

Poligon z miniaturnimi avtomatsko vodenimi vozički za učenje in razvoj avtonomnih mobilnih sistemov

Andrej Zdešar, Matevž Bošnjak, Gregor Klančar

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

E-pošta: {andrej.zdesar, matevz.bosnak, gregor.klancar}@fe.uni-lj.si

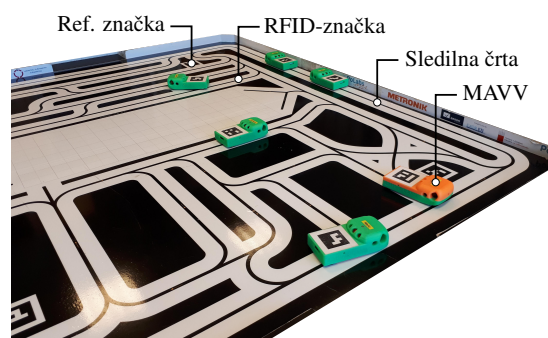
System of Small-Scale Automated Guided Vehicles for Education and Research of Autonomous Mobile Systems

The paper presents a cyber-physical model of a scaled-down industrial warehouse with automated guided vehicles (AGVs). The platform consists of a network of lines with RFID-tags that mark drivable roads and crossroads, along which the AGVs can travel. Above the platform it is a vision system that enables global tracking of all the AGVs in real time. AGVs are made from 3D printed, mechanical and electronic parts. The kinematic model of the AGVs drive train is a front-wheel driven tricycle. Since not all of the essential sensors are available in appropriate small-scale version, some virtual sensors are introduced. Various modular subsystems are integrated together using the Robot Operating System (ROS). The complete system enables study, development and evaluation of algorithms for autonomous driving. Although it is mainly used for educational purposes in the graduate course Autonomous Mobile Systems, it is also suitable for research activities.

1 Uvod

Na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za elektrotehniko se v drugem letniku magistrskega študija izvaja predmet Avtonomni mobilni sistemi (AMS). Predmet je sestavljen iz treh ur predavanj in dveh ur laboratorijskih vaj tedensko. Namen laboratorijskih vaj je, da študenti samostojno implementirajo metode za avtonomne mobilne sisteme, ki so jih spoznali tekom predavanj, na praktičnem primeru. Laboratorijske vaje pri predmetu AMS so v preteklosti potekale v skupinah dveh ali treh študentov na različne načine in na različni opremi. Eno študijsko leto je vsaka skupina delala na svojem projektu (na različnih mobilnih sistemih). Spet drugo leto so vsi študenti delali na istem projektu (na istem mobilnem sistemu), a vsaka skupina le na določenem podsistemu — na koncu pa so podsistemi, ki so jih razvile posamezne skupine morali delovati skupaj [1].

V zadnjih letih smo, zaradi naraščanja števila študentov pri predmetu (od študijskega leta 2018/19 poteka predmet vzporedno tudi v angleškem jeziku za študente na izmenjavi) in za dosego lažje primerljivosti študentskega dela, vaje preoblikovali tako, da imajo vse skupine študentov



Slika 1: Fizični model industrijske hale z MAVV-ji.

enako nalogo, ki jo vsaka skupina izvaja na svojem mobilnem sistemu. Naloga je zasnovana tako, da so postopoma obdelane vse glavne teme predavanj: modeliranje, vodenje, planiranje poti in lokalizacija. Po desetih terminih laboratorijskih vaj sledi ob zaključku semestra zagovor vaj, ki poteka kot demonstracija delovanja avtonomnega mobilnega sistema.

Za izvedbo laboratorijskih vaj smo morali zagotoviti več enakih kolesnih mobilnih sistemov, ki omogočajo izvedbo vsebine obravnavane na predavanjih. Znan sistem, ki se tudi uporablja za namen učenja in razvoja algoritmov za avtonomno vožnjo, je *Duckietown* [2], a je sistem veliko prevelik za vpeljavo v obstoječo učilnico. V Laboratoriju za avtomatiko in kibernetiko (LAK) smo zato razvili fizični model industrijske hale in miniaturne avtomatsko vodene vozičke (MAVV) ter pripadajoče pomožne sisteme (slika 1). Sistem predstavlja nadgradnjo našega predhodnega sistema, kjer smo imeli miniaturni poligon mesta in mobilne robote z diferencialnim pogonom [3]. V nadaljevanju je predstavljena zgradba celotnega sistema in možnosti, ki jih sistem ponuja — ne le za pedagoške namene, temveč tudi za raziskave in razvoj, npr. sledenje trajektoriji [4] ali vožnja več-agentov v formaciji [5] itd.

Pri izdelavi MAVV-jev nismo zahtevali natančne preslikave dejanske situacije iz industrijskega okolja, saj vseh sistemov (npr. laserskega merilnika razdalj, pogonskega mehanizma) ni moč primerno pomanjšati. S fizičnim modelom tako posnemamo le tiste lastnosti avtomatsko vodenih vozičkov (AVV), ki so potrebne za učenje in razvoj algoritmov za avtonomno vožnjo. Za namen izvedbe pedagoškega procesa smo želeli, da sistem omogoča razvoj

algoritmov za avtonomno vožnjo, tako da je možna vsaj izvedba odometrije, vodenja mobilnega sistema po poti, načrtovanje poti med poljubnimi cilji in lokalizacija mobilnega sistema v znanem zemljevidu okolja. Za namen raziskav in razvoja smo zaželi tudi, da sistem omogoča še razvoj algoritmov za več-agentno vodenje, načrtovanje in optimizacijo poti več agentov, iskanje alternativnih poti in obvozov v primeru zastojev in/ali ovir in podobno.

Zaradi boljše povezljivosti med različnimi sistemi in modularnosti smo se odločili, da bomo uporabili okolje ROS (angl. *Robot Operating System*).

2 Poligon

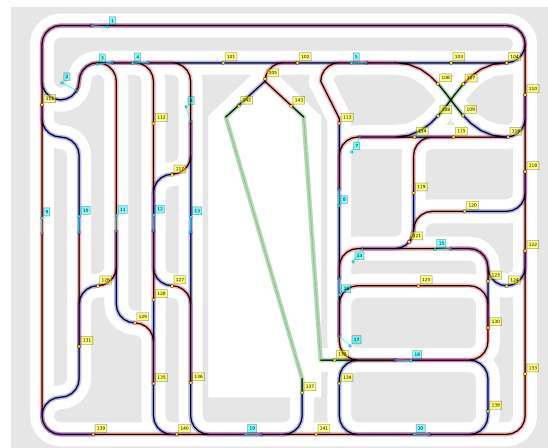
V industrijskih okoljih z AVV-ji se za označevanje poti mnogokrat uporabljajo magnetni trakovi, ki jih je mogoče zanesljivo zaznavati, in RFID-značke, ki delujejo na podlagi radio frekvenčne tehnologije, za označevanje imen poti in križišč. Naš poligon je sestavljen iz omrežja usmerjenih poti, ki se v križiščih razdružijo v več poti ali pa se združijo v eno pot (slika 2). Pri miniaturizaciji mobilnega sistema smo v našem primeru uporabili optični IR-senzor, ki omogoča detekcijo črte pod mobilnim sistemom, in RFID-bralnik, ki omogoča branje RFID-značk, ki se nahajajo na znanih položajih ob poteh. Glede na izbiro roba črte, ki mu sledimo, lahko v križišču izberemo želeno pot. RFID-značke se ne nahajajo ob vseh poteh in tudi ne pred vsemi križišči (na sliki 2 so položaji RFID-značk označeni s sinje modrimi oznakami).

V osrednjem delu poligona imamo tudi t. i. prosto področje, ki je brez sledilnih črt. V tem področju mora navigacija mobilnega sistema biti izvedena s pomočjo dodatnih senzorjev, in ne na podlagi optičnega senzorja za sledenje črti.

2.1 Predstavitev zemljevida poligona z grafom

Zemljevid poligona lahko zapišemo v obliki grafa. Vsaka pot ima določeno smer, ki jo v grafu predstavimo kot usmerjeno povezavo. Vozlišča grafa predstavljajo križišča, kjer se stikajo poti. Graf v programskem jeziku Python lahko zapišemo s pomočjo gnezdenega slovarja (podatkovni tip `dict`).

Za namen planiranja poti in vodenja smo graf predstavili v še nekoliko prirejeni obliki. Mesta na poteh, kjer se nahajajo RFID-značke, smo obravnavali kot postaje, kjer se mobilni sistem lahko ustavi oz. se odloči o svoji naslednji akciji — običajno izbiramo le med sledenjem levemu ali desnemu robu črte. Ker se na vseh poteh ne nahajajo RFID-značke, le te opremimo s t. i. virtualnimi značkami (njihov položaj lahko določimo le na podlagi odometrije/lokalizacije), ki jih tudi obravnavamo kot postaje. Vozlišča v grafu torej predstavljajo vse značke (postaje), poti med značkami pa so usmerjene povezave v grafu (na sliki 2 so povezave med značkami označene z modrimi, rdečimi in zelenimi črtami). V tej predstavitvi se določeni deli poti med postajami torej prekrivajo. Za to predstavitev grafa smo pripravili program, ki avtomatsko pretvori prej omenjeno predstavitev zemljevida z grafom v to obliko. Pri tem smo upoštevali tudi, da je



Slika 2: Zemljevid z označenimi potmi in položaji RFID-značk (sinje modre oznake) ter virtualnih značk (rumene oznake).

položaj RFID-senzorja izmaknjen glede na točko na mobilnem sistemu, ki sledi črti (glej poglavje 4).

3 Globalni sistem za merjenje lege s strojnim vidom

Nad poligonom se nahaja kamera, ki omogoča sledenje vseh objektov, ki se gibljejo po ravnini poligona. Na vsakem robu se nahaja posebna značka z unikatnim vzorcem, ki ga sistem s kamero lahko robustno zazna in določi njegovo lego na sliki. Sledi opis postopka merjenja lege vseh značk oz. mobilnih sistemov glede na poligon, pri čemer je lega kamere poljubna.

Predpostavimo, da je koordinatni sistem kamere glede na svetovni koordinatni sistem podan z rotacijsko matriko $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ in translacijskim vektorjem t . Glede na perspektivni model kamere je preslikava homogene točke $p_W^T = [x_W \ y_W \ 1]$ na poljubni ravnini v prostoru in homogeno točko $p_P^T = [x_P \ y_P \ 1]$ v koordinatnem sistemu slike:

$$p_P \propto S \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} p_W = H p_W, \quad (1)$$

kjer matrika S vsebuje notranje (intrinzične) parametre kamere. Matriko S lahko določimo s kalibracijo, npr. z uporabo postopka s šahovnico [6]. Preslikava H v (1) je znana kot homografija — predstavlja preslikavo med dvema ravninama.

Homografijo H lahko ocenimo na podlagi vsaj štirih korespondenčnih parov točk v ravnini tal in slikovni ravnini. Iz tega razloga se na poligonu nahajajo štiri referenčne značke (slika 1), katerih položaj glede na svetovni koordinatni sistem je znan. Za namen merjenja lege je vsak MAVV opremljen s posebno unikatno značko. Med vožnjo MAVV-ja se značka premika po ravnini, ki je vzporedna s tlemi, zato se položaja MAVV-ja ne da oceniti neposredno na podlagi homografije H . Ker poznamo višino h , na katero je nameščena značka na MAVV-ju, lahko določimo homografijo $H_h(h)$ za to vzporedno ravnino na podlagi homografije H . Položaj značke p_P na sliki, ki se nahaja v vzporedni ravnini glede na ravnino

tal na višini h , lahko preslikamo na ravnino tal v točko p_W , ki je pravokotna projekcija značke na ravnino tal:

$$p_W \propto H_h^{-1}(h)p_P.$$

Da lahko ocenimo homografijo $H_h(h)$ moramo poznati intrinzične parametre kamere S :

$$H_h(h) = S \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & (q_1 \times q_2) \frac{h}{n} + q_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kjer parameter normiranja n določimo kot:

$$n = (\|q_1\| + \|q_2\|)/2. \quad (3)$$

Vektorji q_1 do q_3 v (2) in (3) so:

$$S^{-1}H = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \end{bmatrix}.$$

Vse dokler se mobilni robot giblje le po ravnih tleh, predstavljena metoda omogoča zelo točno sledenje, saj so omejitve sistema implicitno upoštevane v algoritmu za merjenje lege. Ker značka ni rotacijsko invariantna, lahko določimo tudi njeno orientacijo in tako celotno lego MAVV-ja v ravnini tal. Predstavljena metoda merjenja lege MAVV-jev deluje za poljubno postavitve kamere, dokler so vse značke v vidnem polju kamere, a natančnost sistema je lahko spremenljiva. Če ne pride do okluzij referenčnih značk na podlagi, deluje metoda tudi med gibanjem kamere, sicer pa se referenčna homografija H izračuna le kadar so vidne vse štiri referenčne značke.

Predstavljeni pristop je tudi računsko učinkovit, tako da ne zahteva izredno zmogljive strojne opreme. Algoritem za merjenje lege več MAVV-jev smo implementirali na vgradnem sistemu *Raspberry Pi 3 B+* s kamero *Raspberry Pi Camera Board v2*. Za sledenje značk smo uporabili knjižnico *ArUco* [7, 8], ki omogoča robustno in hitro sledenje značk z unikatnimi vzorci, ki je neodvisno od osvetljenosti prostora. S sistemom smo dosegli sledenje več značk in ocenjevanje lege MAVV-jev glede na svetovni koordinatni sistem s frekvenco 20 Hz. Podatki o legi MAVV-jev so na voljo v ROS-u na kanalu τf , ki vsebuje podatke o preslikavah med koordinatnimi sistemi. Sistem s strojnim vidom za merjenje lege omogoča hitro in enostavno postavitve, saj je potrebno nastaviti le položaje referenčnih značk in višine posameznih značk na MAVV-jih ter določiti notranje parametre kamere (npr. s standardnim postopkom za kalibracijo kamere).

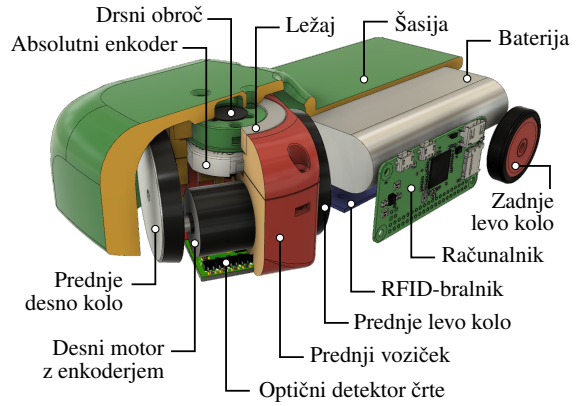
4 Miniaturni avtomatsko vodeni vozički

Želeli smo izdelati MAVV s kinematičnim modelom trikolesnika, ki ima gnano prednje kolo.

4.1 Zgradba

Prednji pogonski del smo izdelali z vozičkom z diferencialnim pogonom, ki je na šasijo pritrjen pasivno preko ležaja. Takšna oblika mehanskega mehanizma je bila najbolj enostavna za izvedbo, pri tem pa smo še vedno dosegli želeni kinematični model. Zgradba MAVV-ja z glavnimi sestavnimi deli je prikazana na sliki 3.

MAVV smo opremlili z več senzorji, ki omogočajo implementacijo algoritmov za avtonomno vožnjo. Motorja na prednjem vozičku, ki ženeta obe kolesi, sta opremljena z inkrementalnim enkoderjem. Poleg tega imamo



Slika 3: Zgradba MAVV-ja v prerezu.

še absolutni enkoder, ki omogoča merjenje kota prednjega vozička glede na šasijo. Na dnu prednjega vozička se nahaja namensko tiskano vezje z mikrokrmilnikom, ki skrbi za nizkonivojsko obdelavo signalov v realnem času in regulacijo hitrosti vrtenja motorjev. Na tiskanem vezju se nahaja tudi 7 segmentni optični detektor črte.

Zadnji kolesi sta pasivni in v trenutni izvedbi nista opremljeni z enkoderji. Na spodnjem delu šasije se nahaja še RFID-bralnik.

Za obdelavo informacij s senzorjev, komunikacijo z zunanji sistemi in izvedbo regulacijskih algoritmov za avtonomno vožnjo se znotraj šasije nahaja računalnik *Raspberry Pi Zero W*. V šasiji se nahaja še baterija.

4.2 Dodatni virtualni senzorji

Zaradi majhnosti MAVV-ja, smo omejeni z naborom senzorjev, ki jih lahko uporabimo, saj določenih senzorjev, ki se običajno uporabljajo na AVV-jih, ni na voljo v tako majhni izvedbi. Takšen primer je laserski merilnik razdalj (LMR), ki je pri sodelujočih AVV-jih običajno obvezen kot varnostni element. AVV-ji so lahko opremljeni celo z več LMR-ji, ki omogočajo pokrivanje čim večjega vidnega kota. LMR-ji se pogosto uporabljajo za namen lokalizacije in gradnje zemljevida okolja [9].

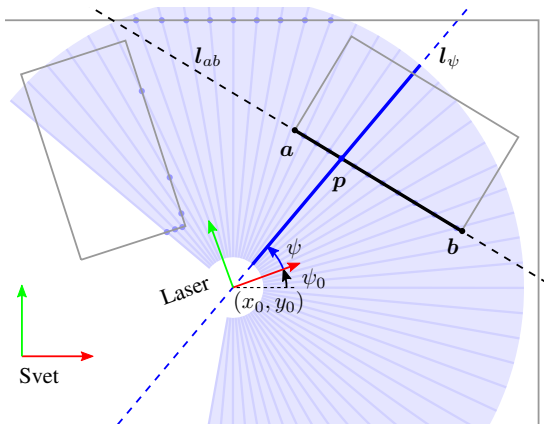
Čeprav LMR-ja ne moremo primerno pomanjšati, da bi ga vgradili na MAVV, pa lahko simuliramo meritve tega senzorja. Globalni sistem s strojnim vidom nam omogoča merjenje leg MAVV-jev, poznamo pa tudi njihove oblike in obliko poligona. Oblike vseh objektov lahko opišemo z daljicami, nato pa uporabimo algoritem za detekcijo presečišč laserskih žarkov z daljicami ovir.

Algoritem se sprehodi čez vse daljice vseh objektov, ki predstavljajo statične ali dinamične ovire, pri čemer za vsako daljico naredimo naslednje (slika 4):

1. Če sta a in b robni točki daljice zapisani v homogenih koordinatah, potem je premica skozi ti dve točki $l_{ab} = a \times b$ in enotski vektor daljice $e_{ab} = \frac{b-a}{\|b-a\|}$.
2. Za vsak žarek LMR-ja

$$l_\psi = [-\sin(\psi) \cos(\psi) x_0 \sin(\psi) - y_0 \cos(\psi)]$$

naredimo naslednje:



Slika 4: Modeliranje laserskega merilnika razdalj.

- (a) Poiščemo presečišče

$$\mathbf{p} = [\kappa x \ \kappa y \ \kappa]^T = \mathbf{l}_\psi \times \mathbf{l}_{ab}$$

žarka s premico daljice in izračunamo faktor $q = e_{ab}^T (\frac{\mathbf{p}}{\kappa} - \mathbf{a})$.

- (b) Če velja $0 \leq q \leq 1$, potem presečišče $\mathbf{p}$ leži na daljici. V tem primeru izračunamo razdaljo r od objekta do izhodišča laserskega merilnika (v smeri vektorja žarka):

$$\mathbf{r} = (\frac{\mathbf{p}^T}{\kappa} - \mathbf{p}_0^T) [\cos \psi \ \sin \psi \ 0]^T.$$

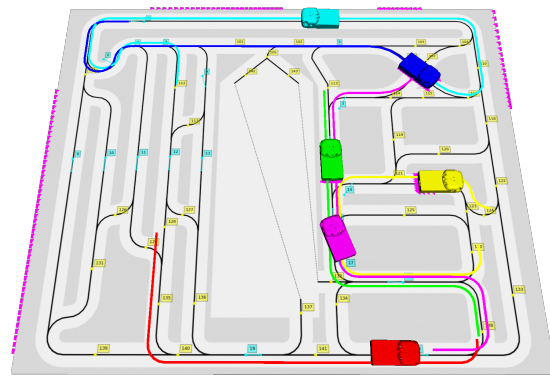
Če velja $0 \leq r \leq r_{max}$ in če je r tudi manjši od trenutne najkrajše razdalje r_ψ , posodobimo najkrajšo razdaljo: $r_\psi = r$.

Virtualni LMR lahko namestimo glede na katerikoli koordinatni sistem (npr. na prednji del MAVV-ja). Nastavimo lahko različne parametre senzorja, kot so doseg, natančnost, vidni kot, kotna ločljivost itd. Podatke meritev podamo v obliki standardnega ROS-sporočila tipa `sensor_msgs/LaserScan`. S stališča podatkov ne moremo ločiti med načinom uporabe realnega ali virtualnega senzorja. Virtualni senzor ne more zaznati objektov, katerih leg ne poznamo oz. jih ne merimo z globalnim sistemom za merjenje lege — poleg MAVV-jev lahko z značkami označimo tudi druge objekte na poligonu in tako omogočimo zaznavanje tudi teh.

Na sliki 5 je vizualizacija laserskih meritev (vijolične točke) v orodju RViz (del okolja ROS), kjer se laserski merilnik razdalj nahaja na vijoličnem MAVV-ju. Vidimo odboje laserskih žarkov na zelenem, modrem in rumenem MAVV-ju, ne pa tudi na sinje modrem MAVV-ju, saj je zasenčen z zelenim MAVV-jem; rdeči MAVV pa je izven vidnega kota senzorja. Zaradi omejenega dosega senzor ne zaznava objektov, ki so preveč oddaljeni.

5 Zaključek

V članku smo predstavili zgradbo miniaturnih avtomatsko vodenih vozil, poligona in podpornih sistemov, ki omogoča učenje in tudi razvoj algoritmov za avtonomno vožnjo. Čeprav fizikalne lastnosti dejanskih AVV-jev niso natančno posnemanje, MAVV-ji omogočajo študijo



Slika 5: Vizualizacija meritev LMR-ja, leg MAVV-jev in načrtovani poti v orodju RViz.

vseh esencialnih problemov, ki se pojavljajo pri razvoju avtonomnih mobilnih sistemov. Sistem je modularen in ga je možno enostavno in hitro prilagoditi za želene namene. V prihodnosti imamo v načrtu opremiti MAVV-je z dodatnimi senzorji (kamera, senzorji bližine idr.). V načrtu pa je tudi nadgradnja sistema, ki bo omogočala oddaljen dostop do sistema in opravljanje laboratorijskih vaj oz. preizkusov na daljavo.

Zahvala

Raziskovalni program št. P2-0219 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura

- [1] A. Zdešar, S. Blažič, and G. Klančar, "Engineering education in wheeled mobile robotics," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12173 – 12178, 2017. 20th IFAC World Congress.
- [2] L. Paull, J. Tani, H. Ahn, J. Alonso-Mora, L. Carlone, M. Cap, Y. F. Chen, C. Choi, J. Dusek, Y. Fang, *et al.*, "Duckietown: an open, inexpensive and flexible platform for autonomy education and research," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1497–1504, IEEE, 2017.
- [3] M. Tavčar, U. Skalar, J. Perko, and A. Zdešar, "Implementation of model-based control systems for autonomous driving of miniature robotic vehicles," in *Proceedings of the 27th International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK*, pp. 131–134, IEEE, 2018.
- [4] G. Klančar and I. Škrjanc, "Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time," *Robotics and autonomous systems*, vol. 55, no. 6, pp. 460–469, 2007.
- [5] G. Klančar, D. Matko, and S. Blažič, "A control strategy for platoons of differential drive wheeled mobile robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 2, pp. 57–64, 2011.
- [6] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [7] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and R. Medina-Carnicer, "Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming," *Pattern Recognition*, vol. 51, pp. 481–491, 2016.
- [8] F. J. Romero-Ramirez, R. Muñoz-Salinas, and R. Medina-Carnicer, "Speeded up detection of squared fiducial markers," *Image and vision Computing*, vol. 76, pp. 38–47, 2018.
- [9] L. Teslić, I. Škrjanc, and G. Klančar, "Using a lrf sensor in the kalman-filtering-based localization of a mobile robot," *ISA transactions*, vol. 49, no. 1, pp. 145–153, 2010.