

SISTEM ZA KONSTRUKCIJU GLOBALNIH MAPA IZ MOBILNIH LIDAR SNIMAKA U INDUSTRIJSKIM OKRUŽENJIMA

AUTOMATED CONSTRUCTION OF GLOBAL 3D MAPS FROM MOBILE LIDAR SCANS IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

DALIBOR ŠELJMEŠI¹, VIŠNJA OGNJENOVIĆ²
VELIBOR ILIĆ³, DALIBOR DOBRILLOVIĆ⁴
VLADIMIR BRITKA⁵, MILAN NIKOLIĆ⁶

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VI25063S

Rezime: U ovom radu predstavljamo automatizovan sistem za izgradnju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih četvoronožnim robotom Unitree Go2. Sistem obuhvata detekciju preklapanja, point-to-plane ICP registraciju sa procenom kvaliteta, optimizaciju grafa pozicija i konstrukciju prostorno indeksirane mape. Testiran na realnim industrijskim podacima, sistem formira stabilnu glavnu komponentu sa prosečnim RMSE poravnanja od 2.5 cm uprkos ograničenim preklopima i geometrijski siromašnom okruženju. Dobijena mapa omogućava efikasnu primenu metoda mašinskog učenja, uključujući detekciju promena i digitalne blizance u industrijskim objektima.

Ključne reči: mobilni LiDAR, registracija oblaka tačaka, ICP algoritam, optimizacija grafa, 3D mapiranje

Abstract: This paper presents an automated system for constructing global 3D maps from mobile LiDAR scans collected using a Unitree Go2 quadruped robot. The proposed offline

¹Dalibor Šeljmeši, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, dalibor.seljmesi@uns.ac.rs, ORCID: 0009-0002-9279-8402

²Višnja Ognjenović, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, visnja.ognjenovic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4271-4549

³Velibor Ilić, Istraživačko-razvojni institut za veštačku inteligenciju, Fruškogorska 1, Novi Sad, velibor.ilic@ivi.ac.rs, ORCID: 0000-0001-5010-1377

⁴Dalibor Dobrilović, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, dalibor.dobrilovic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3083-5725

⁵Vladimir Brtka, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, brtka.vladimir@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7881-9217

⁶Milan Nikolic, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, milan.nikolic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-6643-1442

pipeline includes overlap detection, point-to-plane ICP registration with quality assessment, pose graph optimization, and generation of a spatially indexed global map. Evaluated on real industrial data, the system produces a stable main map component despite limited overlap and geometrically uniform environments, achieving an average alignment RMSE of 2.5 cm. The resulting map is suitable for downstream 3D machine-learning tasks such as change detection and forms a foundation for digital twin applications in Industry 4.0/5.0.

Key Words: mobile LiDAR, point cloud registration, ICP algorithm, pose graph optimization, 3D mapping

1. Uvod

Kontinuirano praćenje stanja industrijskih objekata zahteva pouzdano i frekventno prikupljanje trodimenzionalnih podataka o prostoru. Tradicionalni pristup zasnovan na terestričkom laserskom skeniranju (TLS) obezbeđuje visoku preciznost, ali je logistički zahtevan: zahteva stručnog operatera, planiranje pozicija skenera i ručnu registraciju više snimaka.

Sa razvojem mobilnih robotskih platformi, posebno četvoronožnih robota, otvara se mogućnost automatizovanog mapiranja bez statičkih skenerskih stanica. Slični koncepti autonomne inspekcije i automatske obrade podataka već su uspešno primenjeni i u UAV sistemima za industrijski nadzor, gde kombinacija autonomnog kretanja i metoda računarskog vida omogućava efikasno prikupljanje i obradu informacija o objektima [1].

Unitree Go2 predstavlja stabilnu i pristupačnu platformu koja može autonomno ili poluautonomno da nosi LiDAR senzor kroz kompleksne industrijske okoline.

U ovom radu razvijamo potpuno automatizovan sistem za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih tokom hodanja robota. Sistem obuhvata: (1) inicijalno prostorno filtriranje i downsampling skenova, (2) automatsku detekciju preklapanja između skenova korišćenjem centara i bounding box geometrije, (3) point-to-plane ICP registraciju sa kontrolisanim pragovima kvaliteta, (4) globalnu optimizaciju grafa pozicija, i (5) konstrukciju finalne mape sa prostornim indeksiranjem.

Cilj rada nije razvoj nove ICP varijante ili novog SLAM algoritma, već integracija postojećih metoda u robustan, potpuno autonoman sistem koji može da radi offline nad mobilnim LiDAR snimcima bez ručne intervencije. Praktična evaluacija izvršena je na realnom industrijskom setu podataka u zatvorenom prostoru, pri čemu sistem postiže uspešna registracija sa prosečnim RMSE < 3 cm.

Rezultujuća globalna mapa predstavlja pouzdanu osnovu za dalju analizu, kao što su detekcija promena i digital twin aplikacije. Pored toga, može se koristiti pri standardnoj primeni LiDAR-a u AGV(Automated Guided Vehicles) navigaciji,

praćenju pokretne imovine. Time je konfiguracija ovog sistema primenljiva u Industriji 4.0/5.0, čak i u situacijama kada dolazi do delimičnog ili potpunog prekida konekcije sa internet vezom.

2. Pregled literature

2.1. ICP registracija oblaka tačaka

Klasične metode registracije oblaka tačaka zasnovane su na ICP algoritmu, koji iterativno minimizuje razliku između dva skena [2], [3]. Point-to-plane varijanta se pokazala posebno efikasnom u okruženjima sa velikim brojem ravnih površina, što je čest slučaj u industrijskim objektima. Analize varijanti ICP-a ukazuju da izbor metrike i parametrizacije značajno utiče na konvergenciju i stabilnost [4], dok linearne least-squares aproksimacije [5] predstavljaju standardnu implementaciju u savremenim bibliotekama. Kasnije proširenje metode kroz Generalized-ICP [6] i indoor rekonstrukcije [7] unapređuju stabilnost registracije, dok noviji radovi demonstriraju da i jednostavne ICP varijante mogu biti vrlo konkurentne kada se pravilno podele tačke i inicijalizacije [8].

2.2. Mobilno LiDAR mapiranje četvoronožnim robotima

Savremeni sistemi mobilnog mapiranja zasnovani na četvoronožnim robotima demonstriraju mogućnost pouzdane 3D rekonstrukcije bez statičkih skenerskih stanica. LiDAR-only SLAM pristupi za robotske platforme pokazuju preciznost i u zahtevnim industrijskim okruženjima [9]. Primena Unitree robota u rekonstrukciji enterijera potvrđuje pogodnost ove platforme za automatizovano mapiranje u zatvorenim prostorima [10], [11].

Uparedna istraživanja mobilnog i terenskog laserskog skeniranja pokazuju da mobilni sistemi postižu nižu lokalnu preciznost, ali daleko veću efikasnost prikupljanja podataka [12], [13]. Napredni LiDAR-IMU SLAM pristupi [14] dodatno povećavaju tačnost pri nestabilnom hodu robota, dok se noviji radovi fokusiraju na kombinovanje mobilnih i statičkih skenova radi poboljšanja gustine i pokrivenosti [15].

2.3. Rezime i pozicioniranje rada

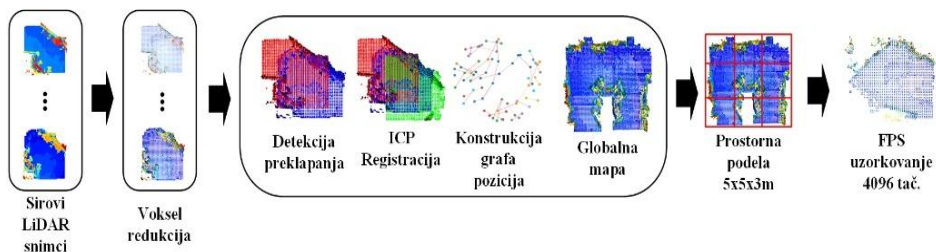
Pregled literature pokazuje da većina postojećih rešenja za mobilno mapiranje teži real-time SLAM sistemima, često uz integraciju IMU senzora, specijalizovanih robotizovanih platformi ili kompleksnih metoda optimizacije. Takvi pristupi zahtevaju dodatnu kalibraciju, hardversku sinhronizaciju i stabilne uslove kretanja, što otežava primenu u industrijskim enterijerima sa ograničenim preklapima i ponavljajućom geometrijom.

Nasuprot tome, ovaj rad se fokusira na offline konstrukciju globalne 3D mape isključivo iz LiDAR sekvenci, bez IMU podataka i bez ručnih intervencija. Time se

postizhe jednostavniji, pouzdan i u potpunosti automatski pipeline koji koristi postojeće i dobro proverene tehnike: detekciju preklapanja, point-to-plane ICP i optimizaciju grafa, prilagođene uslovima mobilnih robotskih snimanja u industrijskim okruženjima.

3. Metodologija

Predloženi sistem predstavlja potpuno automatizovan pipeline za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka u industrijskim okruženjima. Proces se sastoji od pet glavnih faza, prikazanih na Slici 1: (1) inicijalna priprema podataka, (2) detekcija preklapanja između skenova, (3) lokalna ICP registracija, (4) konstrukcija i analiza grafa pozicija, i (5) globalno poravnanje i prostorna podela mape.



Slika 1. Dijagram sistema

3.1. Priprema podataka i voxel redukcija

Ulaz u sistem čini sekvenca sirovih LiDAR snimaka prikupljenih tokom hoda robota u zatvorenom prostoru. S obzirom na to da sirovi oblaci tačaka mogu da sadrže stotine hiljada tačaka po skenu, prvi korak je uniformna redukcija gustine metodom voxel grid filtriranja (tipično 2–3 cm). Ova redukcija uklanja redundansu, smanjuje memorijske zahteve i ubrzava kasnije faze, a pri tome zadržava sve relevantne strukture za pouzdanu registraciju.

Tipičan sirovi sken Unitree 4D LiDAR L1 senzora sadrži približno 20–40 hiljada tačaka po okviru (u zavisnosti od brzine rotacije), pri čemu senzor obezbeđuje horizontalni FOV od 360° i vertikalni FOV od 90°, uz efektivnu uzorkovnu frekvenciju od 21 600 tačaka u sekundi. Ove karakteristike obezbeđuju dovoljnu gustinu podataka za pouzdanu ICP registraciju u industrijskim okruženjima.

3.2. Automatska detekcija preklapanja skenova

Da bi se izbeglo registrovanje parova skenova koji se ne preklapaju, između svih kandidata najpre se vrši procena verovatnog preklapanja.

Za svaki par skenova i, j izračunavaju se:

- euklidska udaljenost između njihovih centara,

- razlike prostornog obima (bounding box),
- visinska odstupanja.

Parovi koji zadovolje pragove prostorne blizine ulaze u proces registracije. Ovaj korak značajno smanjuje broj ICP poziva i povećava stabilnost u uniformnim industrijskim okruženjima, gde veliki broj skenova može imati malo korisnih karakteristika.

3.3. *Pairwise point-to-plane ICP registracija*

Za sve parove skenova za koje je prethodna faza detektovala verovatno preklapanje, primenjuje se metoda point-to-plane ICP. Ova varijanta ICP-a za svaku tačku u izvornom skenu pronalazi najbližu tačku u cilnom skenu i poravnava skenove tako što minimizuje odstupanje duž normalnog pravca površine.

Ovakav pristup naročito dobro funkcioniše u industrijskim okruženjima sa mnogo ravnih zidova, podova i dugačkih hodnika.

Na kraju registracije čuvaju se sledeći parametri kvaliteta:

- transformacija između dva skena,
- fitness (udeo tačaka koje su uspešno uparene),
- RMSE greške poravnanja.

Registracije koje ne ispunjavaju zadate pragove (npr. dovoljno visok fitness i niska greška) odbacuju se.

3.4. *Izgradnja i analiza grafa pozicija*

Sve uspešne ICP registracije organizuju se u neusmereni graf, gde čvorovi predstavljaju skenove, a ivice uspešne transformacije.

Analizom povezanih komponenti identifikuje se glavna komponenta, tj. najveći podgraf koji sadrži konzistentno registrovane snimke.

U okviru glavne komponente bira se referentni sken, čvor sa:

- najvećim stepenom (najviše pouzdanih veza),
- najvećom prosečnom fitness vrednošću transformacija.

Ovaj korak garantuje da se globalna mapa gradi iz najstabilnijeg segmenta putanje, čime se izbegavaju lokalne nestabilnosti ICP-a u uniformnim delovima okruženja.

3.5. *Globalno poravnanje (multi-hop transformacije)*

Nakon što je određena glavna komponenta grafa i izabran referentni sken, potrebno je sve ostale skenove dovesti u njegov koordinatni sistem. Ovo se postiže tako što se za svaki sken pronalazi najkraći put kroz graf do referentnog skena. Na tom putu se nalaze jedna ili više pouzdanih registracija dobijenih ICP-om.

Za svaki sken se zatim primenjuje niz uzastopnih transformacija duž tog puta, tako da se njegov oblak tačaka pravilno poravnava sa referentnim koordinatnim okvirom. Na taj način se vrši globalno poravnanje čak i u situacijama kada dva skena nisu direktno registrovana, već su povezani preko trećih skenova. Konačan rezultat ove faze je konzistentna globalna mapa u kojoj su svi skenovi postavljeni u zajednički koordinatni sistem i geometrijski usklađeni. Ovo predstavlja osnovu za izgradnju finalne 3D mape i za dalju prostornu analizu.

3.6. Prostorna podela i Farthest Point Sampling (FPS) uzorkovanje

Kako bi globalna mapa bila pogodna za dalje analize i algoritme dubokog učenja, vrši se podela prostora na uniformne prostorne ćelije dimenzija $5 \times 5 \times 3$ m. Ova podela omogućava ravnomernu organizaciju tačaka u prostoru i sprečava da gusti regioni dominiraju u kasnijoj obradi. Za svaku ćeliju koja pripada globalnoj mapi i sadrži dovoljno tačaka: izdvajaju se sve tačke unutar ćelije, primenjuje se Farthest Point Sampling (FPS) da bi se izdvojilo tačno 4096 reprezentativnih tačaka ravnomerno raspoređenih po zapremini, čuvaju se informacije o poziciji ćelije i broju originalnih tačaka. Ovaj proces obezbeđuje da se svaka prostorna oblast mape dosledno reprezentuje istim brojem tačaka, što je bitno za dalje zadatke kao što su detekcija promena, lokalna registracija ili treniranje modela mašinskog učenja.

4. Eksperimentalno okruženje

Eksperimenti su izvedeni na realnom industrijskom setu podataka prikupljenom u zatvorenom prostoru koristeći četvoronožnog robota Unitree Go2 Pro opremljenog LiDAR senzorom Unitree 4D LiDAR L1. Tokom prikupljanja robot se kretao duž linearne putanje dužine približno 25 metara, pri čemu je LiDAR radio u režimu kontinuiranog skeniranja sa frekvencijom od 10 Hz. Ukupno je prikupljeno 110 LiDAR skenova u formatu PCD. Sirovi podaci obrađeni su potpuno offline, bez IMU informacija i bez GNSS/INS referenci, što predstavlja izazovno okruženje zbog uniformnih površina, ponavljajuće geometrije i ograničenih preklopnih oblasti između uzastopnih skenova. Finalna 3D mapa generisana je kao objedinjeni PCD fajl i prostorno indeksirana u uniformne ćelije pogodne za primenu veštačke inteligencije na 3D podacima. Svi eksperimenti izvršeni su na računaru sa procesorom Intel i5-10300H i 16 GB RAM-a. Obrada je realizovana u Python okruženju koristeći biblioteke Open3D, NumPy i SciPy.

5. Rezultati

5.1. Detekcija preklapanja

Od 110 prikupljenih skenova generisano je 5,995 mogućih parova, od čega se 883 (14.7%) kvalifikovalo kao kandidati sa potencijalnim preklapanjem. Time je

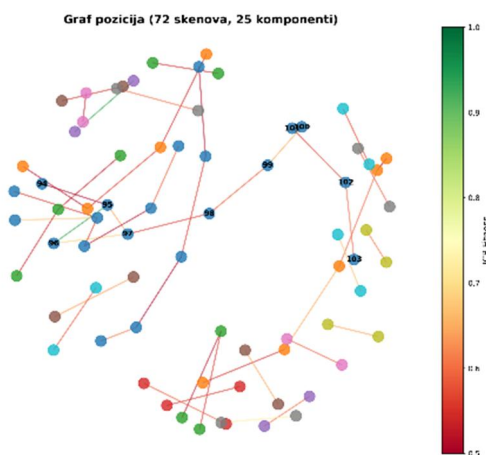
eliminirano 84.1% parova, što značajno smanjuje ukupnu računarsku kompleksnost pipeline-a.

5.2. ICP Registracija

Na 883 kandidata primenjena je point-to-plane ICP registracija. Uslovi kvaliteta (fitness, RMSE i konvergencija) ispunjeni su kod 48 parova (5.4%). Ovaj mali procenat očekivan je zbog geometrijske uniformnosti industrijskog okruženja, kao i uskog vidnog polja Unitree 4D Lidar L1 senzora prilikom linearnog kretanja.

5.3. Struktura grafa

Od 72 skena koji su imali makar jednu validnu ICP registraciju formirano je ukupno 25 povezanih komponenti, pri čemu je najveća (glavna) komponenta obuhvatila 10 skenova i korišćena je za globalno poravnanje i konstrukciju finalne mape. Slika 2 pokazuje da se većina ostalih skenova nalazi u veoma malim komponentama sa jednom ili dve veze, što je tipična posledica ograničenog preklapanja i uniformne geometrije industrijskog okruženja. U takvim uslovima ICP često ne uspeva da pronađe stabilnu transformaciju, pa samo ograničen podskup skenova formira koherentan i dovoljno pouzdan segment za globalnu rekonstrukciju. Glavna komponenta se izdvaja većim brojem međusobno konzistentnih registracija, što ukazuje na stabilnije preklapanje i povoljnije geometrijske uslove u tom delu putanje robota. Tako Slika 2 vizuelno potvrđuje da se stabilna 3D mapa može izgraditi samo iz dela skenova koji čine gustu i dobro povezanu mrežu transformacija.



Slika 2. Struktura grafa pozicija sa 25 povezanih komponenti

5.4. Kvalitet registracije

U okviru glavne komponente postignut je prosečan RMSE od 2.50 ± 0.45 cm i prosečan fitness od 0.592 ± 0.089 , što potvrđuje dobro lokalno poravnanje uprkos

malim preklapajućim oblastima. Referentni sken automatski izabran optimizacijom grafa bio je #95. Detaljne metrike kvaliteta registracije prikazane su u tabeli 1.

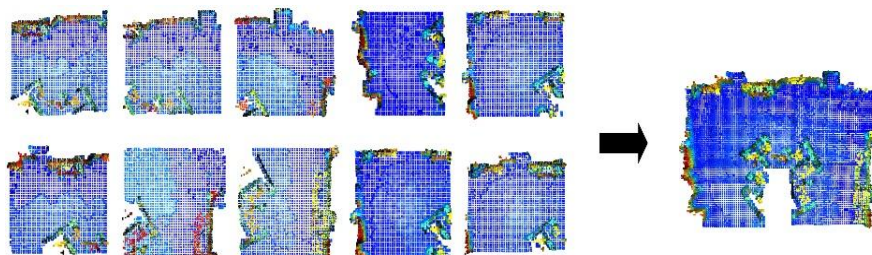
Tabela 1. Sažetak metrika kvaliteta registracije

Metrika	Vrednost
Ukupno skenova	110
Kandidati (preklapanje)	883 (14.7%)
Uspešne ICP registracije	48 (5.4%)
Skenova u grafu	72
Broj komponenti	25
Glavna komponenta	10 skenova (13.9%)
Prosečan RMSE	2.50 ± 0.45 cm
Prosečan fitness	0.592 ± 0.089
Referentni sken	#95 (3 konekcije)

Postignut RMSE (<3 cm) je u skladu sa zahtevima za industrijske aplikacije detekcije promena i uporediv sa rezultatima mobilnog mapiranja prijavljenim u literaturi [13]. Referentni sken automatski izabran optimizacijom grafa bio je #95 sa tri uspešne registracije.

5.5. Finalna mapa

Spajanjem skenova glavne komponente dobijena je konzistentna globalna 3D mapa (slika 3) pogodna za geometrijsku analizu i mašinsko učenje. Mapa je dodatno podeljena na prostorne ćelije i reprezentovana metodom FPS uzorkovanja, čime se omogućava direktna primena modela za detekciju promena i segmentaciju prostora.



Slika 3. Globalna 3D mapa dobijena spajanjem 10 registrovanih skenova

6. Zaključak

U ovom radu predstavljen je automatizovan sistem za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih četvoronožnim robotom u industrijskom okruženju. Iako su uslovi snimanja doveli do ograničenog broja uspešnih

registracija, rezultati pokazuju da je moguće formirati stabilnu globalnu mapu sa preciznim lokalnim poravnanjem ($RMSE \approx 2-3$ cm). Sistem eliminiše ručnu registraciju, smanjuje vreme obrade i omogućava ponovljive inspekcije bez ljudske intervencije. Dobijene mape se mogu direktno koristiti za detekciju promena, digitalne blizance i planiranje autonomnih putanja, što predstavlja važan korak ka većoj primeni mobilnog LiDAR mapiranja u pametnim fabrikama i prediktivnom održavanju.

Glavno ograničenje sistema je mala stopa uspešnih registracija u uniformnim delovima hodnika, što je posledica nedovoljnog preklapanja i ograničenog vidnog polja senzora. Budući rad će uključiti integraciju IMU podataka, robustnije lokalne deskriptore i proširenje dataset-a kako bi se poboljšala gustoća i stabilnost globalne mape.

7. Literatura

- [1] D. Šeljmeši, V. Ilić, V. Ognjenović, V. Brtko, and D. Dobrilović, Intelligent UAV Surveillance: GIS-Based Path Planning and Post-Flight Object Detection Using YOLOv11 in *Proc. 15th Int. Conf. Appl. Internet Inf. Technol. (AIIT 2025)*, Bitola, North Macedonia, <https://www.researchgate.net/publication/397561933>, 2025.
- [2] Chen Y, Medioni G, Object Modelling by Registration of Multiple Range Images, *Image and Vision Computing*, 10(3), 145-155, 1992.
- [3] Besl P. J, McKay N. D, A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256, 1992.
- [4] Rusinkiewicz S, Levoy M, Efficient Variants of the ICP Algorithm, *Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 145-152, 2001.
- [5] Low K. L, Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration, *Technical Report TR04-004*, University of North Carolina at Chapel Hill, 2004.
- [6] Segal A. V, Haehnel D, Thrun S, *Generalized-ICP*, *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2009.
- [7] Choi S, Zhou Q. Y, Koltun V, Robust Reconstruction of Indoor Scenes, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 5556-5565, 2015.
- [8] Vizzo I, Guadagnino T, Mersch B, Wiesmann L, Behley J, Stachniss C, *KISS-ICP: In Defense of Point-to-Point ICP—Simple, Accurate, and Robust Registration If Done the Right Way*, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), 1029-1036, 2023.
- [9] Ramezani M, Tinchev G, Iuganov E, Fallon M, Online LiDAR-SLAM for Legged Robots with Robust Registration and Deep-Learned Loop Closure, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 4093-4100, 2020.

- [10] Hu D, Gan V. J. L, Yin C, Robot-assisted mobile scanning for automated 3D reconstruction and point cloud semantic segmentation of building interiors, *Automation in Construction*, 152, 104949, 2023.
- [11] Gan V. J. L, Hu D, Zhai R, Wang Y, Automated As-built 3D Reconstruction Using Quadraped Robot and 3D LiDAR Sensor, *Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 129-135, 2024.
- [12] Wetzel E. M, Liu J, Leathem T, Sattineni A, The Use of Boston Dynamics SPOT in Support of LiDAR Scanning on Active Construction Sites, *Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 493-500, 2022.
- [13] Thomson C, Apostolopoulos G, Backes D, Boehm J, Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 289-293, 2013.
- [14] Zhou Z, Zhang C, Li C, Liu Z, Xu L, Jiang C, A tightly-coupled LIDAR-IMU SLAM method for quadraped robots, *Measurement and Control*, 57(3-4), 399-412, 2024.
- [15] Grzelka K, Koszyk J, Ambrozinski Ł, Rucka M, Lachowicz J, Application of mobile laser scanner to augment stationary collected point clouds, *Building Research & Information*, 53(6), 675-699, 2025.