spašavanja. Za primjer se mogu navesti potresi u Petrinji i Zagrebu (2020.) gdje je nakon prouzročene štete također bilo korišteno masovno prikupljanje prostornih podataka. Tako brzo prikupljeni podaci su bili vrlo bitni te su služili kako bi se u što kraćem roku odredila materijalna šteta na objektima te odredili potrebni zahvati kako bi se spriječila daljnja stradavanja.

2.4 Prednosti i nedostaci

Jedna od glavnih prednosti mobilnog kartiranja je njegova brzina i efikasnost. Mobilne platforme, kao što su vozila, dronovi i ručni uređaji, mogu brzo pokriti velike površine i prikupljati podatke u kratkom vremenu. Ovo je posebno korisno za hitne inspekcije, brze analize terena i situacije gdje je vrijeme ključno, poput prirodnih katastrofa ili infrastrukturnih inspekcija. Gledajući s poduzetničke strane, brzina i efikasnost pozitivno utječu na obavljanje

uslužnih poslova, što rezultira mogućnošću obavljanja većeg broja projekata s istom količinom radne snage. Iako početni troškovi nabave opreme za mobilno kartiranje mogu biti visoki, dugoročno gledano, ova tehnologija može značajno smanjiti troškove i resurse potrebne za prikupljanje geografskih podataka.

Mobilno kartiranje je vrlo fleksibilno i prilagodljivo različitim okruženjima i uvjetima. Mobilne platforme mogu se koristiti u urbanim sredinama, ruralnim područjima, teško dostupnim terenima i ekstremnim uvjetima. Mobilno kartiranje svoju fleksibilnost također zahvaljuje mogućnosti kombinacije različitih senzora, čime se postiže veća pouzdanost i točnost prikupljenih podataka te proširuje mogućnost primjene u različitim područjima. Korištenje GNSS-a, IMU-a, kamera i LiDAR-a omogućuje stvaranje sveobuhvatnih i detaljnih karata koje pružaju višeslojne informacije o terenu i objektima koji se na njemu nalaze.

Mobilno kartiranje, iako izuzetno korisno, ima nekoliko značajnih nedostataka koje treba uzeti u obzir. Prvo, visoki troškovi nabave i održavanja sofisticirane opreme, poput LiDAR-a, GNSS uređaja i kamera visoke rezolucije, mogu biti prepreka za mnoge organizacije, posebno one s ograničenim budžetom. Tehnička zahtjevnost upravljanja i obrade prikupljenih podataka zahtijeva specijalizirano znanje i vještine, što može biti izazovno za timove bez odgovarajuće obuke i iskustva. Loši vremenski uvjeti, poput kiše, snijega, magle i jakog vjetrova, mogu negativno utjecati na kvalitetu prikupljenih podataka, jer LiDAR i kamere imaju poteškoća u preciznom bilježenju u uvjetima smanjene vidljivosti. Osim toga, mobilno kartiranje generira ogromne količine podataka koje zahtijevaju značajne kapacitete za pohranu i moćne sustave za obradu, što može biti logistički izazov za organizacije bez adekvatne infrastrukture. Postoji i stalna briga oko privatnosti i sigurnosti prikupljenih podataka, posebno u urbanim sredinama gdje se snimaju privatni prostori i osobne informacije, što može dovesti do etičkih, a ponekad i pravnih problema.

3. MandEye sustav mobilnog kartiranja

3.1 Opis sustava

MandEye sustav je razvio poljski doktor znanosti, stručnjak za robotiku, informatiku i kartiranje, dr. sc. Janusz Będkowski. Prvenstveno je razvijen kao niskobudžetni, open-source, sustav 3D kartiranja koji je u fazi unaprjeđivanja, ali i dalje ima dobru podlogu da „naudi“ skupocjenim sustavima mobilnog prikupljanja podataka. Sustav dolazi u dvije varijante, može se naručiti direktno od autora uz određenu financijsku naknadu, a može se samostalno sastaviti uz upute koje je autor objavio na GitHub portalu. Za prikupljanje podataka korišten je sustav koji je sastavio profesor Geodetskog fakulteta, dr. sc. Loris Redovniković. U nastavku će biti detaljno objašnjeni hardverski i softverski dio korištenog sustava, sama primjena sustava te njegove mogućnosti.

3.2 Hardver

Hardver je ključna komponenta u razvoju i funkcioniranju robotike i autonomnih sustava, jer osigurava preciznost, pouzdanost i brzinu prikupljanja podataka. Kvalitetan hardver omogućuje prikupljanje detaljnijih i točnijih podataka o okolini, brzu obradu podataka, izdržljivost u teškim uvjetima, energetska učinkovitost kao i kompatibilnost za laku integraciju različitih komponenti. MandEye sustav je hardverski baziran na LiDAR senzoru LiVOX MID 360, računalu Raspberry Pi 4, baterijama te potrebnom ožičenju.

LiDAR LiVOX MID-360 predstavlja revolucionarni senzor prvenstveno razvijen za robotiku i autonomne sustave. Ovaj napredni senzor omogućuje preciznu percepciju okoline kroz 360-stupanjsku 3D vizualizaciju, čime omogućuje prikupljanje podataka okoline bez mrtvih kutova. Svojem kompaktnim dizajnom i lakoćom instalacije, Livox Mid-360 pruža visoku razinu pouzdanosti i preciznosti u širokom spektru sustava za mobilno kartiranje. Optimiziran je za mobilne robote, nudeći podršku za napredne algoritme poput SLAM-a (Simultaneous localization and mapping), što omogućuje autonomno kretanje i mapiranje okoline.



Slika 2. LiDAR LiVOX MID 360 (preuzeto s portala livotech.com)

Osnovne specifikacije senzora LiVOX MID 360 (izvor:livoxtech.com):

Model: MID-360

Valna duljina lasera: 905 nm

Sigurnosni standardi lasera: Class 1 (IEC60825-1:2014)(Eye Safety)

Maksimalna udaljenost detekcije: 40 m - 10% refleksije

70 m - 80% refleksije

Minimalna udaljenost detekcije: 0.1 m

Vidno polje: Horizontalno: 360°, Vertikalno: -7°~52°

Točnost udaljenosti (1σ): ≤ 2 cm (10m)

≤ 3 cm (0.2m)

Kutna točnost (1σ): $< 0.15^\circ$

Stopa točaka: 200,000 points/s

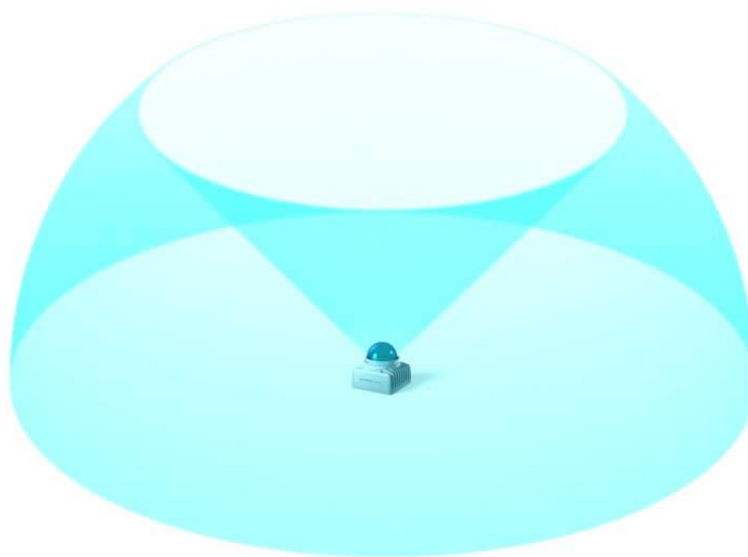
IMU: integrirani IMU model: ICM40609

Radna temperatura okruženja: -20°C to 55°C

Voltaža izvora energije: 9 ~ 27 V DC

Dimenzije: 65×65×60 mm

Težina: 265 g



Slika 3. Vidno polje senzora (preuzeto s portala livoxtech.com)

Raspberry Pi 4 je četvrta generacija mikroračunala iz Raspberry Pi Foundation. Nudi revolucionarna povećanja brzine procesora, multimedijских performansi, memorije i povezivosti u usporedbi s prethodnom generacijom. Ovaj uređaj pruža napredne mogućnosti za eksperimentiranje, učenje i izradu različitih projekata u automatizaciji, IoT-u, obrazovanju i mnogim drugim područjima. Raspberry Pi 4 nudi korisnicima svestran i pristupačan način za istraživanje tehnologije i kreativno izražavanje.



Slika 4. Mikroračunalo Raspberry Pi 4

Osnovne specifikacije mikroračunala Raspberry Pi 4 (izvor: raspberrypi.com):

Procesor: Broadcom BCM2711, četverojezgreni Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit

Memorija: 1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4-3200 SDRAM (ovisno o modelu)

Povezivost: -2,4 GHz i 5,0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac bežični LAN, Bluetooth 5.0, BLE
Gigabit Ethernet

- 2 × USB 3.0 porta

- 2 × USB 2.0 porta.

Video i zvuk: - 2 × mikro HDMI priključak (podržano do 4Kp60)

- 2-tračni MIPI DSI priključak za zaslon

- 2-tračni MIPI CSI priključak za kameru

- 4-polni stereo audio i kompozitni video priključak

Ulazna snaga: - 5V DC putem USB-C konektora (minimalno 3A1)

- 5V DC preko GPIO zaglavlja (minimalno 3A1)

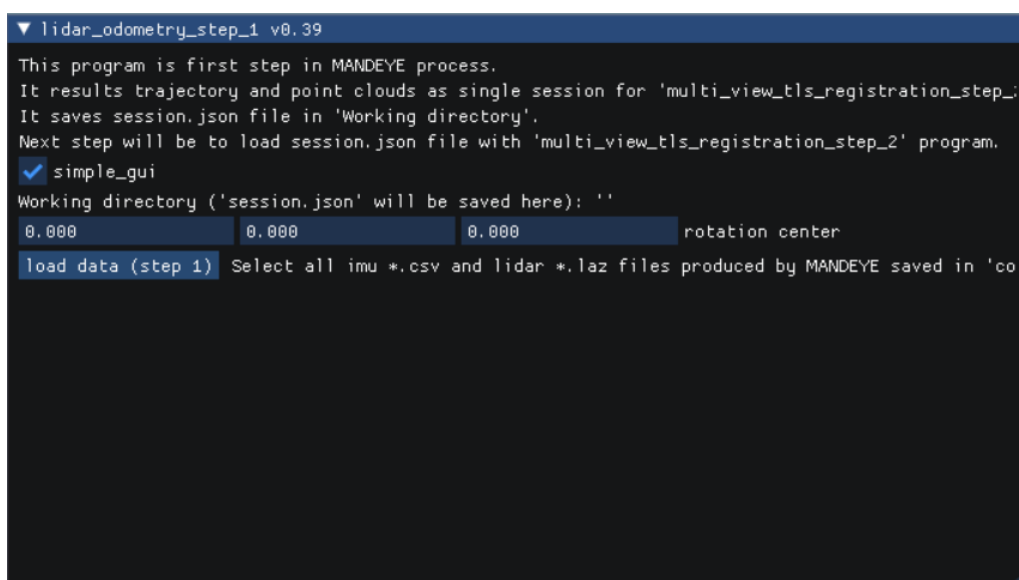
- Power over Ethernet (PoE)—omogućeno (zahtijeva poseban PoE HAT)

Radna temperatura: 0 – 50°C

Korišteno računalo na sebi ima dodatno ugrađena dva gumba, od kojih jedan služi za statično, a drugi za dinamično skeniranje.

3.3 Softver

U mobilnom kartiranju, softver igra ključnu ulogu u prikupljanju, obradi i analizi podataka o okolini kako bi se stvorile precizne karte ili modeli terena. Softverski paket MandEye sustava podržava razne mogućnosti manipulacije podataka, dok se korisničko sučelje ne odlikuje pretjerano lijepim izgledom. U softverskom paketu dolaze tri programa od kojih svaki ima svoju ulogu u tijeku obrade prostornih podataka, te grafički prikaz oblaka točaka. Prvi program se naziva „*lidar_odometry_step_1*“. Njegova uloga je određivanje trajektorije, izgladivanje linije trajektorije i računanje skupnog point cloud-a iz sirovih podataka dobivenih iz IMU i LiDAR-a. Nakon obavljenih radnji sprema se sesija koja se učitava u drugi program na daljnju obradu. Drugi program se naziva „*multi_view_tls_registration_step_2*“ koji nudi razne mogućnosti obrade točkastih prostornih podataka. U drugom se dijelu učitava sesija kreirana u koraku 1, nakon čega se podaci obrađuju sukladno određenom zadatku. Neke od mogućnosti su poravnanje zasebnih skenova, „Loop closure“ koji zatvara kružnu trajektoriju proporcionalno ravnajući skenove, georeferenciranje, izvoz podataka u razne formate. Rezultati su najčešće 3D oblaci točaka u LAS ili LAZ formatu podataka (komprimirani LAS - LiDAR *Aerial Survey*). Treći dio programskog paketa zove se „*multi_session_registration_step_3*“. On služi za poravnanje 3D oblaka točaka različitih sesija, odnosno komponiranje više različitih sesija u jednu cjelinu, uzimajući u obzir relativni položaj i orijentaciju između sesija.



```
lidar_odometry_step_1 v0.39
This program is first step in MANDEYE process.
It results trajectory and point clouds as single session for 'multi_view_tls_registration_step_'.
It saves session.json file in 'Working directory'.
Next step will be to load session.json file with 'multi_view_tls_registration_step_2' program.
 simple_gui
Working directory ('session.json' will be saved here): ''
0.000 0.000 0.000 rotation center
load data (step 1) Select all imu *.csv and lidar *.laz files produced by MANDEYE saved in 'co
```

Slika 5. Sučelje prvog dijela programskog paketa

Paralelno s obradom u radu se koristio još jedan softver koji nije dio MandEye sustava i programskog paketa, a to je CloudCompare. Navedeni softver je otvorenog koda i koristi se za obradu i analizu oblaka točaka, i mesheva, često dobivenih iz LiDAR-a, fotogrametrije i drugih tehnika 3D skeniranja. Jedna od ključnih značajki CloudCompare softvera je njegova sposobnost obrade različitih formata oblaka točaka, uključujući LAS, LAZ, PLY, OBJ i mnoge druge. Ova fleksibilnost omogućuje korisnicima da učitaju, vizualiziraju i manipuliraju podacima na način koji odgovara njihovim specifičnim potrebama i zahtjevima projekta. U konkretnom primjeru, CloudCompare koristio se za vizualizaciju oblaka točaka i kreiranje tlocrta i razvijenog profila špilje, što će biti objašnjeno u nastavku.

4. Primjena MandEye sustava prikupljanja podataka u speleologiji

4.1 Speleologija

Speleologija je složena znanstvena disciplina koja se bavi istraživanjem i proučavanjem pećina, špilja i ostalih podzemnih objekata. Ona nije ograničena samo na istraživanje špilja, već obuhvaća i proučavanje raznih fenomena koji se pojavljuju u podzemnom okruženju, uključujući geološke procese, hidrologiju, biološku raznolikost, arheološke artefakte i klimatske uvjete. Speleologija, zbog svega navedenog, spaja različite grane znanosti poput geologije, biologije, hidrologije, arheologije, geografije i geodezije kako bi pružila sveobuhvatan uvid u pećinske sustave i njihov značaj u okolišu i ljudskoj povijesti. Geološki aspekt speleologije uključuje proučavanje formiranja špilja i drugih podzemnih prostora. To može uključivati analizu geoloških slojeva, procese erozije, formiranje stalaktita i stalagmita, te mnoge druge geološke fenomene koji su karakteristični za podzemne sustave. Hidrologija je također važan aspekt speleologije, jer mnoge špilje sadrže podzemne tokove, potopljene prostorije ili druga vodena tijela. Speleolozi su znanstvenici koji se bave istraživanjem, kartiranjem i proučavanjem pećina kako bi bolje razumjeli njihovu konfiguraciju, floru, faunu i evoluciju. Biološka raznolikost u pećinama također je predmet proučavanja u speleologiji. Ovi podzemni ekosustavi mogu podržavati različite oblike života, uključujući mikroorganizme, paukove, insekte, pa čak i rijetke vrste riba i guštera prilagođene podzemnom životu. Proučavanje ovih ekosustava pomaže u razumijevanju evolucije i adaptacije organizama na ekstremne uvjete podzemnog okoliša. Arheološki aspekt speleologije obuhvaća istraživanje i dokumentiranje arheoloških ostataka i tragova ljudske aktivnosti koji se nalaze u špiljama. Špilje su često korištene kao skloništa, staništa ili čak kao religijski ili kulturni prostori za različite civilizacije tijekom povijesti. Proučavanje tih ostataka pomaže u otkrivanju drevnih kultura i rekonstrukciji tadašnjeg načina života.

Hrvatski krš obiluje dubokim jamama koje su postale poznate diljem svijeta. Do sada je istraženo 54 jama dubljih od 250 metara, od kojih su tri jame čak dublje od 1000 metara - Jamski sustav Lukina jama-Trojama, Slovačka jama i Jamski sustav Velebita. Ukupno, njih 18 doseže dubine veće od 500 metara, a većinom se nalaze na planini Velebit. Kada je riječ o duljinama, najdulji hrvatski jamski sustav prema rezultatima speleoloških istraživanja je Jamski sustav Crnopac koji ima preko 63 kilometra istraženih kanala, te ga čine jame Draženova puhaljka, Kita Gaćešina, Oaza, Muda Labudova, Adela i Vlažna Mađarica. Usprkos

impresivnim podacima o najvećim hrvatskim špiljama i jamama, MandEye sustav je testiran u dosta manjoj jami. Razlog tomu bila je potreba da se ispita funkcionalnost i pouzdanost samog sustava u prostoru koji predstavlja prosječan speleološki objekt. Kako su u vrijeme prikupljanja podataka za izradu diplomskog rada speleolozi iz PDS Velebit bili u posjeti Mijatovoj jami, odlučili smo im se priključiti i tamo ispitati mogućnost MandEye sustava za izmjeru speleoloških objekata.

4.2 Mijatova jama

Mijatova jama, smještena južno od Mateškog Sela u općini Generalski Stol, jedno je od prirodnih blaga Hrvatske koje fascinira svojom dubinom, ljepotom i speleološkom vrijednošću. Ova špilja, istraжена te topografski snimljena u 1960-im godinama od strane članova speleološkog odsjeka Planinarskog društva Sveučilišta "Velebit" iz Zagreba, predstavlja dragocjen primjer podzemnih formacija koje obiluju intrigantnim geološkim značajkama. Riječ je o špilji s jamskim ulazom, dugačkoj 1115 metara, što je čini jednom od značajnijih u ovom dijelu Hrvatske. Ono što je posebno izdvaja je veličina njenih podzemnih prostora, koja je pomalo netipična za područje Generalskog Stola. Prostrani hodnici, impresivni stalaktiti i stalagmiti te složeni labirint podzemnih kanala čine ovu špilju pravim izazovom i rajem za speleologe. Nakon što je Mijatova jama prvi put istraжена, postala je važnim dijelom terenskih aktivnosti speleoloških škola. Do početka Domovinskog rata 1991. godine, špilju su redovito posjećivali speleolozi i studenti, koji su u njoj stjecali praktična znanja i vještine. No, ratne operacije i blizina prve linije bojišnice učinili su ovaj prirodni spomenik nedostupnim. Ulaz u Mijatovu jamu našao se na minski sumnjivom području, što je onemogućilo istraživanja i posjete sve do prije nekoliko godina. Unatoč izazovima, Mijatova jama nije zaboravljena. Danas, nakon razminiranja i povećane sigurnosti, ponovno je dostupna za speleološka istraživanja. Njena zaštita i očuvanje postali su prioritet, kako bi se sačuvale njezine prirodne ljepote i znanstvena vrijednost. Ova špilja pruža neprocjenjive informacije o geološkoj povijesti područja, klimatskim promjenama kroz tisućljeća te formiranju krša i podzemnih voda. Mijatova jama nije samo geološki fenomen već i svjedočanstvo o snazi prirode i povijesti ovog kraja. Ona je podsjetnik na prošla vremena i ratne strahote, ali i simbol obnove i povratka života. Kao takva, Mijatova jama nastavlja inspirirati i privlačiti speleologe, znanstvenike i ljubitelje prirode, nudeći im uvid u tajnoviti podzemni svijet koji čeka da bude otkriven.



Slika 6. Okno jame

4.3 Prikupljanje podataka

U ranijem tekstu opisan je hardverski i softverski dio korištenog sustava prikupljanja podataka, no za korištenje sustava u špilji napravljene su male preinake. Svi hardverski dijelovi, osim LiDAR senzora, smješteni su u ruksak koji je ojačan drveno-plastičnom konstrukcijom, te služi kao kućište sustava. Senzor je pričvršćen na sigurnosnu kacigu, kako bi ruke bile slobodne tijekom prolaska kroz špiljski sustav.



Slika 7. Profesor Loris Redovniković u postavljanju hardverskog dijela sustava

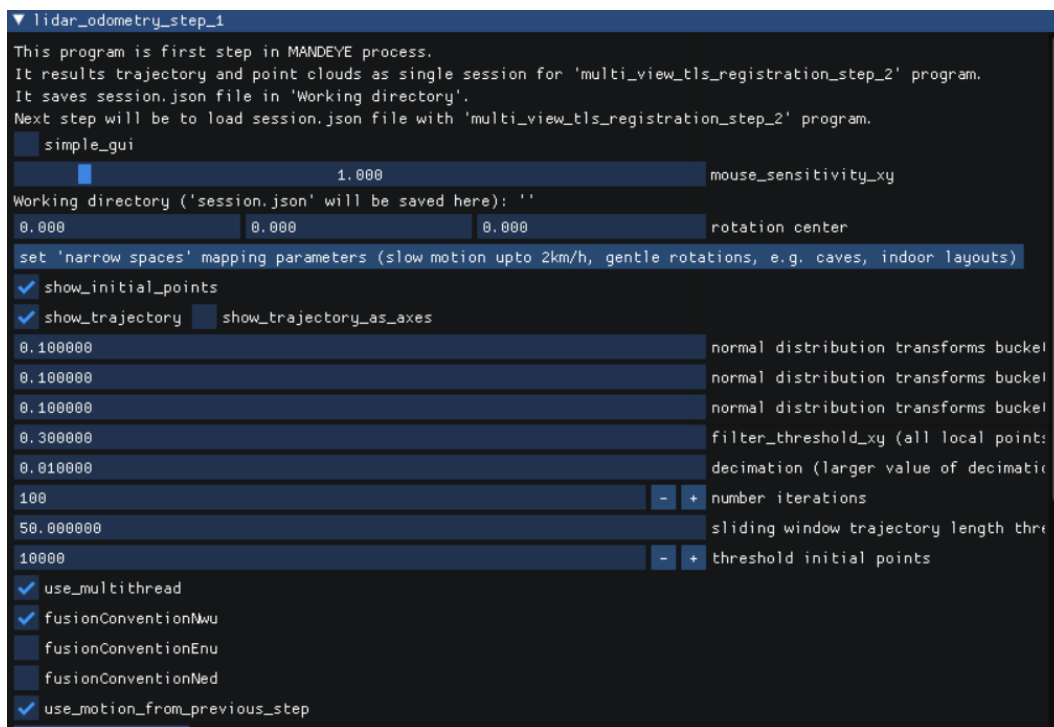
Nakon sklapanja svih komponenti sustava, profesor Loris i njegov tim speleologa krenuli su u prikupljanje podataka. Na početku je odrađen statični sken na ulazu u Mijatovu jamu, za kojega prikupljanje podataka traje oko 30 sekundi, nakon toga se krenulo u dinamično skeniranje dvije grane sustava jame. Najopasniji izazov prikupljanja podataka u špiljama (i jamama) predstavlja nesiguran teren, odnosno nepredvidiva konfiguracija same jame. Zbog toga je potrebno prethodno stručno osposobljavanje, odnosno pohađanje speleološke škole. Još jedan od izazova je problematika izmjere/definiranja točnog oblika nehomogenih površina sustava jame. Površine jama (špiljskih sustava) prekrivene su raznim sigama, kamenjem, jezerima te ostalim geološkim detaljima koji čine prikupljanje podataka još dugotrajnim i zahtjevnim. Osim navedenih izazova dovodi se u pitanje i prostorna točnost trajektorije, uzimajući u obzir da se dolaskom na kraj speleološkog objekta točnost ne može provjeriti. Jedini način provjere trajektorije, odnosno geometrije same jame, je korištenje neovisnih kontrolnih mjerenja. Provođenje tahimetrijske metode zahtjevno je u uskim i niskim dijelovima špilje. Uz takve uvijete prikupljanje podataka je prilično sporo i zahtjevno.

Po završetku prikupljanja podataka, sprema se korištena oprema, te se podaci izvoze na računalo za daljnju obradu. U nastavku će biti prikazano kako se testirani sustav prikupljanja podataka snašao u tim teškim uvjetima, bit će detaljno opisana softverska obrada prikupljenih podataka te na kraju prikazan konačni rezultat.

4.4 Obrada podataka

Na početku obrade podataka pokreće se prvi program programskog paketa pod nazivom „*lidar_odometry_step_1*“. Na zaslonu se pojave tri prozora, jedan služi za grafički prikaz podataka, drugi služi za upravljanje naredbama dok je na trećem prikazan tijek izvršenih naredbi u tekstualnom obliku. Ovo vrijedi za sva tri programa. U prozoru za pokretanje naredbi ukratko je opisan sami tijek obrade, odnosno što bi trebalo raditi i kojim redoslijedom. Prvi je korak učitavanje podataka koji se pokreće klikom na naredbu „*Load data*“ (slika 8.). Ukoliko se podaci prikupljaju u uskim prostorima poput špilja, prije samog učitavanja, preporuča se upotreba opcije „*set 'narrow spaces' mapping parameters*“ koja prilagođava parametre sukladno uskom kanalu u špilji. Ako se isključi kvačica pored „*Simple GUI*“ otvara se prošireni niz mogućnosti koje softver nudi. Nakon pokretanja naredbe „*Load data*“ pojavljuje se dijaloški okvir na kojem treba izabrati sve *.laz i *.csv datoteke nastale prikupljanjem podataka. Ekstenzija *.laz označava datoteke koje se odnose na podatke LiDAR senzora, a ekstenzija *.csv predstavlja podatke prikupljene s IMU-a. Nakon što su učitani podaci, pokreće se naredba „*Compute all*“ koja pokreće algoritam za automatsko poravnavanje svih skenova.

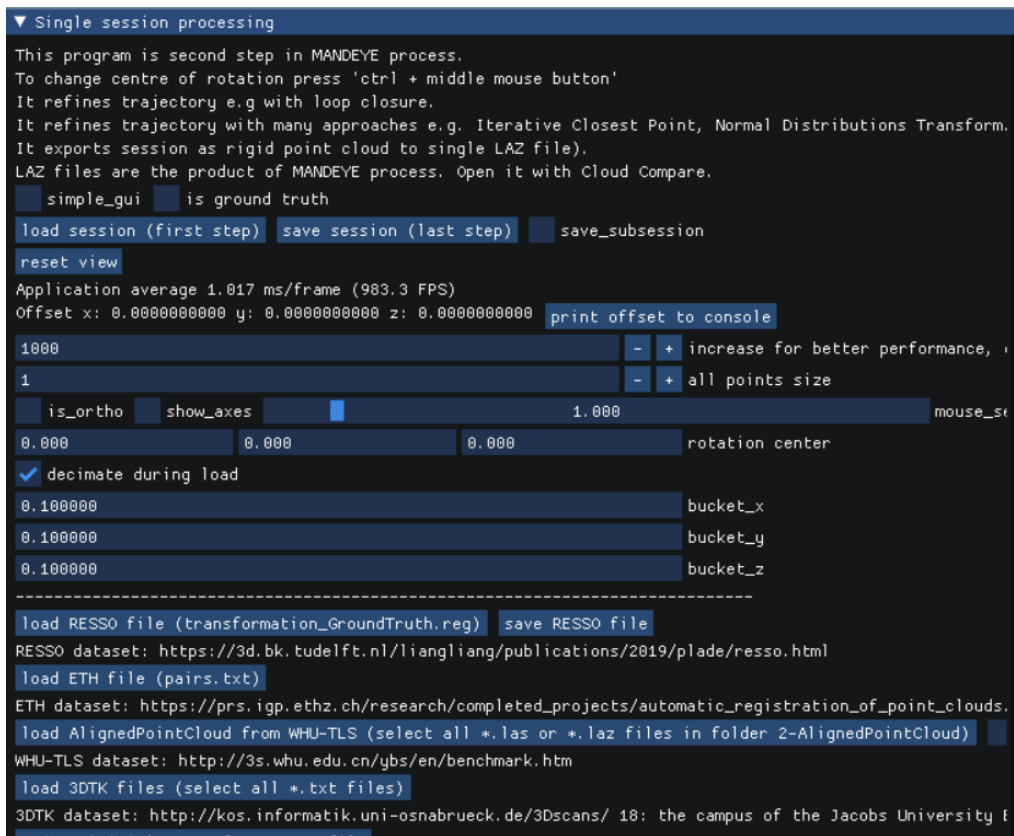
Poravnavanje traje malo duži period, što ovisi o količini ulaznih podataka te o jačini računala. Rezultat izvršenja naredbe za poravnavanje je jedinstveni oblak točaka. U mapi „preview“, koja se stvara na mjestu gdje se nalaze učitani podaci, sprema se trenutno stanje projekta u *.laz formatu. Učitavanjem istog u softver CloudCompare može se paralelno uz obradu pratiti napredak cijelog projekta. U Naredbenom retku nakon izvršenja naredbe za poravnavanje, prikaže se duljina trajektorije (putanje) po kojoj se kretalo. Trajektorija ne odgovara stvarnoj duljini jame, ali se može koristiti kao približna vrijednost. Duljina prve trajektorije iznosi 140.82 m dok duljina druge trajektorije (dužeg prolaza jame) iznosi 572.01 m. Također, postoji opcionalna naredba za izgladivanje trajektorije „Consistency“. Njenom primjenom obrada traje nešto dulje, ali je moguće dodatno poboljšati kvalitetu konačnih podataka. Nakon što su odrađeni svi navedeni koraci, sesija se sprema naredbom „Save result“, program se gasi te se pristupa sljedećem koraku.



Slika 8. Prikaz sučelja prvog programa

Nakon prvog koraka pristupa se drugom programu programskog paketa pod nazivom „multi_view_tls_registration_step_2“. Drugi program sadrži opsežniji izbor naredbi za georeferenciranje oblaka točaka. Prvi korak drugog programa je učitavanje prethodno spremljene sesije pomoću naredbe „load session“ (slika 9.). Prilikom učitavanja, ukoliko želimo detaljniji prikaz modela, potrebno je isključiti opciju „decimate during load“. Također, isključivanje navedene opcije usporava i otežava provođenje naredbi, stoga će biti potrebno

čekati duži period da se naredba odradi. Nakon što je sesija učitana, postoji mogućnost prikaza oblaka točaka gdje se odabire kolika gustoća točaka će biti prikazana. Što je veći broj odabran u izborniku, prikazuje se manji broj točaka, a program radi lakše i brže. Kada je izabrana vrijednost 0 u izborniku, prikazane su sve točke, prikaz oblaka točaka izgleda konzistentnije, ali program radi usporeno i otežano. Najvažnije je pronaći pravi omjer gdje će oblak točaka izgledati dovoljno kvalitetno, a da program i dalje brzo radi. Navedeni izbor prikaza ne utječe na obradu jer u direktnu obradu ulaze sve točke.



Slika 9. Prikaz sučelja drugog programa

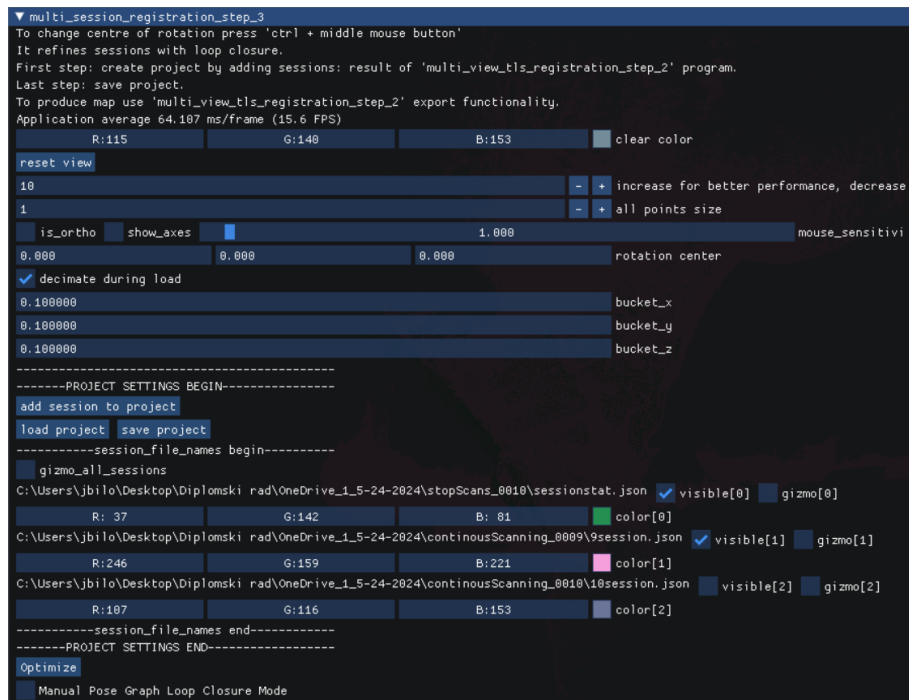
U nastavku se koristi naredba „*generate random colors*“ koja boja sve skenove sesije zasebno u drugačiju boju. Navedena naredba nam pomaže da razlikujemo skenove da bi lakše vidjeli spojeve između skenova. Na obje sesije skenovi su bili međusobno dobro poravnati te nije bilo potrebe za korekcijom. Na kraju se sprema svaka sesija naredbom „*save session*“ te se izvozi oblak točaka u *.las ili *.laz formatu naredbom „*save all marked scans to laz (as one global scan)*“, kako bi se kasnije prikaz mogao otvoriti u nekom od softvera za obradu oblaka točaka poput CloudCompare-a. U nastavku je prikazan izgled oblaka točaka prve (kraće) sesije gdje se vidi konfiguracija ove strane špilje. Ulaz u špilju se nalazi na vrhu skena gdje su točke

prikazane raspršeno zbog okoline. Istim naredbama iz prvog i drugog programa obrađuju se svi dinamični i statični skenovi, kako bi ih imali spremne za konačno poravnanje.



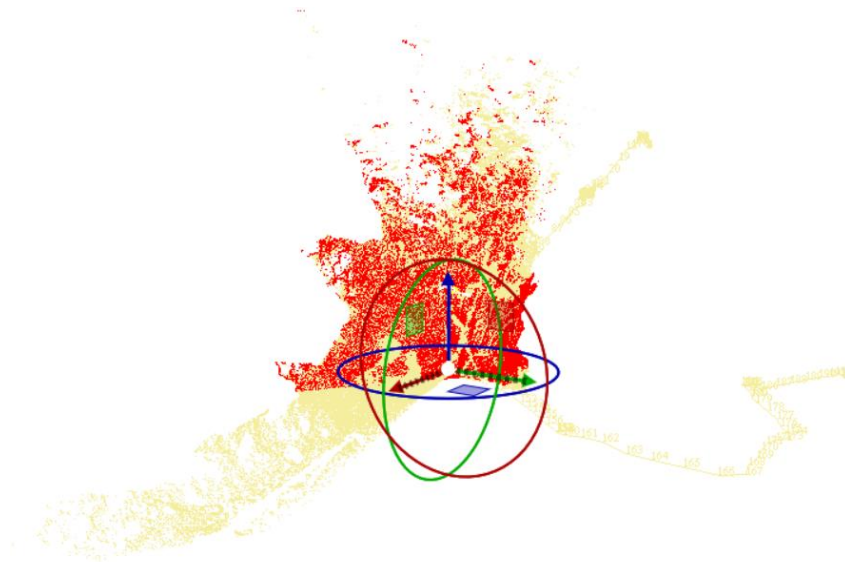
Slika 10. Prikaz oblaka točaka kraćeg ogranka jame nakon obrade u koraku 2.

Na ovaj su način pripremljeni oblaci točaka u pogledu relativne orijentacije zasebnih skenova, slijedi korak tri u kojem se pristupa spajanju dvije sesije (dva oblaka točaka koji se odnose na dva ogranka jame) i statičnog skena ulaza u špilju. Međusobno povezivanje odvija se u trećem programu koji se naziva „*multi_session_registration_step_3*“. Prvi korak je dodavanje svake sesije zasebno naredbom „*add sessions to project*“. Pri dodavanju sesija vrijedno je spomenuti da se statični sken, ukoliko je georeferenciran u trećem programu, mora učitati prvi, kako bi se ostale sesije poravnavale sukladno njemu. Takav se georeferencirani sken u koraku 2. označava kvačicom na naredbu „*ground truth*“. Nakon učitavanja tri sesije (jedna statična i dvije dinamične), slijedi njihovo međusobno spajanje. Kako bi se pristupilo tom koraku potrebno je jedan dinamični sken ugasiti isključenjem kvačice s naredbe „*visible*“ pokraj odgovarajućeg skena.



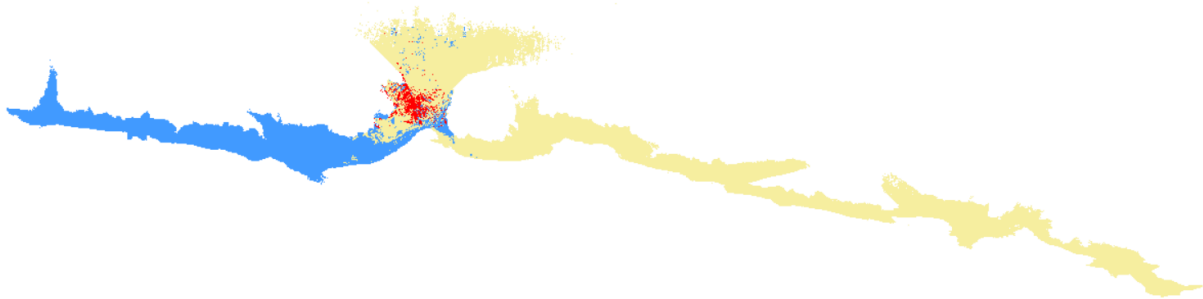
Slika 11. Prikaz sučelja trećeg programa

Kada su vidljive samo dvije sesije u konkretnom primjeru, jedan statični i jedan dinamični sken aktivira se dio programa za poravnavanje pozicija grafova klikom na naredbu „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“. Zatim se odabere pojedinačni sken dinamične sesije koji će se poravnati sa statičnim te se doda rub između istih klikom na naredbu „*add edge*“. Nakon toga se pali naredba „*manipulative active edge*“ koja služi za upravljanje rubom koji je prethodno označen. Prvi korak ovog postupka je aktiviranje gizma te ručno poravnavanje dinamičnog skena na statični (slika 12.). Gizmo je alat ili dodatak unutar softvera za 3D modeliranje i obradu podataka koji omogućuje manipulaciju objekata u prostoru. Gizmo omogućuje korisnicima da ručno poravnaju različite skenove koristeći rotacije i translacije oko osi X, Y i Z.



Slika 12. Poravnavanje statičnog (crveni) i dinamičnog (žuti) skena pomoću gizmo alata

Nakon ručno odrađenog poravnanja gasi se gizmo te se pristupa automatskom algoritmu za poravnavanje klikom na naredbu „*ICP*“. ICP je iterativna metoda koja se koristi za poravnavanje dva skupa točaka u prostoru. Glavna svrha ICP-a je da minimizira razliku između dva oblaka točaka. Pristupom algoritmu bira se koeficijent koji označava radijus traženja. Pri korištenju navedene naredbe prvo se za radijus odabrala vrijednost 1, zatim kada je algoritam odradio radnju smanjuje se vrijednost koeficijenta. Algoritam se pokretao s koeficijentom 0.6 i 0.2, pritom su vizualne promjene na grafičkom prikazu bile sve manje. Kada je obavljeno zadnje poravnanje gase se naredbe „*manipulative active edge*“ i „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“ te se klikne na naredbu „*optimize*“, koja poravnava sve skenove u jednu cjelinu sukladno poravnatom statičnom i dinamičnom skenu. Ako se vizualnim pregledom utvrdi da je cjeloviti oblak točaka ispravno međusobno poravnat nastavlja se sa spremanjem rezultata, u protivnom se pristupa opisanom procesu ispočetka birajući novi rub (poveznicu dva pojedinačna skena). Klikom na naredbu „*save results*“ relativni položaj svih oblaka točaka (skenova) se sprema u datoteku „*poses*“, za svaki oblak točaka u odgovarajuću mapu. Tako spremljeni oblaci točaka imaju međusobno trajno određen položaj u odnosu jedan na drugog.



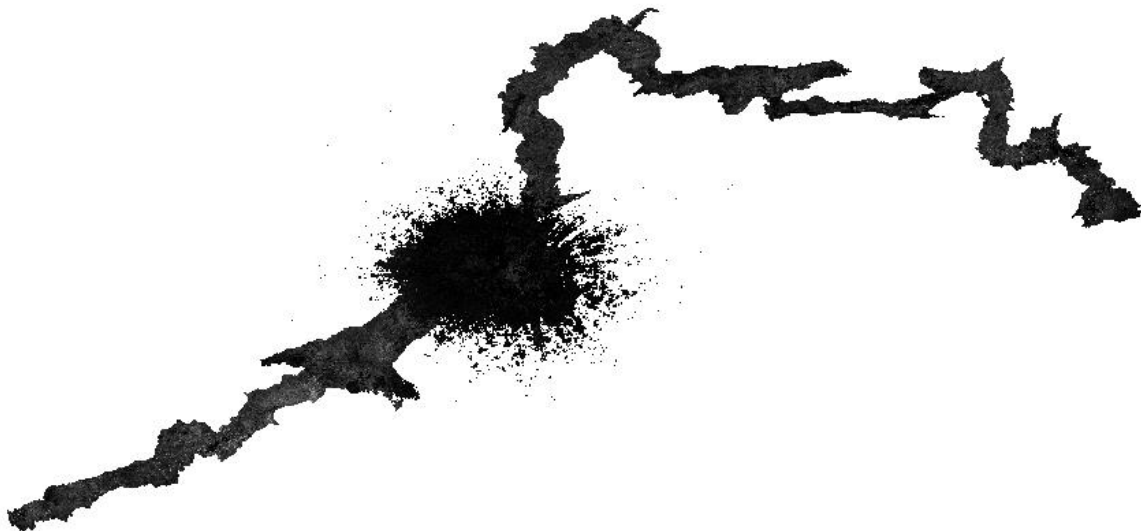
Slika 13. Prikaz poravnatih dinamičnih (plavi i žuti) oblaka točaka sa statičnim (crveni)

4.5 Presentacija rezultata

Nakon kontrolnog pregleda poravnavanja gasi se treći program te se pristupa CloudCompare softveru na daljnju vizualizaciju. U navedeni softver se učitavaju obrađeni skenovi te se pristupa nekim metodama koje grafički prikaz čine prezentativnijim. Kada su učitani oblaci točaka, prikazuje se konfiguracija jame iz dvije perspektive, tlocrtne i bočne. Takvi prikazi se dobiju klikom na ikone „*Set top view*“ i „*Set side view*“.

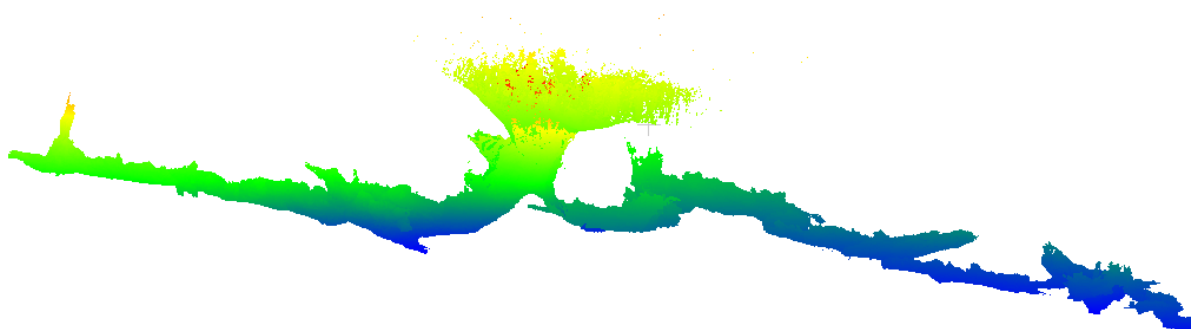


Slika 14. Konfiguracija jame iz bočne perspektive



Slika 15. Konfiguracija jame iz tlocrtno perspektive

Odabirom naredbe „Tools“ > „Projection“ > „Export coordinate to SF“ omogućava se izvoz koordinata točaka kao skalarnih polja (SF), što je korisno za daljnju analizu i manipulaciju podacima. Otvori se dijalog prozor u kojem se može odabrati koje koordinatne komponente (X, Y, Z) se izvoze kao skalarna polja. Može se odabrati jednu, dvije ili sve tri komponente. Nakon što se potvrdi odabir, izabrane komponente bit će pretvorene u skalarna polja i dodane u oblak točaka. Ova funkcionalnost omogućava korisnicima da jednostavno izdvoje koordinatne podatke i koriste ih kao dodatne informacije unutar oblaka točaka, čime se povećava fleksibilnost i mogućnosti analize u CloudCompare-u. Izvoz koordinata kao skalarnih polja može biti posebno koristan za napredne analize, kao što su filtriranje prema određenom intenzitetu povrata signala ili vizualizacija različitih aspekata skeniranih podataka. Na ovom primjeru, izvezena je koordinata „Z“ kao skalar. Pomoću tog alata dobiven je Height Map, odnosno mapa visina gdje se može percipirati kakvi su visinski odnosi između pojedinih dijelova jame. Na slici 16 ista boja označava istu relativnu visinu. U sljedećem prikazu može se primijetiti kako jama ima još jedan vertikalni dio na kraćoj grani sustava.



Slika 16. Height map

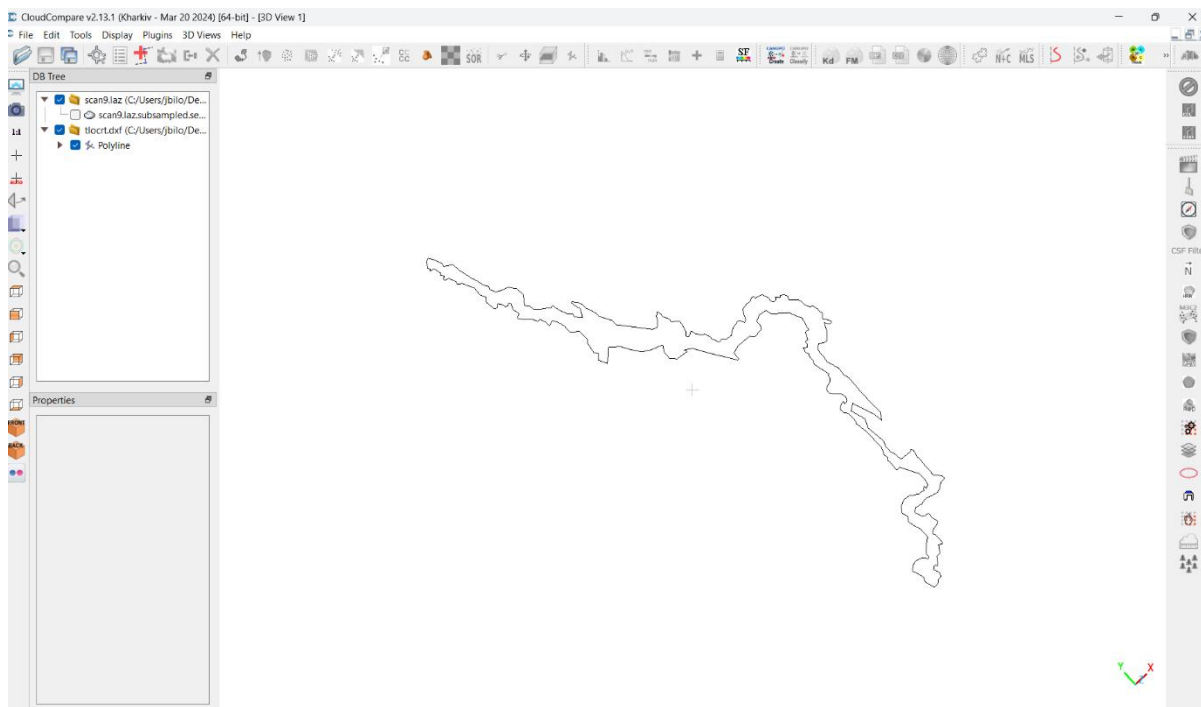
Kako bi prikaz učinili još prezentativnijim, pristupilo se rezanju gornjeg dijela oblaka točaka, koji predstavlja ulaz u jamu. U navedenom dijelu točke su raspršene jer je snimanje započeto prije direktnog ulaska u jamu. Do raspršenja dolazi jer okolina oko samog senzora nije homogena cjelina, već se tu nalaze stabla, grmlje, speleolozi i ostali pokretni objekti koji zbog gibanja stvaraju šum na oblaku točaka. Pomoću naredbe „*Segment*“ iz padajućeg izbornika „*Edit*“ reže se područje za koje smatralo da nije potrebno. Naredba „*Segment*“ u CloudCompare-u omogućava interaktivno odabiranje i izdvajanje dijelova oblaka točaka ili mreža, što je korisno za uklanjanje neželjenih dijelova podataka ili fokusiranje na specifične regije. Odabir područja se odrađuje pomoću naredbe „*Segment out*“ gdje pomoću poligona odabiremo točke iz trenutne projekcije. Nakon odabiranja točke nestanu te se klikne na naredbu „*Confirm and delete hidden points*“ kako bi se iste obrisale. Za prikaz je odabrana boja „*Brown > Yellow*“ kako bi se pokušala još bolje dočarati prostorna konfiguracija. Korištenjem naredbe „*Point picking*“ dolazi se do položajnih podataka o odabranoj točki. Na taj način se odabire najniža i najviša (odrezano okno) točka te se dobiva vrijednost dubine jame koja iznosi 59,84 m.



Slika 17. Prikaz konfiguracije jame s vidljivim oknom

Izrada tlocrta u Cloud Compare-u izvodi se jednostavno, prateći par koraka. Odabire se učitani oblak točaka, te se otvara alat „*Cross Section*“ gdje se odabire naredba „*Slice extraction*“. Nakon pojavljivanja novog prozora, klikne se na „*Extract envelope(s)*“, „*Envelope type*“ se postavlja na „*Full*“, a parametar „*max edge lenght*“ (koji određuje gustoću lomnih točaka nove tlocrtno linije) je u ovom slučaju postavljen na vrijednost 0.5. Pri postavljanju

parametara potrebno je paziti da je odabrana os Z. Kada su svi parametri postavljeni klikne se na „OK“ te se pojavi tlocrt oblaka točaka.



Slika 18. Tlocrtni prikaz oblaka točaka

Za potrebe izrade razvijenog profila jamskog sustava potrebni su nam os jame i oblak točaka. Oblak točaka je prethodno obrađen, dok os treba odrediti pomoću drugih besplatnih softvera. Os jame u ovom slučaju predstavlja trajektorija (određena skupom točaka) po kojoj su se prikupljali podaci. Koordinate točaka spomenute trajektorije exportiraju se iz 2. programa softverskog paketa, u *.csv datoteku pomoću naredbe „*save all marked trajectories to csv*“. Datoteka se otvori u Excel-u te se preuredi za daljnje korištenje na način da se doda stupac koji označuje broj točke, te da se obrišu svi stupci osim x, y, i z koordinate. Tako uređena *.csv datoteka se učitava u Q-Gis besplatni softver. Prilikom učitavanja postavlja se korišteni razdjelnik, označavaju se stupci koji predstavljaju broj točke, x, y, i z os, te se klikne na naredbu „*Add*“. Na ekranu se pojavljuju točke trajektorije koje se spajaju u poliliniju pomoću naredbe „*Points to path*“ iz izbornika „*Processing toolbox*“. Dobivena polilinija se pojednostavljuje pomoću naredbe „*Simplify*“, te se izvozi pomoću naredbe „*Export/Save Features As*“ pazeći da se odabere *.dxf format kako bi se mogla učitati u Cloud Compare. Kada su polilinija trajektorije i oblak točaka učitani u Cloud Compare, odabire se naredba „*Extract Sections*“ nakon čega se klikne na „*Create polyline*“, te „*Import polylines from DB*“. Kada je trajektorija učitana klikne se na naredbu „*Extract points along active sections*“ koja otvara novi dijaloški okvir u kojem se određuju parametri poput duljine sekcije i maksimalne duljine ruba. U ovom

primjeru maksimalna duljina ruba je 0.5. Klikom na tipku „OK“ zatvara se dijaloški okvir te se klika na naredbu“ *Unfold the points along the selected polyline*“ u kojem se zadaje debljina oblaka točaka oko polilinije koja će biti selektirana. Rezultat svih prethodnih koraka je oblak točaka, koji gledajući bokocrtno (naredba „*Set front view*“) izgleda kao tanka linija zbog male zadane širine. Iz ovakvog oblaka točaka dobije se linija pomoću alata „*Cross section*“ objašnjenog u ranijem odlomku, samo ovog puta pazeći da bude odabrana os y.



Slika 19. Razvijeni profil Mijatove jame

5. Ostale primjene MandEye sustava

Sustav mobilnog kartiranja je provjeren u sustavu jame gdje površine nisu toliko homogene. Ta činjenica upućuje na to da, osim provođenja geodetske izmjere tahimetrijskom metodom, nemamo na osnovu čega konkretno primijetiti grube pogreške položaja i orijentacije skenova. Zbog toga je bilo potrebno testirati sustav u objektima stvorenim ljudskim djelovanjem (zidovi, tuneli, stepenice, itd.) kako bi utvrdili postojanje grubih pogrešaka, odnosno šuma. Također, bilo je potrebno testirati mobilni sustav prikupljanja podataka u nekom zatvorenom sustavu, gdje se može utvrditi pomak između početne i završne pozicije. Za testiranje sustava u takvim uvjetima odabrane su dvije lokacije koje po svojim putanjama te uskim prolazima podsjećaju na špiljski sustav, ali su prolazi omeđeni zidovima. Odabrane dvije lokacije su rudnik u Tehničkom muzeju Nikola Tesla u Zagrebu i tunnelski sustav vile Rebar te njeni ostaci.

5.1 3D mobilno kartiranje rudnika u Tehničkom muzeju Nikola Tesla u Zagrebu

5.1.1. O lokaciji

Tehnički muzej Nikola Tesla u Zagrebu, smješten na Savskoj cesti u srcu grada, predstavlja jedan od najvažnijih tehničkih muzeja u Hrvatskoj. Osnovan 1954. godine, muzej je dobio ime po jednom od najpoznatijih znanstvenika i izumitelja, Nikoli Tesli, čije inovacije i danas inspiriraju generacije znanstvenika i inženjera. Ulaskom u muzej, posjetitelje dočekuje bogata zbirka stalnih postava koja pokriva razne aspekte tehnike i znanosti. Među njima su izložbe posvećene poljoprivredi, energetici, prometu, tekstilnoj industriji i rudarstvu, koje pružaju uvid u povijest i razvoj ovih ključnih područja. Posebno istaknuta je izložba posvećena Nikoli Tesli, gdje se mogu vidjeti njegovi izumi, patenti i interaktivne demonstracije njegovih eksperimenata. Tehnički muzej Nikola Tesla ne samo da prikazuje povijest tehnike, već i aktivno sudjeluje u obrazovanju kroz razne programe. Edukativni programi prilagođeni su školama i individualnim posjetiteljima, a često se organiziraju i tematske izložbe koje istražuju specifične tehničke i znanstvene teme. Radionice i predavanja dodatno obogaćuju posjetiteljevo iskustvo, omogućujući im da steknu dublje razumijevanje i praktične vještine.

Jedna od najfascinantnijih i najpopularnijih atrakcija u Tehničkom muzeju Nikola Tesla u Zagrebu je replika rudnika, koja posjetiteljima pruža jedinstven i realističan uvid u svijet rudarenja. Prostire se na oko 300 metara hodnika i prikazuje različite rudnike ugljena i druge rude koje su bile važne za hrvatsku industriju. Jama Barbara, kako se naziva ovaj model

rudnika, posvećena je sv. Barbari, zaštitnici rudara, te nosi ime koje odražava poštovanje prema radnicima koji su svoj život posvetili ovom teškom poslu. Replika rudnika izgrađena je s velikom pažnjom prema detaljima kako bi što vjernije prikazala rudarske uvjete. Posjetiteljima omogućuje da prošetaju kroz podzemne hodnike i vide alate, opremu i metode koje su se koristile u rudarenju. Sama konstrukcija rudnika u muzeju izgrađena je s namjerom da posjetitelji osjete atmosferu pravog rudnika, s uskim prolazima, niskim stropovima i autentičnom rasvjetom. Hodnici su mračni, osvjetljeni tek sporadičnim svjetlima koja dodaju dozu realnosti i napetosti, stvarajući pravi doživljaj podzemnog svijeta.



Slika 20. Unutrašnjost rudnika Tehničkog muzeja

Rudnik u muzeju služi kao edukativni alat koji posjetiteljima, posebno djeci i mladima, pomaže da shvate koliko je rudarstvo bilo težak i opasan posao. Kroz vođene ture i interaktivne prezentacije, posjetitelji mogu naučiti o različitim vrstama ruda, metodama vađenja i povijesti rudarstva u Hrvatskoj i šire. Interaktivni elementi u rudniku omogućuju posjetiteljima da dodirnu i koriste rudarske alate, kao i da vide demonstracije rudarskih tehnika. „Muzej edukacijsku komponentu ostvaruje formalnim i neformalnim sadržajima, poput informativnih vodstava i demonstracija (u prostorima rudnika, kabineta Nikole Tesle i planetarija), predavanja, seminara, radionica i programa“ (Hrvatska tehnička enciklopedija, Portal hrvatske tehničke baštine, 2018.). Rudnik u Tehničkom muzeju Nikola Tesla također ima veliku povijesnu i kulturalnu vrijednost. Prikazuje povijest rudarstva u regiji, čuvajući sjećanje na vrijeme kada je rudarstvo bilo jedan od najvažnijih gospodarskih sektora.

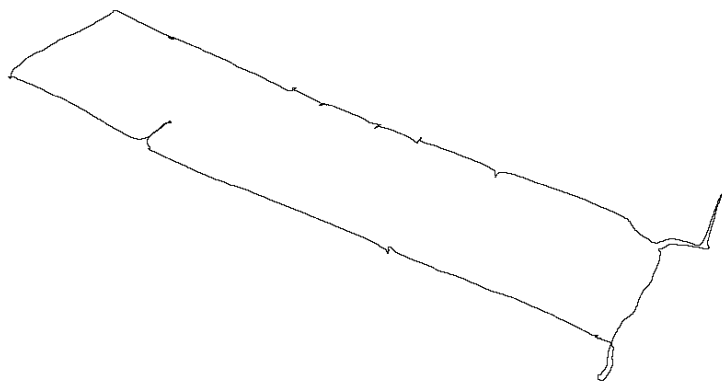
5.1.2. Prikupljanje podataka

Za prikupljanje podataka u rudniku, potrebno je bilo pronaći trenutak kada je rudnik bio prazan, odnosno kada se u njemu nisu nalazili posjetitelji. U suradnji s djelatnicima

Tehničkog muzeja Nikola Tesla dogovoren je ulazak u tunel u razdoblju kada nije bilo organiziranih tura posjetitelja. Ulaz u tunel obilježava veliko strmo stubište, na čijem početku je postavljen natpis "SRETNO!". Prije samog snimanja, bilo je potrebno isplanirati rutu kretanja i prikupljanja podataka unutar tunela. Budući da je tunel kružnog oblika, odabrano je da početak rute bude na sredini jednog od rudničkih frontova. Nakon povezivanja opreme i testiranja svih komponenti, uređaj je postavljen na tlo radi provođenja statičnog skeniranja početne točke rute. Nakon završetka statičnog skeniranja, uređaj se uzima s tla i kreće se planiranom rutom, uz brzinu prosječnog do malo sporijeg hoda. Tijekom skeniranja, posebna pažnja posvećena je snimanju ulaznog stubišta i prednjeg prostora. Po završetku snimanja, uređaj se vraća na početnu poziciju, gdje je provedeno još jedno statično skeniranje. Nakon dovršetka skeniranja, prikupljeni su podaci izvezeni na računalo radi njihove daljnje obrade. U prethodnom razdoblju, za potrebe izrade diplomskih ispita razvijen je poligonski vlak te su izračunate apsolutne koordinate točaka duž cijelog rudnika. Tijekom skeniranja, na četiri kuta rudnika postavljene su trakice na točke poligonskog vlaka u nastojanju da se konačni oblak točaka georeferencira, no zbog nedovoljne refleksivnosti trakica, navedeni proces nije bio uspješan. Nakon izvoza podataka na računalo, pristupa se daljnjoj obradi kako bi se prikupljeni podaci koristili u daljnjim analizama i istraživanjima.

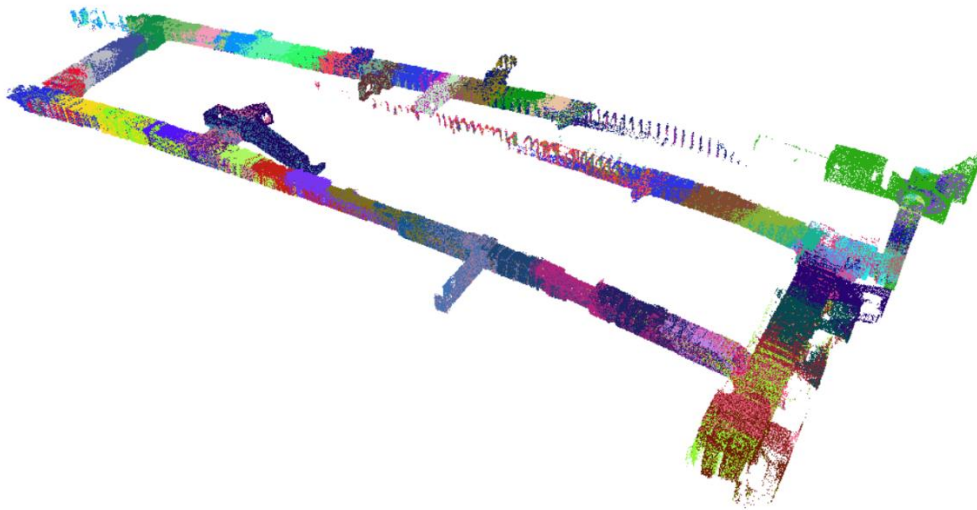
5.1.3. Obrada podataka

Prvi koraci obrade slični su kao u prethodno opisanoj obradi, stoga ponovljene naredbe neće biti detaljno objašnjene. Pokretanjem prvog programa „*lidar_odometry_step_1*“ učitavaju su prikupljeni podaci, nakon čega se, prateći korake iz prethodne obrade, računa oblak točaka te se isti sprema u sesiju. Jedina razlika je korištenje algoritma „*Consistency 2*“ koji bolje odgovara ravnim plohama. Izračunata duljina trajektorije iznosi 280,25 m.



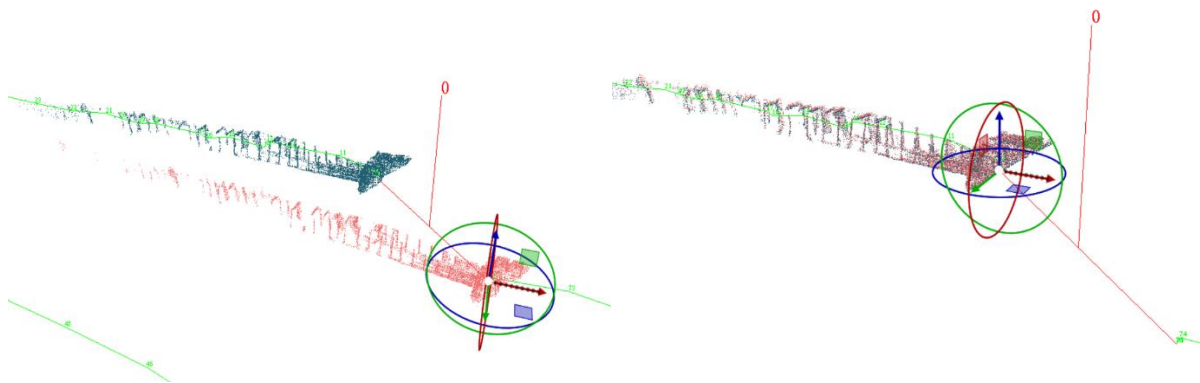
Slika 21. Trajektorija

Nakon pokretanja drugog programa „*multi_view_tls_registration_step_2*“, učitava se oblak točaka. Nakon što su podaci učitani, odznači se kvačica na naredbi „*Simple GUI*“, koja pojednostavljuje grafičko sučelje. Uzimajući u obzir da zadana obrada zahtjeva korištenje opsežnijih naredbi, isključivanjem jednostavnog grafičkog sučelja ponudi se dodatan set naredbi. Jedna od tih naredbi je „*generate random colors*“, gdje svi posebni skenovi dobiju različitu boju kako bi ih razlikovali. Uvidom u grafički prikaz oblaka točaka primijeti se da kružna trajektorija nije zatvorena. Pojednostavljeno, početni i završni sken se ne preklapaju, već postoji određeni odmak. Takva razlika nastaje zbog sistematske pogreške, za koju postoji mogućnost da nije velika, ali na većim udaljenostima dobiva veće vrijednosti jer se greške gomilaju.



Slika 22. Prikaz rudnika prije prilagodbe

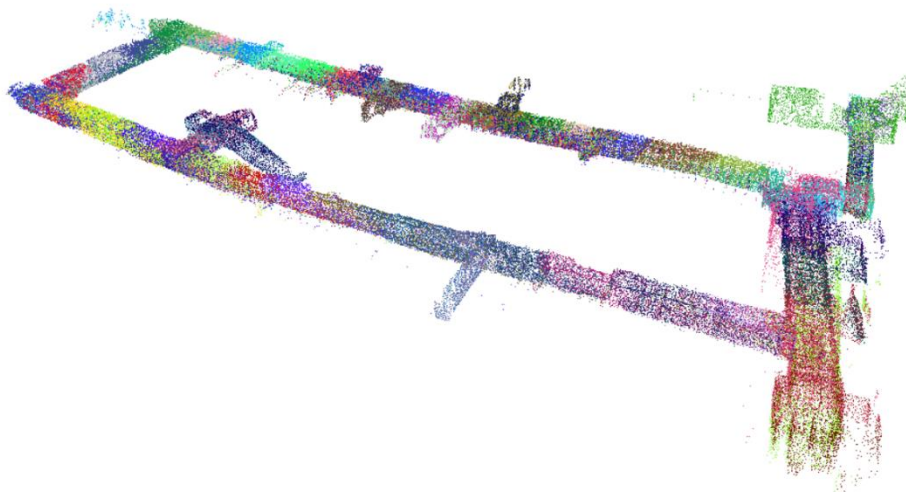
Za rješavanje problema zatvaranja putanje koristi se naredba „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“ koja je već objašnjena ranije, ali ima malih razlika u koracima. Nakon pokretanja navedene naredbe određuje se rub, odnosno poveznica između skenova koji se žele poravnati. U izborniku navedene naredbe postoje „*index_loop_closure_source*“, koja označava indeks početnog skena, te „*index_loop_closure_target*“, koja označava indeks ciljanog skena poravnavanja. U konkretnom slučaju, te dvije vrijednosti se uzimaju s najvećom mogućom razlikom, odnosno vrijednost 0 i vrijednost 76. Na taj način su odabrani početni i završni sken kako bi ih poravnali, odnosno zatvorili putanju. Nakon odabira skenova, potvrđuje se odabir klikom na naredbu „*add edge*“ te se pokreće mogućnost „*manipulate_active_edge*“ kojom poravnavamo aktivni rub. Nadalje, pali se pomoćni alat gizmo, pomoću kojeg se ručno namješta sken, sve do razine mogućnosti.



Slika 23. Poravnavanje pomoću gizmo alata

Nakon ručnog poravnanja, primjenjuje se prethodno objašnjeni ICP algoritam poravnavanja. Proces se provodi iterativno dok se ne dođe do zadovoljavajućeg poklapanja, odnosno dok nema uočljivih pomaka između odabranih skenova. Kada su skenovi poravnati, isključuje se opcija *"manipulate_active_edge"* i aktivira naredba *"Set initial poses as motion model"*, koja poravnava svaki sken pojedinačno proporcionalno udaljenosti od aktivnog ruba, te prema relativne pozicije poravnatih skenova. Zatim se ukupni poravnati oblak točaka računa pomoću naredbe *"Compute pose graph SLAM"*, a *"Manual Pose Graph Loop Closure Mode"* se deaktivira. Nakon izvršenja ovih koraka, prikazuje se oblak točaka, čime se potvrđuje poravnanje, odnosno spajanje početnog i krajnjeg skena. Ako rezultati nisu zadovoljavajući, postupak se može ponoviti dodavanjem novih rubova. Proces se može ponavljati dok konačni oblak točaka ne bude zadovoljavajuće poravnat. Također, moguće je naknadno upravljati već poravnatim rubovima. Interesantni rubovi odabiru se promjenom indeksa na listi rubova, pri čemu indeksi počinju od 0, što znači da prvi dodani rub ima indeks 0. Ako rezultati nisu zadovoljavajući, a postoji sumnja na određeni rub, rubovi se mogu pretraživati i brisati prema indeksu.

Na ovom setu podataka korištena su samo dva ruba, jedan gdje je spoj početnog i krajnjeg skena, a drugi je odabran na suprotnom kutu gdje su skenovi malo odstupali jedan od drugog. Također je testirano poravnavanje s gomilanjem broja rubova, ali takav način ne dovodi do smislenog rezultata već model bude deformiran s većim odstupanjem.

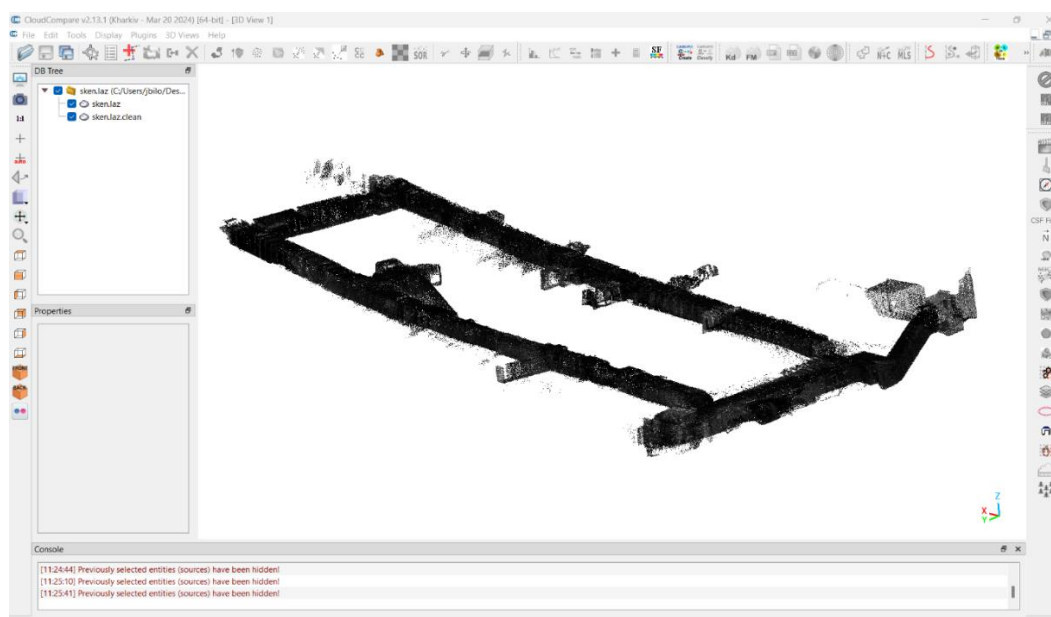


Slika 24. Poravnati oblak točaka

Kada je konačni rezultat zadovoljavajući, spremi se sesija naredbom „*save session*“, poravnati oblak točaka se sprema u *.laz formatu, pomoću naredbe „*save all marked scans to laz (as one global scan)*“. Pri obradi ovog seta podataka nije korišten treći dio programskog paketa, budući da je snimana samo jedna sesija.

5.1.4. Prezentacija rezultata

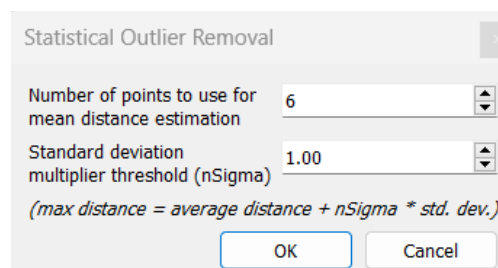
Izlazni te obrađeni podaci MandEye sustava učitani su u CloudCompare softver na daljnju obradu kako bi oblak točaka bio bolje vizualiziran. Oblak točaka učitava se u softver te se koriste razni vizualni i statistički alati za uklanjanje nepotrebnih dijelova oblaka.



Slika 25. Učitani oblak točaka u CloudCompare softver

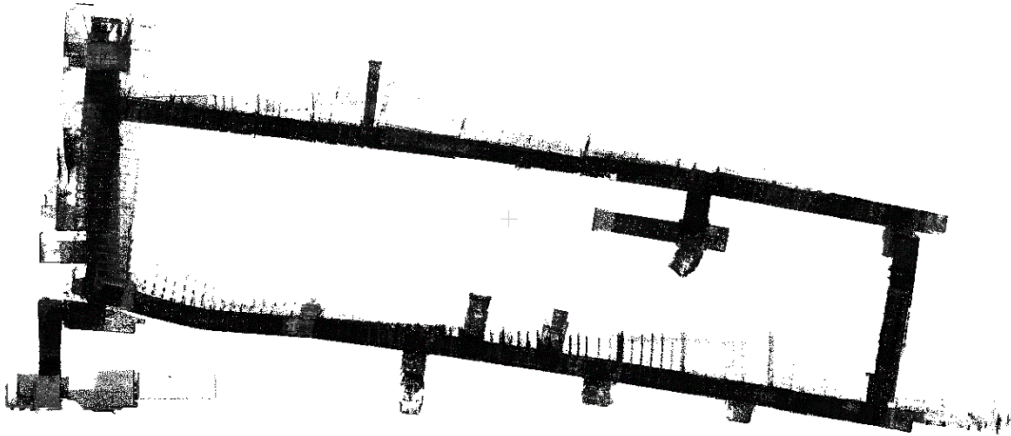
Na ovom primjeru korišten je statistički alat SOR (statistical outlier removal). Ovaj alat predstavlja metodu za uklanjanje šuma i izoliranih točaka koje mogu nepovoljno utjecati na točnost i korisnost podataka. Princip rada SOR filtera temelji se na statističkoj analizi lokalnog susjedstva svake točke u oblaku. Kada se primijeni SOR filter, prvo se za svaku točku identificira određeni broj susjeda. Taj broj susjeda, definiran parametrom „k“, određuje koliko će okolnih točaka biti uzeto u obzir za analizu. Zatim se za svaku točku izračunava prosječna udaljenost do svih njenih susjeda. Ove prosječne udaljenosti podliježu daljnjoj statističkoj analizi kako bi se izračunali ključni parametri, poput srednje vrijednosti i standardne devijacije. Nakon što se izračunaju statistički parametri, filter identificira točke koje odstupaju od očekivanih vrijednosti. Točke koje imaju prosječnu udaljenost do susjeda veću od srednje udaljenosti plus određeni broj standardnih devijacija smatraju se outlierima, ili izoliranim točkama te se uklanjaju iz oblaka.

Filter se pokreće odabirom odgovarajućeg oblaka točaka, zatim se klikom na „SOR“ ikonu otvara prozor u kojem zadajemo parametre. Parametri koji ulaze u formulu određuju koji dio oblaka točaka će se ukloniti. Ako postavimo prevelike vrijednosti parametara, neće se obrisati dovoljan broj točaka. Suprotno, ako stavimo premale vrijednosti, odnosno prestroge parametre, oblak točaka će izgubiti veliku većinu svojih sastavnih dijelova te se neće moći predočiti kakav oblik predstavlja. Najbitnije je odabrati optimalne parametre kako bi rezultat bio zadovoljavajući.

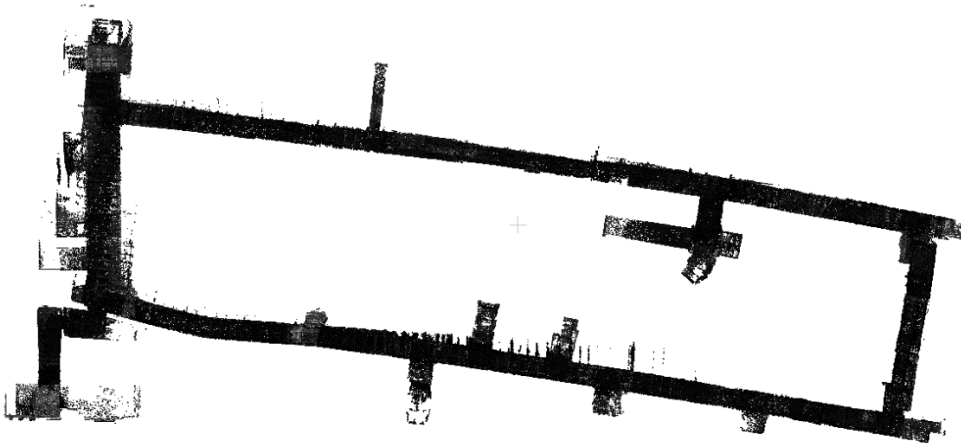


Slika 26. Korištene postavke u SOR filteru

Nakon pokretanja statističkog alata s prikazanim parametrima (slika 26.), dobiven je rezultat koji prikazuje malo jasnije konfiguraciju rudnika. Na oblaku točaka se primijeti da su uklonjene točke koje su udaljenije od većine točaka oblaka (slika 28.).



Slika 27. Tlocrtni prikaz oblaka točaka prije korištenja SOR filtera



Slika 28. Tlocrtni prikaz oblaka točaka nakon korištenja SOR filtera

5.2. 3D mobilno kartiranje tunelskog sustava i ostataka vile Rebar

5.2.1. O lokaciji

Vila Rebar, smještena na padinama Medvednice iznad Zagreba, predstavlja intrigantno poglavlje u povijesti Hrvatske. Ova građevina, izgrađena tijekom 1930-ih godina, svjedočila je vremenu luksuza, političke moći i konačnog propadanja. Od svoje izgradnje kao luksuzne rezidencije, preko mračnog razdoblja Drugog svjetskog rata, do današnjih dana kada stoji kao ruševina, vila Rebar ostavlja za sobom bogatu i slojevitu povijest koja i dalje privlači pažnju povjesničara, turista i lokalnih stanovnika. Izgradnja vile Rebar započela je između dva svjetska rata, u vrijeme kada je Zagreb bio u ekspanziji, a potrebe za luksuznim rezidencijama

su rasle. Smještena na uzvisini Medvednice, vila je pružala spektakularan pogled na Zagreb i okolne pejzaže. Namjera je bila stvoriti prostor koji će služiti za odmor i uživanje, daleko od gradske vreve, a istovremeno dovoljno blizu da bude lako dostupan. Tijekom Drugog svjetskog rata, vila Rebar postala je poznata kao dom i sjedište Ante Pavelića, vođe ustaškog pokreta i poglavnika Nezavisne Države Hrvatske. U tom razdoblju, vila je bila mjesto gdje su se donosile mnoge ključne političke odluke, te je postala simbol moći i utjecaja ustaškog režima. Mnogi važni politički sastanci i odluke koje su donesene unutar njenih zidova oblikovale su sudbinu Hrvatske tijekom rata, ali i nakon njega.

Nakon završetka rata, vila Rebar doživjela je drastične promjene. Napuštena i prepuštena zubu vremena, vila je pretrpjela značajna oštećenja. Tijekom komunističkog razdoblja, vila je promijenila nekoliko namjena, služeći kao vojni objekt, restoran i izletište. Unatoč tim pokušajima ponovne upotrebe, vila je s vremenom počela propadati, a dodatna oštećenja prouzročili su vandalizam i požari koji su je gotovo potpuno uništili. Njena sudbina bila je zapečaćena kombinacijom nemara, vandalizma i prirodnih sila.



Slika 29. Ostaci vile Rebar (Preuzeto s portala zagreb.info)

Jedan od najintragantnijih aspekata vile Rebar su tuneli koji se nalaze ispod nje. Ovi tuneli izgrađeni su tijekom Drugog svjetskog rata i služili su u različite svrhe, uključujući sklonište i moguće tajne rute za bijeg. Tuneli su izgrađeni s namjerom da služe kao sklonište u slučaju zračnih napada te kao siguran prolaz za bijeg u slučaju napada na vilu. Njihova izgradnja bila je strateški planirana kako bi osigurala sigurnost tadašnjih visokih dužnosnika. Tuneli su napravljeni od čvrstih materijala, dizajnirani da izdrže bombardiranja i druge oblike

napada. Neki izvori sugeriraju da su tuneli povezivali vilu s različitim izlaznim točkama na Medvednici, omogućujući bijeg na više strana. Tuneli su bili opremljeni svim potrebnim sadržajima za preživljavanje u slučaju dugotrajnog boravka. To je uključivalo ventilacijske sustave, skladišne prostore za hranu i vodu, kao i osnovne sanitarne čvorove. Njihova širina i visina omogućavale su lak prolazak ljudi, a u nekim dijelovima i vozila manjeg tipa. Danas su ostaci vile Rebar gotovo potpuno urušeni, ali tuneli ispod nje i dalje privlače pažnju istraživača i povjesničara. Oni predstavljaju fascinantno dio povijesti koji još uvijek čeka da bude potpuno istražen i dokumentiran. Neki dijelovi tunela su dostupni znatiželjnim posjetiteljima, ali mnogi dijelovi su opasni i teško dostupni zbog urušavanja i nedostatka održavanja.



Slika 30. Izgled tunela vile Rebar

5.2.2. Prikupljanje podataka

Na temelju provedenih razgovora, određeno je provesti tri sesije snimanja radi dokumentiranja specifičnih dijelova tunela. Usprkos izazovima pristupa uzrokovanim vegetacijom i otpadom na lokaciji, primjerena obuća bila je nužna za siguran pristup, te svjetiljka za kretanje kroz mračne dijelove tunela.

Na ulazu u tunel postavljene su reflektirajuće trakice na stativama radi testiranja mogućnosti georeferenciranja. Ovaj put su korištene trakice s većom refleksijom kako bi se jasnije razlikovale na oblaku točaka u odnosu na okolinu. U središtu ulaza postavljen je skener te je provedeno statično skeniranje, obuhvaćajući i prethodno postavljene oznake. Nakon toga, započelo se s dinamičnim skeniranjem tunelskog sustava. U uskim prostorima, bilo je potrebno paziti na brzinu kretanja i promjenu smjera kako bi se izbjegle pogreške vezane uz IMU.

Također, izbjegavalo se veliko približavanje zidovima u najužim prostorima kako bi LiDAR senzor uspio prikupiti sve potrebne podatke.

Na kraju svake sesije, provodilo se statično skeniranje. Posljednjom sesijom obuhvaćeni su kameni ostaci vile radi dobivanja tlocrtnih podataka. Po završetku skeniranja, podaci su izvezeni na računalo radi daljnje obrade.

5.2.3. Obrada podataka

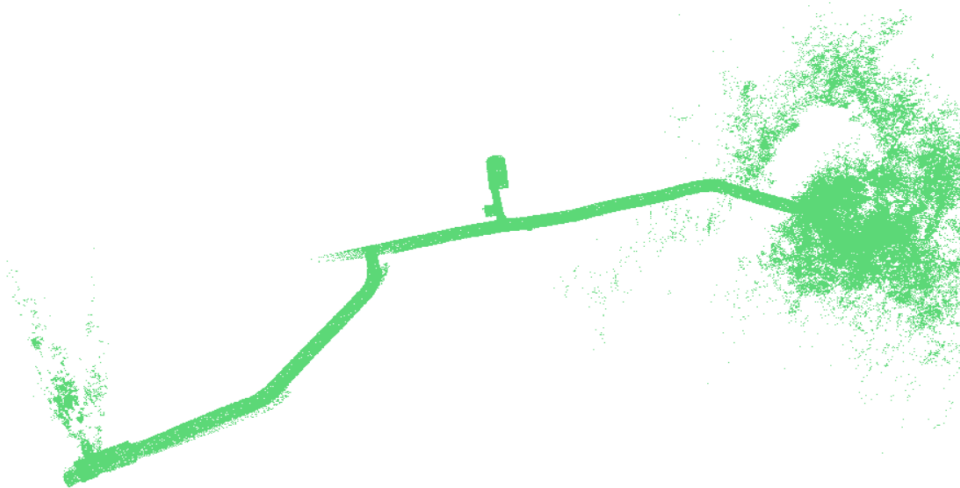
Uvodni koraci MandEye softvera uključuju standardne postupke koji su slični kao u prethodna dva primjera. Prvo se pokreće program *"lidar_odometry_step_1"* radi učitavanja prikupljenih podataka uz korištenje algoritma „*Consistency 2*“. Nakon toga, slijedi računanje oblaka točaka za svaku sesiju dinamičnog i statičnog skeniranja, prateći korake koji su opisani u prethodnim poglavljima. Podaci se zatim spremaju, a program se zatvara. Sesije su spremljene internim oznakama „*session4.json*“, „*session5.json*“ i „*session6.json*“. Nakon toga, slijedi pokretanje drugog programa naziva *"multi_view_tls_registration_step_2"*. Proces obrade u drugom programu je isti za sve sesije na tom području. Prvi korak u drugom programu je učitavanje prethodno spremljene sesije putem naredbe *"load session"*. Kada je sesija učitana, različite boje se generiraju na svim skenovima pomoću naredbe *"generate random colors"* kako bi se lakše razlikovali. Zatim se pregledom oblaka točaka provjerava postoji li dio skenova koji nije ispravan ili je potrebno dodatno poravnavanje. Pregledom jedne od dinamičnih sesija primijećena je greška tijekom skeniranja ulaznog prostora tunela koji je bio obuhvaćen dva puta. Ova sesija je započela na ulazu u tunel, prošla je kroz jednu stranu tunela, izašla izvan tunela, a zatim se vratila na ulaz. Ulaz u tunel bio je obuhvaćen još dvije sesije, a pregledom tih sesija utvrđeno je da su skenovi nepravilni od trenutka izlaska iz tunela do ponovnog dolaska na ulaz. Pretpostavlja se da je do greške došlo zbog brze promjene smjera gibanja pri izlasku iz tunela, što je rezultiralo pogrešnom rotacijom smjera kretanja prema podacima inercijalnog senzora (IMU).



Slika 31. Deformacija u oblaku točaka (session5.json)

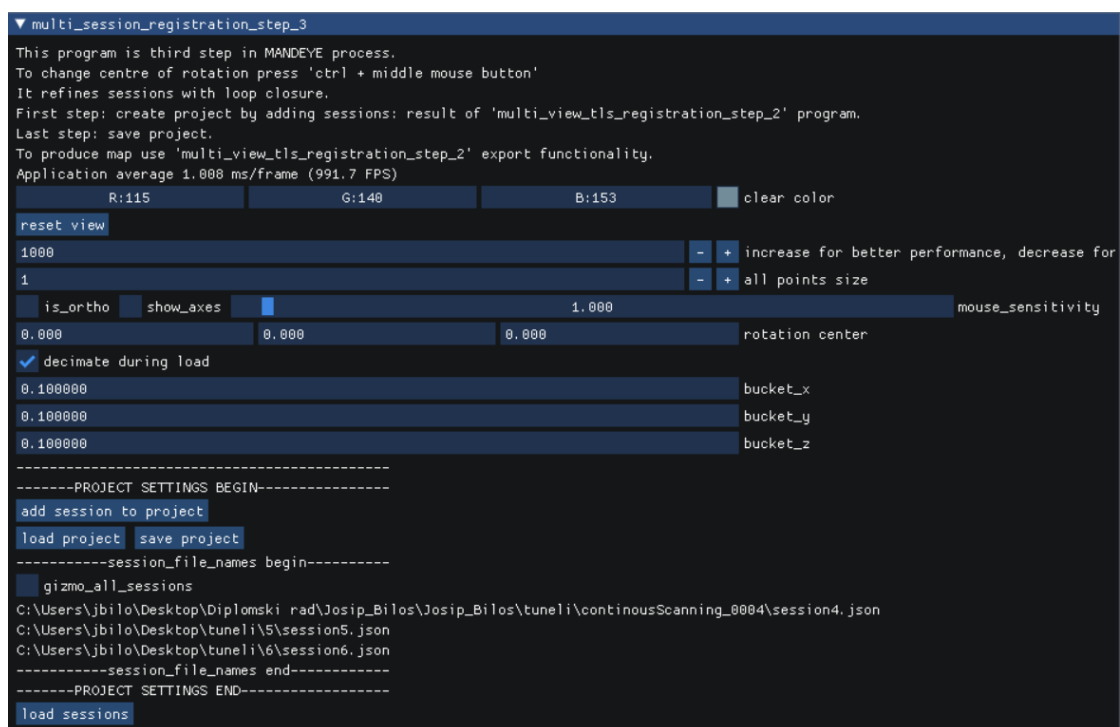
Kada su identificirani neispravni skenovi, njihove *.csv i *.laz ulazne datoteke su izostavljene iz daljnje obrade. Preostale datoteke su ponovno podvrgnute prvom dijelu programa kako bi se formirala sesija bez neispravnog dijela. Važno je napomenuti da prilikom izostavljanja ulaznih datoteka možemo izostaviti podatke s početka ili s kraja trajektorije, uzimajući u obzir redoslijed skenova. To je zato što IMU podaci povezuju sve položaje u jedinstvenu trajektoriju, pa ako nedostaju podaci sredine, trajektorija se spaja od posljednjeg skena do sljedećeg u nizu koji je položajno udaljeniji.

Ukoliko se primijeti da pojedina sesija zahtijeva poravnavanje, koristi se naredba „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“. Prateći dosad opisane korake oblak točaka svake sesije se interno poravnava uzimajući potreban broj rubova. Postupak se odrađuje za svaku sesiju posebno. Na kraju se sprema svaka sesija naredbom „*save session*“ te se izvoze oblaci točaka u *.laz formatu naredbom „*save all marked scans to laz (as one global scan)*“.



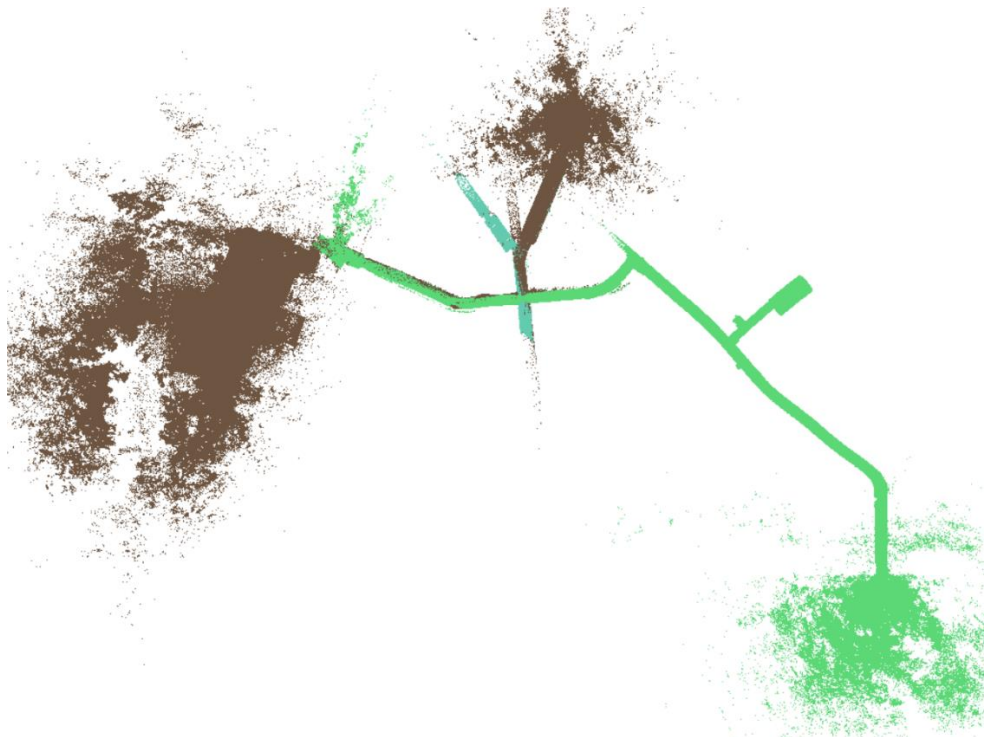
Slika 32. Prikaz poravnate sesije (session4.json)

Obrada prikupljenih podataka tunela postaje komplicirana u trećem programu, gdje se svim sesijama trebaju položajno poravnati odnosi sa statičnim skenom, a zatim međusobni odnosi s ostalim sesijama. Korak poravnavanja sa statičnim skenom je objašnjen na prijašnjem primjeru pa će sad biti detaljnije opisano prostorno uklapanje sve tri dinamične sesije. Prilikom učitavanja sesija u „*multi_session_registration_step_3*“ važno je da sesija prema kojoj se nastoje prilagoditi ostale bude prva učitana. Zbog te činjenice bilo je potrebno isplanirati koja će to sesija biti. U ovom primjeru izabrana je sesija interne oznake „session4.json“ jer je najduža sadrži tunelsko raskrižje koje je obuhvaćeno na sve tri dinamične sesije.



Slika 33. Korisničko sučelje trećeg programa te redosljed učitanih sesija

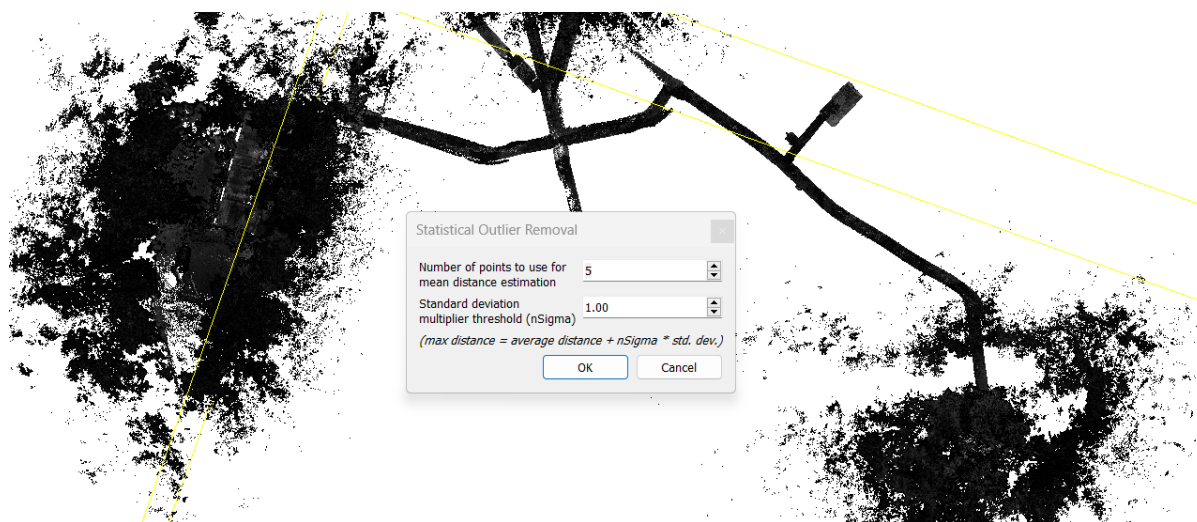
Klikom na naredbu „*load sessions*“ učitane su sesije na međusobno poravnavanje. Potrebno je odraditi dva poravnavanja, tj. potrebno je poravnati dvije sesije s temeljnom sesijom (*session4.json*). Upravljanjem naredbom za vidljivost ostavljaju se vidljivim samo dvije sesije koje želimo poravnati. Odabrana temeljna sesija je vidljiva cijelo vrijeme, dok se preostale dvije pale ili gase. Postupak poravnavanja je isti kao u dosadašnjem primjeru, jedina razlika je što se sesije preklapaju međusobno na velikom dijelu. Aktivira se naredba za poravnavanje oblaka točaka „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“, naredba „*manipulative active edge*“ te se pojedinačni skenovi svake od sesija položajno preklapaju. Poravnavanju se također prvo pristupa ručno pomoću gizma, a potom automatski pomoću iterativne metode ICP. Nakon što je provedeno poravnanje, deaktiviraju se naredbe „*manipulative active edge*“ i „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“, te nakon toga slijedi klik na naredbu „*optimize*“. Ova naredba poravnava sve sesije u jednu smislenu cjelinu. Ako se smatra da je cjeloviti oblak točaka ispravno međusobno poravnat, nastavlja se s spremanjem rezultata. U suprotnom, pristupa se opisanom procesu ispočetka, birajući novu vezu između dva pojedinačna skena svake sesije. Kada su oblaci točaka u linijskoj formi, a postoji veliko preklapanje između sesija, odabir više od jednog ruba (veza među skenovima) može rezultirati deformacijom ukupnog (cjelovitog) oblaka točaka. Klikom na naredbu „*save results*“, relativni položaj svih oblaka točaka (sesija) se sprema u datoteku „*poses*“, za svaki oblak točaka u odgovarajuću mapu, gdje su trajno spremljeni prostorni odnosi između sesija.



Slika 34. Rezultat poravnavanja u trećem programu (tlocrtno)

5.2.4. Presentacija rezultata

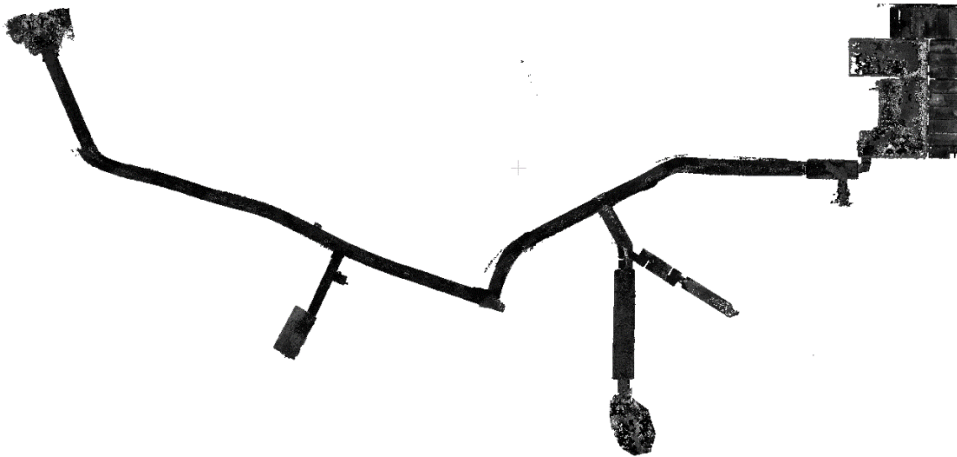
Učitavanjem sesija (*.laz) u CloudCompare primijeti se da su tri različita oblaka točaka međusobno prostorno usklađeni, što je rezultat prethodne obrade u trećem programu. Pregledavanjem cijelog oblaka točaka mogu se uočiti neka odstupanja od formirane konfiguracije tunela. S obzirom na to da MandEye softver nema mogućnosti filtriranja, u konkretnom slučaju čišćenje podataka obavljeno je u CloudCompare-u. Odabrane su dvije metode čišćenja oblaka koje su korištene u prethodnim obradama. Prvi korak u čišćenju oblaka točaka bio je SOR filter za brisanje udaljenih točaka (outliera). Na listi oblaka točaka, koja se nalazi na lijevoj strani korisničkog sučelja, odabiru se svi oblaci točaka na kojima se planira provesti čišćenje. SOR filter se pokreće klikom na ikonu, te podešavanjem određenih parametara (slika 35.). Nakon pokretanja filtera, točke koje ne zadovoljavaju uvjet filtera automatski se obrišu.



Slika 35. SOR filter

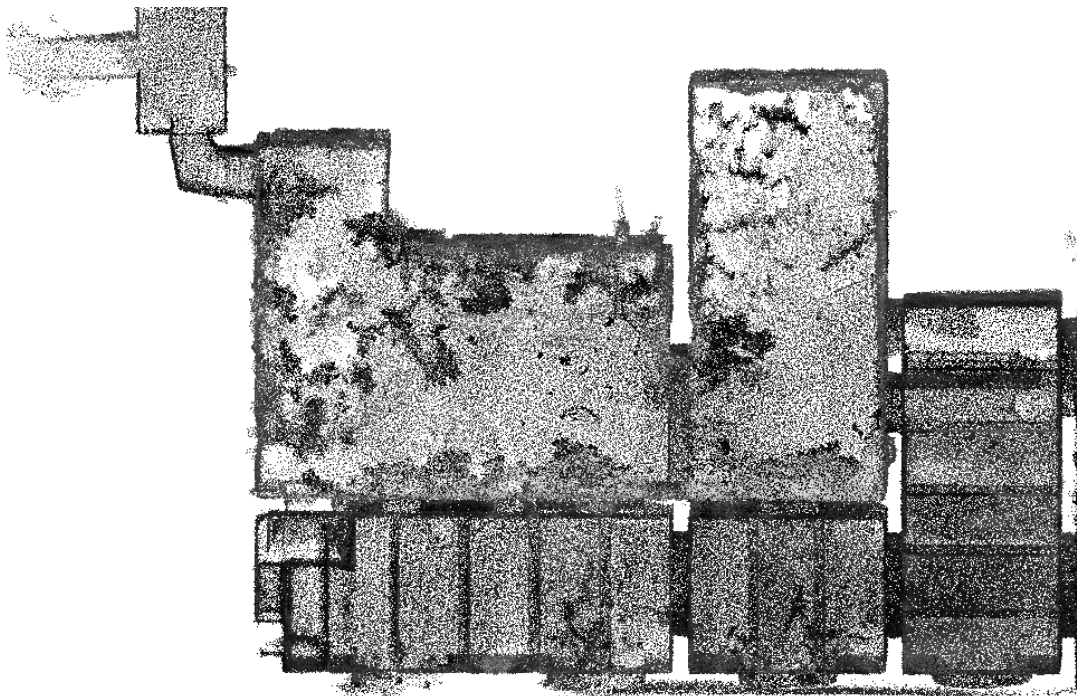
Rezultat SOR filtera je očišćeni oblak točaka od statistički najudaljenijih točaka, ali rezultat i dalje nije bio zadovoljavajući. Pregledom tunelske konfiguracije i dalje se mogao uočiti skup podataka koji odskače od većine, što je najčešća pojava kod križanja u tunelskom sustavu ili kod skretanja pod pravim kutom. Spomenuti problematični podaci pojavljuju se zbog smanjene točnosti instrumenta na većim udaljenostima, što najviše dolazi do izražaja u pravolinijskim objektima. Poravnavanjem takvih područja u "multi_view_tls_registration_step_2" programu nije moguća, jer se kod pregledavanja svih skenova posebno, primijeti odstupanje na području skretanja ili križanja u najudaljenijem

skenu od istog. Jedna od mogućih opcija bila je rezanje problematičnih podataka u CloudCompare-u, koja se provodi naredbom „*Segment*“ iz padajućeg izbornika „*Edit*“. Također je napravljeno rezanje raspršenih podataka koji su se nalazili oko ulaza u tunel, kako bi dobili čist i jasan prikaz samih predulaznih prostora i tunela.



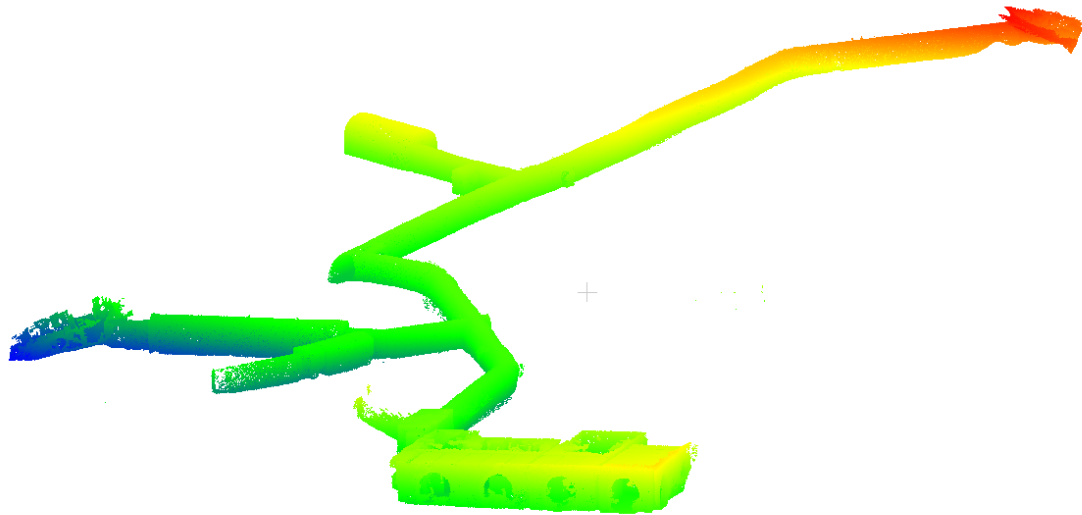
Slika 36. Očišćeni oblak točaka

Promjenom perspektive gledišta u korisničkom sučelju te pregledavanjem modela, nazire se konfiguracija predulaza i kamenih ostataka vile Rebar, te detaljnost oblaka točaka. Tlocrtnim prikazom ostataka vile, detaljnost dolazi do izražaja, te se mogu primijetiti jasni prostorni odnosi (nije došlo do deformacije oblaka točaka).



Slika 37. Tlocrtni prikaz ostataka kamenog prizemlja vile Rebar

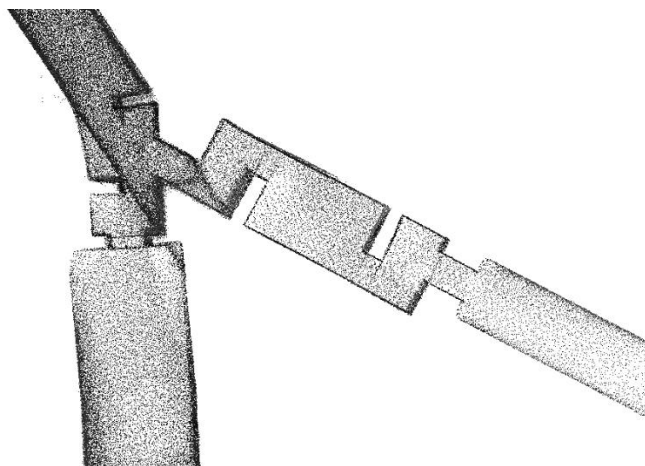
Odabirom već korištene naredbe „Tools“ > „Projection“ > „Export coordinate to SF“ omogućava se izvoz koordinata točaka kao skalarnih polja (SF). Izvezene su koordinatne vrijednosti po „Z“ osi, te je izrađen prikaz u kojemu možemo razlikovati područja različitih relativnih visina.



Slika 38. Prezentacija promjene visina u tunelskom sustavu iz ptičje perspektive

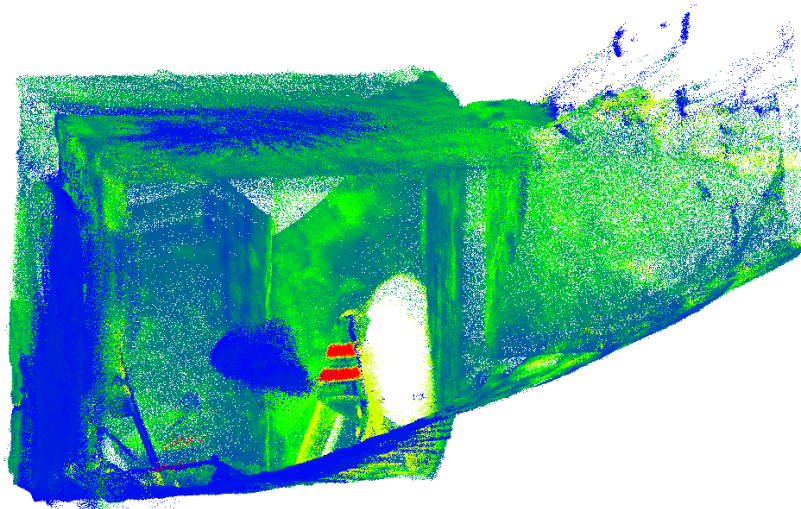
6. Analiza rezultata

Uvidom u sveukupne rezultate obrade, dolazi se do zaključka kako navedeni sustav prikupljanja i obrade podataka ima svoje dobre ali i manje dobre strane. Sustav se može pohvaliti iznimnom točnošću modeliranja manjih prostora, kao primjer se mogu navesti ostaci vile Rebar te sami ulazi u tunele. Na detaljnijoj analizi predulaza, gdje je skučen prostor, sustav se dobro snalazio. Prolazeći kroz prostore širine svega cca. 70 cm uspješno je formirao oblik predulaza (slika 39.). Svi frontovi, odnosno zidovi, modelirani su pravokutno, kako su i izvedeni u naravi.



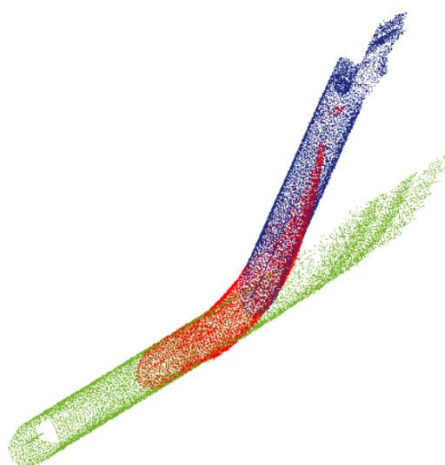
Slika 39. Detaljan prikaz predulaza u tunel

Također valja spomenuti testiranje mogućnosti georeferenciranja oblaka točaka. Postavljene reflektirajuće trakice se ističu kada se u CloudCompare-u podesi način prikaza oblaka točaka. Točke su obojane po intenzitetu povrata signala, dakle kada promijenimo skalu boja s „grey“ na „blue – green – yellow – red“, ističu se reflektirajuće trakice koje su obojene u crveno jer imaju najveći intenzitet povrata signala (slika 40.). Postupku georeferenciranja može se pristupiti izmjerom apsolutnih koordinata reflektirajućih trakica, ali u ovom primjeru se samo provjeravala mogućnost prepoznavanja istih u oblaku točaka.



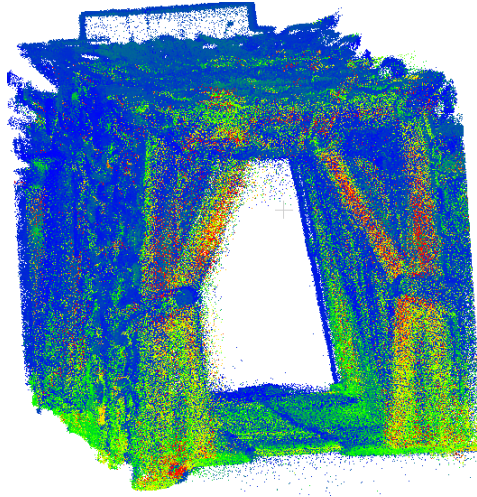
Slika 40. Isticanje reflektirajućih trakica

Na primjeru tunela do izražaja dolazi problematika pozicioniranja točaka udaljenijih od instrumenta. Podatak ima smanjenu točnost na većim udaljenostima, čemu je također uzrok manjak refleksije udaljenijih točaka tunelskog sustava. Štoviše, pogreška je izraženija jer se radi o uskom pravolinijskom području, gdje mala promjena po kutu donosi veće promjene po položaju, odnosno uočljivija odstupanja. Prema samoj uputi proizvođača LiDAR senzora, kako bi podatak bio kvalitetan potrebno je na udaljenosti 70 m od instrumenta imati refleksiju 80%, što je u ovim uvjetima bilo nemoguće. Na prikazanom primjeru (slika 41.) ističe se navedena pogreška, gdje crveni sken formira krivinu, plavi sken nastavlja putanju, a zeleni sken na svom krajnjem dijelu dislocira krivinu te ju prezentira udaljeniju od stvarnog položaja. Pogrešan skup podataka može se djelomično otkloniti pomoću SOR filtera u CloudCompare-u, ali svakako ostaje neotklonjenih područja (repova).



Slika 41. Pogreška skenova

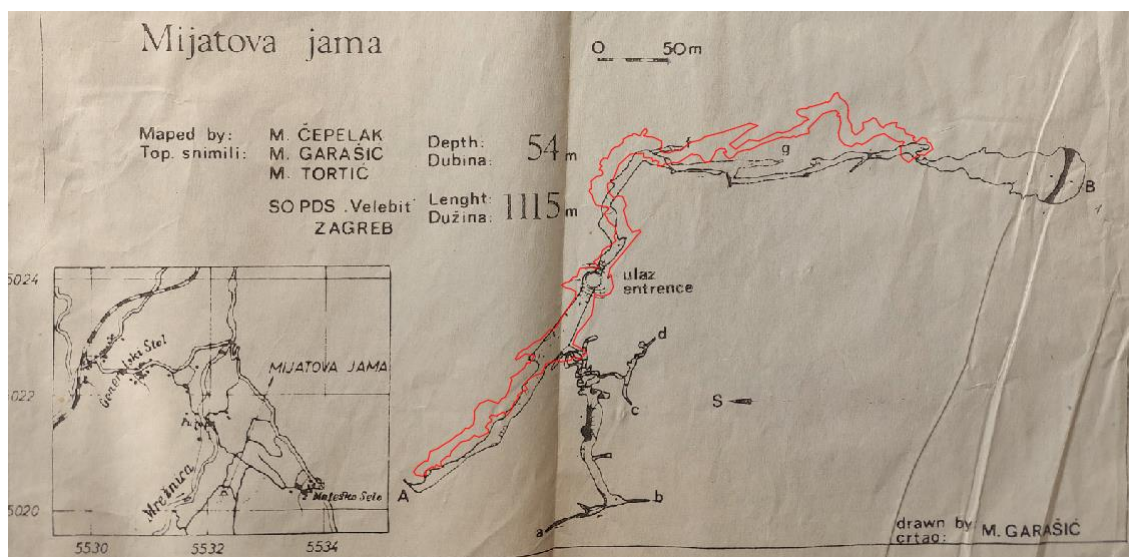
Na primjeru rudnika može se primijetiti visoka razina detaljnosti koju je moguće postići s navedenim sustavom. Do izražaja dolaze potporne grede rudnika, koje su detaljno formirane na oblaku točaka. Također se na primjeru (slika 42.) ističu linije tračnica. Na ovom primjeru se može vidjeti kako se sustav bolje snalazi u skeniranju ravnih ploha u odnosu na zakrivljene, uspoređujući ga s primjerom tunela vile Rebar.



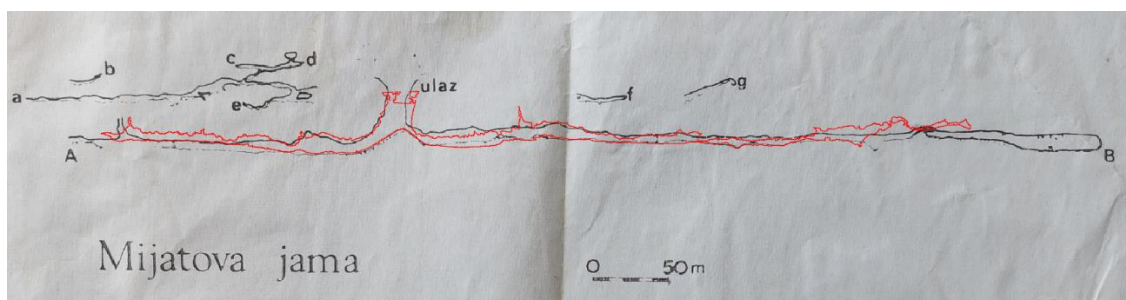
Slika 42. Dio unutrašnjosti rudnika

Kod rudnika se pojavljuje problematika prilikom zatvaranja putanje, odnosno preklapanjem početnog i završnog skena naredbom „*Manual Pose Graph Loop Closure Mode*“. Ova naredba matematički određuje i prilagođava svaki sken u odnosu na susjedni, pri čemu se sken ponaša kao kruto tijelo. Tako rotacije i translacije rezultiraju nedovoljno povezanim skenovima koji negativno utječu na kvalitetu prikaza. Kada sken obuhvaća dva duga fronta (npr. sken na kutovima rudnika), dolazi do odstupanja udaljenijeg skupa točaka od stvarnog položaja. Pri postavljanju većeg broja rubova (veznih linija među skenovima), ukupni oblak točaka se uspješno poravnava na lokaciji samog ruba. Međutim, dolazi do značajne deformacije oblaka na suprotnom kraju, pri čemu se podaci deformiraju kako po položaju tako i po orijentaciji. Testiranjem raznih varijanti, uključujući kombinaciju većeg broja rubova, nije postignut optimalni rezultat. Stoga je odlučeno koristiti isključivo rub između početnog i završnog skena. Preostaje pitanje za daljnje testiranje: hoće li se poravnavanje odraditi ispravnije ako se u algoritmu poravnavanja zasebni skenovi ne bi ponašali kao kruto tijelo, već bi se elastično prilagođavali susjednom skenu. Ovaj pristup sugerira potrebu za daljnjim istraživanjem metoda poravnanja koje bi mogle smanjiti deformacije i poboljšati ukupnu kvalitetu prikaza skenova u kompleksnim sustavima.

U pogledu prikupljanja podataka u jami, testirani sustav se odlično snašao modelirajući površinu jame te opisujući njenu konfiguraciju. Pregledom oblaka točaka mogu se ustanoviti sve udubine i izbočine prolaza jame. Usporedbom s topografskom izmjerom iz 60-ih godina općenita orijentacija te odnosi između sesija odgovaraju prijašnjoj izmjeri. Međutim, kada se preklopi s tlocrtnim prikazom stare izmjere, s većim odmakom od ulaza u jamu pojavljuju se i veće razlike između novonastalog oblaka točaka i skice izmjere iz 60-ih. Također, na oblaku točaka, kao i na staroj skici, uočavaju se kanali, udubine i izbočenja na približno jednakim pozicijama. Preklop (slika 43.) je izrađen pomoću AutoCAD softvera, gdje su iscrtani rubovi jame (crvena linija) automatski generirani u CloudComareu-u na temelju dinamičkog skena. Izvorna skica dovedena je u mjerilo uz pomoć linearnog mjerila te preklopljena s linijom rubova jame. Dubina jame stare izmjere iznosi 54 m, dok dubina jame očitana s oblaka točaka iznosi 59.84 m. Razlika se vjerojatno pojavljuje zbog uzimanja različite referentne točke od koje se mjeri dubina.



Slika 43. Preklop skeniranja jame sa starom topografskom izmjerom (tlocrtno)



Slika 44. Preklop dobivenog razvijenog profila s razvijenim profilom stare topografske izmjere

7. Zaključak

Mobilno kartiranje je tehnologija koja se sve više koristi u geodeziji ali i raznim drugim područjima. Mogućnost prikupljanja velikih količina prostornih podataka u vrlo kratkom vremenu otvara brojne mogućnosti za primjenu u različitim industrijama. Iako se suočava s izazovima, kontinuirani napredak u tehnologiji senzora, obrade podataka i integraciji s naprednim algoritmima obećava svjetlu budućnost za mobilno kartiranje. Kako se tehnologija razvija, očekuje se da će mobilno kartiranje postati još učinkovitije, pristupačnije i korištenije, pružajući nove mogućnosti za bolje razumijevanje i očuvanje prostora koji nas okružuje.

U ovom radu testirane su mogućnosti MandEye sustava za prikupljanje i obradu podataka. Podaci prikupljeni ovim sustavom mogu se koristiti u različite svrhe, a sami rezultati obrade su prilično impresivni, uzimajući u obzir cijenu sustava. Hardverske komponente sustava uspješno su integrirane u funkcionalnu cjelinu na temelju detaljnih uputa. Međutim, korisničko sučelje još nije na razini komercijalnih rješenja mada nudi pregršt mogućnosti. Postoji prostor za napredak u softverskim rješenjima, posebno u poboljšanju određenih algoritama obrade. Trenutno korisničko sučelje ima određeni broj nedostataka, ali softver se neprestalno usavršava. Ako vizualno uglađeno korisničko sučelje nije ključno stručnjacima za obradu podataka, tada je ovaj sustav prikupljanja i obrade podataka zadovoljavajući. Obradeni oblaci točaka prikupljeni ovim sustavom mogu služiti daljnjoj obradi ili analizi u nekim od specijaliziranih programa za analizu i obradu trodimenzionalnih podataka. Mogu se kreirati tlocrtni prikazi objekata, modelirati razni BIM (Building Information Modeling) sustavi, kreirati 3D karte, itd.

Ukoliko se nastavi s unaprjeđenjima, MandEye sustav ima mogućnost za postati jedna od korištenijih tehnologija za 3D mobilno kartiranje. S daljnjim razvojem i optimizacijom softverskih komponenti, uključujući algoritme obrade podataka i radom na dodatnoj stabilnosti programa, MandEye sustav mogao bi značajno unaprijediti efikasnost i točnost prikupljanja prostornih podataka. Njegova velika prednost je da radi na Windows okruženju i da je besplatan.

Popis literature

Bačić, Ž. (2023.): Interna skripta iz kolegija „Integrirani sustavi u geomatici“, Geodetski fakultet Zagreb

Dr. Klaus, Schwarz, P., El-Sheimy, N. (2004): Mobile Mapping Systems -- State Of The Art And Future Trends

El-Sheimy, N. (2005.): An Overview of Mobile Mapping Systems

El-Sheimy, N. (2000.): Mobile multi-sensor systems: The new trend in mapping and GIS applications

El-Sheimy, N., Ellum, C.M. (2000.): A mobile mapping system for the survey community

Gilliéron, P. (2003.): Enhanced Navigation System for Road Telematics

Klub Ursus Spelaeus (2020.): Radni posjet Mijatovoj jami, članak na Facebook stranici speleološkog kluba Ursus Spelaeus

Kurşun, H. (2023.): Accuracy comparison of mobile mapping system for road inventory, Mersin Photogrammetry Journal

Talaya, J., Bosch, E., Alamus, R., Pages, A.S. (2004.): GEOVAN: the mobile mapping system from the ICC

Tao, C. (2000.): Mobile mapping technology for road network data acquisition

Tao, C., Li, J. (2007.): Advances in Mobile Mapping Technology

Internetski izvori:

URL 1: <https://github.com/MapsHD/HDMMapping> (21.05.2024.)

URL 2: https://github.com/JanuszBedkowski/mandeye_controller (21.05.2024.)

URL 3: <https://www.livoxtech.com/mid-360> (27.05.2024.)

URL 4: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (27.05.2024.)

URL 5: <http://speleologija.hr/uvod-u-speleologiju> (28.05.2024.)

URL 6: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnicki-muzej-nikola-tesla/> (29.05.2024.)

URL 7: https://hr.wikipedia.org/wiki/Vila_Rebar (03.06.2024.)

Popis slika

Slika 1. Ilustracija MMS sustava iz C. Tao (2000.): Mobile mapping technology for road network data acquisition

Slika 2. LiDAR LiVOX MID 360 (preuzeto s portala livotech.com)

Slika 3. Vidno polje senzora (preuzeto s portala livoxtech.com)

Slika 4. Mikroročunalo Raspberry Pi 4

Slika 5. Sučelje prvog dijela programskog paketa

Slika 6. Okno jame

Slika 7. Profesor Loris Redovniković u postavljanju hardverskog dijela sustava

Slika 8. Prikaz sučelja prvog programa

Slika 9. Prikaz sučelja drugog programa

Slika 10. Prikaz oblaka točaka kraćeg ogranka jame nakon obrade u koraku 2.

Slika 11. Prikaz sučelja trećeg programa

Slika 12. Poravnavanje statičnog (crveni) i dinamičnog (žuti) skena pomoću gizmo alata

Slika 13. Prikaz poravnatih dinamičnih (plavi i žuti) oblaka točaka sa statičnim (crveni)

Slika 14. Konfiguracija jame iz bočne perspektive

Slika 15. Konfiguracija jame iz tlocrtne perspektive

Slika 16. Height map

Slika 17. Prikaz konfiguracije jame s vidljivim oknom

Slika 18. Tlocrtni prikaz oblaka točaka

Slika 19. Razvijeni profil Mijatove jame

Slika 20. Unutrašnjost rudnika Tehničkog muzeja

Slika 21. Trajektorija

Slika 22. Prikaz rudnika prije prilagodbe

Slika 23. Poravnavanje pomoću gizmo alata

Slika 24. Poravnati oblak točaka

Slika 25. Učitani oblak točaka u CloudCompare softver

Slika 26. Korištene postavke u SOR filteru

Slika 27. Tlocrtni prikaz oblaka točaka prije korištenja SOR filtera

Slika 28. Tlocrtni prikaz oblaka točaka nakon korištenja SOR filtera

Slika 29. Ostaci vile Rebar (Preuzeto s portala zagreb.info)

Slika 30. Izgled tunela vile Rebar

Slika 31. Deformacija u oblaku točaka (session5.json)

Slika 32. Prikaz poravnate sesije (session4.json)

Slika 33. Korisničko sučelje trećeg programa te redosljed učitanih sesija

Slika 34. Rezultat poravnavanja u trećem programu (tlocrtno)

Slika 35. SOR filter

Slika 36. Očišćeni oblak točaka

Slika 37. Tlocrtni prikaz ostataka kamenog prizemlja vile Rebar

Slika 38. Prezentacija promjene visina u tunelskom sustavu iz ptičje perspektive

Slika 39. Detaljan prikaz predulaza u tunel

Slika 40. Isticanje reflektirajućih trakica

Slika 41. Pogreška skenova

Slika 42. Dio unutrašnjosti rudnika

Slika 43. Preklop skeniranja jame sa starom topografskom izmjerom (tlocrtno)

Slika 44. Preklop dobivenog razvijenog profila s razvijenim profilom stare topografske izmjere