

AVTONOMNA VOZILA V INTRALOGISTIKI

DARKO HERCOG,¹ PRIMOŽ BENČAK²

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija

darko.hercog@um.si

² Univerza v Mariboru, Fakulteta za logistiko, Celje, Slovenija

primoz.bencak1@um.si

Avtomatsko vodena in avtonomna vozila se vedno bolj uporabljajo v intralogističnih procesih v namene transporta blaga ali podpore pri komisioniranju. Publikacija podaja kratek pregled področij avtomatskih in avtonomnih vozil, njihove razlike ter možnosti uporabe v intralogistiki. Bralcu poda osnovno teorijo s področja delovanja posameznih (pod)sistemov (pogon, senzorji, lokalizacija in navigacija) avtonomnih mobilnih robotov. Za lažje razumevanje so dodane spletne povezave do videoposnetkov, ki teorijo podkrepijo s praktičnimi prikazi. Nazadnje je s primerom avtonomnega mobilnega robota MiR100 predstavljeno upravljanje mobilnega robota in njegove funkcije.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fl.2.2025.6](https://doi.org/10.18690/um.fl.2.2025.6)

ISBN

978-961-286-972-4

Ključne besede:

avtonomna vozila,
avtonomni mobilni roboti,
AMR,
avtomatsko vodena vozila,
AGV,
intralogistika



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fl.2.2025.6](https://doi.org/10.18690/um.fl.2.2025.6)

ISBN

978-961-286-971-7

Keywords:

autonomous vehicles,
autonomous mobile robots,
AMR,
automated guided vehicles,
AGV,
intralogistics



University of Maribor Press

AUTONOMOUS VEHICLES IN INTRALOGISTICS

DARKO HERCOG,¹ PRIMOŽ BENČAK²

¹ University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science,
Maribor, Slovenia

darko.hercog@um.si

² University of Maribor, Faculty of Logistics, Celje, Slovenia

primoz.bencak1@um.si

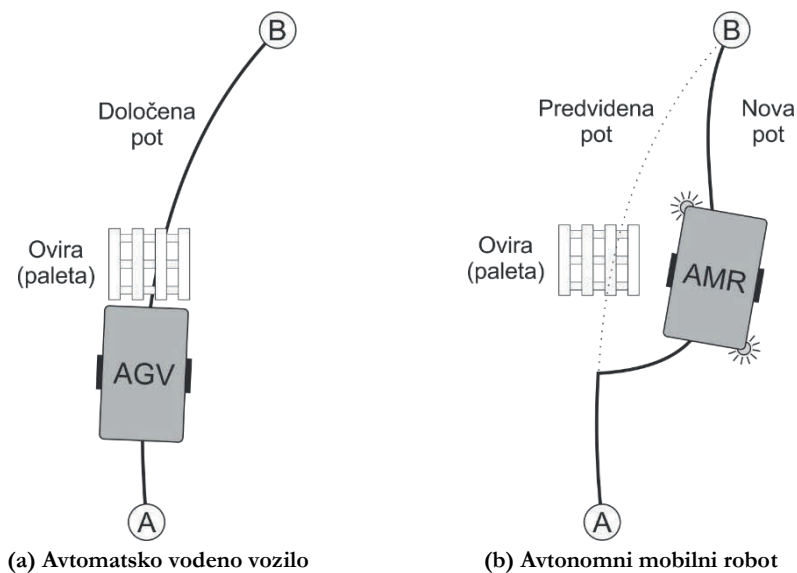
Automated guided and autonomous vehicles are increasingly used in intralogistics processes to transport goods or support order picking. The publication provides a brief overview of the areas of automated and autonomous vehicles, their differences, and potential applications in intralogistics. The reader is introduced to the basic theory of the operation of autonomous mobile robots' (sub)systems (drive, sensors, localization, and navigation). For ease of understanding, web links to videos are added, which support the theory with a practical demonstration. Finally, in an example of the autonomous mobile robot MiR100, the operation of the mobile robot and its functions are presented.

1 Uvod

Avtonomna in avtomatsko vodena vozila omogočajo samostojen transport različnega tovora znotraj proizvodnih ali logističnih procesov. Avtomatsko vodena vozila, za katere se v uporablja kratica AGV (ang. Automated Guided Vehicles), so na tržišču prisotna že precej časa; prvo takšno vozilo je bilo namreč izdelano že leta 1950. Avtomatsko vodena vozila sledijo fiksnim in vnaprej označenim potem (slika 6.1-a), pri čemer se za označitev poti uporabljajo različni sistemi, kot so npr. sledilne žice ali magnetni trakovi. Vozilo s pomočjo nameščenih senzorjev detektira označeno pot, nato pa s pomočjo pogonskega in krmilnega sistema tej poti sledi. Dodatno pa ta vozila vsebujejo tudi senzorje za detekcijo prisotnosti ovir na označeni poti. V primeru zaznane ovire se mora vozilo ustaviti in počakati na odstranitev te ovire (slika 6.1-a). Avtomatsko vodena vozila predstavljajo dokaj preprosto in cenovno ugodno rešitev samostojnega notranjega transporta, saj bazirajo na relativno preprostih sistemih zaznavanja, procesiranja in odločanja. Imajo pa ta vozila kar nekaj pomanjkljivosti, in sicer: (1) sledijo fiksnim in vnaprej določenim potem, (2) v primeru nepričakovane ovire na poti se vozilo zaustavi, (3) za delovanje vozil je potrebna sprememba infrastrukture in kasneje tudi vzdrževanje te infrastrukture itd. Navkljub navedenim pomanjkljivostim se ta vozila dandanes v industriji precej uporabljajo in sicer za manj kompleksne prevoze tovora iz ene do druge lokacije.

Pred slabim desetletjem so se na tržišču začela pojavljati novejša vozila, za katere se uporablja termin avtonomni mobilni roboti oz. kratica AMR (ang. Autonomous Mobile Robots). Ta vozila imajo določeno stopnjo inteligence in lahko samostojno sprejemajo odločitve, ko zaidejo v nove ali nepredvidene situacije. Avtonomni mobilni roboti izvajajo lokalizacijo in navigacijo s pomočjo senzorjev in naprednih algoritmov ter naloženega zemljevida oz. karte prostora, v katerem izvajajo transportna opravila (Siegwart, Nourbakhsh, & Scaramuzza, 2011). Avtonomni mobilni roboti vsebujejo številne senzorske sisteme, med katerimi so še posebej pomembni varnostni laserski skenerji. Posledično lahko obratujejo v neposredni bližini ljudi in ostalih dinamičnih ovir, zmožni so peljati tudi skozi vrata, hodnike in uporabljati dvigala. Z vgrajenimi senzorji in dovršeno programsko in strojno opremo zaznavajo objekte v svoji neposredni okolici in z uporabo naprednih algoritmov samostojno izračunajo optimalno pot do cilja. V primeru zaznane ovire na predvideni poti, ta vozila samostojno poiščejo alternativno pot in po njej nadaljujejo

z dostavo tovora do ciljne lokacije (slika 6.1-b). V nadaljevanju bo za vozila AMR uporabljen tudi termin avtonomna vozila, za vozila AGV pa avtomatska vozila.



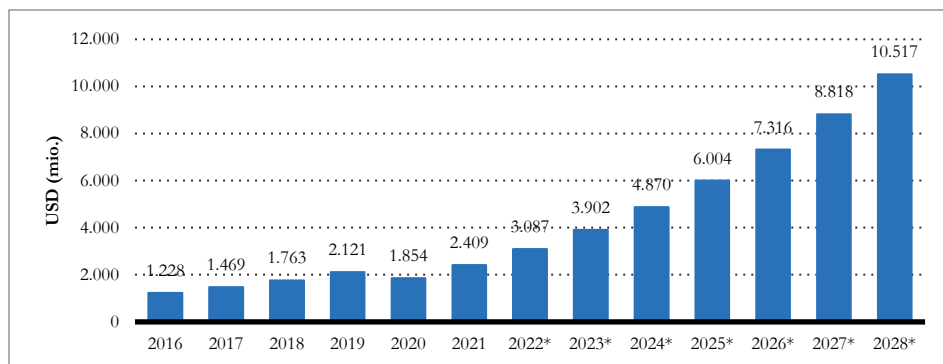
Slika 6.1: Pot avtomatsko vodenega (levo) in avtonomnega vozila (desno)

Vir: lasten.

Zaradi številnih dobrih lastnosti prodaja avtonomnih mobilnih robotov strmo narašča. Letni promet trenutno znaša dobre 3 milijarde ameriških dolarjev, v naslednjih petih letih pa bi naj narastel celo preko 10 milijard (slika 6.2).

Avtonomna vozila so prilagodljiva, saj se prilagajajo spremembam v okolju. Relativno enostavno jih je mogoče programirati in prilagoditi za izvajanje različnih opravil. Avtomatsko vodena vozila pa so zasnovana za vnaprej določene poti in opravila, zato so manj prilagodljiva spremembam v okolju. Sprememba njihovih poti ali opravil zahteva spremembo fizične infrastrukture. Vpeljava avtonomnih vozil vključuje kartiranje oz. kreiranje karte prostora, v katerem bo vozilo delovalo, konfiguracijo vozila in programiranje transportnih opravil. Vpeljava teh vozil ne zahteva namestitve fizičnih poti ali kakšnih drugih posegov v obstoječo infrastrukturo. Pri vpeljavi avtomatsko vodenih vozil pa je potrebno okolje prilagoditi in namestiti sledilne poti, kar pa je lahko precej dolgočasno in cenovno zahtevno. Avtonomna vozila so primerna za izvajanje nalog v dinamičnih okoljih,

kot so skladišča ali proizvodni obrati, kjer se vozila gibljejo v neposredni bližini ljudi, opreme in drugih ovir. Avtomatska vozila pa se uporabljajo v transportnih procesih, kjer so poti v naprej točno določene in se praviloma s časom ne spreminjajo. Avtonomna vozila veljajo za dolgoročno stroškovno bolj učinkovita, saj zahtevajo manj investicij v infrastrukturo in se lahko prilagajajo spreminjajočim se potrebam.



Slika 6.2: Velikost svetovnega trga avtonomnih mobilnih robotov (AMR) od leta 2016 do 2021 z napovedjo do leta 2028

Vir: (Statista., 2023).

1.1 Vrste vozil

Na tržišču obstaja precej različnih vrst avtonomnih in avtomatsko vodenih vozil, med drugim (Wikipedija, 2023):



- Paletni vozički (ang. Pallet Trucks); ta vozila se primarno uporabljajo za transport palet in ne vsebujejo mehanizma za avtomatsko nalaganje/odlaganje tovora. Vozila vsebujejo le mehanizem, ki omogoča dvig in spust palet v območju nekaj centimetrov.
- Viličarji (ang. Fork Trucks); le-ti so opremljeni z vilicami in se primarno uporabljajo za samostojen transport tovora na paletah. Uporabljajo se predvsem pri transportih, kjer obstaja višinska razlika med nalaganjem in odlaganjem. Ta vrsta vozil sodi med dražja vozila.
- Vlečna vozila (ang. Towing Trucks); ta vozila so zasnovana za vleko pasivnih vozičkov ali prikolic, naloženih z različnim tovorom. Pogosto se

uporabljajo v proizvodnih procesih za oskrbo montažnih linijah s potrebnim materialom.

- Unit Load vozila so zasnovana za prevoz različnega tovora, kot so palete, zaboji ali kontejnerji. Vozila vsebujejo ploščad, ki vključuje mehanizem za dviganje/spuščanje tovora, transportne valjčke z/brez pogona, tračne transporterje itd.
- Vozila za lažji tovor (ang. Light Load) so vozila z nosilnostjo do 500 kg. Uporabljajo se za prevoz lažjih predmetov, kot so škatle, košare, ali drugi materiali.
- Specializirana vozila (ang. Specialized Trucks); ta vozila so prilagojena posebnim aplikacijam, kot so na primer izvajanje transporta v čistih sobah, nevarnih snovi v kemičnih obratih itd.

V tabeli 6.1 so zbrane povezave do YouTube videoposnetkov, ki prikazujejo različne vrste vozil. Do videoposnetkov je mogoče dostopati s klikom na YouTube ikono. V kolikor povezava ne deluje, je mogoče videoposnetek poiskati na portalu YouTube z uporabo pripadajočih ključnih besed.

Tabela 6.1: Primeri različnih vrst avtonomnih in avtomatsko vodenih vozil

Vrsta vozila	Video	Ključne besede
Paletni vozički		Nipper B.V., Nipper AGV
viličarji		Jungheinrich UK, AGV Forklift Trucks by Jungheinrich
vlečna Vozila		DF Automation, AGV towing multiple trolleys
		JD Universal, Unidirectional Towing AGV for Logistics Transportation
Unit Load		Dematic, Unit Load AGV - Warehouse Automation by Egemin Automation Inc.
		IBG Automation, AGV - Automated Guided Vehicle
Vozila za lažji tovor		SSI SCHAEFER Group, Automated Guided Vehicle Weasel®, E-Commerce, Supply Chain, Hermes Fulfilment GmbH

1.2 Uporaba avtonomnih vozil v intralogistiki

Avtonomni mobilni roboti se v intralogistiki in skladiščih uporabljajo za različne namene, kot so:

- oskrba proizvodnih delovnih mest,
- prevoz blaga v skladiščih in distribucijskih centrih,
- podpora pri procesu komisioniranja,
- itd.

V industriji se avtonomni mobilni roboti uporabljajo predvsem za oskrbo proizvodnih delovnih postaj s potrebnim materialom. To oskrbo zagotavljajo namenska avtonomna vozila, kot so na primer avtonomni viličarji, ali pa univerzalna avtonomna vozila, ki se jim z gornjim modulom (ang. top module) spremeni funkcionalnost, ter na tak način prilagodi specifičnim nalogam. Za oskrbo proizvodnih delovnih mest v praksi najpogosteje zasledimo: (a) vlečna vozila, (b) vozila s poličnim regalom, (c) s transportnim sistemom in (d) z dvižno mizo.

V skladiščih in distribucijskih centrih se avtonomna vozila uporabljajo predvsem za podporo pri komisioniranju. Pri komisioniranju tipa »blago k človeku« se uporabljajo mobilni regali in avtonomni mobilni roboti z dvižnim mehanizmom. Vozilo v skladišču dvigne celoten regal in ga prenese do delovne postaje, kjer se nahaja komisionar. Ko le-ta pobere zahtevane izdelke iz regala, AMR prenese regal nazaj v skladišče. Pri komisioniranju tipa "človek k blagu" pa avtonomna vozila nudijo podporo komisionarju. Komisionarji se premikajo po hodnikih med regali s policami in pobirajo blago v skladu z naročilom v delovnem nalogu. Komisionarji poberejo blago s polic in ga odložijo v škatle, ki se nahajajo na avtonomnem vozilu, le-to pa poskrbi za transport blaga do vhodno/izhodnega območja skladišča.

2 Avtonomni mobilni roboti

Avtonomni mobilni roboti vsebujejo številne komponente (podsisteme), ki omogočajo avtonomno zaznavanje okolja, lokalizacijo, navigacijo in izvajanje transportnih opravil. Med pomembnejšimi so.

- Senzorski sistem; le-ta vsebuje številne senzorje (inercialni, optični, 3D kamere, ultrazvočni senzorji itd.), s pomočjo katerih vozilo zaznava okolico. Dodatno imajo k osnovnim senzorjem nekatera vozila tudi druge senzorje, ki se uporabljajo za posebne naloge, kot so: čitalniki črtne kode, čitalniki

radiofrekvenčne identifikacije (ang. Radio Frequency Identification, RFID) ali okoljski senzorji.

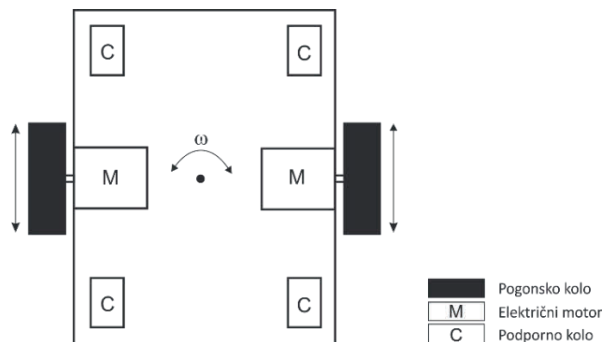
- Lokacijski sistem; avtonomni mobilni roboti morajo poznati svojo točno lokacijo v okolju, v katerem se nahajajo. To zagotavlja lokalizacijski sistem, ki na podlagi podatkov, pridobljenih iz različnih senzorjev, oceni trenutni položaj in orientacijo robota glede na njegovo interno karto.
- Navigacijski sistem; navigacijski sistem predstavlja ključno komponento za avtonomno delovanje vozil, saj je ta sistem zadolžen za načrtovanje poti. Na osnovi začetne in končne lokacije ter ob upoštevanju omejitev prostora (zidovi, prepovedana območja itd.) navigacijski sistem izračuna optimalno pot robota. V primeru zaznane ovire na izračunani poti pa poišče alternativno.
- Varnostni sistem; avtonomna vozila v nobenem primeru ne smejo ogrožati varnosti ljudi in/ali opreme. Posledično vozila vključujejo različne varnostne komponente, kot so varnostni laserski skenerji, senzorji za zaznavanje trkov, gumbi za zaustavitev v sili, ki zagotavljajo varno delovanje vozila tudi v neposredni bližini ljudi.
- Sistem za upravljanje baterij; avtonomni mobilni roboti so praviloma baterijsko napajani. Sistem za upravljanje baterij zagotavlja optimalno delovanje baterij z namenom doseganja čim daljše življenjske dobe le-teh.
- Komunikacijski sistem; le-ta omogoča komunikacijo z drugimi sistemi. Pri avtonomnih mobilnih robotih se najpogosteje uporabljajo moduli za brezžično komunikacijo (npr. Wi-Fi ali Bluetooth).
- Uporabniški vmesnik; uporabniški vmesnik, ki je praviloma dosegljiv preko posebnega zaslona na dotik ali spletnega vmesnika, omogoča spremljanje trenutnega stanja robota, ročno upravljanje robota, prikaz obvestil in opozoril, prikaz karte območja, programiranje robota itd.
- Pogonski sistem; pogonski sistem vključuje pogonske motorje, reduktorje, kolesa in krmilnike pogonskih motorjev. Z ustreznim krmiljenjem pogonskih koles vozilo sledi predhodno izračunani poti.
- Sistem strojnega učenja in umetne inteligence; nekatera napredna vozila vključujejo tudi sisteme strojnega učenja in umetne inteligence. Ti sistemi se uporabljajo za prepoznavanje predmetov, optimizacijo poti, opraviil itd.

2.1 Konfiguracije pogonskega in krmilnega sistema

Avtonomna in avtomatsko vodena vozila vsebujejo pogonski in krmilni sistem. Pogonski sistem omogoča pomik vozila v vzdolžni smeri, krmilni pa zasuk vozila. Generalno gledano obstajajo štiri osnovne konfiguracije pogonskega in krmilnega sistema (Roboteq Inc., 2013):

1. Diferencialni pogon (ang. Differential drive):
 - s štirimi pogonskimi kolesi.
 - z dvema pogonskima kolesoma in enim ali več podpornih koles (ang. Castor wheel).
2. Kolesni pogon (ang. Steer drive): vsebuje kolo, ki je hkrati pogonsko in krmilno.
3. Avtomobilski (ang. Ackerman) pogon. Pri tej konfiguraciji sta zadnji kolesi pogonski, sprednji pa krmilni.
4. Mecanum (ang. Mecanum) konfiguracija je podobna tisti pri diferencialnem pogonu s štirimi pogonskimi kolesi, namesto navadnih koles pa so uporabljena t. i. mecanum oz. švedska kolesa. Z ustreznim vodenjem teh koles je mogoče doseči pomik mobilnega robota v poljubni smeri.

Pri avtonomnih in avtomatsko vodenih vozilih je najpogosteje uporabljen diferencialni pogon z dvema pogonskima kolesoma (slika 6.3), saj je ta konfiguracija precej preprosta za izvedbo in hkrati omogoča dovolj natančno krmiljenje vozila. Ta konfiguracija diferencialnega pogona vključuje tudi eno ali več podpornih koles, ki preprečujejo prevračanje vozila. Pogonski kolesi sta vpeti na isti osi, hitrost vrtenja posameznega kolesa pa je določena s hitrostjo vrtenja pripadajočega električnega motorja. Če se pogonski kolesi vrtita z enako hitrostjo, vozilo pelje naravnost, v nasprotnem primeru pa vozilo zavija v smeri kolesa, ki se vrti počasneje. Vozilo z diferencialnim pogonom se lahko tudi zavrti na mestu (okrog osi vrtenja), in sicer tedaj, ko se kolesi vrtita z enako hitrostjo, pri čemer pa se eno vrti naprej, drugo pa nazaj.



Slika 6.3: Diferencialni pogon z dvema pogonskima in štirimi podpornimi kolesi

Vir: lasten.

Tabela 6.2 vsebuje povezave do YouTube video vsebin, v katerih so prikazani principi delovanja različnih konfiguracij pogonskega in krmilnega sistema.

Tabela 6.2: Primeri konfiguracij pogonskega in krmilnega sistema

Konfiguracija	Video	Ključne besede
Diferencialni pogon		Kollmorgen – Autonomous Mobile Solutions, AGV Vehicle Types, Differential drive
Kolesni pogon		Kollmorgen – Autonomous Mobile Solutions, AGV Vehicle Types, Steer drive
		SICK AG, Monitoring automated guided vehicles (AGV) - with Safe Motion Control from SICK
Mecanum		ERobtic, ERobtic Mecanum Wheel
		Torwegge GmbH & Co. KG, TORsten Mecanum Rad Animation TORWEGGE
		KUKA - Robots & Automation, Clever Autonomy for Mobile Robots - KUKA Navigation Solution
		Neobotix GmbH , Neobotix mobile Roboterplattformen

2.2 Zunanji in notranji senzorji

Avtonomna vozila vsebujejo številne zunanje in notranje senzorje. Zunanji senzorji se uporabljajo za zaznavanje okolice, notranji pa za detekcijo notranjih procesnih veličin. Za zaznavanje okolja, lokalizacijo in navigacijo se uporabljajo kombinacije podatkov, pridobljenih iz različnih senzorjev. Najpogosteje uporabljeni senzorji so:

- Inercialne merilne enote (ang. Inertial Measurement Units, IMUs). Le-te se uporabljajo pri ohranjanju stabilnosti vozila in pri lokalizacijskih ter navigacijskih algoritmih. IMU vključujejo tri osnovne senzorje, in sicer: (1) 3-osni merilnik pospeška (ang. Accelerometer), ki meri pospeške vozila v vseh treh smereh (x, y, z), (2) 3-osni žiroskop (ang. Gyroscope), ki meri kotno hitrost oz. hitrost vrtenja vozila okoli posamezne osi, (3) 3-osni magnetometer (ang. Magnetometer), ki meri jakost in smer magnetnega polja v vseh treh oseh. V kombinaciji z drugimi senzorji podatki inercialne merilne enote izboljšajo natančnost ocene lokacije robota.
- LiDAR senzorji (ang. Light Detection And Ranging). Ti senzorji so ključna senzorska komponenta, ki se v avtonomnih mobilnih robotih uporablja za navigacijo, zaznavanje ovir, kartiranje in lokalizacijo. LiDAR senzorji z uporabo laserskih žarkov merijo razdalje do predmetov v okolici robota, kar omogoča natančno kartiranje prostora in navigacijo.
- Senzorji pogonskih koles; le-ti so nameščeni na pogonskih motorjih in tako zajemajo hitrost ter položaj pogonskih koles. Ti senzorji omogočajo grobo določitev smeri in hitrosti gibanja vozila. Zaradi različnih pogreškov (naključnega drsenja pogonskih koles, geometričnih napak, ločljivosti inkrementalnih dajalnikov ...) takšen sistem določanja hitrosti vozila ni absolutno točen, zato so potrebni dodatni senzorji (merilniki pospeška, žiroskopi itd.), ki oceno o hitrosti gibanja dopolnjujejo z natančnejšimi meritvami. Senzorji pogonskih koles zagotavljajo informacije, ki pomagajo pri lokalizaciji vozila, predvsem pri algoritmih, ki temeljijo na odometriji (ang. Odometry).
- Ultrazvočni senzorji (ang. Ultrasonic Sensors) oddajajo zvočne valove in merijo čas, v katerem se oddani valovi odbijejo od zaznanih objektov. Uporabljajo se predvsem za detekcijo transparentnih objektov, kot so npr.

steklena vrata, ki jih optični senzorji (LiDAR, kamere) težje ali pa sploh ne zaznajo.

- Sistemi kamer se uporabljajo za vizualno zaznavanje objektov, predvsem tistih, ki jih z drugimi senzorji ni mogoče zaznati. LiDAR senzorji zaznavajo objekte v ravnini, ki je za določeno razdaljo odmaknjena od tal (višina je odvisna od namestitve senzorja na mobilno platformo). Objektov, ki se nahajajo višje ali nižje od te ravnine, LiDAR senzorji ne zaznajo. Za zaznavo takšnih objektov se uporabljajo 3D kamere, ki so praviloma nameščene na sprednji strani vozila.
- Radarski senzorji (ang. Radar Sensors) oddajajo radijske valove in merijo čas preleta od oddaje do sprejema. Radarji uporabljajo radiofrekvenčne (RF) signale, običajno v mikrovalovnem pasu in omogočajo zaznavo predmetov na razmeroma velikih razdaljah. V primerjavi z optičnimi senzorji, kot so LiDAR ali kamere, na radar manj vplivajo neugodne vremenske razmere, kot so dež, megla ali sneg, zato so primerni za avtonomna vozila, ki delujejo na prostem. Imajo pa radarji na splošno manjšo ločljivost v primerjavi z LiDAR senzorji, zato so manj primerni za kartiranje prostora ali zaznavanje manjših predmetov.
- Senzorji dotika (ang. Touch sensors); ti senzorji se uporabljajo za zaznavo trkov s predmeti. V splošnem se za detekcijo ovir uporabljajo brezkontaktni in kontaktni sistemi. Slednji se uporabljajo pri avtomatsko vodenih vozilih, pri avtonomnih pa se praviloma uporabljajo brezkontaktni sistemi. Kot kontaktni sistem se uporabljajo varnostni odbijači, znotraj katerih so nameščeni senzorji dotika. Ti senzorji se aktivirajo, ko pride do neposrednega stika vozila z oviro.
- Globalni sistem za določanje položaja (ang. Global Positioning System, GPS). V nekaterih avtonomnih mobilnih robotih se uporablja tehnologija globalnega sistema za določanje položaja, ki zagotavlja podatke o globalnem položaju vozila, kjer koli na zemeljski obli. To je še posebej uporabno pri vozilih, ki se uporabljajo na prostem, kot je npr. kmetijstvo ali dostava v zadnji milj. Signali GPS ne morejo prodreti v notranjost zgradb, zato se v vozilih, ki delujejo v zaprtih prostorih, ne uporabljajo.
- Ostali senzorji; odvisno od namena uporabe lahko avtonomna vozila vsebuje tudi ostale senzorje, kot so npr. senzorje za merjenje zunanjih

veličin (temperatura, vlažnost, koncentracija plinov), senzorje za detekcijo črtnih kod, RFID oznak itd.

2.2.1 Varnostni laserski skenerji

Varnostni laserski skenerji (slika 6.4) omogočajo brezkontaktno detekcijo objektov o okolici mobilnega robota. Ti senzorji imajo t. i. varno območje (ang. Safety zone) in dve ali več opozorilnih območij (ang. Warning zones), ki so nastavljiva in namenjena različnim podpornim funkcijam, kot je npr. opozorilni zvok. Če vozilo zazna oviro znotraj opozorilnega območja (rumeno in oranžno območje) v smeri gibanja, mora začeti z normalnim zaviranjem. Če se zaznan objekt nahaja znotraj varnega območja (rdeče območje), pa se mora vozilo zasilno zaustavi z uporabo vgrajene zavore (Wikipedija, 2023). Sodobni varnostni laserski skenerji omogočajo konfiguracijo več območij, in sicer s pomočjo pripadajoče programske opreme. AMR-ji praviloma vsebujejo dva ali več varnostnih laserskih skenerjev. Najpogosteje se uporabljata dva, ki sta nameščena na diagonalnih robovih vozila. Takšna namestitvev omogoča 360° zaznavanje okolice vozila, kar pomeni, da lahko AMR zaznava tudi objekte, ki se nahajajo ob boku vozila. To je še posebej pomembno v primeru zasuka robota na mestu.






Slika 6.4: Primer varnostnega laserskega skenerja

Vir: (SICK AG, 2018)

Varnostni laserski skenerji se uporabljajo za brezkontaktno detekcijo objektov na številnih področjih (tabela 6.3), zelo pogosto jih zasledimo na področju varovanja delovnih območij industrijskih robotov.

Tabela 6.3: Primeri delovanja in uporabe varnostnih laserskih skenerjev

Področje uporabe	Video	Ključne besede
Mobilni roboti		SICK AG , Monitoring automated guided vehicles (AGV) - with Safe Motion Control from SICK
Robotske celice		SICK Sensor Intelligence, Safe Robotics: Safe sequence monitoring
		SICK AG, Safe Robotics: Palletizing application

2.3 Lokacijski in navigacijski sistemi

Avtonomna in avtomatsko vodena vozila vsebujejo lokacijski in navigacijski sistem, Pri avtomatsko vodenih vozilih je le-ta precej preprosto, saj vozila le sledijo vnaprej določenim potem. Avtonomna vozila pa vsebujejo širok nabor senzorjev in napredne navigacijske algoritme, kar jim omogoča prilagajanje transportnim potem v spreminjajočem okolju.

2.3.1 Avtomatsko vodena vozila

Pri avtomatsko vodenih vozilih se za označitev poti najpogosteje uporabljajo sledilne žice in sledilni trakovi (tabela 6.4). Sledilna žica je najstarejši sistem za usmerjanje vozil in se še danes uporablja, predvsem zaradi svoje visoke natančnosti in zanesljivosti. Vendar pa ima ta sistem eno pomembno omejitev; žico je namreč potrebno namestiti v posebno režo pod površino tal, približno 1 cm globoko. To pomeni, da je potrebno izvesti fizične posege v infrastrukturo na območju, kjer bo vozilo izvajalo transportne naloge. Podoben poseg v infrastrukturo pa je potrebno izvesti tudi ob vsaki spremembi poti. Za razliko od sledilnih žic se sledilni trakovi nameščajo na površino tal. Njihova ključna prednost je predvsem v tem, da jih je mogoče enostavno odstraniti ali premestiti. Sledilni trakovi so lahko barvni ali magnetni. Najpogosteje se uporabljajo magnetni sledilni trakovi, saj so precej manj občutljivi na poškodbe in umazanijo.

Za detekcijo poti pa se uporabljajo tudi t. i. inercialni navigacijski sistemi (tabela 6.4), pri katerih ni potrebno označiti celotne poti vozila, temveč le določene točke. Inercialni sistemi temeljijo na merjenju pospeškov v vseh treh smereh (x , y , z) in kotov zasuka okrog vzdolžne, prečne in navpične osi vozila (Wikipedija. Prosta enciklopedija). Na podlagi izmerjenih pospeškov in kotov zasuka se s pomočjo

integracijskih metod oceni trenutni položaj vozila v prostoru. Zaradi različnih pogrškov (pogreški senzorjev, pogršek integracijske metode itd.) prihaja do razlik med dejanskim in ocenjenim položajem vozila, zato se pri tej navigaciji praviloma uporabljajo dodatne talne oznake. Ko vozilo prečka takšno oznako, s senzorjem zazna njen točen položaj in popravi ocenjen položaj vozila. Praviloma se kot oznake uporabljajo majhni trajni magneti, obstajajo tudi rešitve, kjer se uporabljajo RFID ali QR oznake.









2.3.2 Avtonomna vozila

Pri avtonomnih vozilih se za lokalizacijo in navigacijo pogosto uporabljata dve metodi, in sicer 2D lasersko skeniranje in SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping).

2D lasersko skeniranje deluje na principu merjenja odboja laserskega žarka od fiksno nameščenih odsevnikov v prostoru. Na podlagi odboja laserskih žarkov iz različnih odsevnikov se s pomočjo triangulacije določi trenutni položaj vozila. Laserska tehnologija zagotavlja visoko odpornost na lažne refleksije in visoko natančnost določitve položaja. Običajno se ta tehnologija uporablja na nekoliko višjih platformah, na primer v viličarjih, saj je v teh primerih laser nameščen dokaj visoko in posledično ob prisotnosti ljudi ne prihaja do prekinitve laserskih žarkov.

Pri uporabi SLAM algoritmov si vozilo izgradi konsistentno karto območja, v katerem se nahaja, hkrati pa tudi določi trenutno lokacijo na tej karti. SLAM pogosto vključuje združevanje senzorjev, pri katerem se združujejo podatki iz več senzorjev, da se izboljša natančnost kartiranja in lokalizacije. SLAM algoritme klasificiramo na osnovi senzorjev, ki jih le-ti primarno uporabljajo. LiDAR SLAM prioriteto uporablja LiDAR za zaznavo okolice, medtem ko npr. Visual SLAM uporablja sistem strojnega vida oz. kamere kot primarnega senzorja. SLAM je primeren za neznana ali dinamična okolja, kjer se lahko postavitev obratov s časom spreminja. Algoritmi SLAM so računsko zelo potratni in posledično zahtevajo veliko procesorske moči in pomnilnika. SLAM je odvisen od kakovosti in natančnosti senzorjev, zato je kalibracija senzorjev ključnega pomena.

Tabela 6.4: Primeri delovanja različnih lokacijsko-navigacijskih sistemov

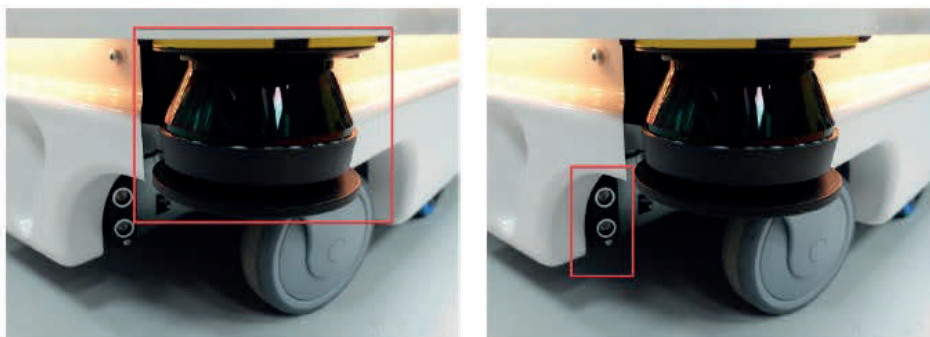
Lokacijski in navigacijski sistem	Video	Ključne besede
Sledilna žica		Jungheinrich AG, Jungheinrich Inductive Guidance for Forklift Trucks
		Götting KG, Götting FTF Spurführungstechnologien / AGV Track Guidance Technologies
Sledilni trakovi		Götting KG, Götting FTF Spurführungstechnologien / AGV Track Guidance Technologies
		Roboteq, Magnetic track following Mobile Robot demonstrator
Inercialni sistem		DS AUTOMOTION, Magnetic Navigation by DS AUTOMOTION GmbH - Automated Guided Vehicle (AGV)
2D laser		Götting KG, Götting FTF Spurführungstechnologien / AGV Track Guidance Technologies
		DS AUTOMOTION, Laser navigation by DS AUTOMOTION GmbH - Automated Guided Vehicle (AGV)
SLAM		cygbot lab, 2D / 3D Dual SLAM Robot using ROS and LiDAR with Raspberry Pi

3 Avtonomno vozilo MiR100

MiR100 (Mobile Industrial Robots., 2023a) je avtonomno vozilo z nosilnostjo do 100 kg proizvajalca Mobile Industrial Robots. Uporabljati ga je mogoče izključno v zaprtih proizvodnih prostorih, v skladiščih ali znotraj drugih industrijskih objektov. MiR100 (slika 6.5) ima vgrajena dva varnostna laserska skenerja (slika 6.6), ki sta nameščena na diagonalnih robovih robota in tako omogočata skeniranje celotnega območja v njegovi okolici. Vozilo vsebuje tudi ultrazvočne senzorje (slika 6.6) in 3D kamero. Posledično lahko vozilo MiR100 obratuje v neposredni bližini ljudi in ostalih dinamičnih ovir, zmožno je peljati skozi ožje hodnike ali vrata. MiR100 deluje na diferencialni pogon in sicer ima dve pogonski kolesi in štiri podporna kolesa (ang. Castor wheel). Vozilo je možno ročno upravljati preko vgrajenega spletnega vmesnika, primarno pa je vsekakor namenjen samostojnemu izvajanju različnih transportnih nalog. Robot izvaja lokalizacijo in navigacijo preko zemljevida, ki se lahko uvozi ali ustvari ob prvem zagonu.

**Slika 6.5: MiR100**

Vir: lasten.

**Slika 6.6: Varnostni laserski skener (levo) in ultrazvočni senzor (desno)**

Vir: lasten.






MiR100 predstavlja osnovno mobilno platformo, na katero je mogoče namestiti različne zgornje module (ang. Top Modules) in s tem spremeniti funkcionalnost vozila (slika 6.7). Dodatek MiR Hook 100, na primer, spremeni vozilo MiR100 v vlečno vozilo in tako omogoča vleko tovora, ki se nahaja na pripetih vozičkih. Primeri nekaterih dodanih zgornjih modulov za vozilo MiR100 so navedeni v spodnji tabeli 6.5.



Slika 6.7: Primer zgornjega zaklepnega modula.

Vir: lasten.

Tabela 6.5: Primeri gornjih modulov za vozilo MiR100

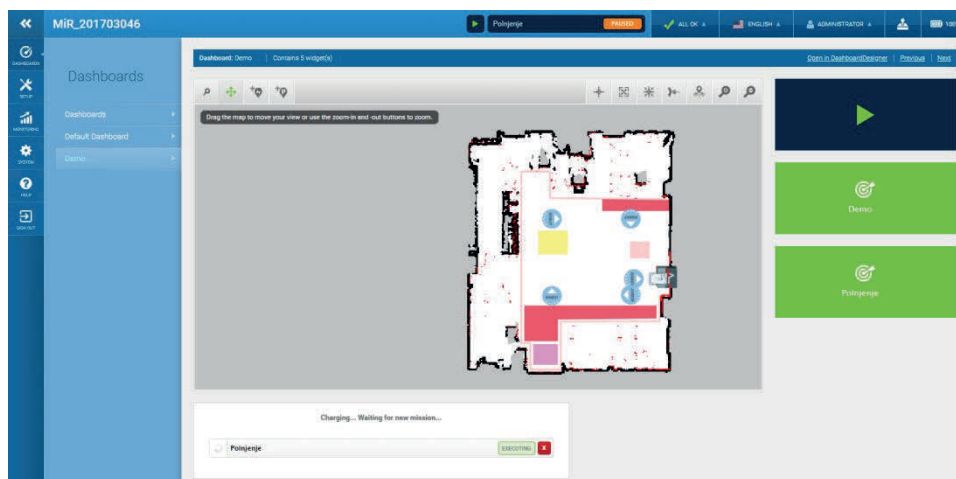
Gornji modul	Video	Ključne besede
Valjni, tračni	 	Omni Automation, MiR 100 Robot - Top Module Roller Conveyor Mobile Industrial Robots, MiR100 hos SAXE på Elmia Automation 2016
Zaklepni		Robotcenter, Clamp top module for MiR100/MiR200
Vlečni		Mobile Industrial Robots, MiR 100 Hooking a Trailer Automatically
S sodelujočo robotsko roko		Mobile Industrial Robots, MiR100 with UR cobot arm at SGIMRI

3.1 Uporabniški vmesnik

Roboti MiR imajo vgrajeno Wi-Fi dostopno točko, preko katere je mogoče dostopati do uporabniškega vmesnika robota. Uporabniški vmesnik, ki je zasnovan v obliki spletne strani, omogoča: (1) kreiranje nadzornih plošč, (2) kartiranje prostora, (3) kreiranje misij, (4) spremljanje trenutnega stanja robota, (5) upravljanje uporabnikov, (6) ročno vodenje robota, (7) posodobitve programske opreme itd.

Nadzorne plošče omogočajo neposreden dostop do posameznih ključnih funkcij robota in so predvsem namenjene različnim skupinam uporabnikov. Posamezna nadzorna plošča je sestavljena iz vizualnih gradnikov (ang. Widget), ki predstavljajo

značilnosti sistema, kot je npr. določena misija, zemljevid, trenutna čakalna vrsta misij itd. Nadzorne plošče je mogoče kreirati in urejati z vgrajenim urejevalnikom nadzornih plošč (ang. Dashboard designer). Primer nadzorne plošče je prikazan na spodnji sliki (slika 6.8).



Slika 6.8: Primer izdelane nadzorne plošče

Vir: lasten.

Vozilo je mogoče ročno upravljati s pomočjo virtualne igralne palice (ang. Joystick), ki je sestavni del uporabniškega vmesnika. Preko uporabniškega vmesnika je mogoče kreirati več uporabniških računov z različnimi dovoljenji, kar omogoča nadzorovan dostop do posameznih funkcij robota. Preko uporabniškega vmesnika je mogoče spremljati tudi trenutno stanje robota (njegova lokacijo na zemljevidu, stanje baterije, sporočila o napakah in opozorilih itd).

3.2 Kartiranje in urejanje kart

Kartiranje oz. izdelovanje zemljevidov območja je najpomembnejši postopek, ki vozilu omogoča samostojno delovanje v izbranem prostoru. Izdelava karte poteka v dveh korakih. V prvem koraku se na robota naloži CAD datoteko obstoječe karte prostora, ali pa se karto kreira z ročnim vodenjem robota. V drugem koraku pa se karto uredi z uporabo vgrajenega urejevalnika. Vgrajena funkcionalnost kartiranja omogoča kreiranje zemljevida z ročnim premikanjem robota po prostoru z uporabo

vgrajene virtualne igralne palice. Med premikanjem se zajemajo podatki iz varnostnih laserskih skenerjev in na podlagi le-teh robot izdelava karto prostora. Po zajemu karte sledi urejanje. Dodatno k nepremičnim objektom (npr. stene) so v procesu kreiranja namreč zajeti tudi t. i. dinamični objekti (ljudje, viličarji, vozički, stoli, palete itd.), ki se v trenutku zajemanja nahajajo v okolici vozila. Te objekte je potrebno odstraniti, saj lahko v nasprotnem primeru podaljšajo dolžino poti vozila. Pri skeniranju lahko pride tudi do napak pri zaznavanju nepremičnih objektov (npr. sten) in posledično se objekti na karti prikažejo kot prekinjene črte. V tem primeru je takšne objekte treba z uporabo vgrajenih orodij na karti popraviti ali dodatno narisati.

Na urejeni karti je z uporabo dodatnih orodij možno določiti: (1) priporočljiva območja vozila (ang. Preferred zones), (2) nepriporočljiva območja (ang. Unpreferred zones), (3) nedovoljena oz. prepovedana območja vozila (ang. Forbidden zones), (4) kritična območja (ang. Critical zones), (5) hitrostna območja (ang. Speed zones), (6) območja signalizacije (ang. Blink zones, Beep zones) itd.

Posamezna območja imajo naslednji pomen:

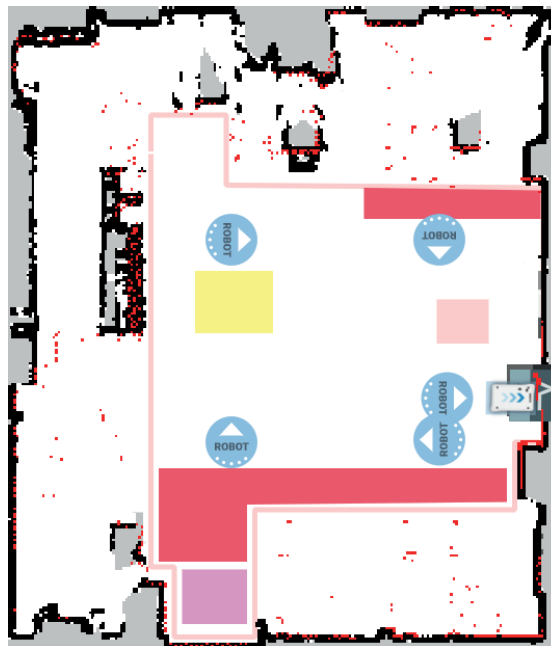
- Priporočljivo območje (ang. Preferred zones): robot vedno poskuša peljati po tem območju.
- Nepriporočljivo območje (ang. Unpreferred zones): robot se poskuša izogniti temu območju, vendar, če ni druge možnosti, lahko pelje tudi po tem območju.
- Prepovedano območje (ang. Forbidden zones): v to območje robot ne sme nikoli vstopiti.
- Kritična območja (ang. Critical zones): ovire, ki so zaznane s pomočjo nameščenih kamer ali skenerjev, so v tem območju prezrte. To robotu omogoča, da se lahko približa oviram brez sprožitve varnostnega sistema zaustavitve. Ko robot zapusti to območje, se zaščitne funkcije ponovno aktivirajo. To območje je uporabno npr. pri ozkih prehodih, vratih itd.
- Usmerjevalna območja (ang. Directional zones): določajo smer gibanja robota. Robot se v tem območju lahko premika le v izbrani smeri.
- Hitrostna območja (ang. Speed zones): v teh območjih je možno povečati ali zmanjšati hitrost vozila. Zmanjšanje hitrosti se npr. uporabi, če se vozilo

nahaja v območju z veliko ljudmi. Privzeta hitrost robota je 1 m/s, minimalna 0,1 m/s in maksimalna 1,5 m/s.

- Območja signalizacije (ang. Blink zones, Beep zones): med vožnjo v tem območju lahko robot predvaja izbran zvok in/ali ustrezno signalizira z vgrajenim LED svetlobnim trakom. Signalizacija se primarno uporablja za opozarjanje ljudi na prisotnost robota.
- Območje I/O modula: ob vstopu v to območje robot aktivira vhodno/izhodni (ang. Input / Output) modul.

Na spodnji sliki (slika 6.9) je prikazan primer urejene karte z dodanimi posebnimi območji.

Pred kreiranjem transportnih opravil (misi) je na kreirani karti potrebno določiti še pozicijske točke (markerje); to so točke v prostoru, do katerih se robot lahko zapelje. Posamezna točka vsebuje ime, X in Y koordinato točke v metrih ter orientacijo vozila v stopinjah.



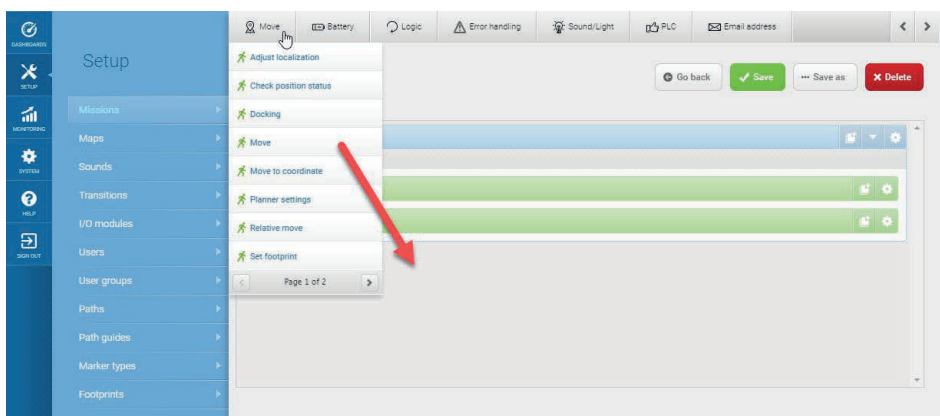
Slika 6.9: Primer urejene karte z dodanimi posebnimi območji

Vir: lasten.

3.3 Kreiranje misij

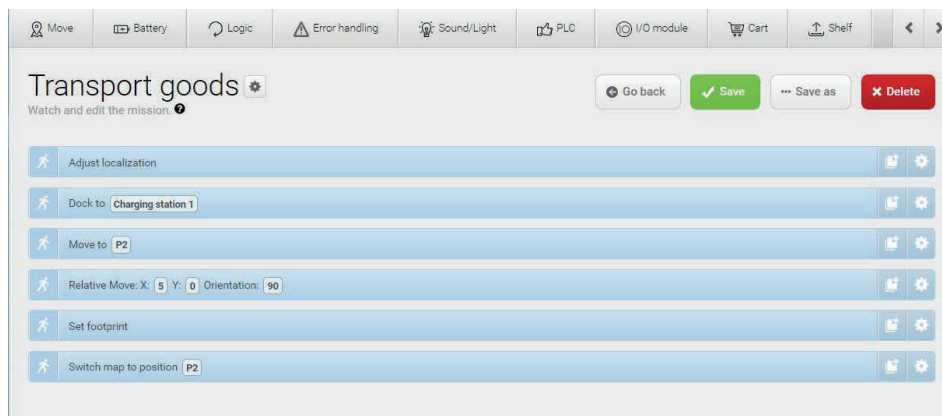
Po kreiranju karte sledi programiranje vozila oz. kreiranje t. i. misij (ang. Missions). Misija je sestavljena iz različnih dejanj, kot so: premik vozila, vklop/izklop digitalnega signala, priklop/odklop vozička itd. Posamezna dejanja predstavljajo osnovne gradnike za oblikovanje misij, le-te pa je možno uporabiti tudi znotraj drugih misij. Večina dejanj ima nastavljive parametre.

Misija je sestavljena iz posameznih dejanj oz. ukazov, ki jih je možno izbrati v menijih urejevalnika misij (ang. Mission Editor), slika 6.10. Ukazi so združeni v podmenije *Move*, *Battery*, *Logic* itd. Ukaz se v misijo doda tako, da se povleče v spodnji del urejevalnika, slika 6.10. Ukazi se izvajajo v zaporedju, in sicer od zgoraj navzdol. Parametre izbranega ukaza je možno spremeniti z izbiro ikone (zobnik), ki se nahaja na skrajno desni strani posameznega ukaza (slika 6.11).



Slika 6.10: Urejevalnik misij (Mission Editor)

Vir: lasten.



Slika 6.11: Primer kreirane misije

Vir: lasten.

4 Zaključek

Poglavje podaja bralcu osnovne informacije o delovanju avtomatsko vodenih in avtonomnih vozil ter opisuje praktične primere aplikacij. V kratkem pregledu področja avtomatsko vodenih in avtonomna vozila je moč opaziti, da eni in drugi uporabljajo različne senzorske sisteme za zaznavanje okolice in ovir. Z uporabo različnih pogonov dosegamo različne načine premikanja ter posledično kinematične in dinamične lastnosti vozil. Glavna razlika med avtomatskimi in avtonomnimi vozili je prisotna predvsem v sistemih odločanja, ki pa so neposredno povezani s sistemi zaznavanja. Na praktičnem primeru avtonomnega mobilnega robota MiR 100 je prikazano delovanje uporabniškega vmesnika ter osnovnih funkcij za delovanje v intralogističnih aplikacijah. Ugotovimo lahko, da je MiR 100 osnovna avtonomna platforma, ki pa za naprednejše aplikacije potrebuje dodatne module. Predvidevamo, da se bo uporaba avtonomnih mobilnih robotov v prihodnosti zvišala predvsem na račun nadgradnje obstoječih avtomatsko vodenih vozil ter avtomatizacije ročnih procesov.

Literatura

- Mobile Industrial Robots. (2023a). MiR100 User guide. Retrieved from <https://www.mobile-industrial-robots.com/>
- Mobile Industrial Robots. (2023b). Mobile Industrial Robots Web Site. Retrieved from <https://www.mobile-industrial-robots.com/>

- Roboteq Inc. (2013). Building a Magnetic Track Guided AGV, Application Note AN1326. Retrieved from <https://www.roboteq.com/index.php/applications/100-how-to/278-building-a-magnetic-track-guided-agv>
- SICK AG. (2018). SICK Web Site. Retrieved from <https://www.sick.com>
- Sieewart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*: MIT press. Statista. (2023). Global autonomous mobile robot market size 2016-2028. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/1285835/worldwide-autonomous-robots-market-size>
- Wikipedija. (2023). Automated Guided Vehicle. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle
- Wikipedija. Prosta enciklopedija. Inercialna navigacija. Retrieved from https://sl.wikipedia.org/wiki/Inercialna_navigacija