

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A RASPBERRY PI-BASED HUMAN FOLLOWING ROBOT WITH TENSORFLOW LITE- BASED DETECTION

RANCANG BANGUN *HUMAN FOLLOWING ROBOT* BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN PENDETEKSIAN BERBASIS TENSORFLOW LITE

Ariq Farras Zhafran¹, Dananjaya Ariateja², Herwin Melyanus Hutapea³

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan
Republik Indonesia, Indonesia

Email: ariqzhafran1@gmail.com

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan
Republik Indonesia, Indonesia

Email: dananjaya.ariateja@idu.ac.id

³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan
Republik Indonesia, Indonesia

Email: herwin.hutapea@idu.ac.id

Received: July 21, 2025 Revised: September 11, 2025 Published: September 16, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i1.35263>.

Abstract

The application of artificial intelligence (AI) in robotics has provided innovative solutions to various operational challenges, particularly those related to the system's ability to automatically detect and interact with humans. One such implementation is the Human Following Robot, an autonomous robot designed to follow human movements using an AI-based image processing system. This research proposes the design and development of a Raspberry Pi 4-based Human Following Robot prototype with a TensorFlow Lite algorithm. The research methodology uses an experimental approach with a focus on evaluating target detection accuracy and robot movement stability under varying lighting and terrain conditions. The experimental approach was used by testing the robot on flat and rocky terrain, as well as in bright and dim lighting conditions. The limitation of this research is that the system only tests the detection of one target person without any obstacles or other people around the robot. The results of the study show that the robot has optimal performance at a detection distance of 200–300 cm with an accuracy of 92%–94% in lighting conditions above 100,000 lux, as well as stable movement on flat terrain. Based on these results, this robot has great potential to support more efficient and safer military logistics operations. Future development will focus on improving accuracy in low-light conditions, improving mechanical design, and integrating multi-object tracking capabilities.

Keywords: Human-Following Robot, TensorFlow Lite.

Abstrak

Penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dalam bidang robotika telah menghadirkan solusi inovatif terhadap berbagai tantangan operasional, khususnya terkait kemampuan sistem dalam mendeteksi dan berinteraksi dengan manusia secara otomatis. Salah satu implementasinya adalah *Human Following Robot*, yaitu robot otonom yang dirancang untuk mengikuti pergerakan manusia dengan memanfaatkan sistem pengolahan citra berbasis AI. Penelitian ini mengusulkan perancangan dan pembangunan prototipe *Human Following Robot* berbasis Raspberry Pi 4 dengan algoritma TensorFlow Lite. Metodologi penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan fokus penelitian diarahkan pada evaluasi akurasi deteksi target serta kestabilan pergerakan robot pada kondisi pencahayaan dan medan yang bervariasi. Pendekatan eksperimental digunakan dengan menguji robot pada medan datar dan berbatu, serta pada kondisi pencahayaan terang dan redup. Batasan penelitian ini adalah sistem hanya menguji pendeteksian satu orang target tanpa adanya objek penghalang atau orang lain di sekitar robot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

robot memiliki kinerja optimal pada jarak deteksi 200–300 cm dengan akurasi 92%–94% pada kondisi pencahayaan di atas 100.000 lux, serta pergerakan stabil di medan datar. Berdasarkan hasil tersebut, Robot ini memiliki potensi besar untuk mendukung operasi logistik militer yang lebih efisien dan aman. Untuk pengembangan selanjutnya diarahkan pada peningkatan akurasi di kondisi minim cahaya, perbaikan desain mekanik, serta integrasi kemampuan pelacakan multi-objek.

Kata Kunci: Human Following Robot, TensorFlow Lite.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) pada era Revolusi Industri 4.0 telah membawa dampak signifikan dalam berbagai sektor, terutama pada bidang pertahanan dan militer. AI memiliki kemampuan untuk meniru kecerdasan manusia, seperti pengambilan keputusan, pengenalan pola, serta pemrosesan visual secara *real-time* [1]. Pemerintah Indonesia melalui program *Making Indonesia 4.0* turut mendorong pemanfaatan AI sebagai salah satu teknologi kunci dalam mendukung transformasi digital nasional dan modernisasi sistem pertahanan. Penerapan AI bahkan berpotensi meningkatkan efisiensi operasional hingga 52% di berbagai sektor [2].

Namun, pada pelaksanaan operasi di lapangan, personel militer masih menghadapi berbagai tantangan, mulai dari keterbatasan infrastruktur, kondisi medan yang sulit, hingga risiko keselamatan saat membawa perlengkapan secara manual. Kondisi tersebut menuntut adanya solusi berbasis teknologi yang mampu membantu personel dalam menjalankan tugas, khususnya pada situasi taktis yang dinamis dan penuh risiko [3]. Salah satu pendekatan inovatif yang dapat diterapkan adalah pengembangan robot otonom berbasis AI yang mampu mengikuti pergerakan manusia secara otomatis. Robot jenis ini dikenal sebagai *Human Following Robot*, yaitu robot otonom yang dirancang untuk mendeteksi dan mengikuti manusia menggunakan sistem pelacakan visual berbasis AI, sehingga robot dapat menjaga jarak aman dengan target [4]. Robot semacam ini banyak dikembangkan untuk membantu manusia dalam aktivitas operasional di berbagai kondisi lingkungan [8].

Penelitian ini mengusulkan perancangan dan pembangunan prototipe *Human Following Robot* menggunakan Raspberry Pi 4 dan algoritma TensorFlow Lite, yang dirancang agar dapat beroperasi secara efisien pada perangkat dengan daya komputasi terbatas [15]. Desain robot dilengkapi dengan sistem penggerak berbasis *chassis tank* untuk melewati variasi medan sederhana. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem robot mampu mendeteksi keberadaan manusia dengan akurasi tinggi serta mengikuti target secara stabil pada kondisi pencahayaan dan medan yang berbeda.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe robot yang mampu mendeteksi serta mengikuti manusia secara *real-time*. Fokus penelitian diarahkan pada penentuan jarak optimal deteksi, pengaruh kondisi pencahayaan, serta keandalan pergerakan robot pada berbagai jenis medan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi robotika otonom berbasis AI di Indonesia.

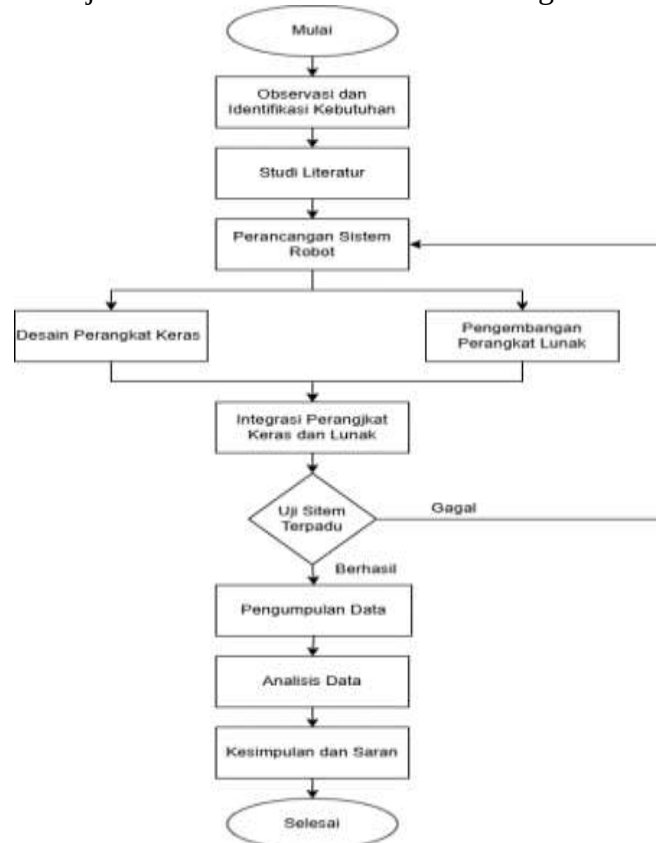
METODOLOGI PENELITIAN

A. Alur Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memahami dasar teori terkait AI, machine learning, robotika, hingga implementasi TensorFlow Lite pada perangkat dengan daya komputasi rendah [5]. Setelah itu, dilakukan perancangan sistem secara menyeluruh, mulai dari pemilihan komponen hardware (Raspberry Pi 4, kamera

RANCANG BANGUN *HUMAN FOLLOWING ROBOT* BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN PENDETEKSIAN BERBASIS TENSORFLOW LITE

USB, chasis tank mini, motor DC, dan driver motor L298N) hingga perancangan arsitektur perangkat lunak untuk menjalankan model pelacakan manusia secara real-time. Alur penelitian tersebut disajikan dalam bentuk *Flowchart* sebagai berikut:



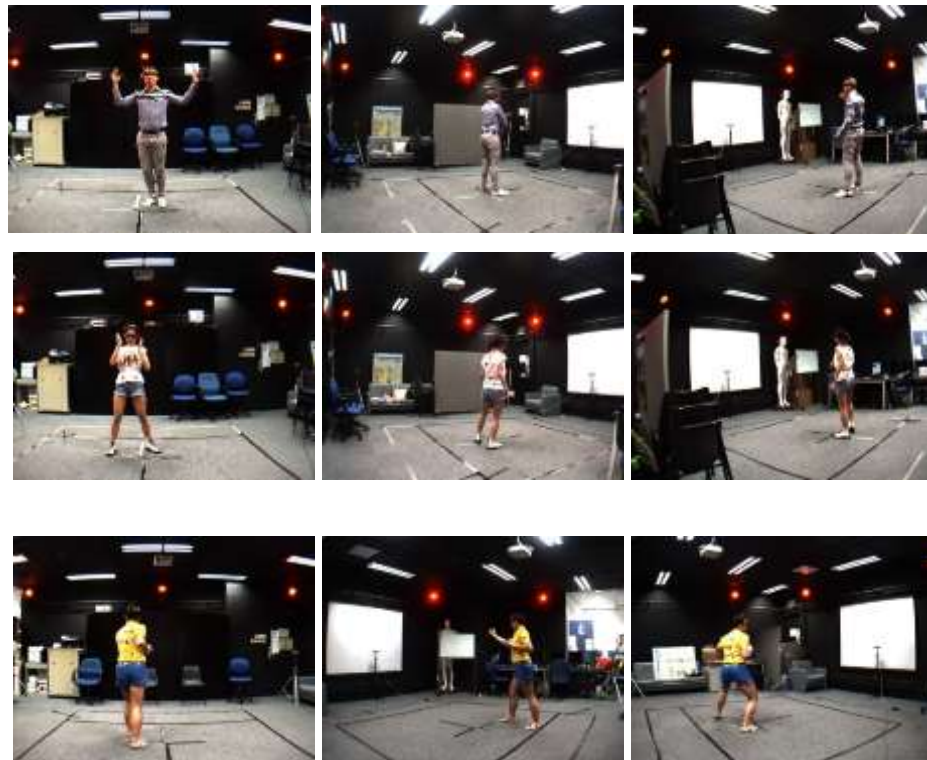
Gambar 1. Alur Penelitian

B. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dalam penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem pelacakan visual berbasis *machine learning* yang berjalan secara real-time menggunakan platform Raspberry Pi 4. Algoritma yang digunakan adalah TensorFlow Lite, yang merupakan versi ringan dari TensorFlow dan dirancang untuk perangkat dengan sumber daya terbatas [6]. Sistem ini memungkinkan robot untuk mendeteksi keberadaan manusia berdasarkan citra yang diambil oleh kamera dan secara otomatis menghasilkan perintah pergerakan untuk mengikuti target tersebut. Berikut untuk tahapan proses perancangan perangkat lunaknya:

1. Persiapan dan Pengumpulan Dataset

Tahapan perancangan perangkat lunak dimulai dengan proses pengumpulan dan persiapan dataset. Dataset terdiri dari citra manusia full-body dalam berbagai posisi, pencahayaan, dan jarak pengambilan. Citra dikumpulkan dari hasil pengambilan langsung dan sumber publik, kemudian dianotasi menggunakan platform Roboflow. Pada penelitian ini menggunakan jumlah 2398 gambar dataset yang selanjutnya dilakukan proses labelling berupa tanda pada objek yang dideteksi manusia [14].



Gambar 2. Dataset Gambar

2. Preprocessing Data

Proses ini bertujuan untuk mempersiapkan data agar dapat diproses dengan optimal oleh model. Preprocessing yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa model dapat belajar dengan efisien dan akurat [7]. Tahapan preprocessing yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi resize gambar, normalisasi, dan augmentasi data. Resize gambar diatur ke dimensi 640×640 piksel agar sesuai dengan input model yang digunakan. Selanjutnya augmentasi data seperti rotasi acak, flipping horizontal, dan variasi pencahayaan, Kemudian dataset tersebut dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu 87% untuk pelatihan, 8% untuk validasi, dan 5% untuk pengujian, sehingga total seluruh data menjadi 100%.

3. Pelatihan Model

Setelah dataset disiapkan, proses pelatihan model dilakukan menggunakan algoritma YOLOv5s melalui Google Colab. Model dilatih selama 100 *epoch* menggunakan format file .yaml untuk konfigurasi dan format file .pt untuk hasil pelatihan [9]. Setelah pelatihan selesai, model dikonversi ke format TensorFlow Lite (.tflite) agar dapat dijalankan di Raspberry Pi 4 [10]. Model .tflite diintegrasikan ke dalam skrip Python di Raspberry Pi. Program utama berjalan secara terus-menerus untuk menggerakkan robotnya sesuai dengan perintah yang diinputkan.

RANCANG BANGUN *HUMAN FOLLOWING ROBOT* BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN PENDETEKSIAN BERBASIS TENSORFLOW LITE

Gambar 3. Dataset Pelatihan

C. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dalam penelitian ini bertujuan untuk membangun sebuah platform robotik yang mampu menjalankan sistem pelacakan visual secara real-time serta melakukan pergerakan mengikuti target manusia di berbagai kondisi medan. Sistem perangkat keras terdiri dari sejumlah komponen utama yang terintegrasi secara fungsional, yakni unit pemrosesan, sensor visual, sistem aktuator, dan sumber daya. Berikut untuk komponen perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini:

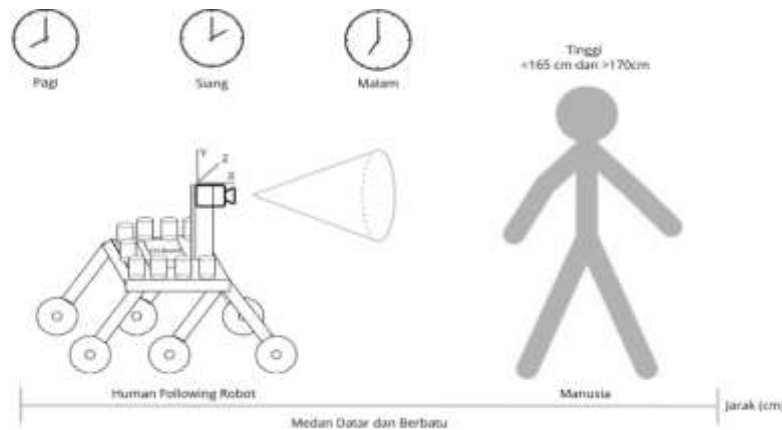
- Raspberry Pi 4 Model B sebagai pusat pengolahan data.
- USB Kamera untuk menangkap gambar dan mengidentifikasi objek target manusia.
- Motor DC dan Driver Motor untuk mendukung pergerakan roda dalam sistem rocker-bogie.



Gambar 4. Prototipe Robot

D. Skenario Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem Human Following Robot yang telah dirancang, baik dari segi akurasi pendeteksian target manusia maupun keandalan pergerakan robot dalam berbagai kondisi lingkungan. Skenario pengujian disusun secara sistematis untuk mengamati perilaku sistem terhadap tiga variabel utama, yaitu jarak deteksi, kondisi pencahayaan, dan jenis medan. Selain itu, pengujian dilakukan juga terhadap tinggi badan target yaitu 173cm.



Gambar 5. Skenario Pengujian

- Pengujian Jarak Deteksi

Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan jarak optimal di mana sistem dapat mendeteksi dan mengikuti manusia secara akurat. Pengujian dilakukan dalam kisaran jarak mulai dari 100 cm hingga 500 cm dengan interval setiap 100 cm. Pada setiap titik jarak, sistem diaktifkan dan robot diminta untuk mendeteksi serta mengikuti target. Parameter yang diamati adalah keberhasilan deteksi dan kecepatan respons terhadap perintah gerak oleh robot dalam berbagai jarak tersebut.

- Pengujian Pengaruh Pencahayaan

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi manusia di bawah kondisi pencahayaan yang berbeda. Dua kondisi utama diuji yaitu kondisi pencahayaan terang (>100.000 lux), setara dengan cahaya matahari langsung dan kondisi pencahayaan redup atau gelap (<5.000 lux), menyerupai kondisi dalam ruangan gelap atau malam hari. Pengujian dilakukan untuk mengamati performa deteksi serta respon pergerakan.

- Pengujian Jenis Medan yang Dilalui Robot

Pengujian ini mengamati performa mobilitas robot ketika bergerak mengikuti target pada dua jenis medan yaitu medan datar seperti ubin dan medan berbatu seperti batu-batuan kecil. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui stabilitas gerak, kemungkinan selip atau macet, serta konsistensi pelacakan arah terhadap target.

HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil Pengujian Jarak Deteksi

Pengujian jarak deteksi dilakukan untuk mengetahui seberapa jauh sistem mampu mengenali keberadaan manusia sebagai target pelacakan. Uji dilakukan pada lima titik jarak yaitu 100 cm, 200 cm, 300 cm, 400 cm, dan 500 cm. Setiap jarak diuji sebanyak 10 kali, dengan target manusia berjalan secara perlahan di hadapan robot. Model deteksi yang telah ditanamkan dalam Raspberry Pi 4 akan memproses gambar secara real-time dan menghasilkan bounding box pada objek manusia, kemudian menggerakkan motor penggerak mengikuti arah objek.'

RANCANG BANGUN *HUMAN FOLLOWING ROBOT* BERBASIS RASPBERRY PI DENGAN PENDETEKSIAN BERBASIS TENSORFLOW LITE

Tabel 1. Hasil Pengujian Jarak Deteksi

Percobaan	Tinggi Badan (cm)	Jarak Deteksi (cm)	Waktu Respons (detik)
1	173	100	3.0
2	173	200	3.0
3	173	300	3.5
4	173	400	4.0
5	173	500	4.5



Gambar 6. Pengujian Jarak Deteksi terhadap Objek

Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu respons tercepat diperoleh pada jarak 200 cm, dengan rata-rata waktu deteksi dan reaksi sebesar 3 detik. Jarak semakin dekat (100–200 cm) justru menghasilkan respons lebih cepat, yaitu rata-rata 3 detik, karena objek terlalu besar dalam frame sehingga dapat memudahkan robot dalam mengklasifikasi objek. Sementara itu, pada jarak jauh (400–500 cm), waktu respons semakin meningkat hingga 3.5 sampai 4 detik, disebabkan oleh objek yang terlalu kecil dan kurang kontras dalam citra. Ini menegaskan bahwa sistem memiliki performa optimal pada jarak menengah, di mana ukuran objek sesuai dengan resolusi input kamera dan model dapat mengenalinya dengan cepat [13]

B. Hasil Pengujian Kondisi Pencahayaan

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem pendeteksian dan pelacakan manusia terhadap variasi pencahayaan lingkungan. Dua kondisi utama yang diuji adalah pencahayaan terang (>100.000 lux, setara sinar matahari langsung) dan pencahayaan redup (<5.000 lux, menyerupai pencahayaan ruangan gelap). Sistem diuji sebanyak 10 kali untuk tiap kondisi guna memperoleh nilai rata-rata dan tren performa.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kondisi Pencahayaan

Percobaan	Jarak Deteksi (cm)	Kondisi Pencahayaan	Intensitas Cahaya (Lux)	Akurasi (%)
1	100	Terang	178.500	93
2	200	Terang	178.600	94
3	300	Terang	178.600	93
4	400	Terang	178.600	92

5	500	Terang	178.600	90
6	100	Gelap	516	88
7	200	Gelap	516	89
8	300	Gelap	516	87
9	400	Gelap	516	85
10	500	Gelap	516	82



Gambar 7. Pengujian Kondisi Pencahayaan terhadap Objek

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi terang, sistem mampu mendeteksi objek manusia secara akurat dengan akurasi sebesar 94%, sementara pada kondisi gelap akurasi turun bahkan menjadi 82%. Penurunan akurasi ini disebabkan oleh kualitas visual yang rendah dalam pencahayaan minim, seperti berkurangnya kontras dan kaburnya detail objek, yang mengganggu proses klasifikasi pada model deteksi [11]. Ini menunjukkan bahwa system *Human Following Robot* sangat bergantung pada kondisi pencahayaan dalam lingkungan operasionalnya [12].

C. Hasil Pengujian Jenis Medan

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jenis permukaan medan terhadap kecepatan dan stabilitas pergerakan robot saat melakukan pelacakan target manusia. Dua jenis medan digunakan dalam skenario ini, yaitu medan datar berupa lantai ubin dan medan berbatu yang disimulasikan menggunakan kerikil dan batu kecil untuk menciptakan kondisi permukaan tidak rata. Dalam pengujian, subjek berjalan sejauh 5 meter, sementara robot diminta mengikuti jalur gerak target secara otomatis. Kecepatan tempuh dan kelancaran gerak robot diamati secara langsung menggunakan stopwatch dan observasi visual.

Tabel 2. Hasil Pengujian Medan Uji

No	Jenis Medan	Rata-rata Kecepatan (m/s)	Jumlah Uji Coba	Stabilitas Gerak
1	Medan Datar	0.35	10	Stabil
2	Medan Berbatu	0.21	10	Kurang Stabil

RANCANG BANGUN *HUMAN FOLLOWING ROBOT* BERBASIS RASPBERRY PI
DENGAN PENDETEKSIAN BERBASIS TENSORFLOW LITE

Gambar 7. Pengujian Medan Uji

Hasil menunjukkan bahwa pada medan datar, robot mampu bergerak dengan rata-rata kecepatan 0,35 m/s secara stabil dan tanpa gangguan arah. Sementara pada medan berbatu, kecepatan menurun menjadi 0,21 m/s, dan pergerakan robot menjadi kurang stabil, ditandai dengan getaran, selip, serta sedikit deviasi arah dari target. Penurunan ini disebabkan oleh hambatan mekanik akibat medan tidak rata yang mengganggu traksi roda rantai. Meskipun sistem pelacakan visual tetap bekerja, performa keseluruhan sistem menjadi terpengaruh oleh kondisi medan. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas pelacakan manusia tidak hanya bergantung pada algoritma pendeteksian, tetapi juga pada desain mobilitas fisik robot yang mampu mengatasi medan ekstrem.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan prototipe Human Following Robot berbasis pengolahan citra dengan menggunakan Raspberry Pi dan algoritma deteksi TensorFlow Lite, yang mampu mengikuti pergerakan manusia secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja optimal pada jarak 200 sampai 300 cm dengan waktu respons cepat yaitu 3.5 detik, serta akurasi tinggi diangka 92% pada kondisi pencahayaan terang. Namun, performa sistem menurun pada kondisi pencahayaan redup dan medan tidak rata, yang berdampak pada akurasi deteksi serta stabilitas gerak robot. Selain itu, sistem hanya diuji pada satu orang target tanpa adanya objek penghalang atau manusia lain di sekitarnya. Hal ini menunjukkan keterbatasan sistem dalam membedakan target utama dari objek lain. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi Raspberry Pi 4 dengan TensorFlow Lite dapat digunakan untuk mengembangkan sistem pelacakan manusia secara *real-time*. Ke depannya, pengembangan dapat difokuskan pada peningkatan akurasi dalam kondisi minim cahaya, perbaikan desain mekanik agar lebih stabil di medan ekstrem, serta penambahan kemampuan identifikasi multi-objek.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih ditujukan khususnya kepada dosen pembimbing atas arahan dan bimbingannya selama proses penyusunan, serta kepada keluarga dan rekan-rekan yang telah memberikan semangat dan dukungan moral secara konsisten.

Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam proses pengujian dan penyediaan data, yang sangat membantu kelancaran penelitian ini hingga dapat diselesaikan dengan baik. Harapannya, hasil dari penelitian

ini dapat memberikan manfaat dan menjadi acuan bagi pengembangan penelitian di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] McKinsey & Company, *The State of AI in 2022 — and a Half Decade in Review*, McKinsey Global Institute, 2022. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2022>
- [2] M. Kress, *The Art and Science of Sustaining Military Operations: Operational Logistics*. Cham: Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31346-8>
- [3] R. Hall and M. Coyne, *Military Logistics and Supply Chain Management: Challenges and Solutions*. Hershey: IGI Global, 2014. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4761-9>
- [4] R. Algabri and M. T. Choi, "Deep-learning-based indoor human following of mobile robot using color feature," *Sensors*, vol. 20, no. 9, pp. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20092458>
- [5] R. G. Wardhana, G. Wang, and F. Sibuea, "Penerapan machine learning dalam prediksi tingkat kasus penyakit di Indonesia," *Journal of Information System Management (JOISM)*, vol. 5, no. 1, pp. 45–53, 2023.
- [6] A. Allan, "Benchmarking TensorFlow Lite on the new Raspberry Pi 4 Model B," *Medium*, 2019. [Online]. Available: <https://aallan.medium.com/benchmarking-tensorflow-lite-on-the-new-raspberry-pi-4-model-b-3fd859d05b98>
- [7] J. Burdack, F. Horst, S. Giesselbach, I. Hassan, S. Daffner, and W. I. Schöllhorn, "Systematic comparison of the influence of different data preprocessing methods on the performance of gait classifications using machine learning," *Frontiers in Sports and Active Living*, vol. 1, no. 11, pp. 1–12, 2019. <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00011>
- [8] K. Bahadur Kharka, T. R. Wangchuk Bhutia, L. Chettri, N. Luitel, and S. Lepcha, "Human Following Robot using Arduino Uno," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 1, no. 6, pp. 321–327, 2019.
- [9] J. Redmon and A. Farhadi, "YOLOv3: An incremental improvement," *arXiv preprint, arXiv:1804.02767*, 2018.
- [10] A. G. Howard et al., "MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications," *arXiv preprint, arXiv:1704.04861*, 2017.
- [11] Z. Zhang, R. Qiu, and M. Q.-H. Meng, "Human-following robot using depth camera," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 1–12, 2019. <https://doi.org/10.1177/1729881419828198>
- [12] J. Pan and Y. Zhang, "Real-time human detection and tracking for mobile robot with depth camera," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87932–87940, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993515>
- [13] H. Sadeghi and J. Choi, "Real-time object detection on edge devices: A survey," *Sensors*, vol. 21, no. 15, pp. 5024, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21155024>
- [14] Tzutalin, *LabelImg: Graphical Image Annotation Tool*. GitHub Repository, 2015. [Online]. Available: <https://github.com/tzutalin/labelImg>
- [15] T. N. Sainath, Y. He, B. Li, A. Narayanan, and R. Pang, "Efficient neural network models for mobile and embedded devices," in *Proc. Interspeech*, 2020, pp. 2272–2276. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-2794>