



MAPIRANJE, LOKALIZACIJA I NAVIGACIJA PO NERAVNOM TERENU
AUTONOMNO VOĐENOG VOZILA PROMJENLJIVE GEOMETRIJE

MAPPING, LOCALIZATION AND NAVIGATION ON UNEVEN TERRAIN OF
AUTOMATED GUIDED VEHICLE WITH VARIABLE GEOMETRY

Aleksandar Kičić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – MEHATRONIKA

Kratak sadržaj – Rad opisuje mapiranje, lokalizacija i navigacija po neravnom terenu autonomno vođenog vozila promjenljive geometrije. Zadatak rada bilo je istražiti i implementirati algoritme za automatsko mapiranje, lokalizaciju i navigaciju po neravnom terenu za autonomno vođeno vozilo. Pri tome bilo je potrebno na osnovu dostupne literature proučiti postojeće algoritme za automatsko mapiranje, lokalizaciju i navigaciju i odabrati odgovarajuće, prilagoditi odabrani pristup problemu navigacije na neravnom terenu i implementirati predloženo rješenje na autonomno vođenom vozilu. Predloženo je rješenje u obliku lidar filter čvora koji kao ulaz ima nefiltrirane vrijednosti distanci čitanja lidara i uglova rotacije sa inercijalnog senzora, Na osnovu ovih podataka filter daje kompenzacioni vrijednosti na određenu temu unutar ROS-a. Na kraju je eksperimentalno provjereno predloženo rješenje i upoređeno sa postojećim rješenjem uz pomoć Vicon sistema.

Ključne reči: AGV, mapiranje, lokalizacije, navigacija

Abstract – The paper describes mapping, localization and navigation on uneven terrain of an autonomously driven vehicle with variable geometry. The task of the work was to research and implement algorithms for automatic mapping, localization and navigation on uneven terrain for an autonomously driven vehicle. In doing so, it was necessary to study the existing algorithms for automatic mapping, localization and navigation based on the available literature and select the appropriate ones, adapt the selected approach to the problem of navigation on uneven terrain and implement the proposed solution on an autonomously driven vehicle. A solution was proposed in the form of a lidar filter node that has unfiltered values of lidar reading distances and rotation angles from the inertial sensor as an input. Based on this data, the filter publishes compensated values on a specific topic within ROS. Finally, the proposed solution was tested experimentally and compared with the existing solution with the help of the Vicon system.

Keywords: AGV, mapping, localization, navigation

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Milutin Nikolić, vanr. prof.

1. UVOD

Proizvodnja stalno nastoji ka efikasnijim i jeftinijim načinima realizacije svojih konačnih produkta. Fleksibilni sistemi proizvodnje (FMS) su korišćeni u potrazi za isplativijim i vremenski efikasnijim procesima [1]. Postavljanje nove proizvodne linije predstavlja veliku investiciju za kompaniju, a da se manje promjene realizuju na već postojećim proizvodnim linijama može dovesti do zastoja, smanjenja produktivnosti i zahtjevaju veliko ulaganje kapitala.

Alternativa ovom tradicionalnom metodu bi bila ta da se u sistem ugradi fleksibilna linija. Ovaj pristup bi se razlikovao od tradicionalnog, linearnog u pogledu: rasporeda, njegove mogućnosti obrade i sposobnosti da proizvodi više nego jedan predmet. Još jedna prednost bi bila sposobnost promjene sistema bez uticaja na ukupnu proizvodnju.

Automatizovana vozila su bitna komponenta ove fleksibilnosti proizvodne linije. Termin eng. *Automated Guided Vehicles* se odnosi na vozila koja su u stanju da se kreću bez ljudske intervencije i sposobna su da autonomno navigiraju prostor u kome se nađu. Mogu se koristiti kao alternativa za fiksne transportne trake koje transportuju nedovršeni proizvod kroz faze proizvodnje sekvencijalno. AGV bi mogao uzimati i ostaviti (eng. *pick and place*) nedovršeni proizvod na bilo koju fazu proizvodnje što omogućava fleksibilniji proizvodni proces. Najnovija verzija AGV-a se često naziva Autonomno inteligentno vozilo (AIV), engl. *Autonomous Intelligent Vehicle*.

1.1. Postavka problema

Najčešće primjenjivani autonomni roboti u uslovima proizvodnje programirani su da prate unaprijed zadate linije putanja ili bar kodove koji se nalaze na ključnim mjestima u fabrici. Vozila su rigidne konstrukcije i nemaju mogućnost artikulacije što im dozvoljava da budu što kompaktnijeg dizajna i mogućnost što veće nosivosti tereta.

U uslovima proizvodnje gdje dolazi do kontaminacije radnog prostora oko mašina i pokretnih traka uvidena je potreba za ravojem autonomno vođenog vozila (AGV-a) koji bi imao sposobnosti da prelazi preko ovakvog terena. Sistem je razvijen primjenom koncepta artikulacije šasije i upotrebom četiri omnidirekciona točka tipa mekanum (eng. “*mecanuum*”).

Navigacija u promjenljivim i kontaminiranim uslovima nije moguća upotrebom predefinisanih kretanja uz praćenje obilježja na tlu ili zidovima fabrike. Za ove

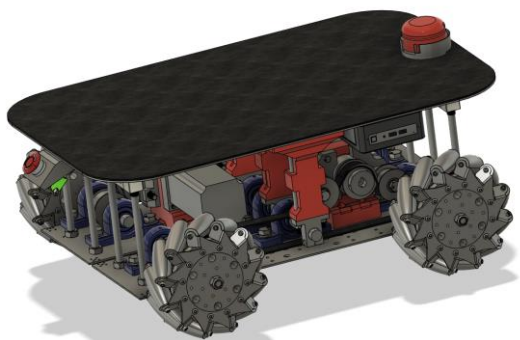
potrebe navigiranja robota unutar radnog prostora, koriste se metode navigacije upotrebom naprednijih senzora. Putanje se generišu na osnovu prvobitno kreirane mape koja se osvježava novim informacijama u toku rada vozila uz sisteme detekcije prepreka ili samih radnika. Senzor koji se prvobitno koristi na ovakvim vozilima jeste lidar. Pored lidara koriste se i inercijalni senzori (eng. “*Inertial Mesurment Unit*”) i kamere koje posjeduju mjerenja dubine pored normalne RGB kamere.

Trenutno ponuđeni paketi navigacije prostora imaju mogućnost korišćenja 2D ili 3D lidara ali pretpostavljaju da se vozilo kreće horizontalno, u ravni sa tlom. Ovakva pretpostavka ima negativan efekat u prelasku terena koji nije ravan jer se baza robota gdje, se obično montiraju senzori, naginje što pravi negativan uticaj na procjenu daljine objekata na mapi mjerenih sa sistemom lidara. U zavisnosti od ugla, tačke koje lidar dobija, koje predstavljaju razdaljinu od objekata u stvarnosti, imaju vrijednosti koje odstupaju od stvarnih rastojanja kada bi robot bio paralelan sa podlogom upravo zbog ugla gledanja.

2. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA

Mehanika robota projektovana je tako da bi se omogućilo kretanje AGV-a po terenu koji nije idealo ravan već je ispunjen preprekama koje bi robot trebao da pređe uz što manje naginjanje površine za nošenje tereta i samog tereta. Zahtjevi nosivosti bili su 100 kg postavljenih na gornju noseću ploču koja je prekrivena gumiranim materijalom radi poboljšanja trenja između robota i predmeta koji nosi. Gabaritne dimenzije robota su 776 mm x 628 mm x 250 mm a osno rastojanje točkova je rastojanje 444 mm i po sirini 526 mm.

Na slici 1 dat je prikaz mehaničke konstrukcije sklopljenog robota:



Slika 1: Mehanička konstrukcija vozila

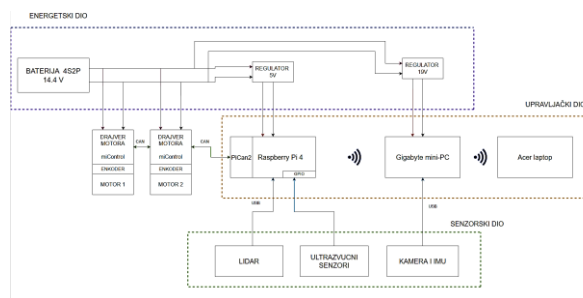
3. ELEKTRONIKA

U sledećem poglavlju dat je pregled elektronike korišćene za pokretanje i upravljanje sistema i dati su senzori koji su korišćeni za odometriju, mapiranje prostora i navigaciju kao i sigurnosni senzori. Blok šema elektronike data je na slici 2.

3.1. Energetski sistem

Napajanje robota vrši se iz četiri Turnigy 4s 14.4V Li-Po baterije, po dvije vezane u paralelu pa tako dva seta

vezana u serijsku vezu radi ostvarivanja većeg kapaciteta i potrebnog napona za rad drajvera. Baterije ovog tipa su odabrane radi njihove mogućnosti da isporuče relativno velike strujne zahtjeve koji pri punom opterećenju robota dosežu i 20A, velikog su kapaciteta od 5000 mAh u kompaktnom pakovanju i sa niskom težinom baterija.



Slika 2: Blok šema elektronike

Motori izabrani za pogon vozila su firme Groschopp i modela EGK65-30NA, to su motori bez četkica sa permanentnim magnetima. Nominalni obrtni moment je 0.35 Nm pri radu na 24V nominalnog napona. Proizvode snagu od 120 W i imaju 6000 rmp brzinu okretanja

Tabela 1: Energetski zahtjevi sistema

Motor + drajver x2	120 W x 2	240 W
RaspberryPi + lidar	15 W	15 W
Mini-PC	36 W	36 W
US senzori	1 W x 10	10 W

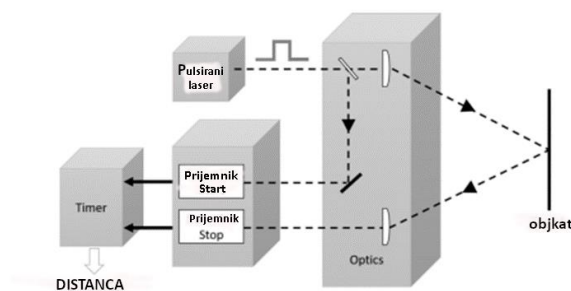
4. SENZORI

Senzora koji su korišćeni na vozilu su lidar, inercijalni senzor unutar Intel kamere i ultražvučni senzori. Senzori su korišćeni u svrhu mapiranja, lokalizacije i navigacije vozila u prostoru kao i u sigurnosne funkcije i detekciju prepreka ili ljudi koji nailaze na putanju kretanja.

4.1. LiDAR

Termin LiDAR (Light Detection and Ranging) se prvi put pojavio 1963. godine. Bila je to kombinacija reči „svjetlo” i “radar “. Princip rada je i dalje isti, refleksija svjetlosti i izračunavanje vremena leta (eng. “Time of Flight” TOF), što se može bolje vidjeti na slici 3.

Projektovanjem optičkog signala na objekat/površinu reflektovani povratno rasijani signal se prima i obrađuje da bi se odredila udaljenost. Ovo omogućava stvaranje oblaka tačaka okoline.



Slika 3: Princip rada lidara

Formula je vrlo jednostavna, udaljenost D do mete se mjeri na osnovu povratnog kašnjenja (ΔT) svjetlosnih talasa koji putuju do mete.

$$D = c \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdje je: D - rastojanje objekta c - brzina svetlosti ΔT - vreme potrebno svetlosti da putuje

4.2. Inercijalna mjerna jedinica IMU

Inercijalna mjerna jedinica, IMU (eng. "Inertial measurement unit"), obično se sastoji od dva senzora sa 3 ose, akcelerometra i žiroskopa. Opciono, može biti prisutan i treći senzor - magnetometar. U prvom obliku oni su sposobni da mjere šest veličina, mjerenje ubrzanja (ms^2) i ugaone brzine (rad/s). U drugom slučaju dodavanjem magnetne orijentacije (μTesla) broj mjernih veličina se povećava na devet.

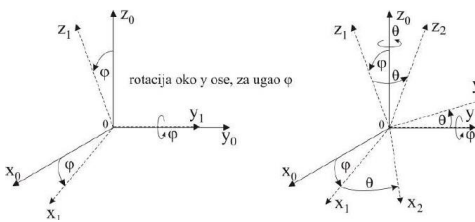
5. SOFTVERSKO REŠENJE

Za implementaciju ovog rada korišćen je *Robot Operating Sistem* (ROS), verzija *Foxy Fitzroy*. To je skup softverskih biblioteka i alata otvorenog koda posebno dizajniranih za robotske aplikacije i za jednostavnu integraciju nekoliko softverskih dijelova potrebnih za rad robota, od drajvere do najsavremenijih algoritama. Glavne softverske biblioteke i alati koji se koriste za ovu implementaciju su sledeće:

- Ubuntu 20.04.5 LTS (Focal Fossa): Operativni sistem
- ROS *Foxy Fitzroy*: Ros distribucija
- Lokalizacija robota: Ovaj paket je kolekcija čvorova za procjenu stanja i fuziju senzora.
- Imu alati: Sadrži različite alate za IMU uređaje, koristi se za pokretanje *madwick* filterskog čvora odgovornog za kreiranje orijentacije iz podataka Intel Imu.
- Rviz: Glavni alat za 2D/3D vizualizator u ROS-u
- Nav2 navigacioni paket

5.1. Lidar filter

Kada robot prelazi preko neravnog terena lidar se rotira oko x , y i z ose zaredom (φ - fi, θ - theta i ψ - psi) kao sto je prikazano na kordinatnom sitemu na slici 5.



Slika 5. Transformacije koordinatnog sistema preko ZYX Ojlerovih uglova

Usljed rotacija kordinatnog sistema lidara podaci koji se koriste u navigacionom paketu za formiranje lokalne i globalne mape troškova nisu tačni jer se očitavanje distanci vrši u novom, pomjerenom koordinatnom sistemu. Ovakav ofset podataka uzrokuje netačnost pozicioniranja robota i mogućnost sudara sa fiksnim objektima na mapi.

5.2. Predloženo rešenje

Vektor distance (rastojanje tačke u prostoru do centra lidara) \mathbf{d}_1 u novom, pomjerenom sistemu može se izraziti preko jednačine 9:

$$\vec{d}_1 = R_1^0 \cdot \vec{d}_0 \quad (9)$$

gdje je \mathbf{d}_1 distanca u pomjerenom ks dok je \mathbf{d}_0 distanca u referentnom kordinatnom sistemu koji ortogonalan na teren bez nagiba, R_1^0 je matrica rotacija izmjedju ks.

Da bismo kompenzovali distancu lirada potrebno je da predstavimo \mathbf{d}_0 u odnosu na \mathbf{d}_1 :

$$\vec{d}_0 = R_0^1 \cdot \vec{d}_1 \quad (10)$$

Gdje su R_0^1 i \vec{d}_1 :

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\varphi & \sin\theta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\vec{d}_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \\ 0 \end{bmatrix} d_1 \quad (12)$$

α – ugaono rastojanje trenutne tačke očitavanja lidara

Množenjem jednačina 11 i 12 dobijamo:

$$\vec{d}_0 = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\varphi\sin\alpha \\ \cos\varphi\sin\alpha \\ -\sin\theta\cos\alpha + \cos\varphi\sin\varphi\sin\alpha \end{bmatrix} d_1 \quad (18)$$

Intenzitet d_0 u preslikan u xy ravni je:

Mjerenja dobijena sa inercijalnog senzora koji je nagnut kada vozilo prelazi preko neravnog terena data su preko uglova φ i θ . Navigacioni paket koji je korišćen pretpostavlja da se robot nalazi u horizontalnoj ravni smatrajući da su prepreke vertikalne. Da bi smo ispravili distance mjerenja koje su mjerenje u nagemotm stanju naći ćemo intenzite vektora \mathbf{d}_0 :

$$|d_0| = \frac{d_1^2 (\cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\varphi\sin\alpha)^2 + d_1^2 (\cos\varphi\sin\alpha)^2}{\sqrt{d_1^2 (\cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\varphi\sin\alpha)^2 + d_1^2 (\cos\varphi\sin\alpha)^2}} \quad (19)$$

Predloženo rješenje je implementirano u ROS2 čvor čiji su ulazi dvije teme i to: `/scan/unfiltered` i `/imu/rpy`. Na prvu temu publišuje `rplidar` čvor i tip poruke je `LaserScan` koji nam daje niz dužina tačaka u prostoru raspoređenih na određenim uglovima u krugu. Druga tema dolazi od filtera za intercijalni sistem i u obliku poruke `Vector3Stamped` daje nam informacije o `roll`, `pitch` i `yaw` uglovima. Kao izlaz iz čvora data je tema `/scan` koja je predstavlja filtriran oblik ulaznih podataka.

6. EKSPERIMENT

Testiranje će se vršiti uz pomoć *Vicon* sistema kamera. Pokazano je kako se robot navigira u prostoru sa preprekama sa i bez korišćenja lidar kompenzacionog filtera predloženog kao rešenje u prethodom poglavlju.

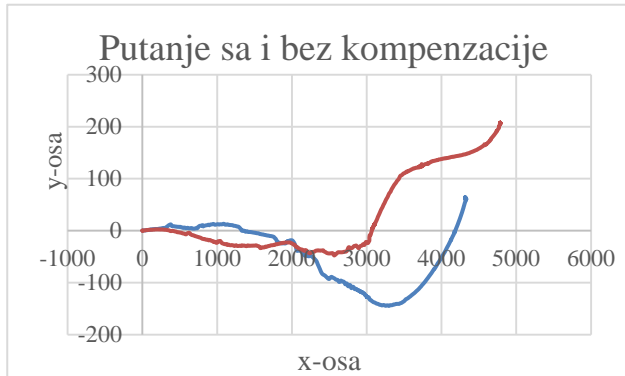


Slika 6. Kordinatni sistemi Vicon sistema, robota i mape

6.1. Rezultati eksperimenta

Nakon snimanja dobijamo rezultate dva načina navigacije, bez predloženog lidar filtra koji kompenzuje kretanje robota vozila po neravnom terenu i sa lidar filtrom. Koordinatni sistem kamera i robota dovedeni su u isti koordinatni početak naknadnom obradom podataka. Kao krajnja koordinata navigacije tada je tačka (4400, 50).

Pri putanji kretanja vozila u xy ravni bez kompenzacije u odnosu na referentni Vicon sistem uočavamo grešku po x osi od 336 mm i grešku po y osi od 207 mm i vizuelno možemo uvidjeti grešku u orijentaciji od 45 stepeni. Dok pri putanji kretanja vozila u xy ravni sa lidar kompenzacijom uočavamo grešku po x osi od 75 mm i grešku po y osi od 11 mm i vizuelno možemo uvidjeti grešku u orijentaciji od 15 stepeni.



Slika 7. Putanja AGV sa i bez lidar kompenzacije

7. ZAKLJUČAK

Prema zahtjevima nosivosti i brzine i načina kretanja vozila konstruisano je autonomno vođeno vozilo sa četiri omnidirekciona točka ali po dva su pokretana jednim motorom. Prvi dio zadatka riješen je upotrebom postojećih paketa za navigaciju, slam i lokalizaciju. Robotski sistem prilagođen je radu unutar ROS-a, prilagođena je postojeća robotska platforma za komunikaciju unutar ovog sistema i to uz korišćenje standardizovanih tipova poruka.

Kao rješenje problema navigacije po neravnom terenu implementiran je čvor filtera unutar ROS-a koji prikuplja neobrađene podatke o distancama sa lidarskog čvora i podatke o nagibu robota po određenim osama sa intercijalnog senzora unutar kamere.

Eksperimentalnim putem potvrđena je efikasnost predloženog lidar kompenzacionog filtra na osnovu mjerenja referentnog Vicon sistema. Prvo mjerenje je urađeno bez upotrebe filtra i snimljeni su rezultati, a drugo mjerenje urađeno je sa upotrebom filtra. Nakon poređenja podataka došli smo do pozitivnih rezultata rada filtra. Potvrđeno je da se vozilo našlo na poziciji bližoj zadatoj u slučaju sa korišćenjem lidar filtra, a orijentacija je vizuelno izgledala bliže zadatoj.

Kao dodatak navigaciji robota u prostoru, planirano je implementirati lidarsku odometriju (eng LOAM – Lidar odometry and mapping) koja bi služila kao dodatak trenutnoj odometriji i poboljšala bi preciznost pozicioniranja vozila. Trenutno je na robotu montirana Intel Realsence kamera koja ima mogućnost da obezbijedi oblak tačaka distanci predmeta koje kamera može da vidi, tako da sledeći dodatak bila bi implementacija vizuelne odometrije. Nakon ovih poboljšanja odometrije planirano je da se vozilo pripremi za rad unutar industrijskog okruženja u fabrici,

8. LITERATURA

[1] L. Lynch, T. Newe, J. Clifford, J. Coleman, J. Walsh, D. Toal: “Automated Ground Vehicle (AGV) and Sensor Technologies- A Review”, 2018 Twelfth International Conference on Sensing Technology.

[2] Applied sciences: “An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles”, link: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093>, Accessed: 15.09.2022.

[3] B. Ivanović, T. Milić: “Kalmanov filter”, link: <https://blaza.github.io/kalmanfilter/>, Accessed: 20.09.2022.

[4] Wikipedia: “Extended Kalman filter, link: https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter, Accessed: 17.09.2022.

Kratka biografija:



Aleksandar Kičić rođen je u Tesliću, RS, BiH 1998. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti robotike odbranio je 2021.god.

kontakt: acokicic@gmail.com