

Rancang Bangun Robot Penghindar Halangan dengan Metode Fuzzy Logic

Fajar Mustofa Kamal^a, Santoso^b, Ratna Hartayu^c, Ahmad Ridhoⁱ^d, Kukuh Setyadjit^e, Lutfi Agung Swarga^f, Jufrizel^g

^{a, b, c, d, e, f} Department of Electrical Engineering, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

^g Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 Maret 2025

Received in revised form

10 April 2025

Accepted 20 Mei 2025

Available online 20 Juni 2025

Keywords:

Robot Obstacle

Fuzzy Logic

IOT

ABSTRACT

The development of autonomous mobile robots requires the ability to detect and avoid obstacles automatically to enhance safety and efficiency in dynamic environments. This study aims to design an obstacle-avoiding robot based on fuzzy logic, which enables adaptive decision-making similar to human reasoning. The system is controlled by an ESP-32 microcontroller, integrated with ultrasonic sensors to measure the distance to nearby objects, and an L298N motor driver to control the direction and speed of DC motors using an H-bridge and PWM. Additionally, Firebase is employed as a real-time backend for data monitoring and management. Test results indicate that the robot can operate according to the design, performing maneuvers such as turning left, right, moving forward, or backward when detecting obstacles within a certain range. The system proves to be effective in obstacle detection and avoidance, achieving a satisfactory success rate during testing. This prototype presents an innovative solution in the implementation of intelligent control systems based on fuzzy logic and is expected to contribute to the advancement of adaptive and responsive autonomous robotics.

1 Pendahuluan

Agar robot mobile dapat beroperasi secara mandiri di lingkungan yang dinamis dan tidak pasti dan mengurangi risiko kerusakan atau kecelakaan, kemampuan untuk mendeteksi dan menghindari halangan secara otomatis dan akurat adalah salah satu pertahanan utama dalam pengembangan mereka.

Untuk mencapai tujuan tersebut, berbagai sensor dan metode pengendalian digunakan. Salah satunya adalah logika fuzzy, yang memiliki kemampuan untuk meniru proses pengambilan keputusan manusia. Metode ini digunakan bersama dengan modul ESP-32 sebagai mikrokontroler utama yang mengontrol seluruh sistem dan sensor ultrasonik untuk mengidentifikasi jarak objek di sekitar robot. Driver motor L298N memungkinkan kontrol arah dan kecepatan motor DC secara tepat menggunakan rangkaian jembatan H dan PWM.

Selain itu, sistem pengembangan ini memanfaatkan layanan backend Firebase dari Google, yang memungkinkan pengelolaan dan analisis data secara real-time. Dengan menggunakan teknologi ini, robot yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional dan keamanan pengguna dengan cepat.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun robot penghindar halangan berbasis logika fuzzy

yang mampu beroperasi secara otomatis dan adaptif. Hasil dari pengembangan ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi robotika berbasis sistem cerdas, serta memberikan kontribusi dalam bidang robotika otonom yang semakin berkembang.

2 Studi Literatur

2.1. Esp-32

ESP-32 merupakan modul mikrokontroler terintegrasi yang dikembangkan oleh Espressif Systems, memiliki fitur lengkap dan kinerja tinggi untuk berbagai aplikasi Internet of Things (IoT). Modul ini merupakan pengembangan dari ESP8266 dan dilengkapi dengan dua prosesor yang mampu bekerja secara multitasking, satu untuk mengelola jaringan WiFi dan Bluetooth, dan satu lagi untuk menjalankan aplikasi secara independen. ESP-32 memiliki kecepatan prosesor hingga 160 MHz dan memori RAM yang cukup besar, mendukung berbagai perangkat tambahan seperti ADC, DAC, I2C, I2S, SPI, dan UART, sehingga sangat cocok untuk pengolahan sinyal analog dan digital.

Fitur konektivitas WiFi dan Bluetooth yang lengkap memungkinkan ESP-32 digunakan dalam berbagai proyek IoT yang membutuhkan komunikasi wireless yang handal dan efisien. Selain itu, modul ini juga mendukung protokol TCP/IP, HTTP, dan FTP, serta memiliki fitur pemrosesan sinyal yang cepat dan efisien. Kemudahan penggunaan dan ketersediaan library yang lengkap menjadikan ESP-32 pilihan

populer dalam pengembangan sistem otomatisasi dan pengendalian perangkat berbasis sistem cerdas.

Dengan kemampuan ini, ESP-32 mampu berfungsi sebagai pusat pengendali yang mengintegrasikan sensor, aktuator, dan platform cloud seperti Firebase untuk pengolahan data secara real-time, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi robotika dan sistem penginderaan jarak seperti robot penghindar halangan berbasis logika fuzzy.

2.2. Fuzzy Logic

Fuzzy logic merupakan teori himpunan logika yang dikembangkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965, yang bertujuan untuk merepresentasikan pengetahuan manusia ke dalam bentuk matematis yang menyerupai cara berpikir manusia. Berbeda dengan logika klasik yang hanya mengenal nilai benar (1) atau salah (0), fuzzy logic memungkinkan nilai hasil berada di antara 0 dan 1, sehingga dapat menangani ketidakpastian dan ketidaktepatan data secara lebih fleksibel.

Proses kerja sistem fuzzy meliputi beberapa tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, basis pengetahuan, mesin inferensi, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, data masukan yang bersifat tegas diubah menjadi data linguistik menggunakan fungsi keanggotaan tertentu, seperti fungsi linier. Basis pengetahuan berisi aturan-aturan logika IF... THEN yang menghubungkan variabel input dan output dalam bentuk himpunan fuzzy. Mesin inferensi mengolah data fuzzy berdasarkan aturan yang ada untuk menghasilkan keluaran fuzzy, yang kemudian dikonversi kembali menjadi nilai tegas melalui proses defuzzifikasi.

Metode inferensi yang umum digunakan dalam sistem fuzzy adalah Mamdani, yang menggunakan fungsi implikasi min dan metode penarikan kesimpulan seperti max, additive, dan PROBOR. Fungsi keanggotaan yang digunakan dapat berupa berbagai bentuk, termasuk fungsi linier, yang memudahkan proses perhitungan dan implementasi. Dengan kemampuannya dalam mengatasi ketidakpastian dan merepresentasikan pengetahuan manusia secara lebih natural, fuzzy logic banyak diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk pengendalian sistem otomatis dan robotika.

2.3. Platform Firebase

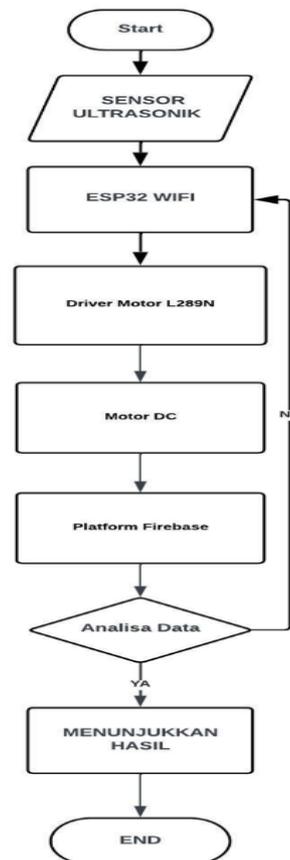
Firebase adalah layanan *Backend as a Service* (BaaS) yang dikembangkan oleh Google untuk memudahkan pengembangan aplikasi dengan menyediakan berbagai fitur backend secara lengkap dan terintegrasi. Firebase menawarkan solusi yang memungkinkan pengembang fokus pada pengembangan fitur aplikasi tanpa harus mengelola infrastruktur server secara langsung.

Fitur utama Firebase meliputi Realtime Database, Cloud Firestore, Authentication, Cloud Messaging, Hosting, dan Analytics. Realtime Database dan Cloud Firestore adalah database cloud yang mendukung sinkronisasi data secara real-time dan offline, sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan data yang selalu terupdate dan responsif. Firebase Authentication memudahkan proses autentikasi pengguna melalui berbagai metode seperti email, nomor telepon, Google, Facebook, dan lainnya. Selain itu, Firebase Cloud Messaging memungkinkan pengiriman notifikasi dan pesan secara efisien ke pengguna aplikasi.

Firebase juga menyediakan layanan hosting konten web yang cepat dan aman, serta integrasi dengan layanan analitik untuk memantau penggunaan aplikasi secara detail. Dengan kemudahan integrasi dan penggunaan library yang lengkap, Firebase menjadi platform yang populer dalam pengembangan aplikasi berbasis IoT, robotika, dan sistem otomatisasi.

3 Metodologi

3.1. Flow chart

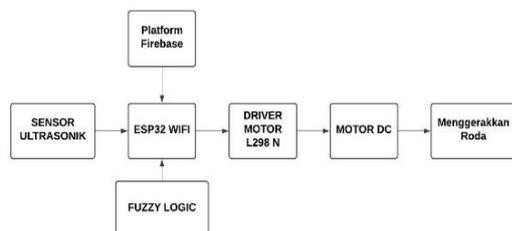


Gambar 1. Flowchart Robot Penghindar Halangan

Flowchart pada Gambar 1 menggambarkan alur kerja sistem robot dalam menghindari halangan secara otomatis.

Proses dimulai dari pembacaan jarak oleh sensor ultrasonik yang dipasang di sisi kiri, tengah, dan kanan robot. Data jarak tersebut dikirim ke ESP32 untuk diproses menggunakan logika fuzzy yang telah diprogram dengan sejumlah rule tertentu. Berdasarkan hasil inferensi fuzzy, ESP32 mengatur kecepatan dan arah motor DC melalui sinyal PWM. Selanjutnya, data sensor dan pergerakan motor dikirim ke Firebase untuk dianalisis, divalidasi, dan disimpan sebagai log pengujian sistem.

3.2. Block Diagram

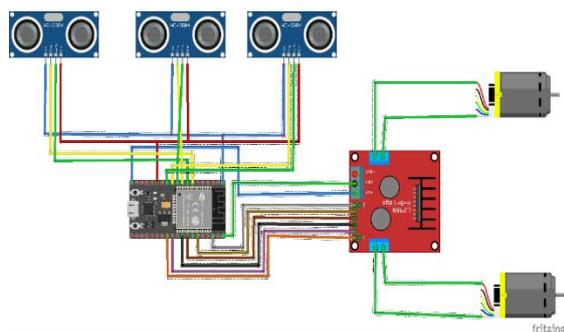


Gambar 2. Bock Diagram Sistem

Gambar 2 menunjukkan blok diagram sistem robot penghindar halangan yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sensor ultrasonik, mikrokontroler ESP32, driver motor L298N, motor DC, dan platform Firebase. Sensor ultrasonik berfungsi sebagai alat pengukur jarak antara robot dan objek penghalang di sekitarnya. Data jarak ini dikirimkan ke ESP32, yang kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Logic untuk menentukan arah gerak robot secara otomatis dan adaptif.

ESP32 berperan sebagai pusat kendali sistem yang menerima input dari sensor, melakukan inferensi fuzzy berdasarkan rulebase yang telah ditentukan, serta menghasilkan sinyal PWM sebagai output untuk mengontrol motor DC melalui driver L298N. Selain itu, ESP32 juga bertugas mengirimkan data input sensor dan output motor ke Firebase secara real-time. Hal ini memungkinkan pemantauan dan analisis performa robot dilakukan secara daring, sehingga sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan efisiensi tinggi.

3.3. Wiring Diagram



Gambar 4. Wiring Diagram

Pada Gambar 4 ditampilkan diagram pengkabelan (wiring diagram) dari sistem robot penghindar halangan yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP-32. ESP-32 berfungsi sebagai otak utama sistem, yang bertanggung jawab untuk membaca data dari sensor, memproses data tersebut dengan logika fuzzy, serta mengirimkan sinyal kendali ke driver motor. Mikrokontroler ini memiliki banyak General Purpose Input Output (GPIO) yang memungkinkan koneksi ke berbagai perangkat eksternal.

Dalam sistem ini digunakan tiga sensor ultrasonik HC-SR04 yang masing-masing diposisikan di bagian kiri, tengah, dan kanan robot. Sensor ini terhubung ke ESP-32 melalui pin khusus. Pin trig (trigger) sensor kiri, tengah, dan kanan masing-masing dihubungkan ke GPIO 32, 25, dan 27, sedangkan pin echo dari masing-masing sensor dihubungkan ke GPIO 33, 26, dan 14 pada ESP-32. Pin trig berfungsi untuk mengirimkan gelombang ultrasonik, sedangkan pin echo menerima pantulan gelombang untuk mengukur jarak objek.

Sinyal dari sensor kemudian diproses oleh ESP-32 menggunakan metode logika fuzzy. Hasil pemrosesan ini menghasilkan output berupa sinyal PWM (Pulse Width Modulation) untuk mengatur kecepatan putaran motor DC. Untuk menggerakkan motor, digunakan driver motor L298N. Driver ini menggunakan konfigurasi H-Bridge yang memungkinkan kontrol arah dan kecepatan dua motor secara independen.

Pada bagian driver motor, pin ENA dihubungkan ke GPIO 22 pada ESP-32 untuk mengendalikan kecepatan motor kiri, sedangkan pin IN1 dan IN2 masing-masing terhubung ke GPIO 21 dan 19 untuk mengatur arah putaran motor kiri. Sementara itu, pin IN3 dan IN4 terhubung ke GPIO 18 dan 17 untuk motor kanan, dan pin ENB yang mengatur kecepatannya dihubungkan ke GPIO 16. Motor DC kiri dan kanan masing-masing dihubungkan ke terminal OUT1–OUT2 dan OUT3–OUT4 pada driver L298N.

Konfigurasi wiring ini memungkinkan sistem robot untuk membaca data lingkungan sekitar secara real-time, memproses data menggunakan fuzzy logic, dan mengontrol arah serta kecepatan gerakan motor DC secara akurat dan efisien. Kombinasi ESP-32, sensor ultrasonik, dan driver motor memberikan fleksibilitas tinggi serta keandalan dalam navigasi otonom robot.

4 Pembahasan

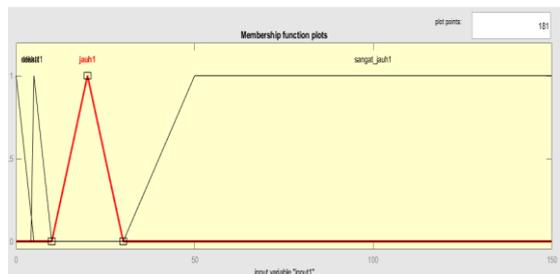
4.1. Menentukan Logika Fuzzy

Dalam menentukan logika fuzzy ada 2 tahap yaitu : Menentukan fungsi keanggotaan logika fuzzy dan aturan / rule fuzzy logic yang akan digunakan.

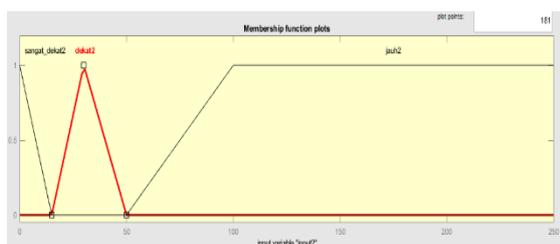
4.1.1 Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy

Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy digunakan dalam menghitung derajat suatu himpunan fuzzy. Yang masing-masing himpunan memiliki fungsi yang telah didefinisikan.

1. Fungsi keanggotaan Input



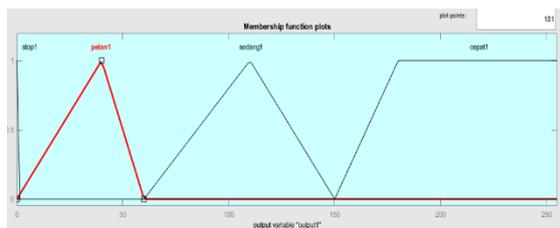
Gambar 5. Fungsi keanggotaan Sensor Kiri dan Sensor Kanan



Gambar 6. Fungsi keanggotaan Sensor Tengah

Pada gambar 5 merupakan membership Fungsi keanggotaan Sensor Kiri dan Sensor Kanan dan pada gambar 6 merupakan membership Fungsi keanggotaan Sensor tengah. Pada sensor kiri dan kanan memiliki 4 parameter input yaitu: a). Sangat Dekat dengan jarak 0 – 5 cm, b). Dekat dengan jarak 5 - 10 cm, c). Jauh dengan jarak 10 – 50 cm, d). Sangat Jauh dengan jarak 50 - 150 cm. Pada sensor tengah memiliki 3 parameter input yaitu: a). Sangat Dekat dengan jarak 0 – 15 cm, b). Dekat dengan jarak 15 – 50 cm, c). Jauh dengan jarak 50 – 250 cm.

2. Fungsi keanggotaan Output



Gambar 7. Fungsi keanggotaan Output

Pada gambar 7 ditampilkan membership function output yaitu motor kiri dan motor kanan. Output yang akan dieksekusi oleh robot adalah hasil defuzzifikasi dari rulebase berdasarkan hasil membership function input. Dengan garis besar defuzzifikasi adalah ketika terdapat hambatan di depan

robot, robot akan menentukan arah sesuai dengan jarak sisi yang lebih luas dan kemudian terus berlanjut untuk bergerak. Fungsi keanggotaan untuk output memiliki 4 parameter output yaitu: a). Berhenti dengan nilai pwm 0, b). Pelan dengan nilai pwm 0 – 50, c). Sedang dengan nilai 50 – 150, d). Cepat dengan nilai 150 – 255.

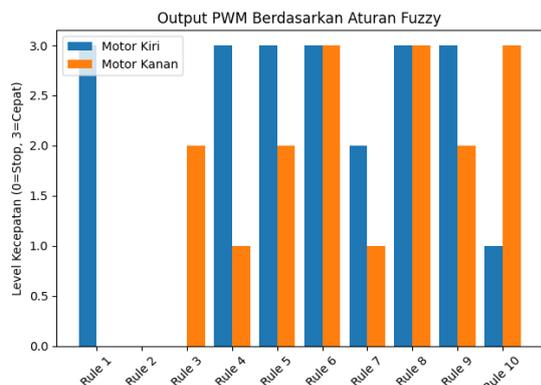
4.1.2 Aturan Fuzzy

Himpunan fuzzy dan operator fuzzy merupakan subjek dan kata kerja dari logika fuzzy. Pernyataan aturan if-then ini digunakan untuk merumuskan pernyataan kondisional yang menyusun logika fuzzy. Berikut aturan Fuzzy yang digunakan:

Tabel 1. Aturan Fuzzy Logic

No	Sensor Kiri	Sensor Tengah	Sensor Kanan	Motor Kiri	Motor Kanan
1	Sangat Jauh	Dekat	Sangat Jauh	Cepat	Stop
2	Sangat Jauh	Sangat Dekat	Sangat Jauh	Stop	Stop
3	Jauh	Sangat Dekat	Sangat Dekat	Stop	Sedang
4	Dekat	Dekat	Sangat Jauh	Cepat	Pelan
5	Sangat Jauh	Jauh	Sangat Jauh	Cepat	Sedang
6	Jauh	Jauh	Jauh	Cepat	Cepat
7	Dekat	Dekat	Dekat	Sedang	Pelan
8	Sangat Jauh	Sangat Dekat	Sangat Jauh	Cepat	Cepat
9	Sangat Jauh	Jauh	Sangat Jauh	Cepat	Sedang
10	Sangat Dekat	Jauh	Sangat Dekat	Pelan	Cepat

Tabel aturan fuzzy logic menunjukkan kombinasi kondisi input dari sensor kiri, tengah, dan kanan, serta respons output yang diberikan kepada motor kiri dan kanan. Sistem menggunakan logika *if-then* untuk menentukan aksi berdasarkan jarak rintangan. Misalnya, jika sensor tengah mendeteksi jarak sangat dekat, seperti pada baris 2 dan 3, maka robot akan berhenti atau hanya satu motor yang bergerak untuk menghindari tabrakan. Ketika jalur tengah relatif kosong dan sisi kiri atau kanan terhalang, seperti pada baris 1 dan 4, maka robot akan membelok dengan menyesuaikan kecepatan motor. Secara keseluruhan, aturan ini memungkinkan robot merespons lingkungan secara fleksibel dan adaptif.



Gambar 8. Output PWM berdasarkan Logika Fuzzy

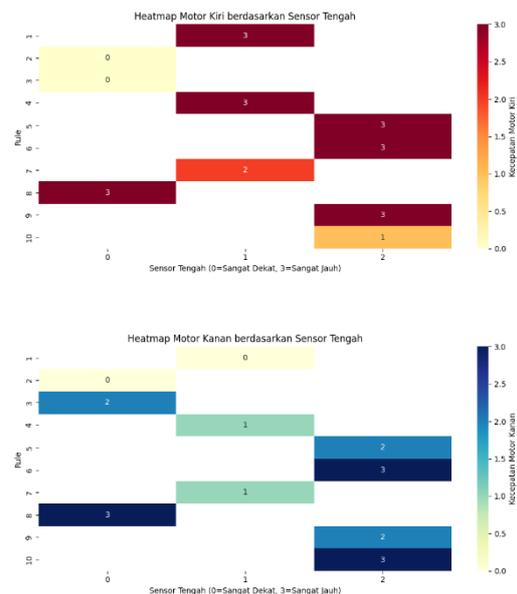
4.2 Hasil Pengujian

Pada penelitian ini melakukan pengambilan data sensor ultrasonik dan PWM motor dc pada robot penghindar halangan menggunakan platform firebase. Untuk mengetahui nilai jarak dan PWM motor dc saat robot menghindari halangan. Berikut merupakan data yang berhasil di dapat dari uji coba robot untuk menghindari halangan dengan metode Fuzzy logic:

Tabel 2. Data dari percobaan

No	Sensor Kiri	Sensor Tengah	Sensor Kanan	Motor Kiri	Motor Kanan
1	150 cm	45 cm	38 cm	205,5	0
2	150 cm	15 cm	150 cm	0	0
3	25 cm	10 cm	5 cm	0	104
4	7 cm	18 cm	150 cm	204,9	25
5	50 cm	250 cm	150 cm	213,6	111,1
6	19 cm	134 cm	19 cm	212,7	212,7
7	9 cm	38 cm	28 cm	100,1	25
8	43 cm	2 cm	54 cm	210,1	0
9	33 cm	66 cm	150 cm	204,3, 46	101,8
10	5 cm	250 cm	5 cm	212	212

Tabel hasil pengujian menunjukkan respons robot terhadap berbagai kondisi rintangan berdasarkan data dari sensor ultrasonik dan output PWM motor. Saat rintangan terdeteksi di tengah atau sisi tertentu, sistem fuzzy secara adaptif mengatur kecepatan motor untuk menghindari. Misalnya, jika sisi kanan terhalang, motor kiri bergerak lebih cepat agar robot berbelok ke kiri. Jika jalur terbuka, kedua motor bergerak cepat agar robot maju lurus. Ketika hambatan sangat dekat di semua sisi, robot akan berhenti. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu memproses data sensor secara efektif dan menghasilkan keputusan kendali motor yang sesuai dengan kondisi lingkungan robot secara real-time.



Gambar 9. Head map Motor berdasarkan Sensor

Heatmap pertama menggambarkan pengaruh input dari sensor tengah terhadap kecepatan motor kiri pada setiap rule fuzzy yang diterapkan. Warna yang lebih terang menunjukkan kecepatan rendah atau kondisi berhenti, sedangkan warna yang lebih gelap menunjukkan kecepatan tinggi. Terlihat bahwa ketika sensor tengah mendeteksi objek sangat dekat (nilai 0), motor kiri cenderung diberi perintah berhenti atau melambat. Sebaliknya, saat sensor tengah mendeteksi jarak jauh, motor kiri bergerak dengan kecepatan lebih tinggi untuk melaju maju.

Heatmap kedua menunjukkan pengaruh yang sama terhadap motor kanan. Saat sensor tengah mendeteksi jalur terbuka (nilai 2 atau 3), motor kanan diaktifkan dengan kecepatan tinggi, yang berarti robot diperintahkan untuk bergerak lurus ke depan. Namun, ketika objek terdeteksi sangat dekat di tengah, motor kanan akan diberi nilai rendah, bahkan berhenti, untuk menghindari tabrakan. Kedua heatmap menunjukkan bahwa sensor tengah sangat menentukan arah dan gerak robot.

5 Kesimpulan

Berdasarkan rumusan masalah dalam laporan ini, dapat disimpulkan bahwa robot penghindar halangan yang dirancang menggunakan metode fuzzy logic mampu berfungsi untuk menghindari rintangan di depannya dengan cara berbelok ke kiri, kanan, maju, maupun mundur sesuai dengan sensor ultrasonik yang bekerja saat mendeteksi adanya penghalang pada jarak tertentu. Sistem ini menunjukkan bahwa alat tersebut mampu bekerja secara efektif dalam mendeteksi dan menghindari halangan, serta dapat dioperasikan sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Selain itu, pengujian menunjukkan bahwa

keberhasilan alat mencapai tingkat yang cukup memuaskan, sehingga dapat digunakan sebagai solusi inovatif dalam pengembangan robotika berbasis sistem kontrol fuzzy.

1. Kontribusi Penulis

Konseptualisasi, Fajar Mustofa dan Santoso; metodologi, Fajar Mustofa; perangkat lunak, Fajar Mustofa; validasi, Fajar Mustofa, Santoso, Ratna Hartayu; analisis formal, Fajar Mustofa; investigasi, Fajar Mustofa; sumber daya, Fajar Mustofa; kurasi data, Fajar Mustofa; penulisan—penyusunan draf asli, Fajar Mustofa; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Ratna Hartayu; visualisasi, Ahmad Ridho'i; pengawasan, Kukuh Setyadjit, Jufrizel; administrasi proyek, Lutfi Agung Swarga.

2. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya atas dukungan fasilitas dan bimbingan selama proses penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh dosen pembimbing serta rekan-rekan laboratorium yang telah memberikan masukan dan bantuan teknis selama proses perancangan, pengujian, dan evaluasi sistem robot ini.

Referensi

- [1] F. Arcelli, D. Universita, and F. Sa, "A Fuzzy Logic Programming Language," *Proc. Jt. Conf. Declar. Program.*, pp. 319–332, 1997.
- [2] B. T. Siti Nurmaini, *Aplikasi Logika Fuzzy Pada Sistem Kontrol Robotik*. 2018.
- [3] A. Saelan, *Logika Fuzzy*, vol. 1, no. 13508029. 2009.
- [4] A. Prof. P. Sarode, P. Dalvi, S. Sawdekar, K. Kamble, and S. Siddiqui, "Obstacle Avoidance Robotic Vehicle," vol. 06, no. 02, pp. 82–85, 2022.
- [5] M. Hellmann, "Fuzzy Logic Introduction," no. 1, 1965.
- [6] S. American, N. America, and S. American, "Scientific American, a division of Nature America, Inc.," vol. 269, no. 1, pp. 76–81, 2018.
- [7] M. Khairudin, R. Refalda, S. Yatmono, H. S. Pramono, A. K. Triatmaja, and A. Shah, "Indonesian Journal of Science & Technology The Mobile Robot Control in Obstacle Avoidance Using Fuzzy Logic Controller," vol. 5, no. 3, pp. 334–351, 2020.
- [8] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [9] Kusuma, G. P., & Sutrisno, E. (2018). Rancang bangun robot penghindar halangan menggunakan sensor ultrasonik dan logika fuzzy. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, 4(2), 115–122. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v4i2.10188>
- [10] Mardiyanto, R., & Wibowo, H. (2015). Perancangan robot penghindar halangan menggunakan metode fuzzy dan sensor infrared. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 3(1), 79–86. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.3.1.2015.79-86>
- [11] Dey, N., Ashour, A. S., & Balas, V. E. (Eds.). (2018). *Smart medical data sensing and IoT systems design in healthcare*. Academic Press.
- [12] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.