

THE FUZZY CONTROL SYSTEM OF A MOBILE ROBOT IN CASE OF OBSTACLE AVOIDANCE

NEIZRAZITO UPRAVLJANJE MOBILNIM ROBOTOM ZA SLUČAJ IZBJEGAVANJA PREPREKA

PILJEK, Petar & KOTARSKI, Denis

Abstract: In this paper, the application of the fuzzy control system of a mobile robot for the problem of obstacle avoidance in an unstructured environment is explored. This problem typically occurs in applications of mobile robots in intelligent warehouses or smart factories. In order to perform simulations, a mathematical model of a robot with a differential drive configuration was derived. The fuzzy control system is implemented in the development control unit with Atmel microcontroller. The test results show that the fuzzy robot control successfully avoids obstacles and with additional enhancements, it can be applied to industrial systems.

Key words: mobile robot, fuzzy control system, obstacle avoidance

Sažetak: U ovom radu istražena je primjena neizrazitog upravljanja mobilnim robotom za problem izbjegavanja prepreka u nestrukturiranom okruženju. Problem se tipično javlja kod primjena mobilnih robota u pametnim skladištima ili pametnim tvornicama. U svrhu provedbe simulacija izveden je matematički model robota s diferencijalnom konfiguracijom pogona. Neizrazito upravljanje implementirano je na razvojnu upravljačku jedinicu s Atmel mikrokontrolerom. Rezultati testiranja pokazuju da robot s neizrazitim regulatorom uspješno izbjegava prepreke. Uz dodatna poboljšanja moguća je primjena na realnim industrijskim sustavima.

Ključne riječi: mobilni robot, neizrazito upravljanje, izbjegavanje prepreka



Authors' data: Petar, **Piljek**, dr.sc., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, petar.piljek@fsb.hr; Denis, **Kotarski**, Veleučilište u Karlovcu, denis.kotarski@vuka.hr

1. Uvod

Mobilni roboti sve su prisutniji u industrijskim pogonima i skladištima (slika 1) te kao servisni roboti. U razmatranim primjenama uglavnom se koriste mobilni roboti kod kojih je mehanizam lokomocije više aktivno pogonjenih kotača [1], a u radu će biti izveden robot s diferencijalnom konfiguracijom pogona [2]. Autonomni mobilni roboti jesu sustavi sposobni za interpretiranje, planiranje i obavljanje zadane misije bez vanjske podrške. Dva su temeljna ponašanja autonomnih robota: ponašanje usmjereno cilju (engl. *goal-oriented behavior*) i reaktivno ponašanje [3].

Jedan od glavnih izazova autonomne navigacije upravo je reaktivno ponašanje, odnosno otkrivanje i izbjegavanje prepreka (engl. *obstacle avoidance*) tijekom izvođenja misije. Sve veća kompleksnost primjena mobilnih robota zahtjeva sofisticiranija rješenja navigacije robota kroz radni prostor. Postoje brojne metode i algoritmi koji navedeni izazov uspješno rješavaju, a u ovom radu je razmotreno neizrazito upravljanje (engl. *fuzzy control*) robotom [4]. Neizraziti skupovi predstavljaju nadgradnju klasične teorije skupova [5]. U klasičnoj teoriji skupova element ili pripada ili ne pripada skupu dok u teoriji neizrazitih skupova element može imati određeni stupanj pripadnosti nekom skupu (ili više njih). Značajan problem konvencionalnih neizrazitih upravljanja predstavlja eksponencijalni rast pravila s povećanjem broja varijabli koji se može izbjeći uvođenjem nekonvencionalne analitičke metode za sintezu adaptivnog neizrazitog upravljanja robotima [6, 7]. U ovom radu naglasak je na implementaciji neizrazitog upravljanja i testiranju ponašanja robota za slučaj izbjegavanja prepreka.

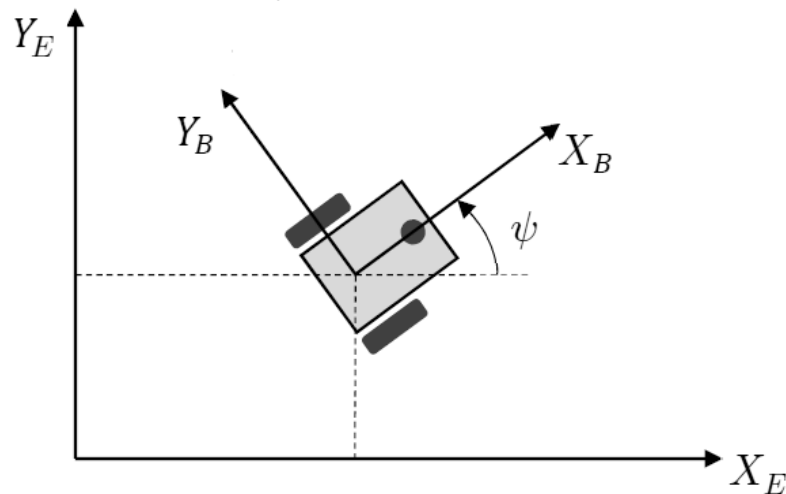


Slika 1. Integracija mobilnog robota u pametno skladište [8].

2. Kinematika mobilnog robota s diferencijalnom konfiguracijom pogona

Izvedba robota s diferencijalnom konfiguracijom pogona sastoji se od 2 aktuatora (elektromotorna pogona) te zbog svojih karakteristika i jednostavnosti predstavlja najčešću pogonsku konfiguraciju. Diferencijalni pogon omogućuje rotaciju u mjestu (bez translacije), a kut zakreta robota (engl. *heading angle*) određen je razlikama brzina lijevog i desnog kotača. Takav tip robota egzistira u dvodimenzionalnom prostoru te ima tri stupnja slobode gibanja (engl. *Degrees of Freedom - DOF*).

Za opisivanje kinematike robota, potrebno je definirati dva Kartezijeva koordinatna sustava (slika 2): inercijski koordinatni sustav (\mathcal{F}^E) i koordinatni sustav mobilnog robota (\mathcal{F}^B). Stupnjevi slobode gibanja predstavljeni su pozicijom (X_E, Y_E) i orijentacijom (ψ) robota te definiraju vektor ε .



Slika 2. Koordinatni sustavi mobilnog robota.

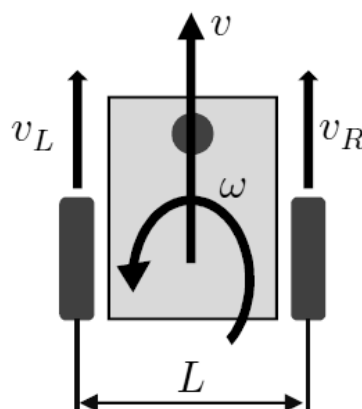
$$\varepsilon = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ \psi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Brzine robota u inercijskom koordinatnom sustavu definirane su sljedećim izrazima

$$\dot{X}_E = v \cos \psi, \quad \dot{Y}_E = v \sin \psi, \quad \dot{\psi} = \omega. \quad (2)$$

gdje su v translacijska, a ω je rotacijska brzina robota. Translacijska i rotacijska brzina definirane su u \mathcal{F}^B te je njima predstavljeno gibanje robota u 2D prostoru.

Problem direktne kinematike je određivanje translacijske i rotacijske brzine robota na temelju kutnih brzina kotača $\Omega = [\omega_L \quad \omega_R]^T$ koje predstavljaju ulazne varijable modela. Pri tome treba uzeti u obzir kinematička ograničenja pogonskog sustava. Kod diferencijalnog pogona (slika 3), broj stupnjeva slobode gibanja je veći od broja aktuatora pa robot s takvim tipom pogona predstavlja neholonomni robot.



Slika 3. Shematski prikaz robota diferencijalnim pogonom.

Sljedećim izrazima definirane su brzine mobilnog robota s diferencijalnom konfiguracijom pogona

$$v = \frac{v_L + v_R}{2}, \quad \omega = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (3)$$

$$v_L = r\omega_L, \quad v_R = r\omega_R \quad (4)$$

Brzine su definirane preko translacijskih brzina lijevog v_L i desnog v_R kotača gdje je L razmak između pogonskih kotača. Translacijske brzine kotača ovise o kutnim (rotacijskim) brzinama kotača ω_L i ω_R te o polumjeru kotača r . Vektor brzine robota $\mathbf{v}^B = [v \ \omega]^T$ definiran je pomoću matrice alokacije pogona robota $\mathbf{\Gamma}_R$ koja preslikava ulazne varijable na vektor brzine robota

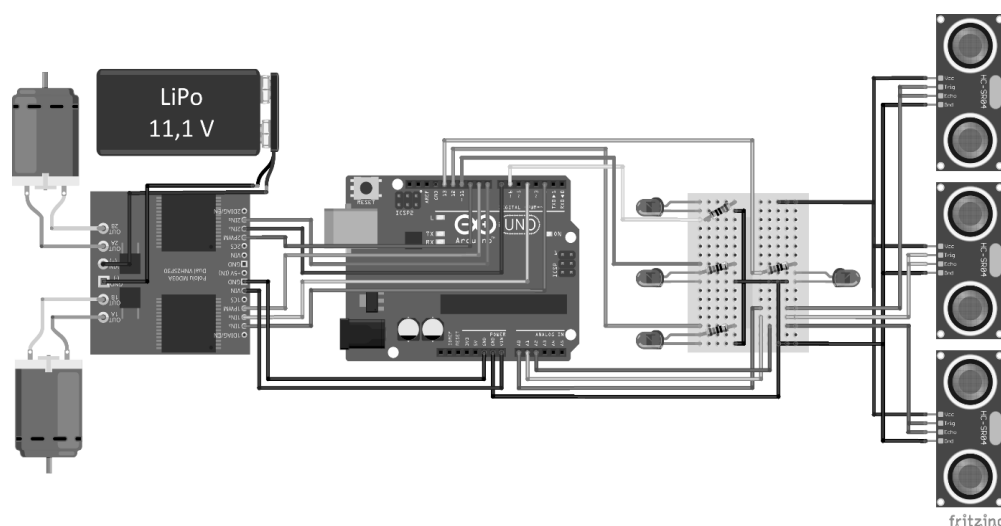
$$\mathbf{v}^B = \mathbf{\Gamma}_R \mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ -\frac{r}{L} & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

Problem inverzne kinematike je određivanje kutnih brzina lijevog i desnog kotača $\mathbf{\Omega} = [\omega_L \ \omega_R]^T$ na temelju željenog stanja robota, odnosno željene translacijske i rotacijske brzine robota $\mathbf{v}^B = [v \ \omega]^T$. S obzirom na izraze (3) i (4), kutne brzine kotača jednake su

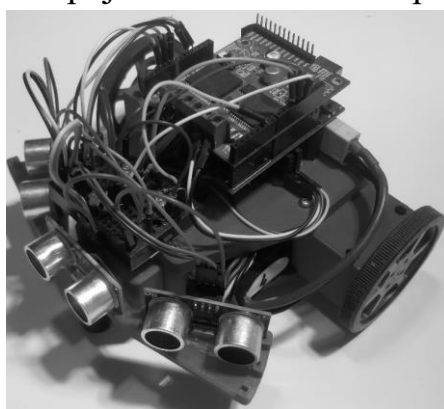
$$\omega_L = \frac{2v - \omega L}{2r}, \quad \omega_R = \frac{2v + \omega L}{2r} \quad (6)$$

3. Izvedba mobilnog robota

Za pogon mobilnog robota korištena su dva istosmjerna motora s reduktorom. Motori su na upravljačku jedinicu spojeni preko upravljačkog kruga motora (Dual VNH5019 motor driver) koji sadrži dva puna H mosta te omogućuje istovremeno upravljanje brzinom i smjerom vrtnje istosmjernih motora. Za mjerenje udaljenosti robota od prepreke korištena su tri ultrazvučna senzora. Središnji ultrazvučni senzor postavljen je na X_B os robota i usmjeren s osi, dok su druga dva senzora postavljena pod kutem od 30° , s lijeve i desne strane središnjeg ultrazvučnog senzora. Tri LED diode služe kao indikatori greške kod očitavanja udaljenosti pojedinog ultrazvučnog senzora, a dodatna LED dioda singalizira brzinu očitavanja. Napajanje mobilnog robota i pripadnih elektroničkih komponenti ostvareno je preko upravljačkog kruga motora pomoću LiPo baterije nominalnog napona 11,1 V. Shema spoja elektroničkih komponenti prikazana je na slici 4, a izvedba mobilnog robota na slici 5.



Slika 4. Shematski prikaz spoja elektroničkih komponenti mobilnog robota.



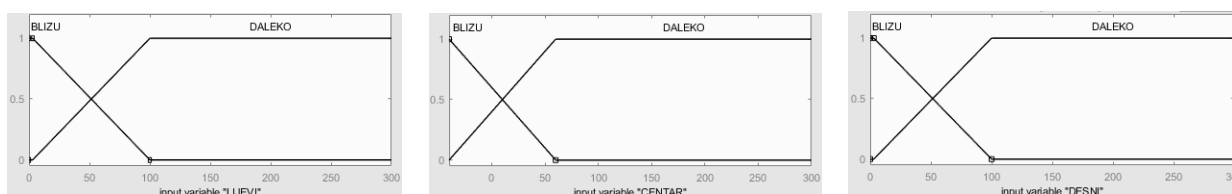
Slika 5. Izvedba mobilnog robota.

4. Neizrazito upravljanje

Cilj primjene neizrazitog upravljanja je različito reagiranje robota na prepreku u ovisnosti o položaju i udaljenosti prepreke. Kod implementiranog neizrazitog upravljanja u ovome radu, ukoliko je prepreka detektirana ispred robota, brzina gibanja robota prema naprijed će se smanjivati proporcionalno udaljenosti robota od prepreke, dok će se u slučaju detektiranja bočnih prepreka mijenjati rotacijska brzina tako da robot sporo skreće ako je prepreka daleko, a brzo ako je prepreka blizu.

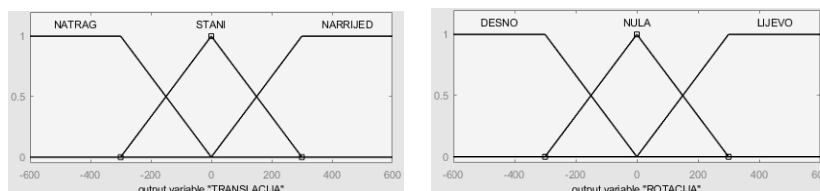
Za planiranje, provjeru i grafički prikaz neizrazitog upravljanja korišten je Matlab Fuzzy Logic Toolbox [9] dok je implementacija na upravljačku jedinicu ostvarena pomoću eFLL biblioteke (Embedded Fuzzy Logic Library) [10]. Korištena biblioteka omogućuje dobivanje izrazitog upravljačkog signala iz izrazitih ulaznih signala kroz tri standardna koraka neizrazitog upravljanja: fazifikacija ili omekšavanje, inferencija ili proces odlučivanja i defazifikacija ili izoštravanje. Izraziti ulazni signali su vrijednosti udaljenosti mobilnog robota od prepreke, dobiveni ultrazvučnim sensorima, dok su izraziti izlazni signali neizrazitog upravljanja translacijska i rotacijska brzina robota iz kojih se naknadno pomoću jednadzbe 6 dobivaju potrebne kutne brzine lijevog i desnog kotača robota.

U koraku fazifikacije ili omekšavanja vrši se pretvorba izrazitih vrijednosti u stupnjeve pripadnosti neizrazitih skupova tako da se odrede ulazne i izlazne jezične varijable te se njima pridruže jezične vrijednosti, uz odabir oblika funkcije pripadnosti čime se određuje i raspon pojedine jezične vrijednosti. Ulazne jezične varijable „LIJEVI“, „CENTAR“, „DESNI“ su udaljenosti pojedinog ultrazvučnog senzora, a jezične vrijednosti udaljenosti koje svaka ulazna jezična varijabla može poprimiti su „BLIZU“ i „DALEKO“. Odabrane trapezoidne funkcije pripadnosti jezičnih vrijednosti, pojedine ulazne jezične varijable, prikazane su na slici 6.



Slika 6. Trapezoidne funkcije pripadnosti jezičnih vrijednosti ulaznim jezičnim varijablama „LIJEVI“, „CENTAR“, „DESNI“.

O kombinaciji ulaznih veličina ovise vrijednosti izlaza. Izlazne jezične varijable „TRANSLACIJA“ i „ROTACIJA“ su translacijska i rotacijska brzina gibanja mobilnog robota, a jezične vrijednosti koje jezična varijabla „TRANSLACIJA“ može poprimiti su „NAPRIJED“, „STANI“ i „NATRAG“, dok su jezične vrijednosti koje „ROTACIJA“ može poprimiti „DESNO“, „NULA“ i „LIJEVO“. Funkcije pripadnosti jezičnih vrijednosti za izlazne jezične varijable su trokutastog oblika i prikazane su na slici 7.



Slika 7. Trokutaste funkcije pripadnosti jezičnih vrijednosti izlaznim jezičnim varijablama „TRANSLACIJA“, „ROTACIJA“.

Interferencija ili proces odlučivanja je proces pretvorbe ulaznih neizrazitih skupova u izlazne neizrazite skupove preko definirane baze pravila. Baza pravila predstavlja ekspertno znanje kojim su povezani ulazni skupove s izlaznim, tj. povezane su očitane vrijednosti ultrazvučnih senzora s translacijskom i rotacijskom brzinom gibanja robota. Pravila se definiraju u IF-AND-THEN obliku na način da se logičkim operatorima povezuju tri ulazne jezične vrijednosti, svaka za udaljenost jednog ultrazvučnog senzora, te se zatim definiraju željene izlazne brzine translacije i rotacije za pojedinu kombinaciju ulaza. Korištena baza pravila prikazana je na slici 8. Za dobivanje agregirane izlazne funkcije pripadnosti u eFLL biblioteku je implementirana Mamdanijeva definicija neizrazite logičke implikacije uz definiciju neizrazitog zbrajanja.

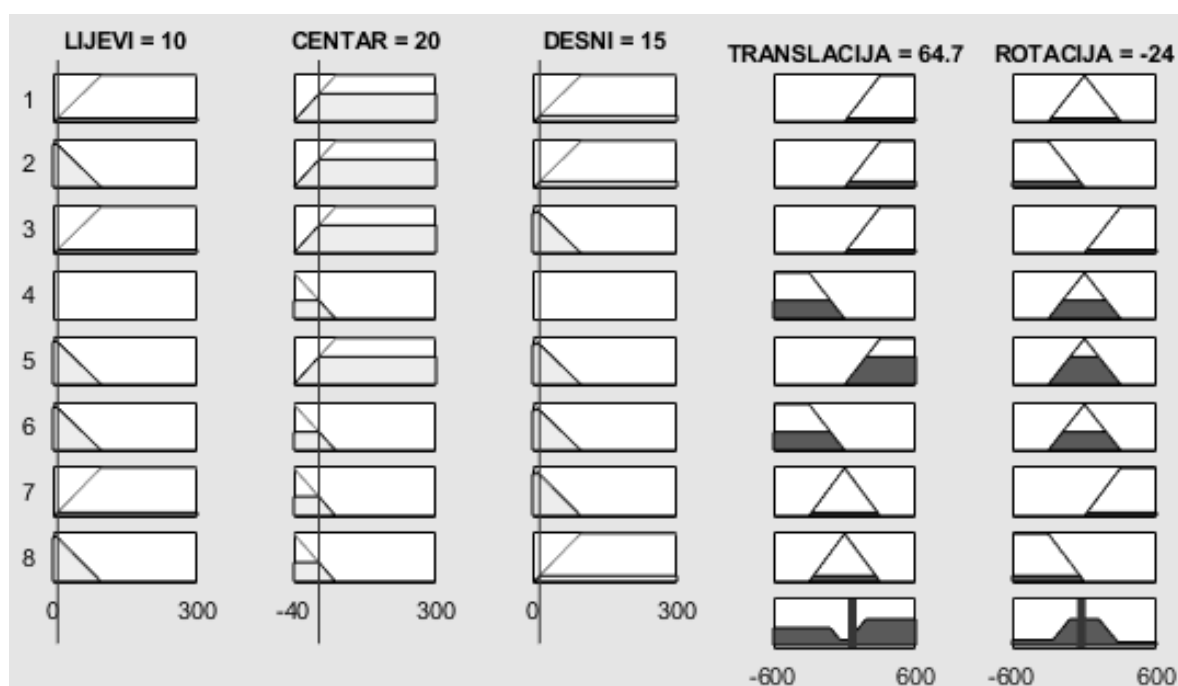
1. If (LJEVI is DALEKO) and (CENTAR is DALEKO) and (DESNI is DALEKO) then (TRANSLACIJA is NAPRIJED)(ROTACIJA is NULA) (1)
2. If (LJEVI is BLIZU) and (CENTAR is DALEKO) and (DESNI is DALEKO) then (TRANSLACIJA is NAPRIJED)(ROTACIJA is DESNO) (1)
3. If (LJEVI is DALEKO) and (CENTAR is DALEKO) and (DESNI is BLIZU) then (TRANSLACIJA is NAPRIJED)(ROTACIJA is LJEVO) (1)
4. If (CENTAR is BLIZU) then (TRANSLACIJA is NATRAG)(ROTACIJA is NULA) (1)
5. If (LJEVI is BLIZU) and (CENTAR is DALEKO) and (DESNI is BLIZU) then (TRANSLACIJA is NAPRIJED)(ROTACIJA is NULA) (1)
6. If (LJEVI is BLIZU) and (CENTAR is BLIZU) and (DESNI is BLIZU) then (TRANSLACIJA is NATRAG)(ROTACIJA is NULA) (1)
7. If (LJEVI is DALEKO) and (CENTAR is BLIZU) and (DESNI is BLIZU) then (TRANSLACIJA is STANI)(ROTACIJA is LJEVO) (1)
8. If (LJEVI is BLIZU) and (CENTAR is BLIZU) and (DESNI is DALEKO) then (TRANSLACIJA is STANI)(ROTACIJA is DESNO) (1)

Slika 8. Prikaz definirane baze pravila.

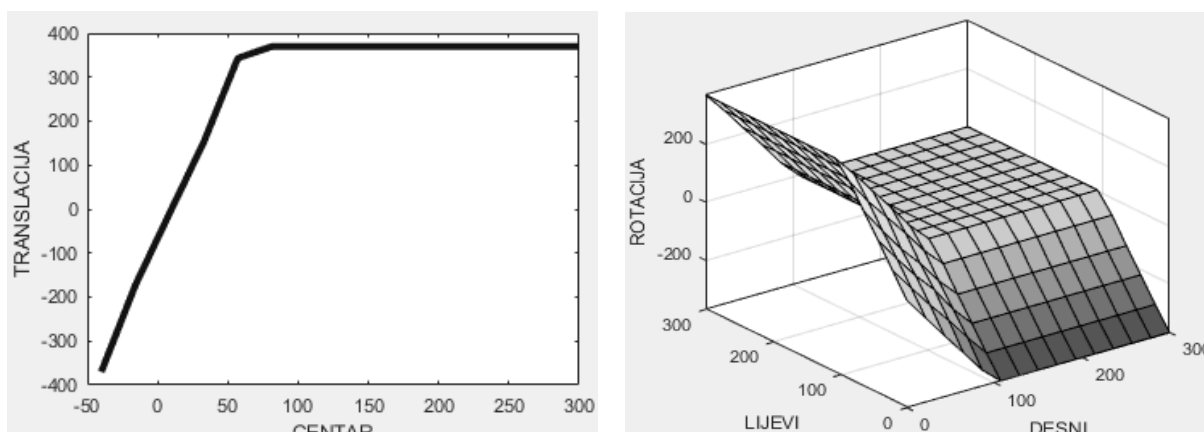
Zadnji korak je proces defazifikacija ili izoštravanja gdje se neizraziti izlazni skupovi pretvaraju i izrazite izlazne vrijednosti, tj. iz agregiranih neizrazitih izlaznih skupova dobivaju se konkretne numeričke vrijednosti translacijske i rotacijske brzine gibanja robota koje se nadalje mogu direktno primijeniti na pojedini aktuator ili se mogu koristiti kao referentne vrijednosti regulatora. Za postupak defazifikacije koriste se razne metode kao što su metoda centra maksimuma, presjeka maksimuma, centra površine, dok korištena eFLL biblioteka za postupak defazifikacije koristi metodu težišta.

Izračunavanje numeričkih vrijednosti izlaznih jezičnih varijabli „TRANSLACIJA“ i „ROTACIJA“, za različite vrijednosti ulaza, grafički je vidljivo u dijagramu zaključivanja prikazanome na slici 9, dok je krivulja odziva jezične varijable „TRANSLACIJA i odzivna površina jezične varijable „ROTACIJA“ vidljiva iz dijagrama na slici 10.

Kao što je već spomenuto, za upravljanje mobilnim robotom nužno je poznavati potrebne kutne brzine lijevog i desnog kotača robota. Prethodno definirana jednadžba 6 omogućuje dobivanje kutnih brzina lijevog i desnog kotača temeljem numeričkih vrijednosti translacijske i rotacijske brzine gibanja robota, dobivenih u prethodnom koraku.



Slika 9. Grafički prikazi izračuna numeričkih vrijednosti izlaznih jezičnih varijabli „TRANSLACIJA“ i „ROTACIJA“ za različite vrijednosti ulaza.



Slika 10. Prikaz krivulje odziva jezične varijable „TRANSLACIJA“ i odzivne površine jezične varijable „ROTACIJA“.

5. Testiranje sustava i diskusija

Uspješno je provedeno testiranje neizrazitog upravljanja mobilnim robotom s diferencijalnim pogonom za slučaj izbjegavanja prepreka. Slika 11 prikazuje dva primjera testiranja sustava. U prvom testnom slučaju mobilni robot se slobodno kreće unutar ograđenog poligona, dok je u drugome slučaju dodana dodatna prepreka u sredini poligona.

Testiranjima je pokazano da robot s implementiranim neizrazitim upravljanjem uspješno izbjegava većinu prepreka. S obzirom da je u testiranjima korišten robot sačinjen od jeftinih komponenti (engl. *low cost*), što se manifestira u vidu ograničenih računalnih resursa mikrokontrolera te smanjene pouzdanosti korištenih senzora, prikazani su osnovni slučajevi. Korištenjem snažnijih mikrokontrolera uz redundantne senzore i fuziju podataka s više različitih tipova senzora, znatno se može povećati učinkovitost i pouzdanost sustava. Opisani koncept neizrazitog upravljanja primjenjiv je i na ostale sustave mobilnih robota, poput autonomnih bespilotnih letjelica, kod kojih je izbjegavanje prepreka sastavni dio misije.





Slika 11. Primjeri izbjegavanja prepreka neizravnim upravljanjem mobilnog robota s diferencijalnim pogonom.

6. Literatura

- [1] G. Campion, G. Bastin and B. Dandrea-Novel. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 31(1):47-62.
- [2] S. Armah, S. Yi and T. Abu-Lebdeh. (2014). Implementation of autonomous navigation algorithms on two-wheeled ground mobile robot. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(1):149-164.
- [3] K. W. Jörg. (1995). World modeling for an autonomous mobile robot using heterogenous sensor information. *Robotics and Autonomous Systems*, 14(2-3):159-170.
- [4] H. Omrane, M.S. Masmoudi and M. Masmoudi. (2016). Fuzzy Logic Based Control for Autonomous Mobile Robot Navigation. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
- [5] L. A. Zadeh. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338-352.
- [6] B. Novaković, B. Vranješ, D. Novaković, D. Majetić, J. Kasać and D. Brezak. (2002). An Adaptive Fuzzy Robot Control without a Fuzzy Rule Base. *Proceedings of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control: IFAC*.
- [7] B. Novaković, J. Kasać, D. Majetić and D. Brezak. (2002). A New Analytic Adaptive Fuzzy Robot Control. *Transactions of FAMENA*, 26(2):21-34.
- [8] <https://www.chinamoneynetwork.com/2017/03/20/vertex-venture-leads-14m-round-in-chinese-logistics-robot-start-up-geek> (23.03.2020.)
- [9] <https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html> (25.03.2020.)
- [10] <https://blog.zerokol.com/2012/09/arduino-fuzzy-fuzzy-library-for-arduino.html> (27.03.2020.)



Photo 059. Metković / Metković