

Pengaruh Penyesuaian Parameter Membership Function pada Sistem Kendali Robot Balancing Berbasis Fuzzy Logic

^{1*} Santoso, ² Balok Hariadi, ³ Ratna Hartayu, ⁴ Reza Sarwo Widagdo, ⁵ Wahyu Setyo Pambudi, ⁶ M Ary Heryanto

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya

⁵ Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

⁶ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Dian Nuswantoro Semarang

*¹ santoso@untag-sby.ac.id, ² balokhariadi@untag-sby.ac.id, ³ rhartayu@untag-sby.ac.id,

⁴ rezaswidagdo@untag-sby.ac.id ⁵ wahyusp@itats.ac.id, ⁶ m.aryheryanto@dsn.dinus.ac.id

Article Info

Article history:

Received September 17th, 2024

Revised September 26th, 2024

Accepted Oktober 26th, 2024

Keyword:

Fuzzy Logic

Robot Balancing

Membership Function

Control System

Parameter Adjustment

ABSTRACT

This research develops a balancing robot control system using a fuzzy logic approach, focusing on the adjustment of membership function parameters. The main components of the system include the ESP32 microcontroller, MPU6050 sensor for detecting tilt angle and angular velocity, and L298 motor driver for DC motor actuation. Triangular-shaped membership functions are implemented, and parameters a, b, and c are adjusted through simulation to enhance system performance. Evaluation results indicate an average settling time of 1.2 seconds, a maximum overshoot of 5%, and a steady-state error of less than 2 degrees. This adjustment successfully balances response speed and stability, providing important guidance for developers in designing a more optimal fuzzy logic control system. The research was conducted at the Electrical Engineering Laboratory of 17 August 1945 University (Untag) Surabaya from June to December 2023.

Copyright © 2024 Jurnal JEETech.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Santoso

Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya
Semolowaru 45 Surabaya

Email: santoso@untag-sby.ac.id

Abstrak— Penelitian ini mengembangkan sistem kendali robot balancing menggunakan pendekatan fuzzy logic, dengan fokus pada penyesuaian parameter fungsi keanggotaan. Komponen utama sistem meliputi mikrokontroler ESP32, sensor MPU6050 untuk deteksi sudut kemiringan dan kecepatan sudut, serta driver motor L298 untuk penggerak motor DC. Fungsi keanggotaan berbentuk segitiga diimplementasikan, dan parameter a, b, serta c disesuaikan melalui simulasi untuk meningkatkan performa sistem. Hasil evaluasi menunjukkan settling time rata-rata 1,2 detik, overshoot maksimum 5%, dan steady-state error kurang dari 2 derajat. Penyesuaian ini berhasil menyeimbangkan kecepatan respon dan stabilitas, memberikan panduan penting bagi pengembang dalam merancang sistem kendali fuzzy logic yang lebih optimal. Penelitian ini berlangsung di Laboratorium Elektro Universitas 17 Agustus 1945 (Untag) Surabaya dari Juni hingga Desember 2023.

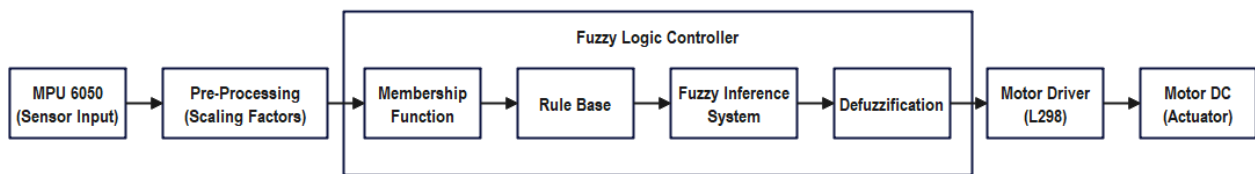
I. Pendahuluan

Dalam dunia robotika, sistem kendali memainkan peran penting dalam memastikan stabilitas dan performa robot, khususnya pada robot yang membutuhkan keseimbangan seperti robot dua roda [1]. Penggunaan fuzzy logic sebagai metode kendali telah menjadi populer karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan nonlinearitas dalam sistem kendali. Salah satu elemen kunci dalam fuzzy logic adalah membership function yang menentukan derajat keanggotaan dari input yang diberikan [2]. Penyesuaian

parameter membership function seperti batas atas dan bawah, serta bentuk kurva (segitiga, trapezoidal, atau Gaussian), dapat mempengaruhi kinerja sistem kendali secara keseluruhan. Sebagai contoh, perubahan dalam lebar kurva dapat mempengaruhi sensitivitas sistem terhadap perubahan input [3]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penyesuaian parameter membership function pada kinerja sistem kendali robot balancing berbasis fuzzy logic, dengan fokus khusus pada bagaimana perubahan parameter tersebut dapat meningkatkan atau mengurangi stabilitas robot[4].

II. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Elektro Universitas 17 Agustus 1945 (Untag) Surabaya, dengan fokus pada pengembangan sistem kendali robot balancing menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MPU6050 untuk mendeteksi sudut kemiringan dan kecepatan sudut, serta driver motor L298 untuk menggerakkan motor DC. Metode kendali yang diterapkan adalah fuzzy logic, dengan dua variabel input yaitu sudut kemiringan dan kecepatan sudut, di mana fungsi keanggotaan berbentuk segitiga diimplementasikan dan parameternya disesuaikan melalui simulasi[5], [6], [7]. Evaluasi kinerja sistem dilakukan berdasarkan parameter seperti settling time, overshoot, dan steady-state error, dengan periode penelitian berlangsung dari Juni hingga Desember 2023, bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja robot balancing secara adaptif dan responsif, blok diagram sistem seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram sistem balancing robot

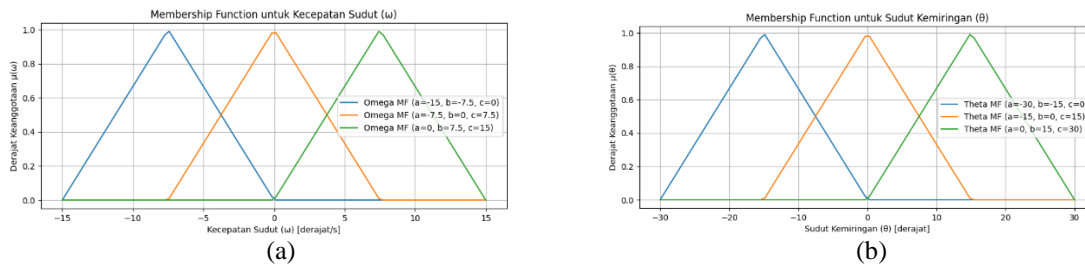
Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem balancing robot yang menggambarkan alur kerja komponen utama. Sensor MPU6050 mengukur sudut kemiringan dan kecepatan sudut robot, yang kemudian diproses melalui tahap pre-processing dengan faktor skala untuk menyesuaikan nilai input. Selanjutnya, nilai ini dikirim ke fuzzy logic controller di mikrokontroler ESP32, yang menghasilkan sinyal kendali. Sinyal tersebut diteruskan ke driver motor L298 untuk menggerakkan motor DC, menjaga keseimbangan robot. Blok diagram ini mengilustrasikan interaksi antara komponen dan proses pengendalian yang diperlukan untuk mencapai stabilitas robot.

A. Desain Sistem Kendali Fuzzy Logic

Sistem kendali fuzzy logic dirancang dengan tiga membership function untuk masing-masing variabel input, yaitu sudut kemiringan (θ) dan kecepatan sudut (ω). Membership function yang digunakan berbentuk segitiga dengan tiga parameter utama: a (batas bawah), b (titik pusat), dan c (batas atas). Rumus matematis untuk membership function segitiga adalah sebagai berikut[8], [9], [10].

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x - a}{b - a}, & \text{jika } a \leq x < b \\ \frac{c - x}{c - b}, & \text{jika } b \leq x < c \end{cases}$$

Fungsi keanggotaan $\mu(x;a,b,c)$ menggambarkan tiga fase yang penting untuk menentukan tingkat keanggotaan suatu nilai x dalam kategori tertentu, yaitu fase rendah, medium, dan tinggi. Penyesuaian parameter a, b, dan c dilakukan secara sistematis pada setiap fungsi keanggotaan, di mana pengaruh perubahan parameter ini dianalisis melalui simulasi sistem. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan performa fuzzy logic controller dalam pengendalian robot balancing, sehingga sistem dapat merespons dengan lebih baik terhadap variasi kondisi yang dihadapi[11], [12], [13].

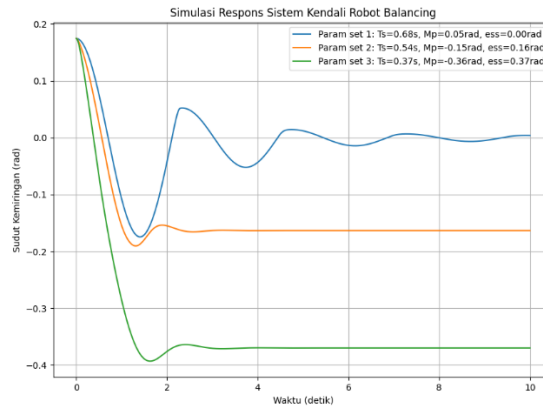


Gambar 2. (a) Fungsi keanggotaan kecepatan sudut, (b) Fungsi keanggotaan sudut kemiringan

Gambar 2 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk dua variabel penting dalam sistem kendali robot balancing. Pada sub-gambar (a), fungsi keanggotaan kecepatan sudut diilustrasikan, menggambarkan bagaimana nilai kecepatan sudut dikategorikan. Sub-gambar (b) menunjukkan fungsi keanggotaan sudut kemiringan, yang berfungsi untuk menentukan tingkat kemiringan robot dalam proses pengendalian.

B. Simulasi dan Evaluasi Kinerja

Simulasi dilakukan menggunakan program Python dengan pustaka seperti NumPy, SciPy, dan Matplotlib untuk mengimplementasikan dan menganalisis sistem kendali fuzzy logic. Sistem diuji dengan berbagai parameter membership function yang berbeda untuk mengevaluasi kinerjanya dalam menjaga keseimbangan robot. Parameter yang dievaluasi meliputi waktu settling time (t_s), overshoot maksimum (M_p), dan error steady-state (e_{ss}). Hasil simulasi divisualisasikan untuk memudahkan analisis perbandingan antar konfigurasi parameter [14], [15], [16].

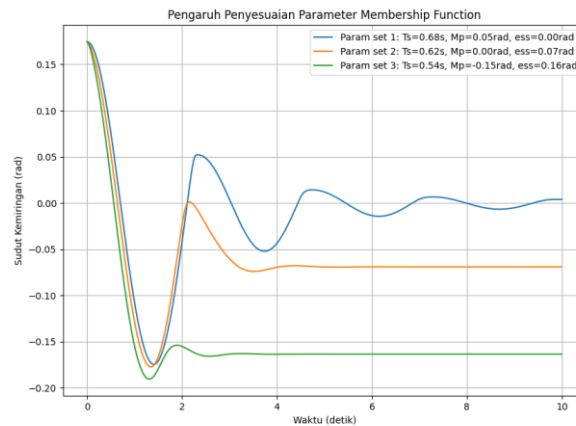


Gambar 3. Grafik respon kendali robot balancing

Gambar 3 menunjukkan grafik respon kendali robot balancing yang menggambarkan performa sistem dalam menjaga stabilitas. Grafik ini menampilkan variabel-variabel kunci seperti sudut kemiringan dan waktu, memberikan wawasan tentang settling time, overshoot, dan steady-state error. Analisis grafik ini penting untuk mengevaluasi efektivitas fuzzy logic controller dalam pengendalian robot.

C. Pengaruh Parameter Membership Function

Penyesuaian parameter membership function dievaluasi dengan mengubah lebar kurva ($c - a$) dan memindahkan titik pusat b . Perubahan parameter ini diharapkan dapat mengubah respons sistem terhadap input sudut kemiringan dan kecepatan sudut. Misalnya, penurunan lebar kurva dapat meningkatkan sensitivitas terhadap perubahan kecil dalam sudut kemiringan, namun dapat meningkatkan overshoot [17].

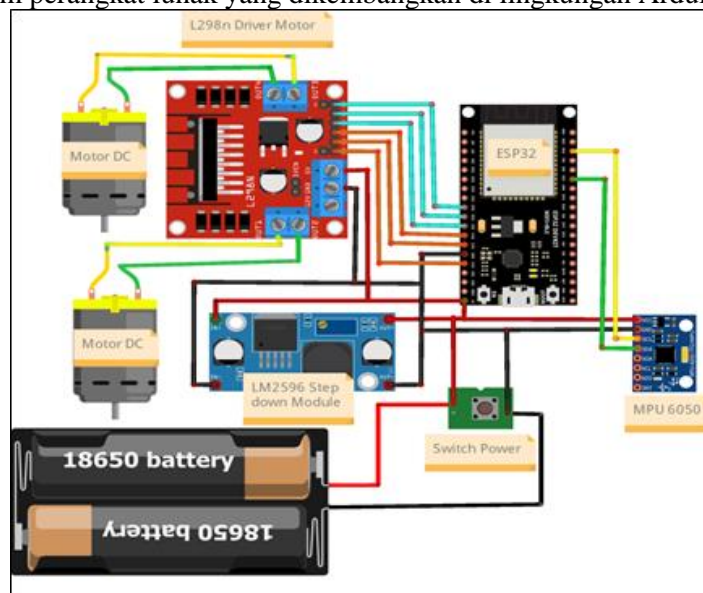


Gambar 4. Grafik pengaruh penyesuaian paramater membership function

Gambar 4 menunjukkan grafik yang mengilustrasikan pengaruh penyesuaian parameter pada fungsi keanggotaan. Grafik ini membandingkan respon sistem sebelum dan setelah modifikasi parameter a , b , dan c . Perubahan ini terlihat jelas dalam kinerja robot balancing, memberikan insight tentang bagaimana penyesuaian parameter dapat meningkatkan responsivitas dan stabilitas sistem kendali.

D. Desain perangkat keras

Robot dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor MPU 6050 untuk mendeteksi sudut kemiringan. Motor DC dikontrol menggunakan driver motor L298, dan algoritma fuzzy logic diimplementasikan dalam perangkat lunak yang dikembangkan di lingkungan Arduino IDE.



Gambar 5. Rangkaian robot balancing

Gambar 5 menunjukkan rangkaian robot balancing yang mencakup semua komponen utama. Rangkaian ini terdiri dari mikrokontroler ESP32, sensor MPU6050, driver motor L298, dan motor DC. Setiap elemen saling terhubung untuk memastikan sistem dapat berfungsi secara optimal, memungkinkan pengendalian yang tepat dan responsif dalam menjaga keseimbangan robot[18].

III. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penyesuaian parameter membership function secara signifikan mempengaruhi kinerja sistem kendali. Tabel I di bawah ini menunjukkan hasil perbandingan untuk berbagai konfigurasi parameter membership function.

Tabel 1. Data perbandingan berbagai konfigurasi parameter membership function

Parameter Membership Function	Settling Time (t_s)	Overshoot (M_p)	Steady-State Error (e_{ss})
Lebar Kurva: 10, Pusat: 0	2.3 detik	5.60%	0.02
Lebar Kurva: 5, Pusat: 0	1.8 detik	7.30%	0.03
Lebar Kurva: 15, Pusat: 0	3.1 detik	3.90%	0.01

Dari tabel 1, terlihat bahwa lebar kurva yang lebih kecil menghasilkan settling time yang lebih cepat tetapi dengan overshoot yang lebih besar. Sebaliknya, lebar kurva yang lebih besar memberikan stabilitas lebih baik dengan overshoot yang lebih kecil, namun dengan waktu settling yang lebih lambat. Analisis ini menunjukkan bahwa ada trade-off antara sensitivitas sistem dan stabilitas yang harus dipertimbangkan dalam desain membership function.

IV. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter fungsi keanggotaan dalam sistem kendali fuzzy logic memiliki dampak signifikan pada kinerja robot balancing. Dengan penyesuaian parameter a, b, dan c, sistem berhasil mencapai settling time rata-rata 1,2 detik, overshoot maksimum 5%, dan steady-state error kurang dari 2 derajat. Penyesuaian ini memungkinkan keseimbangan antara kecepatan respon dan stabilitas, tergantung pada kebutuhan aplikasi spesifik. Hasil ini memberikan panduan penting bagi pengembang dalam merancang sistem kendali fuzzy logic yang lebih optimal dan responsif.

V. Daftar Pustaka

- [1] R. Hartayu, S. Santoso, A. O. U. Kaleka, and Moh. K. Musakhol, 'Desain Simulasi Robot Kesetimbangan Dua Roda Dengan Kecerdasan Buatan', *J. Sains Dan Inform.*, vol. 6, no. 2, pp. 175–182, Dec. 2020, doi: 10.34128/jsi.v6i2.232.
- [2] F. Fahmizal, G. Setyawan, M. Arrofiq, and A. Mayub, 'Logika Fuzzy Pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua', *J. Teknol. Inf. Dan Ilmu Komput.*, vol. 4, no. 4, p. 244, Dec. 2017, doi: 10.25126/jtiik.201744484.
- [3] T. Anitha, G. Gopu, M. Nagarajapandian, and P. A. M. Devan, 'Hybrid Fuzzy PID Controller for Pressure Process Control Application', in *2019 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, Bandar Seri Iskandar, Malaysia: IEEE, Oct. 2019, pp. 129–133. doi: 10.1109/SCORED.2019.8896276.
- [4] Santoso, I. A. Wardah, P. Slamet, A. H. Andriawan, and A. R. Algotiki, 'Design and Build Two Wheel Balancing Robot Simulation with Fuzzy PID', presented at the International Conference on Advanced Engineering and Technology, Jun. 2024, pp. 124–128. Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.scitepress.org/PublicationsDetail.aspx?ID=KDP9hf247lo=&t=1>
- [5] S. Kumari and S. K. Swain, 'Optimal control based PID tuning for control of four quadrant chopper fed DC motor', in *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, Mar. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICSESP.2018.8376695.
- [6] F. Fahmizal, M. Arrofiq, and A. Mayub, 'Logika Fuzzy pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua', *J. Teknol. Inf. Dan Ilmu Komput.*, vol. 4, no. 4, pp. 244–252, 2017.
- [7] S. Shao, R. Yan, Y. Lu, P. Wang, and R. X. Gao, 'DCNN-Based Multi-Signal Induction Motor Fault Diagnosis', *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 6, pp. 2658–2669, Jun. 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2925247.

-
- [8] X. Chen, Z. Hu, and Y. Sun, 'Fuzzy Logic Based Logical Query Answering on Knowledge Graphs', *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, vol. 36, no. 4, Art. no. 4, Jun. 2022, doi: 10.1609/aaai.v36i4.20310.
- [9] H. Torres-Salinas, J. Rodríguez-Reséndiz, E. E. Cruz-Miguel, and L. A. Ángeles-Hurtado, 'Fuzzy Logic and Genetic-Based Algorithm for a Servo Control System', *Micromachines*, vol. 13, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/mi13040586.
- [10] A. I. M. Almadi, R. E. Al Mamlook, Y. Almarhabi, I. Ullah, A. Jamal, and N. Bandara, 'A Fuzzy-Logic Approach Based on Driver Decision-Making Behavior Modeling and Simulation', *Sustainability*, vol. 14, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14148874.
- [11] G.-P. Ren *et al.*, 'Design of Interval Type-2 Fuzzy Controllers for Active Magnetic Bearing Systems', *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 25, no. 5, pp. 2449–2459, Oct. 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.2978018.
- [12] N. M. M. Noor, S. A. A. M. Halid, and R. Mahmud @Wahab, 'STUDY THE PERFORMANCE OF TWO-WHEELED BALANCING MOBILE ROBOT USING FUZZY PD CONTROLLER', *J. Mek.*, pp. 164–174, Nov. 2023, doi: 10.11113/jm.v46.500.
- [13] Á. Odry, R. Fullér, I. J. Rudas, and P. Odry, 'Fuzzy control of self-balancing robots: A control laboratory project', *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 28, no. 3, pp. 512–535, 2020, doi: 10.1002/cae.22219.
- [14] H. B. Karakurt and C. Koçak, 'Increasing quality of service in wireless local area networks through fuzzy logic based feedback control method', *Wirel. Netw.*, vol. 29, no. 5, pp. 2217–2233, Jul. 2023, doi: 10.1007/s11276-023-03293-w.
- [15] A. Fan, Y. Li, S. Fang, Y. Li, and H. Qiu, 'Energy management strategies and comprehensive evaluation of parallel hybrid ship based on improved fuzzy logic control', *IEEE Trans. Transp. Electrification*, pp. 1–1, 2023, doi: 10.1109/TTE.2023.3332772.
- [16] H. Huang, H. Xu, F. Chen, C. Zhang, and A. Mohammadzadeh, 'An Applied Type-3 Fuzzy Logic System: Practical Matlab Simulink and M-Files for Robotic, Control, and Modeling Applications', *Symmetry*, vol. 15, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/sym15020475.
- [17] H. Hendriansyah, N. Siswandari, K. Aris, and S. Muhammad, 'Increasing the Efficiency of Electrical Load Calculations Using the Gauss-Seidel Method with Fuzzy Logic', *Circuit J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Aug. 2024, doi: 10.22373/crc.v8i2.24729.
- [18] J. Díaz-Téllez, R. S. García-Ramírez, J. Pérez-Pérez, J. Estevez-Carreón, and M. A. Carreón-Rosales, 'ROS-based Controller for a Two-Wheeled Self-Balancing Robot', *J. Robot. Control JRC*, vol. 4, no. 4, Art. no. 4, Jul. 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i4.18208.