

NAVIGASI *OBSTACLE AVOIDANCE* ROBOT KECOAK BIO-HIBRIDA MENGUNAKAN KAMERA MONOKULAR

Arif Ainurrofiq¹, Mochammad Ariyanto², Munadi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: arifainurrofiq@students.undip.ac.id

Abstrak

Penelitian ini merealisasikan sistem navigasi obstacle avoidance pada robot bio-hibrida berbasis Madagascar Hissing Cockroach (*Gromphadorhina portentosa*) menggunakan arsitektur komputasi off-board untuk mengatasi keterbatasan daya olah pada platform mikro. Wahana dilengkapi kamera OV2640 dan sensor Time-of-Flight VL53L0X pada modul Sseed XIAO ESP32S3 yang mengirimkan aliran video dan data jarak secara nirkabel melalui WiFi ke komputer utama, di mana model Depth Anything V2 menghasilkan peta kedalaman secara real-time dan algoritma berbasis probabilitas zona menentukan jalur bebas hambatan. Perintah navigasi dikirimkan kembali melalui protokol ESP-NOW berlatensi rendah, sementara eksekusi gerak dilakukan melalui stimulasi elektro-mekanis berupa sinyal 50 Hz, 3,3 V pada antenna untuk kendali rotasi dan motor vibrator pada cerci untuk translasi maju. Evaluasi komparatif terhadap tiga varian model mengonfirmasi adanya trade-off yang signifikan secara statistik antara kualitas depth map dan kecepatan inferensi melalui uji One-Way ANOVA ($F = 3,631$; $p = 0,0336$) dan Tukey HSD ($q = 3,565 > q \text{ kritis} = 3,44$), sehingga dipilih ViT-S pada resolusi QVGA dengan rata-rata FPS AI 20,18. Pengujian navigasi pada arena labirin 66×71 cm menghasilkan tingkat keberhasilan 81,25%, meningkat signifikan dari 12,5% tanpa sistem navigasi, mengonfirmasi bahwa pendekatan ini efektif untuk mewujudkan navigasi otonom pada platform serangga dengan potensi aplikasi dalam misi pencarian dan penyelamatan pascabencana.

Kata kunci: depth estimation; esp-now; madagascar hissing cockroach; navigasi otonom; robot bio-hibrida

Abstract

*This study realizes an obstacle avoidance navigation system on a bio-hybrid robot based on the Madagascar Hissing Cockroach (*Gromphadorhina portentosa*) using an off-board computation architecture to overcome the processing limitations of micro-scale platforms. The cockroach is equipped with an OV2640 camera and VL53L0X Time-of-Flight sensor on a Sseed XIAO ESP32S3 module, transmitting video streams and distance data wirelessly via WiFi to a host computer, where the Depth Anything V2 model generates real-time depth maps and a zone-based probabilistic algorithm determines the obstacle-free path. Navigation commands are returned via the low-latency ESP-NOW protocol, while locomotion is executed through electro-mechanical stimulation — a 50 Hz, 3.3 V signal on the antennae for rotational control and a vibration motor on the cerci for forward movement. Comparative evaluation of three model variants confirmed a statistically significant trade-off between depth map quality and inference speed through One-Way ANOVA ($F = 3.631$; $p = 0.0336$) and Tukey HSD ($q = 3.565 > q \text{ critical} = 3.44$), leading to the selection of ViT-S at QVGA resolution with an average of 20.18 AI FPS. Navigation testing in a 66×71 cm maze achieved a success rate of 81.25%, significantly higher than 12.5% without the navigation system, confirming this approach is effective for enabling autonomous insect-platform navigation for post-disaster search and rescue applications.*

Keywords: autonomous navigation; bio-hybrid robot; depth estimation; esp-now; madagascar hissing cockroach

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi robotika modern menuntut kemampuan navigasi yang andal, efisien secara energi, dan mampu beroperasi di lingkungan sempit yang sulit dijangkau manusia. Salah satu skenario nyata yang memerlukan kemampuan tersebut adalah misi pencarian dan penyelamatan di area reruntuhan bangunan pascabencana. Robot konvensional berukuran kecil umumnya masih menghadapi kendala dalam hal konsumsi daya, kemampuan melewati medan tidak beraturan, dan efisiensi aktuasi [1].

Dalam konteks tersebut, robot bio-hibrida berbasis serangga muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Serangga seperti kecoa memiliki sistem lokomotor yang telah teroptimasi secara evolusioner, mampu menavigasi celah sempit dan permukaan tidak rata dengan konsumsi energi yang sangat rendah. Madagascar Hissing Cockroach (*Gromphadorhina portentosa*) dipilih sebagai platform karena ukuran tubuhnya yang besar (5,5–6 cm, berat 6–15 gram), eksoskeleton yang kuat, kemampuan adhesi tinggi, dan responsivitas terhadap stimulasi listrik [2]. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kecoa cyborg dapat dikendalikan arahnya melalui stimulasi elektrik pada antena dan stimulasi mekanis pada cerci [3].

Tantangan utama pada platform bio-hibrida adalah keterbatasan sistem persepsi. Sensor berukuran besar seperti LiDAR dan kamera stereo tidak dapat dipasang akibat keterbatasan beban dan daya. Pendekatan yang lebih sesuai adalah penggunaan kamera monokular yang ringan dan hemat daya, dikombinasikan dengan model deep learning untuk estimasi kedalaman [4]. Li et al. [5] telah mendemonstrasikan obstacle avoidance pada insect-computer hybrid robot menggunakan kamera monokular onboard. Penelitian ini mengembangkan pendekatan serupa dengan arsitektur komputasi off-board menggunakan model Depth Anything V2 dan sensor Time-of-Flight (ToF) sebagai referensi metrik, guna mengatasi keterbatasan scale ambiguity pada monocular depth estimation.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1. Stimulasi Elektro-Mekanis

Kendali gerak kecoa dilakukan melalui dua mekanisme. Pertama, stimulasi listrik berupa sinyal square wave 50 Hz, 3,3 V diberikan pada antena kiri atau kanan melalui elektroda kawat berdiameter 0,1 mm untuk menginduksi refleksi rotasi. Pemilihan frekuensi 50 Hz didasarkan pada kesesuaiannya dengan laju spike biologis sistem saraf cerci (50–100 spikes/s) dan terbukti menghasilkan respons paling konsisten dengan habituasi terendah [6]. Kedua, motor vibrator DC 1,5 V dipasang di bagian posterior punggung kecoa untuk mengaktifkan *escape response* memicu translasi maju.

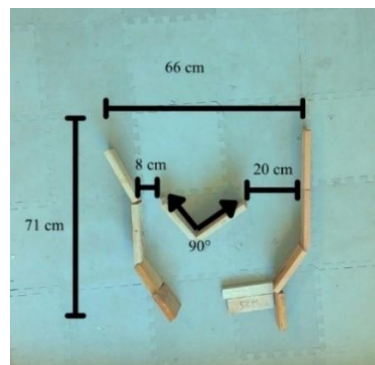
2.2. Algoritma Obstacle Avoidance

Algoritma *obstacle avoidance* diaktifkan ketika sensor ToF mendeteksi jarak objek di bawah 35 cm. Sistem bekerja dalam dua tahap. Pada tahap vertical avoidance, sistem menentukan apakah obstacle memiliki tinggi di atas atau di bawah 5 cm menggunakan garis imajiner pada depth map yang dihitung secara empiris melalui persamaan eksponensial $y = Ae^{Bx}$. Obstacle rendah (< 5 cm) diperintahkan untuk dipanjat menggunakan vibrator, sedangkan obstacle tinggi masuk ke tahap lateral avoidance.

Pada lateral avoidance, frame yang ditangkap diinferensi oleh model Depth Anything V2 untuk menghasilkan depth map. Region of Interest (ROI) selebar 240×25 piksel diekstraksi dari area tengah frame, kemudian direduksi menjadi array 1D dan dibagi menjadi tiga zona (kiri, tengah, kanan) dengan pembobotan berbeda. Skor setiap zona diinversi dan dinormalisasi menggunakan fungsi softmax untuk menghasilkan distribusi probabilitas. Zona dengan probabilitas tertinggi (argmax) dipilih sebagai arah navigasi yang paling aman.

2.3. Protokol Pengujian Navigasi

Pengujian sistem navigasi dilakukan pada arena labirin pada Gambar 1 berukuran 66×71 cm yang dilengkapi dua jenis rintangan: obstacle tinggi berbentuk sudut 90° dan obstacle rendah setinggi 3 cm. Sebanyak 16 percobaan dilakukan menggunakan dua individu kecoa (masing-masing 8 percobaan). Sebagai pembandingan, pengujian juga dilakukan tanpa sistem navigasi sebanyak 8 percobaan. Trajektori kecoa direkam menggunakan kamera Logitech C200 yang dipasang tegak lurus di atas arena dan dianalisis menggunakan model YOLO V8n yang dilatih untuk mendeteksi posisi kecoa.



Gambar 1. Area Labirin Pengujian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh Resolusi Kamera

Tabel 1 menyajikan hubungan antara resolusi kamera dan throughput sistem pada dua kondisi: streaming tanpa inferensi AI (raw) dan streaming dengan inferensi model ViT-S secara bersamaan.

Tabel 1. Perbandingan FPS pada berbagai resolusi kamera

Resolusi	FPS Raw	FPS AI	Δ FPS
QQVGA (160×120)	38,01	19,91	18,10
QVGA (320×240)	34,38	20,18	14,20
VGA (640×480)	17,25	17,74	0,49
SVGA (800×600)	16,38	15,32	1,06

Tren penurunan FPS yang konsisten seiring peningkatan resolusi disebabkan oleh peningkatan volume data per frame yang membebani bandwidth WiFi dan proses encoding JPEG pada ESP32S3. Fenomena menarik ditemukan pada resolusi rendah (QQVGA dan QVGA): selisih FPS raw dan FPS AI sangat besar karena bottleneck sistem bergeser sepenuhnya ke inferensi GPU. Sebaliknya, pada resolusi tinggi (VGA ke atas), selisih ini mengecil karena bottleneck beralih ke kapasitas transmisi WiFi. Resolusi QVGA (320×240) dipilih sebagai konfigurasi optimal karena menawarkan FPS AI tertinggi (20,18 FPS) sekaligus kualitas citra yang lebih memadai dibandingkan QVGA untuk keperluan inferensi depth estimation.

3.2. Evaluasi Model Depth Estimation

Tabel 2 merangkum hasil evaluasi komparatif terhadap tiga varian model Depth Anything V2 berdasarkan throughput komputasi dan kualitas depth map.

Tabel 2. Perbandingan throughput dan kualitas depth map antar varian model

Model	Rata-rata FPS	Mean Sharpness	Keterangan
ViT-S	22,607	0,2742	Dipilih
ViT-B	15,353	0,2533	—
ViT-L	6,817	0,2489	—

Hasil uji One-Way ANOVA menghasilkan nilai $F(2, 51) = 3,631$ dengan $p = 0,0336$, menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik pada setidaknya satu pasang varian. Uji post-hoc Tukey HSD mengidentifikasi bahwa perbedaan yang signifikan hanya terdapat antara ViT-S dan ViT-L ($q = 3,565 > q \text{ kritis} = 3,44$, selisih mean = 0,0253), sementara ViT-B tidak berbeda signifikan dari keduanya. Meskipun ViT-L menghasilkan depth map dengan ketajaman tepi terbaik, FPS-nya hanya 6,817 yang tidak memadai untuk navigasi real-time. ViT-S dipilih karena kecepatan inferensinya 3,3 kali lebih tinggi dari ViT-L, dan selisih kualitas sebesar 0,0253 poin tidak berdampak kritis terhadap keputusan navigasi praktis.

3.3. Limitasi Jarak AI Depth Estimation

Analisis GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan model ViT-S dalam membedakan objek dari latar belakang pada berbagai jarak (20–100 cm) dan kondisi pencahayaan (67, 110, dan 156 lux). Nilai Contrast pada depth map menurun sebesar 61,0% seiring bertambahnya jarak dari 20 cm ke 100 cm, diiringi peningkatan Homogeneity, mengindikasikan bahwa objek dan latar belakang semakin menyatu secara nilai piksel pada depth map.

Temuan penting adalah bahwa Contrast pada citra RAW tetap stabil dengan variasi di bawah 5% pada seluruh rentang jarak yang diuji, membuktikan bahwa penurunan kemampuan pembedaan tekstur bersumber dari keterbatasan model AI, bukan dari kondisi optik kamera. Pengaruh pencahayaan terhadap kualitas depth map juga relatif kecil (variasi Contrast antarkondisi $\approx 4\%$), sehingga jarak merupakan faktor dominan yang membatasi performa model. Temuan ini menjadi landasan penetapan threshold aktivasi algoritma pada jarak 35 cm.

3.4. Hasil Pengujian Sistem Navigasi

Tabel 3 merangkum perbandingan hasil pengujian navigasi dengan dan tanpa sistem kendali obstacle avoidance.

Tabel 3. Hasil pengujian sistem navigasi pada arena labirin

Kondisi	Percobaan	Keberhasilan
Dengan sistem navigasi	16 kali	81,25% (13/16)
Tanpa sistem navigasi	8 kali	12,5% (1/8)

Sistem navigasi menghasilkan tingkat keberhasilan 81,25% (13 dari 16 percobaan), meningkat secara signifikan dibandingkan 12,5% (1 dari 8 percobaan) tanpa sistem navigasi. Tiga kegagalan yang terjadi disebabkan oleh dua faktor utama: pertama, kecoa memasuki corner zone pada obstacle berbentuk L sehingga seluruh bidang pandang kamera

didominasi permukaan obstacle di bawah threshold 20 cm, menyebabkan algoritma tidak dapat mengidentifikasi jalur yang valid; kedua, satu kecoa berbalik arah meninggalkan arena uji. Kegagalan ini mengindikasikan perlunya penanganan khusus untuk kondisi kamera yang terlalu dekat dengan dinding rintangan.

Secara keseluruhan, integrasi sensor OV2640 dan VL53L0X, komunikasi ESP-NOW, model Depth Anything V2 ViT-S, serta stimulasi elektro-mekanis 50 Hz terbukti efektif sebagai sistem navigasi otonom pada platform serangga. Pendekatan ini sejalan dengan temuan Li et al. [5] namun memperluas implementasi dengan arsitektur off-board yang memungkinkan penggunaan model deep learning yang lebih berat tanpa dibatasi oleh kapasitas komputasi perangkat onboard.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merealisasikan sistem navigasi obstacle avoidance pada robot bio-hibrida berbasis Madagascar Hissing Cockroach menggunakan kamera monokular OV2640 dan sensor ToF VL53L0X dengan arsitektur komputasi off-board. Resolusi QVGA terpilih sebagai konfigurasi optimal dengan FPS AI rata-rata 20,18. Model Depth Anything V2 varian ViT-S dipilih berdasarkan keunggulan kecepatan inferensi (22,607 FPS) yang 3,3 kali lebih responsif dibandingkan ViT-L, dengan perbedaan kualitas yang signifikan secara statistik namun tidak kritis terhadap keputusan navigasi. Stimulasi elektro-mekanis kombinasi 50 Hz, 3,3 V pada antena dan vibrator pada cerci terbukti efektif menginduksi gerak rotasi dan translasi maju secara konsisten. Pengujian pada arena labirin menghasilkan tingkat keberhasilan 81,25%, meningkat drastis dari 12,5% tanpa sistem navigasi, mengonfirmasi kelayakan pendekatan ini untuk aplikasi SAR di area sempit pascabencana.

5. Daftar Pustaka

- [1] Ma, S., Chen, Y., Yang, S., Liu, S., Tang, L., Li, B., dan Li, Y., 2023, "The Autonomous Pipeline Navigation of a Cockroach Bio-Robot with Enhanced Walking Stimuli," *Cyborg and Bionic Systems*, 0067.
- [2] Fraga, C. J., Brown, M. S., dan Xu, N. W., 2025, "Advances in Invertebrate Biohybrid Robotics: Leveraging Nature for Locomotion and Sensing in Engineered Systems," *Advanced Intelligent Systems*, 7.
- [3] Ariyanto, M. dan Refat, C. M., 2024, "Feedback Control of Automatic Navigation for Cyborg Cockroach," *Heliyon*, 5.
- [4] Li, R., Lin, Q., Tran-Ngoc, P. T., Le, D. L., dan Sato, H., 2024, "Smart Insect-Computer Hybrid Robots Empowered with Enhanced Obstacle Avoidance Capabilities using Onboard Monocular Camera," *NPJ Robot*, 2.
- [5] Refat, C. M., Ariyanto, M., Yamamoto, K., dan Hirao, K., 2024, "Advancing Biohybrid Insect Robot (BIR) Locomotion Control Through Non-Invasive Mechanical Stimulation," *2024 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems*, 200–206.
- [6] Erickson, J. C., Herrera, M., Bustamante, M., Shingiro, A., dan Bowen, T., 2015, "Effective Stimulus Parameters for Directed Locomotion in Madagascar Hissing Cockroach Biobot," *PLoS ONE*, 10.
- [7] Cecille, A., Duffner, S., Davoine, F., Agier, R., dan Neveu, T., 2025, "Towards Sharper Object Boundaries in Self-Supervised Depth Estimation," *The British Machine Vision Conference (BMVC)*.
- [8] Yang, L., Kang, B., Huang, Z., Zhao, Z., Xu, X., Feng, J., dan Zhao, H., 2024, "Depth Anything V2," *Advances in Neural Information Processing Systems*, 21875–21911.
- [9] Hall-Beyer, M., 2017, "Practical Guidelines for Choosing GLCM Textures to use in Landscape Classification Tasks over a Range of Moderate Spatial Scales," *International Journal of Remote Sensing*, 1312–1333.
- [10] Chaoqiang Zhao, Q. S., 2020, "Monocular Depth Estimation Based on Deep Learning: An Overview," *Science China Technological Sciences*, 1612–1627.
- [11] Tran-Ngoc, P. T., Le, D. L., et al., 2023, "Intelligent Insect-Computer Hybrid Robot: Installing Innate Obstacle Negotiation and Onboard Human Detection onto Cyborg Insect," *Intelligent Insect-Computer Hybrid Robot*.
- [12] Eridani, D., Rochim, A. F., dan Cesara, F. N., 2021, "Comparative Performance Study of ESP-NOW, WiFi, Bluetooth Protocols based on Range," *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*.