

## **Autonomni mobilni robot za rješavanje labirinta** *Autonomous mobile robot for maze solving*

<sup>1a</sup>Eugen Skladany, <sup>2a\*</sup>Vesna Krajčić, <sup>3a,b</sup>Mária Krajčić  
<sup>a</sup>Veleučilište u Rijeci, Vukovarska 58, 51000 Rijeka  
<sup>b</sup>Tehnički fakultet u Rijeci, Vukovarska 58, 51000 Rijeka  
e-mail: <sup>1</sup>eskladany@veleri.hr, <sup>2\*</sup>vkrajci@veleri.hr, <sup>3</sup>mkrajci@veleri.hr

**Sažetak:** U radu je prikazan projekt izrade mobilnoga robota s mogućnošću potpuno autonomne navigacije labirintom sastavljenim od dijelova veličine 20 cm x 20 cm. Bitne karakteristike toga robota su samostalnost u gibanju labirintom, mala cijena, izgled prilagođen kretanju labirintom te jednostavan i pouzdan algoritam lijeve ruke za navigaciju labirintom. Detaljno je opisan izbor sklopovlja (mikrokontroler Cytron UNO SE, koračni motori 28BYJ-48 s upravljačkim pločicama, baterija Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V, istosmjerni pretvarač za smanjenje napona Velleman LM2596S, ultrazvučni senzori HC-SR04), način izrade i programiranje robota. Robot je testiran na jednostavnom labirintu sastavljenom od 11 kvadratnih dijelova dimenzija 20 cm x 20 cm. Taj je labirint obuhvaćao sve situacije koje izrađeni robot treba savladati kako bi se samostalno kretao labirintom koristeći algoritam lijeve ruke. Rezultati testiranja pokazali su uspješno potpuno samostalno kretanje izrađenog robota zadanim labirintom i pouzdanost izabranoga jednostavnoga algoritma lijeve ruke za navigaciju mobilnoga robota.

**Ključne riječi:** autonomni mobilni robot, rješavanje labirinta, mikrokontroler

**Abstract:** The paper presents the project of building a mobile robot with the possibility of fully autonomous navigation through a maze composed of parts measuring 20 cm x 20 cm. Important characteristics of this robot are independence in movement through the maze, low price, appearance adapted to moving through the maze and a simple and reliable left hand algorithm for navigating the maze. Hardware (Cytron UNO SE microcontroller, 28BYJ-48 stepper motors with controllers, Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V battery, Velleman LM2596S voltage reduction DC converter, HC-SR04 ultrasonic sensors) selection, robot building and programming are described in detail. The robot was tested on a simple maze composed of 11 square parts measuring 20 cm x 20 cm. This maze included all situations that designed robot needs to overcome in order to move independently through the maze using left hand algorithm. The testing results showed successful fully independent movement of the built robot through the given maze and reliability of the selected simple left hand algorithm for mobile robot navigation.

**Key words:** *autonomous mobile robot, maze solving, microcontroller*

## 1. Uvod

Izrada robota za rješavanje labirinta predstavlja izazov u području mobilne robotike koji zahtijeva preciznu integraciju sustava za napajanje, pogona, senzora i algoritma za upravljanje kretanjem kako bi se postigla potpuna autonomija u navigaciji robota. Cilj rada je bio razviti mobilni robotski sustav koji može samostalno rješavati labirint sastavljen od kvadratnih dijelova veličine 20 cm x 20 cm po uzoru na MicroMouse natjecanja.

Na prvom MicroMouse natjecanju organiziranom 1977. godine (Christiansen, 1977.) natjecalo se više od sto različitih robota, od kojih je samo 15 uspjelo doći do završetka (Allan, 1979.). 1985. godine održano je prvo svjetsko MicroMouse natjecanje u Japanu (Ottens, 2010.). Pravilnik za MicroMouse natjecanja izdaje IEEE, a posljednja verzija pravilnika vrijedi od 2020. godine (MicroMouse Competition Rules, 2020.).

U sljedećem poglavlju je objašnjen izbor sklopovlja potrebnoga za izradu vlastitoga autonomnoga mobilnoga robota.

## 2. Sklopovlje

Osnovni dijelovi robotskoga sustava su: mikrokontroler Cytron UNO SE, dva koračna motora 28BYJ-48 s upravljačkim pločicama, baterija Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V, istosmjerni pretvarač za smanjenje napona Velleman LM2596S i tri ultrazvučna senzora HC-SR04. Ukupni troškovi tih komponenata iznosili su 142.70 EUR. Osim toga u izradi robotskoga sustava su korišteni: punjač baterija Gens Ace IMARS mini G-Tech USB-C 2-4S 60 W, bušilica, odvijač, multimetar, lemilica, plastična posuda, kotači, vijci, ljepilo, itd.

Glavni dio robotskoga sustava je upravljačka ploča Cytron UNO SE (Slika 1), klon popularnog Arduino UNO mikrokontrolera, koja ima neke dodatne mogućnosti u usporedbi sa standardnom Arduino UNO upravljačkom pločom (CT UNO, 2014.).

**Slika 1.** *Cytron UNO SE upravljačka ploča.*



Izvor: [https://docs.google.com/document/d/1IAeGP\\_92g0VC\\_xuyL\\_ibK\\_EhHU-cxrf3AOS--tf-hvw/view](https://docs.google.com/document/d/1IAeGP_92g0VC_xuyL_ibK_EhHU-cxrf3AOS--tf-hvw/view)

Za pogon se koriste dva koračna motora 28BYJ-48 (Slika 2) i dvije upravljačke pločice ULN2003 koje su potrebne za precizno upravljanje motorima (Velleman, 2018.). Za

istodobno korištenje oba motora potrebno je napajanje koje može generirati 800 mA, ali bi sigurnije bilo koristiti napajanje koje može generirati istosmjernih 5 V i 1000 mA (Mouser, 2018.).

**Slika 2.** Koračni motor 28BYJ-48.



Izvor: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/stepd-01-data-sheet-1143075.pdf>

U robotskom sustavu upotrijebljena su dva izvora napajanja: 9 V cink-ugljikove baterije za napajanje mikrokontrolera i baterija Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V za napajanje koračnih motora (Slika 3). Cink-ugljikove 9 V baterije zauzimaju manje prostora od držača 4 AA 1.5 V baterija te imaju čvrste priključke pa se baterije ne odspajaju prilikom naglih okreta robota. Punjiva baterija Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V je kompaktna litij-polimer (LiPo) baterija koja je vrlo lagana i namijenjena korištenju u modelima zrakoplova na daljinsko upravljanje (Gens Ace, 2024.). Punjač ove baterije treba dodatno nabaviti jer ne dolazi u paketu s baterijom.

**Slika 3.** Baterija Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V.



Izvor: [https://gensace.de/cdn/shop/files/1\\_33\\_25.jpg](https://gensace.de/cdn/shop/files/1_33_25.jpg)

Kako izabrana baterija pruža napon veći od 5 V koliko je potrebno za motore, treba koristiti istosmjerni pretvarač za smanjenje napona. U tu svrhu je izabran uređaj LM2596S proizvođača Velleman (Slika 4) zbog svojih malenih dimenzija, niske cijene i dobre pouzdanosti (Velleman, 2019.).

**Slika 4.** Istosmjerni pretvarač za smanjenje napona Velleman LM2596S.



Izvor: [https://cdn.velleman.eu/downloads/29/vma404\\_a4v02.pdf](https://cdn.velleman.eu/downloads/29/vma404_a4v02.pdf)

Za mjerenje udaljenosti robota od zidova labirinta izabrana su tri ultrazvučna senzora HC-SR04 (Slika 5). To su pouzdani senzori malih dimenzija koji mogu očitati točnu udaljenost do najbliže prepreke unutar 4 metra od senzora (Ultrasonic, 2010.).

**Slika 5.** *Ultrazvučni senzor HC-SR04.*



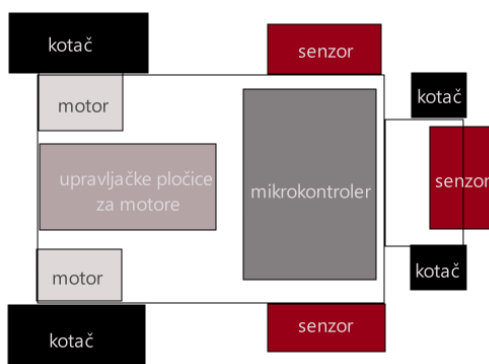
Izvor: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

U nastavku je objašnjeno spajanje prethodno navedenih komponenti u složeni robotski sustav.

### 3. Izrada robota

Prva verzija robota je zamišljena kao jednostavno vozilo na četiri kotača (Slika 6).

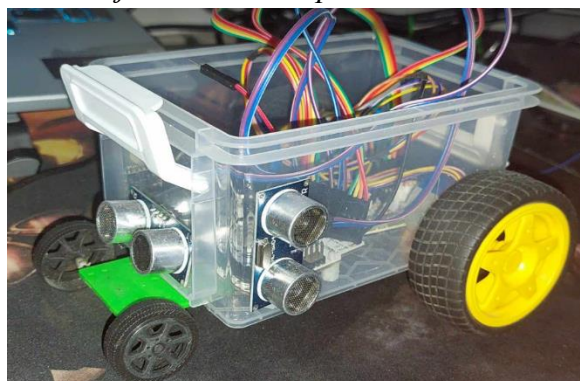
**Slika 6.** *Raspored dijelova prve verzije robota.*



Izvor: *Autori*

Šasija je napravljena od plastične posude s poklopcem. Motori, upravljačke pločice za motore i mikrokontroler nalaze se unutar šasije, a senzori su pričvršćeni na vanjski dio šasije kako bi se pomoću njih dobile informacije u udaljenosti robota od objekta s lijeve, desne i prednje strane. Dva stražnja kotača povezana su izravno na koračne motore bez ikakvoga prijenosnika jer koračni motori sadrže unutarnji prijenosnik omjera 1/64. Stražnji kotači su plastični i obloženi slojem gume, promjera 4 cm te su specifično namijenjeni za izradu vozila na daljinsko upravljanje. Prednji kotači su jednostavni plastični kotači promjera 2 cm. Nakon povezivanja svih komponenta konačne dimenzije prve verzije robota su bile 18 cm x 15 cm (Slika 7).

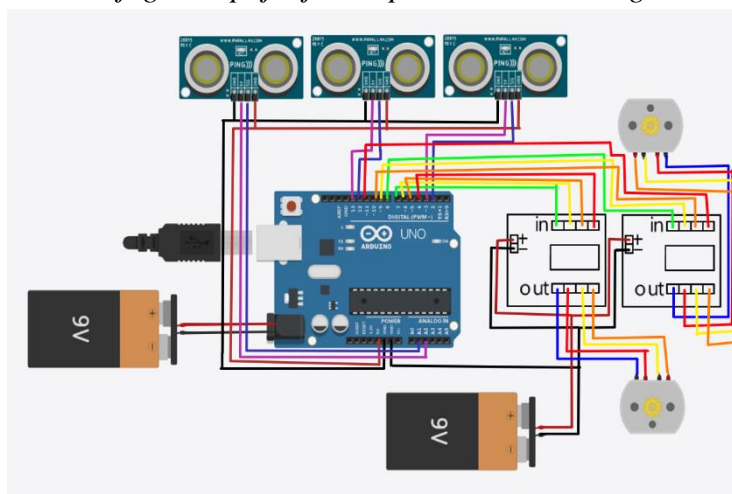
**Slika 7.** Prva verzija robota s komponentama umetnutim u šasiju.



*Izvor: Autori*

Nakon toga bilo je potrebno sve komponente povezati s mikrokontrolerom (Slika 8) i provjeriti mogu li međusobno ispravno komunicirati. Najprije su na upravljačku ploču spojeni ultrazvučni senzori i konfigurirani upotrebom knjižnice Ultrasonic. Nakon toga povezani su motori i njihove upravljačke pločice te je spojeno napajanje. Prva verzija robota je koristila 9 V cink-ugljikove baterije za napajanje motora.

**Slika 8.** Dijagram spajanja komponenata robotskoga sustava.



*Izvor: Autori*

Rad robotskoga sustava provjeren je na jednostavnom poligonu koji se sastojao od dijelova zida dugačkih 20 cm i visokih 10 cm, pri čemu je primijećeno nekoliko nedostataka. Duljina robota od 18 cm bila je prevelika i činila je skretanje nepraktičnim u labirintu sa zidovima duljine 20 cm. Prednji kotači su znatno otežavali skretanje robota jer su bili napravljeni od šuplje i oštre plastike te su zapinjali za podlogu. Cink-ugljikove 9 V baterije nisu bile pogodne za napajanje motora jer je njihova snaga počela opadati nakon 10 do 15 minuta rada robota pa nisu bile ekonomski isplative. Prva dva nedostatka riješena su uklanjanjem prednjih kotača s prve verzije robota (Slika 7) pa je tako dobivena druga verzija robota (Slika 9) s dva kotača.

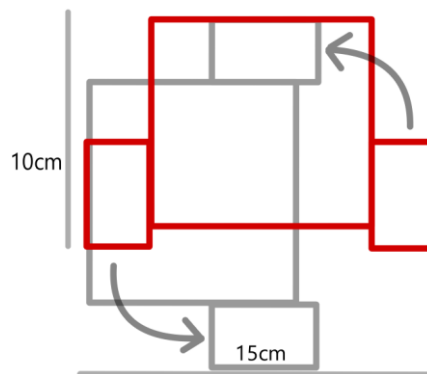
**Slika 9.** *Druga verzija robota.*



*Izvor: Autori*

Dimenzije robota su uklanjanjem prednjih kotača smanjene sa 18 cm x 15 cm na 10 cm x 15 cm (Slika 10). Problem uzrokovan preslabim cink-ugljkovim 9 V baterijama uklonjen je korištenjem Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V LiPo punjive baterije koja je mogla omogućiti kretanje robota dulje od 1 sat pomoću jednog punjenja.

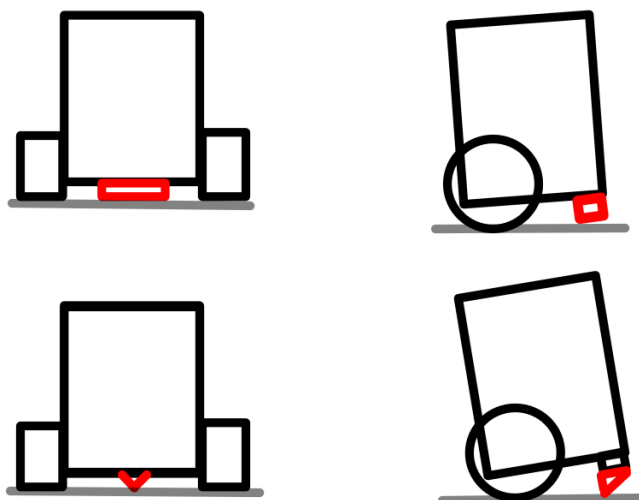
**Slika 10.** *Prostor koji je potreban da se druga verzija robota okrene za 90° ulijevo.*



*Izvor: Autori*

Druga verzija robota drži ravnotežu na tri točke: dvije su stražnji kotači, a treća je dio plastične šasije (Slika 11). Provjerom je otkriveno da je taj dio šasije koji je dodirivao pod stvarao nepotreban otpor, što je usporavalo robota i otežavalo njegovo skretanje pa je na njega dodan šiljak, čime je duljina dodira smanjena s 3 cm na 2 mm (Slika 11). Podizanje šasije šiljkom je podiglo senzore iznad zidova labirinta pa su senzori morali biti spušteni za 3 cm (Slika 12).

**Slika 11.** *Dijelovi šasije robota u dodiru s tlom označeni crvenom bojom.*



*Izvor: Autori*

**Slika 12.** *Razlika u položaju lijevoga senzora prije (lijevo) i nakon (desno) podešavanja.*



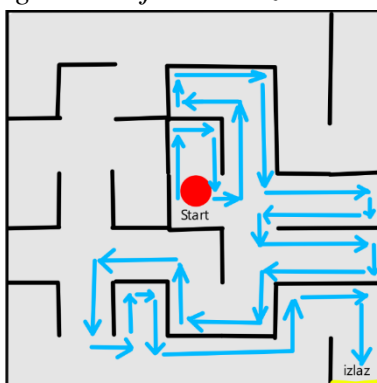
*Izvor: Autori*

Kretanjem robota labirintom se upravlja pomoću izabranoga algoritma za navigaciju.

#### **4. Izbor algoritma za rješavanje labirinta i programiranje robota**

Prva metoda rješavanja labirinta koja je postala popularna na MicroMouse natjecanjima je algoritam lijeve ruke (Allan, 1979.). Nakon toga su razvijeni algoritmi dubinskoga i širinskoga traženja, potpune pretrage i poplavnoga punjenja (Willardson, 2001.). Kako se algoritam poplavnoga punjenja pokazao dosta zahtjevnim za odabrani mikrokontroler, izabran je jednostavniji algoritam lijeve ruke (Slika 13) u kojem robot uvijek prati lijevi zid labirinta dok ne naiđe na prepreku (zid na raskrižju ili u zavoju), nakon čega skreće ulijevo ako je to moguće, a u suprotnom skreće udesno. Ako se nađe u slijepoj ulici, okreće se za 180° i nastavlja pratiti lijevi zid. Robot se prestaje kretati kad izađe iz labirinta, što detektira očitavanjem udaljenosti veće od 20 cm na svim sensorima. Iako savladavanje labirinta pomoću algoritma lijeve ruke često traje dulje zbog brojnih skretanja robota, taj je algoritam vrlo jednostavan i pouzdan.

**Slika 13.** Primjena algoritma lijeve ruke za kretanje robota labirintom.



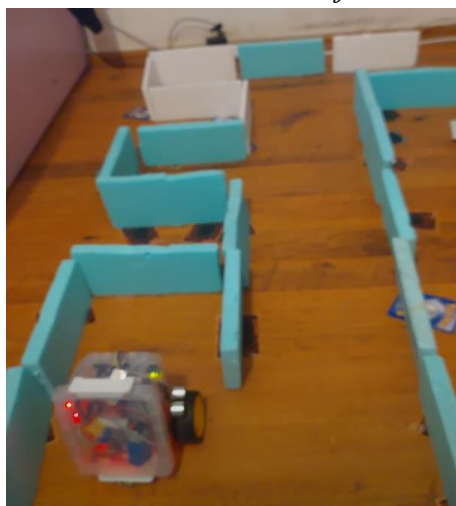
*Izvor: Autori*

Programski kôd robota je izrađen u Arduino IDE paketu i robotski sustav je testiran.

## 5. Testiranje robota

Za testiranje funkcionalnosti robota postavljen je jednostavan labirint sastavljen od 11 kvadratnih dijelova dimenzija 20 cm x 20 cm. Taj labirint obuhvaća sve situacije koje druga verzija robota treba savladati kako bi se samostalno kretala labirintom koristeći algoritam lijeve ruke. Prilikom testiranja autonomni mobilni robot je započeo rješavanje labirinta iz jugozapadnoga kuta, okrenut prema sjeveru (Slika 14), dok se izlaz nalazio u sjeveroistočnom kutu (Slika 15). Videosnimka ovoga testa dostupna je na YouTube platformi na poveznici <https://youtu.be/h9pCk2aGt5U>.

**Slika 14.** Početak testiranja robota.



*Izvor: Autori*

**Slika 15.** Robot izlazi iz labirinta.



*Izvor: Autori*

Tijekom ovoga testa, robot je uspješno demonstrirao sve funkcionalnosti potrebne za svladavanje labirinta, bez da je jednom dotaknuo zidove. Uspješno je izveo okretanje u slijepim ulicama, standardno skretanje, prepoznavanje jednostavnih raskrižja, raskrižja s praznim prostorom ispred njega te izbjegavanje zidova pomoću funkcije za centriranje.

## **6. Zaključak**

Unatoč tehničkim izazovima, poput ograničenih resursa mikrokontrolera i potrebe za pouzdanim rješavanjem zadataka u stvarnom vremenu, uspješno je implementiran sustav koji omogućuje samostalno kretanje robota u labirintu korištenjem algoritma lijeve ruke. Iako taj algoritam nije najbrži način za pronalazak izlaza iz labirinta, njegova jednostavnost i pouzdanost osiguravaju da robot sigurno pronađe izlaz. Rezultati ovoga rada potvrđuju da i jednostavniji algoritmi, u kombinaciji s pažljivo odabranim komponentama, mogu učinkovito rješavati složene zadatke, što ga čini dobrim temeljem za budući razvoj naprednijih robotskih sustava.

Postoji više mogućnosti poboljšanja izrađenoga sustava. Koračni motori bi mogli biti zamijenjeni istosmjernim motorima bez četkica zbog veće snage i brzine te mogućnosti točnoga upravljanja. Arduino upravljačka ploča bi se mogla zamijeniti složenijim mikrokontrolerom poput Raspberry Pi platforme. To bi omogućilo upotrebu složenijih senzora ili kamera te implementaciju naprednijega algoritma poplavnoga punjenja koji bi znatno ubrzao rješavanje labirinta i smanjio broj nepotrebnih skretanja.

## **Literatura**

- Allan, R. (1979). "The amazing micromice: See how they won", *IEEE Spectrum*, vol. 16(9), 62-65.
- Christiansen, D. (1977). "Announcing the Amazing Micro-Mouse Maze Contest", *IEEE Spectrum*, vol. 14(5), 27.

- CT UNO (Arduino UNO Compatible) User's Manual. (2014).  
[https://docs.google.com/document/d/11AeGP\\_92g0VC\\_xuyL\\_ibK\\_EhHU-cxrf3AOS--tf-hvw/view](https://docs.google.com/document/d/11AeGP_92g0VC_xuyL_ibK_EhHU-cxrf3AOS--tf-hvw/view) (27.06.2024.)
- Gens Ace Soaring 1000 mAh 7.4 V. (2024).  
<https://gensace.de/collections/soaring/products/gens-ace-soaring-1000mah-7-4v-30c-2s1p-lipo-battery-pack-with-t3-plug> (28.06.2024.)
- MicroMouse Competition Rules, IEEE R2 SAC. (2020). [https://attend.ieee.org/r2sac-2020/wp-content/uploads/sites/175/2020/01/MicroMouse\\_Rules\\_2020.pdf](https://attend.ieee.org/r2sac-2020/wp-content/uploads/sites/175/2020/01/MicroMouse_Rules_2020.pdf)  
(29.06.2024.)
- Mouser, 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor Data Sheet. (2018).  
<https://www.mouser.com/datasheet/2/758/stepd-01-data-sheet-1143075.pdf>  
(28.06.2024.)
- Otten, D. Micromouse History. (2010). <https://micromouseonline.com/micromouse-book/history/> (21.06.2024.)
- Ultrasonic Ranging Module HC - SR04 data sheet. (2010).  
<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf> (29.06.2024.)
- Velleman, 5 VDC stepper motor with ULN2003 driver board user manual. (2018).  
<https://cdn.velleman.eu/downloads/25/wpi401a4v01.pdf> (28.06.2024.)
- Velleman, DC-DC adjustable voltage step down module LM2596S user manual. (2019).  
[https://cdn.velleman.eu/downloads/29/vma404\\_a4v02.pdf](https://cdn.velleman.eu/downloads/29/vma404_a4v02.pdf) (28.06.2024.)
- Willardson, D. Analysis of Micromouse Maze Solving Algorithms, ECE 557: Learning from Data. (2001). [https://www.academia.edu/8226457/Analysis\\_of\\_Micromouse\\_Maze\\_Solving\\_Algorithms](https://www.academia.edu/8226457/Analysis_of_Micromouse_Maze_Solving_Algorithms) (28.06.2024.)