

Vodenje sodelujoče mobilne robotske celice

Peter Kmecl, Matjaž Mihelj, Marko Munih, Janez Podobnik

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: peter.kmecl@robo.fe.uni-lj.si

Control of a collaborative mobile robot cell

In recent years we have seen a steady growth in the use of mobile robots in industrial scenarios. The growth can be attributed to the improvement of battery and computer technologies as well as new autonomous control algorithms. This paper describes a mobile robot, developed in the Laboratory of robotics at the Faculty of Electrical Engineering, that serves as an autonomous collaborative mobile robot cell and was created as a response to the aforementioned trend. Its purpose is to allow research and development of collaborative mobile applications, as well as enable students to have access to a modern and open mobile robotics system. The paper provides a basic overview of the cell's electrical, communication and information systems as well as the software used to control and plan its movement.

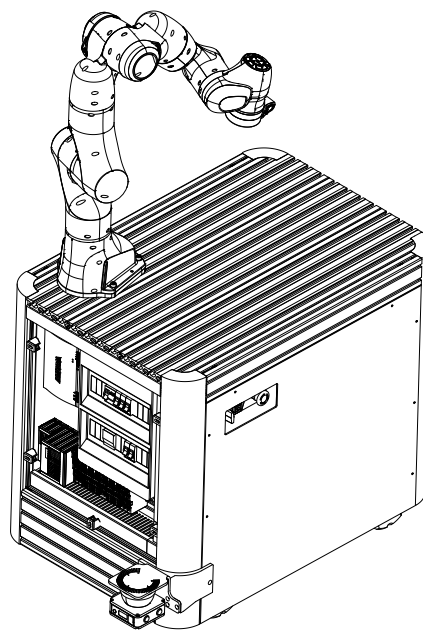
1 Uvod

Mobilna robotika je danes v porastu tako v vsakdanjem življenju, kot tudi v industrijskem okolju. Ključni napredki na področju baterijske tehnologije, procesorske moči in algoritmov vodenja nam omogočajo avtonomijo sistema in natančno vodenje, napredni senzorski sistemi pa zagotavljajo varnost in dovoljujejo deljenje robotovega delovnega prostora z ljudmi [1].

Uporabnost mobilnih robotov se še bistveno poveča, če platformo kombiniramo z robotskim manipulatorjem. Takemu sistemu rečemo tudi mobilni manipulator. Mobilni manipulatorji razširijo funkcionalnost obeh komponent v sistemu. Premična platforma manipulatorju poveča delovni prostor, platforma pa pridobi sposobnost samostojnega opravljanja nalog, ki zahtevajo fleksibilnost manipulatorja (pobiranje in odlaganje, izpolnjevanje naročil, oskrbovanje in vzdrževanje naprav itd.) [1, 2].

Zaradi vse večje uporabe tovrstnih sistemov v tovarnah in skladiščih, smo v Laboratoriju za robotiko na Fakulteti za elektrotehniko, UL razvili sodelujočo mobilno robotsko celico za raziskovalne in pedagoške namene.

V članku bomo predstavili napajalne, komunikacijske in računalniške sisteme robotske celice, ter visokonivojsko in nizkonivojsko programsko opremo, ki nam omogočata avtonomno vožnjo. Na kratko bomo omenili tudi njene varnostne sisteme in algoritme za lokalno načrtovanje poti, ki smo jih preizkusili.

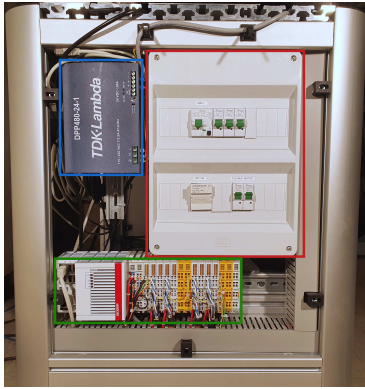


Slika 1: Skica sodelujoče mobilne robotske celice s pritrjenim manipulatorjem Franka Emika Panda.

2 Strojna oprema

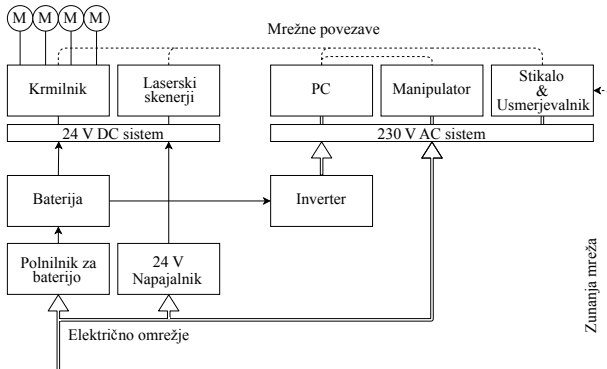
Osnovne funkcije povezane z mobilnostjo naše sodelujoče robotske celice nadzira Beckhoffov industrijski krmilnik oziroma PLC. Zasnovan je modularno in tako omogoča preprosto razširitev ter nadgradnjo funkcionalnosti, ki bi jo pri nadaljnjem razvoju morda potrebovali. Krmilnik vsebuje štirijedrni procesor in poganja operacijski sistem *Windows 10 embedded*. Nameščeno programsko okolje *TwinCAT3* omogoča dodelitev jeder specifičnim nalogam ter komunikacijo z moduli preko protokola *EtherCAT*. Taka izvedba krmilnika pripomore k preprostejši integraciji nizkonivojske strojne opreme v visokonivojski sistem preko standardnih protokolov in komunikacijskih poti. S posebnimi varnostnimi moduli krmilnik poskrbi tudi za osnovne varnostne funkcije. Poleg vodenja motorjev in varnosti krmilnik podaja osnoven uporabniški vmesnik, ki operaterju omogoča ročno premikanje platforme preko krmilne palice s tremi prostostnimi stopnjami. Skupaj z napajalniki in distribucijskimi sistemi je pritrjen na zadnji del platforme, ki je prikazan na sliki 2.

Na celico smo za povečanje mobilnosti vgradili 24 V



Slika 2: Napajalnik (modra), električni varnostni ter distribucijski sistemi (rdeča) in industrijski krmilnik (zeleni).

litij-železov polimerno baterijo s kapaciteto 50 Ah in 230 V inverter z maksimalno močjo 1 kW, ki skrbi za napajanje računalnika in robotskega manipulatorja. Električni sistemi so napeljeni v nadometno omarico za električno napeljavo, kjer s pomočjo varovalk in FID stikala poskrbimo za varnost (rdeč okvir na sliki 2). Za namene nadaljnjega razvoja so v celico vgrajeni vsi potrebni napajalni sistemi za napajanje celice preko električnega omrežja. Shema celotnega električnega sistema je prikazana na sliki 3.

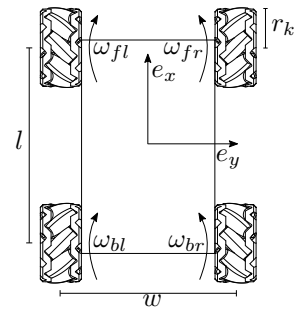


Slika 3: Blokovna shema električnih sistemov na celici.

Na krmilnik so povezani štirje servo motorji, na katere so preko reduktorjev nameščena *Mecanum* kolesa. Ta celica omogočajo premike po osi x in y , rotacijo okoli osi z , ter njihove poljubne kombinacije. Koordinatni sistem mobilne platforme celice, ter njegove osnovne oznake so prikazane na sliki 4.

Naprednejše funkcije vodenja se izvajajo na zmogljivem strežniškem računalniku, na katerega je nameščen operacijski sistem *ESXi*. Ta omogoča namestitev več virtualnih sistemov na en računalnik, kar pripomore h kompaktnosti in varčnosti robotske celice. Nizkonivojsko in visokonivojsko programsko opremo povezuje omrežje Ethernet.

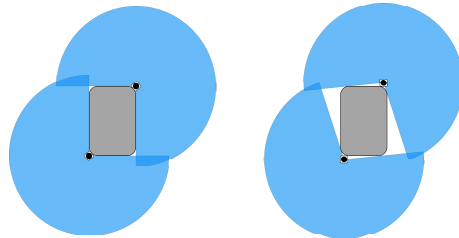
V komunikacijsko omrežje sta povezana tudi dva SICK laserska skenerja. Senzorja omogočata branje podatkov preko omrežja Ethernet in bosta uporabljena za zaznavanje ovir in izgradnjo zemljevida delovnega prostora. Podpirata varnostne digitalne izhode, ki se sprožijo



Slika 4: Koordinatni sistem in osnovne oznake podvozja celice.

v primeru zaznave ovire v vnaprej nastavljenem območju. Digitalni izhodi so povezani na varnostni krmilnik, ki poskrbi za varen izklop motorjev.

Pri laserskih skenerjih smo se morali odločiti za pozicijo in orientacijo pritrditve. Postavljeni morajo biti dovolj nizko, da zaznajo vse ovire na tleh, hkrati pa dovolj visoko, da človeka med hojo oziroma tekom še vedno zaznajo. Poleg višine smo se morali odločiti med dvema montažnima pristopoma - diagonalnim in kotnim. Diagonalni s svojimi varnostnimi polji pokrije celo okolico platforme, vendar znatno poveča profil platforme. Povečani profil oteži navigacijo po tesnih prehodih in približevanje statičnim delovnim površinam (angl. docking). Kotna pritrditev olajša prej omenjeno navigacijo, žrtvuje pa trikotne dele varnostnega polja tik ob platformi. Varnostna polja obeh pristopov so prikazana na sliki 5 [1].



Slika 5: Možni konfiguraciji laserskih skenerjev.

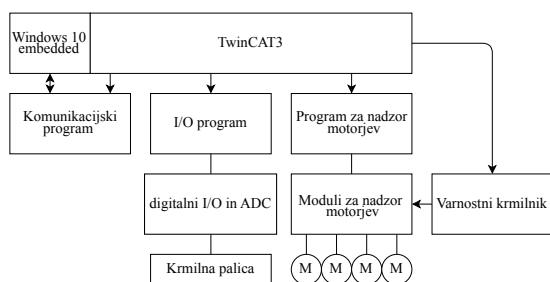
Celica ima na svojo delovno površino pritrjen tudi sodelujoč robotski manipulator Franka Emika Panda s 7 prostostnimi stopnjami, ki je viden na slikah 1 in 6.



Slika 6: Robotski manipulator, ki je pritrjen na celico.

3 Nizkonivojska programska oprema

Nizkonivojska programska oprema teče na Beckhoffovem industrijskem krmilniku. Njena naloga je omogočiti povezavo med strojno opremo, ter višjenivojskimi komponentami, ki skrbijo za pravilno delovanje robotske celice na nivoju aplikacije. V našem primeru jo sestavljajo štiri komponente: vodenje motorjev, obravnava vhodnih signalov, komunikacijski vmesnik ter obravnava varnostnih vhodov in izhodov. Blokovna shema sistema je prikazana na sliki 7.



Slika 7: Blokovna shema nizkonivojskega sistema vodenja.

Za nizkonivojsko programsko opremo je ključnega pomena izvajanje v realnem času s fiksnim časovnim intervalom, saj potrebujemo znano frekvenco izvajanja krmilne programske opreme za natančno računanje kinematike in odometrije mobilne platforme. To zagotovimo z dodelitvijo vsake programske komponente na lastno krmilniško jedro, kar nam omogoča izbiro fiksnega koraka izvajanja posamezne komponente v nadzornem vmesniku *TwinCAT3*. Varnostna logika teče na lastnem varnostnem krmilniku (angl. safety PLC) in je od ostalih komponent neodvisna [3].

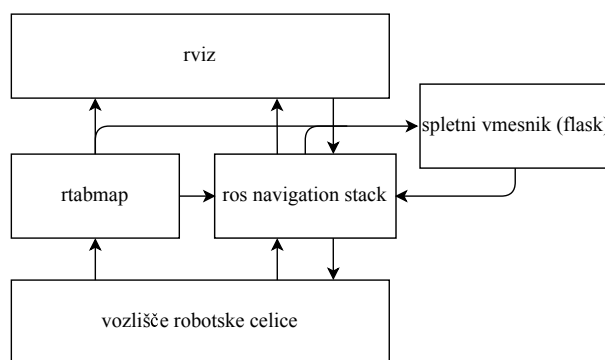
Vodenje motorjev je procesorsko najzahtevnejša komponenta nizkonivojske programske opreme. Vključuje matrično računanje kinematičnega modela in odometrije, za katerega krmilnik ni prilagojen, hkrati pa se mora za natančno delovanje izvajati s čim krajšim časovnim korakom. V našem primeru dela s frekvenco 1 kHz oziroma s časovnim korakom 1 ms [3].

Nizkonivojski programski modul za obdelavo signala je trenutno uporabljen le kot preprost integriran uporabniški vmesnik za ročno premikanje mobilne platforme preko krmilne palice. Za delovanje uporablja analogni vhodni modul in digitalni vhodno/izhodni modul. V nadaljnjem razvoju bi se nanj lahko priklopili dodatni senzori, potrebni za robustnejše in varnejše delovanje sodelujoče mobilne robotske celice.

Do nizkonivojskih funkcij mobilne celice, ki jih ponuja njena nizkonivojska programska oprema (odometrija, hitrostno krmiljenje itd.), si želimo dostopati preko visokonivojske programske opreme, zato med njima potrebujemo hiter komunikacijski vmesnik. S stališča hitrosti in preprostosti implementacije je najprimernejša tehnologija komunikacijskega vmesnika Ethernet, preko katerega lahko s protokolom UDP komuniciramo z zelo majhnimi zamiki. Komunikacijski vmesnik skrbi za pošiljanje informacij in odometrije ter za prejemanje in izvajanje ukazov, prejetih preko vmesnika UDP.

4 Visokonivojska programska oprema

Naloga visokonivojske programske opreme mobilne robotske celice je zagotovitev vmesnika za preprostejšo uporabo njenih ključnih sistemov, ter opravljanje in izvrševanje odločitev na nivoju aplikacije. Zasnovana je modularno na podlagi virtualizacije in odprtokodnega okolja *ROS* oziroma *Robot Operating System*. Okolje *ROS* zagotavlja standardizacijo komunikacijskega vmesnika med moduli, virtualizacija pa nam omogoča uporabo sicer nekompatibilnih operacijskih sistemov na enem zmogljivem strežniškem računalniku brez potrebe po dodatnem prostoru na platformi in z minimalnim povečanjem njene energijske porabe. S stališča vodenja premikov celice je najpomembnejši visokonivojski sistem *ROS*, katerega shema je prikazana na sliki 8 [1].



Slika 8: Poenostavljena blokovna shema visokonivojskega vodenja v sistemu ROS.

Za lokalizacijo smo uporabili *ROS*ov paket *rtabmap*, odprtokodno implementacijo algoritma za VSLAM (angl. Visual Simultaneous Localization And Mapping). Prednost paketa *rtabmap* pred ostalimi sorodnimi paketi je podpora različnih vrst 2D in 3D senzorjev. To nam omogoča dodajanje lidarjev, laserskih skenerjev in RGB-D kamer glede na dodatne potrebe brez spremembe strukture navigacijskega sistema. Hkrati podpira "večsejno" mapiranje (angl. multi-session mapping), lokalizacijo po ugrabitvi (angl. kidnapping) ter lokalizacijo na predhodno shranjenem zemljevidu, kar omogoča raznoliko delovanje v vseh okoliščinah [4, 5, 6, 7].

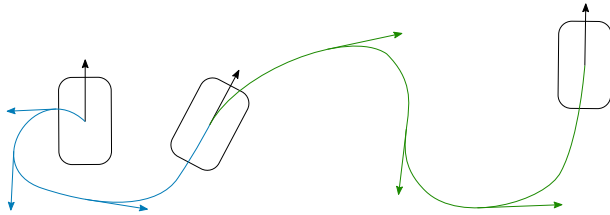
Pot po zemljevidu do željene lokacije načrtuje *ROS*ov vgrajeni paket imenovan *move_base*, ki je del sistema *ROS navigation stack*. Razdeljen je na globalni in lokalni algoritem, na podlagi katerih izračuna optimalno pot okoli stacionarnih ovir na zemljevidu in dinamičnih ovir zaznanih na senzorjih.

Paket za komunikacijo z nizkonivojsko programsko opremo robotske celice smo napisali sami v programskem jeziku Python.

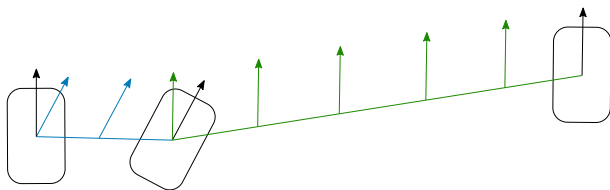
Lokalna navigacija v paketu *move_base* je zasnovana na podlagi vtičnikov. Ti vsebujejo implementacije različnih algoritmov, ki se razlikujejo po sposobnosti izogibanja dinamičnim oviram in podpori za določene pogonske sisteme [7]. V sklopu razvoja našega sistema smo v simulacijskem okolju preizkusili štiri vtičnike, ki so implementirali algoritme *Trajectory rollout*, *Dynamic window*

approach [8], *Elastic band* [9] in *Timed elastic band* [9]. Skice trajektorij, pridobljenih z omenjenimi vtičniki so prikazane na slikah 9, 10 in 11.

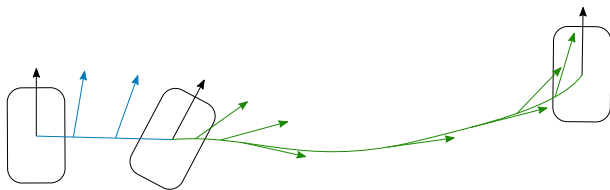
Kot najprimernejši algoritem za naš sistem se je izkazal *Timed elastic band*, ki za razliko od algoritmov *Trajectory rollout* in *Dynamic window approach* primerno izkoristi vsesmernost platforme. Trajektorije, pridobljene z algoritmoma *Elastic band* in *Timed elastic band* se bistveno ne razlikujeta, a se je slednji izkazal za bolj robustno v dinamičnih situacijah (predvsem pri izogibanju dinamičnim oviram) [9].



Slika 9: Skica trajektorije celice, pridobljene z algoritmom *Trajectory rollout*.



Slika 10: Skica trajektorije celice, pridobljene z algoritmom *Dynamic window approach*.



Slika 11: Skica trajektorije celice, pridobljene z algoritmom *Timed elastic band*.

5 Zaključek

Razvili smo sodelujočo mobilno robotsko celico za namen izvajanja raziskav s področja sodelovanja človeka z mobilnimi roboti in razvoj mobilnih robotskih aplikacij. Sistem smo zasnovali modularno, kar nam omogoča hiter nadaljnji razvoj in nadgradnjo sistema.

Nizkonivojsko vodenje temelji na modularnem industrijskem krmilniku Beckhoff. Ta skrbi za pravilno delovanje motorjev in osnovne varnostne funkcije, naprednejše varnostne funkcije in načrtovanje poti pa so zasnovane na odprtokodnem sistemu ROS, ki teče na zmogljivem strežniškem računalniku. Poleg visokonivojskega vodenja platforme s pomočjo virtualizacije nudi sistem za visokonivojsko vodenje robotskega manipulatorja, ki

je pritrjen na celico, ter možnost namestitve poljubnih drugih visokonivojskih sistemov.

Celica je opremljena z baterijo, ki celotnemu sistemu omogoča avtonomno delovanje nekaj ur. Za namen razvoja je opremljena tudi z vsemi potrebnimi napajalniki, ki omogočajo napajanje celice iz električnega omrežja. Za napajanje 230 V sistemov, ki so pritrjeni na celico imamo v platformo vgrajen tudi zmogljiv inverter.

Celica omogoča razvoj naprednih sodelujočih aplikacij, varnostnih funkcij in sodelovanja med mobilno celico ter pritrjenim robotskim manipulatorjem. Zaradi odprtosti sistemov je primerna tako za raziskovalno kot tudi pedagoško dejavnost v laboratorijskem okolju.

Zahvala

Študija je bila opravljena v sklopu raziskovalnega programa št. P2-0228, ki ga je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Industrijski krmilnik Beckhoff, ter pripadajoče module in motorje je prispevalo podjetje Beckhoff Avtomatizacija d.o.o.

Literatura

- [1] P. Kmecl, "Vodenje sodelujoče mobilne robotske celice", *Magistrsko delo*, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2020.
- [2] Biao Zhang, C. Martinez, Jianjun Wang, T. Fuhlbrigge, W. Eakins in Heping Chen, "The challenges of integrating an industrial robot on a mobile platform," v *2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, str. 255–260, 2010.
- [3] H. Taheri, B. Qiao in N. Ghaeminezhad, "Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot," *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, no. 3, str. 6–9, 2015.
- [4] M. Labbé in F. Michaud, "Rtab-map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation," *Journal of Field Robotics*, vol. 36, no. 2, str. 416–446, 2019.
- [5] C. Rösmann, F. Hoffmann in T. Bertram, "Online trajectory planning in ros under kinodynamic constraints with timed-elastic-bands," v *Robot Operating System (ROS). Studies in Computational Intelligence*, vol. 707, Springer.
- [6] C. Rösmann, W. Feiten, T. Wösch, F. Hoffmann in T. Bertram, "Efficient trajectory optimization using a sparse model," v *2013 European Conference on Mobile Robots*, str. 138–143, 2013.
- [7] P. Marin-Plaza et al., "Global and local path planning study in a ros-based research platform for autonomous vehicles," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, Feb 2018.
- [8] D. Fox, W. Burgard in S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, str. 23–33, 1997.
- [9] S. Quinlan in O. Khatib, "Elastic bands: connecting path planning and control," v *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, str. 802–807 vol.2, 1993.