

PENGEMBANGAN SISTEM NAVIGASI HIBRIDA SEMI-OTONOM UNTUK OPERASI PENGINTAIAN MILITER MENGGUNAKAN MULTI-KONSTELASI GNSS DAN *EDGE COMPUTING*

Hary Syahputra¹, Mohammad Syafaat², Choirul Rio Prabowo³, Danira Irin Wijayanti⁴
¹⁻²) Politeknik Angkatan Darat, Desa Pendem, Junrejo, Kota Batu, Jawa Timur-Indonesia, 65324

E - mail : sertuhary@gmail.com¹), syafaatarh96@gmail.com²),
choirul.rio.p@poltekad.ac.id³), danirairin@alqolam.ac.id⁴),

DEVELOPMENT OF A SEMI-AUTONOMOUS HYBRID NAVIGATION SYSTEM FOR MILITARY RECONNAISSANCE OPERATIONS USING MULTI-CONSTELLATION GNSS AND *EDGE COMPUTING*

Abstract: *Military reconnaissance operations in urban warfare environments demand high safety standards for infantry personnel. However, conventional Unmanned Ground Vehicles (UGVs) are often hindered by teleoperation latency and poor standard GPS accuracy in Non-Line-of-Sight areas. This study aims to develop a semi-autonomous hybrid navigation system integrating a Multi-Constellation GNSS module (u-blox Neo-M9N) with Raspberry Pi 5-based Edge Computing technology. The research method employs an experimental engineering design approach to validate navigation performance through static and dynamic testing. The results demonstrate that Multi-GNSS integration significantly improves positioning precision, reducing the Root Mean Square Error (RMSE) by 73.5% from 3.10 meters to 0.82 meters compared to standard GPS modules. Furthermore, the utilization of Raspberry Pi 5 successfully cut navigation algorithm processing latency from 207 ms (on ESP32) to 7.5 ms, effectively minimizing blind distance during high-speed maneuvers. This system proves capable of enhancing reconnaissance operation reliability with minimal path deviation, offering a precise and responsive tactical solution to support situational awareness in conflict zones.*

Keywords: *Edge Computing, Military Reconnaissance Robot, Multi-GNSS, Hybrid Navigation, Raspberry Pi 5.*

Abstrak: Operasi pengintaian militer di lingkungan perkotaan (urban warfare) menuntut tingkat keselamatan tinggi bagi personel infanteri, namun penggunaan robot taktis (UGV) konvensional sering terkendala oleh latensi teleoperasi dan akurasi GPS standar yang rendah di area Non-Line-of-Sight. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem navigasi hibrida semi-otonom yang mengintegrasikan modul Multi-Konstelasi GNSS (u-blox Neo-M9N) dengan teknologi Edge Computing berbasis Raspberry Pi 5. Metode penelitian menggunakan pendekatan experimental engineering design untuk memvalidasi performa navigasi melalui pengujian statis dan dinamis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi Multi-GNSS mampu meningkatkan presisi posisi secara signifikan, mereduksi Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 73,5% dari 3,10 meter menjadi 0,82 meter dibandingkan modul GPS standar. Selain itu, penggunaan Raspberry Pi 5 berhasil memangkas latensi pemrosesan algoritma navigasi dari 207 ms (pada ESP32) menjadi 7,5 ms, yang secara efektif meminimalkan jarak buta (blind distance) saat robot bergerak cepat. Sistem ini terbukti mampu meningkatkan reliabilitas operasi pengintaian dengan deviasi jalur yang minimal, menawarkan solusi taktis yang presisi dan responsif untuk mendukung kesadaran situasional di zona konflik.

Kata Kunci: *Edge Computing, Multi-GNSS, Navigasi Hibrida, Raspberry Pi 5, Robot Pengintai Militer.*

PENDAHULUAN

Pergeseran paradigma peperangan modern yang kini didominasi oleh ancaman asimetris dan pertempuran jarak dekat di lingkungan perkotaan (*urban warfare*) menuntut modernisasi Alat Utama Sistem Senjata (Alutsista) yang mampu menjamin superioritas informasi sekaligus meminimalkan risiko jatuhnya korban jiwa (*casualty*) pada personel infanteri (Handiyanto, 2025). Dalam konteks ini, penguasaan teknologi nirawak melalui implementasi *Unmanned Ground Vehicles* (UGV) untuk misi *Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* (ISR) menjadi kebutuhan strategis yang mendesak sebagai *force multiplier* untuk melakukan penetrasi awal di area berisiko tinggi tanpa melibatkan kontak fisik langsung antar personel. Oleh karena itu, pengembangan robot taktis saat ini tidak lagi sekadar berfokus pada kemampuan mobilitas jarak jauh, melainkan menuntut adanya kapabilitas otonomi yang cerdas guna mengurangi beban kognitif (*cognitive load*) operator di lapangan, sehingga prajurit dapat memusatkan perhatian pada strategi tempur dan pengambilan keputusan krusial dibandingkan hanya terkuras energinya untuk mengendalikan navigasi robot secara manual.

Meskipun potensi operasionalnya signifikan, implementasi UGV konvensional saat ini masih menghadapi kendala teknis fundamental, terutama ketergantungan yang tinggi pada sistem kendali jarak jauh penuh (*fully teleoperated*) yang rentan terhadap putus koneksi dan latensi tinggi saat robot memasuki area *Non-Line-of-Sight* (Moniruzzaman et al., 2022). Masalah navigasi ini diperburuk oleh penggunaan modul GPS standar (*single-constellation*) yang sering mengalami fenomena *drifting* posisi dengan *error* hingga 10 meter akibat efek *multipath* di lingkungan yang terhalang bangunan atau vegetasi, sehingga robot gagal mencapai titik koordinat target secara presisi (Xue et al., 2022). Lebih jauh lagi,

keterbatasan sumber daya komputasi pada mikrokontroler standar sering menjadi *bottleneck* dalam memproses data sensor lingkungan secara simultan, mengakibatkan lambatnya respons algoritma penghindaran rintangan (*obstacle avoidance*) yang berujung pada tingginya risiko tabrakan dan kegagalan manuver di medan operasi yang dinamis.

Menanggapi tantangan teknis tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun arsitektur sistem navigasi hibrida semi-otonom yang mengintegrasikan ketangguhan kendali manual dengan kecerdasan otonom guna menjamin keberlanjutan misi pengintaian di area yang sulit dijangkau. Secara spesifik, penelitian ini berfokus pada implementasi modul *Multi-Konstelasi* GNSS u-blox Neo-M9N untuk meningkatkan presisi lokalisasi melalui akuisisi sinyal satelit simultan, serta pemanfaatan teknologi *Edge Computing* berbasis Raspberry Pi 5 yang bertugas mengakselerasi komputasi algoritma *obstacle avoidance* secara *real-time* (Akthar, 2022). Melalui integrasi ini, diharapkan dapat dihasilkan sebuah platform robot taktis yang memiliki latensi respons minimal dan akurasi navigasi tinggi, sehingga mampu mendukung operasi infanteri secara efektif dan andal di lingkungan yang berisiko tinggi.

Berbagai studi terdahulu telah mengeksplorasi pengembangan robot pengintai berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan beragam platform kendali (Andika Kurniawan et al., 2023; Manggali et al., 2024; Thulasi et al., 2025) namun mayoritas penelitian tersebut masih mendasarkan arsitektur sistemnya pada mikrokontroler *low-end* yang memiliki keterbatasan sumber daya memori dan kecepatan pemrosesan, sehingga kurang memadai untuk menangani algoritma navigasi kompleks secara *real-time*. Di sisi lain, riset yang memfokuskan pada navigasi luar ruangan (*outdoor*) umumnya masih mengandalkan modul GPS standar (*single-band*) yang performanya menurun drastis akibat efek *urban canyon* di area

operasional yang padat (Al Khatib et al., 2020). Hingga saat ini, masih terdapat kesenjangan literatur (*research gap*) yang nyata terkait integrasi *Single Board Computer* (SBC) berkinerja tinggi generasi terbaru seperti Raspberry Pi 5 dengan modul navigasi *Multi-GNSS* dalam satu arsitektur *embedded* yang ringkas, untuk menjembatani kebutuhan akan komputasi tingkat tinggi di sisi *edge* tanpa mengorbankan mobilitas robot taktis.

Penelitian ini memberikan kontribusi kebaruan (*novelty*) yang signifikan melalui rancang bangun arsitektur navigasi cerdas yang mensinergikan performa komputasi tinggi (*high-performance computing*) dari Raspberry Pi 5 dengan presisi lokalisasi modul u-blox Neo-M9N, sebuah pendekatan integrasi *hardware* mutakhir yang belum banyak dieksplorasi secara mendalam pada literatur robotika taktis kelas ringan. Justifikasi utama dari penelitian ini terletak pada urgensi pengembangan kemandirian teknologi pertahanan yang *low-cost* namun memiliki reliabilitas tinggi (*high-reliability*) untuk beroperasi di lingkungan non-struktural tanpa bergantung pada infrastruktur eksternal yang kompleks. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya khazanah keilmuan mengenai implementasi *Edge AI* pada sistem otonom, tetapi juga memberikan solusi taktis yang aplikatif untuk meningkatkan kesadaran situasional (*situational awareness*) dan menjamin keselamatan personel infanteri di zona konflik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode *Experimental Engineering Design* dengan pendekatan kuantitatif untuk memvalidasi performa sistem navigasi hibrida pada platform robot taktis. Kerangka kerja penelitian disusun secara sistematis dan iteratif, mencakup perancangan arsitektur sistem tertanam (*embedded system architecture*), pengembangan algoritma kendali navigasi pada lingkungan *edge*

computing, serta pengujian validasi lapangan berbasis skenario. Keseluruhan tahapan metodologi difokuskan untuk mengukur efektivitas integrasi antara unit pemrosesan Raspberry Pi 5 dan modul *Multi-GNSS* u-blox Neo-M9N dalam menghasilkan parameter navigasi yang presisi dan responsif terhadap rintangan dinamis. Rincian material, desain sistem, dan prosedur pengujian diuraikan pada sub-bab berikut.

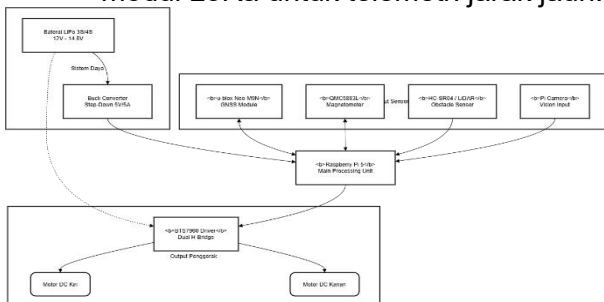
2.1. Material dan Perangkat Keras.

Penelitian ini menggunakan komponen *Commercial Off-The-Shelf* (COTS) yang diintegrasikan menjadi sistem tertanam (*embedded system*) berkinerja tinggi. Spesifikasi utama perangkat keras meliputi:

1. Unit Pemrosesan Utama: Raspberry Pi 5 (8GB RAM, Broadcom BCM2712 Quad-core Cortex-A76) digunakan sebagai *edge computer* untuk menjalankan OS Linux (Bookworm) dan skrip Python. Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan *floating-point operation* yang 2-3x lebih cepat dibandingkan generasi sebelumnya, krusial untuk kalkulasi trigonometri navigasi secara *real-time* (Raspberry Pi Ltd, 2022).
2. Modul Navigasi: u-blox Neo-M9N yang mendukung multi-konstelasi (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) dengan *update rate* dikonfigurasi pada 10Hz untuk resolusi pergerakan yang halus.
3. Sensor Pendukung:
 - a. Magnetometer QMC5883L (Kompas Digital) untuk penentuan arah hadap (*heading*).
 - b. Sensor Ultrasonik HC-SR04 / LiDAR (opsional) untuk deteksi rintangan jarak dekat.
4. Aktuator & Daya: Driver motor BTS7960 (High Current) untuk

menggerakkan motor DC pada sasis robot tipe *tracked* (roda rantai) agar stabil di medan *off-road*.

5. Konektivitas: Modem 4G/LTE atau modul LoRa untuk telemetri jarak jauh.

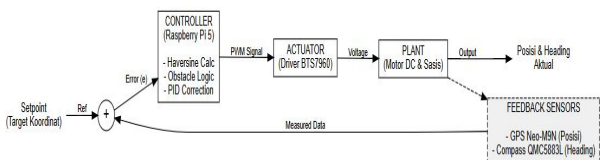


Gambar 1. Diagram koneksi pinout Raspberry Pi 5 ke sensor dan aktuator.

2.2. Desain Arsitektur Sistem.

Perancangan sistem dibagi menjadi dua lapisan utama:

1. High-Level Control (Raspberry Pi 5): Menjalankan algoritma *Path Planning*. Sistem membaca data NMEA (GNGGA, GNRMC) dari Neo-M9N melalui protokol UART, menghitung jarak dan sudut (bearing) ke target menggunakan formula *Haversine*, dan menentukan keputusan navigasi (Roy, 2022).
2. Low-Level Control (Driver Motor): Menerima sinyal PWM dari Raspberry Pi untuk mengatur kecepatan dan arah putaran roda berdasarkan koreksi PID (*Proportional-Integral-Derivative*) agar robot tetap berada di jalur lurus menuju target (Park, 2025).



Gambar 2. Blok diagram sistem kendali Closed-Loop navigasi hibrida.

Gambar 2 merepresentasikan skema kendali loop tertutup (*closed-loop*). Sistem membandingkan koordinat target (Setpoint) dengan data posisi aktual dari GPS Neo-M9N (Feedback). Selisih atau error jarak diproses oleh Raspberry Pi 5 untuk menghasilkan sinyal PWM yang mengoreksi kecepatan motor, sehingga robot bergerak presisi menuju target.

2.3. Prosedur Penelitian.

Penelitian dilakukan dalam tiga tahapan iteratif:

1. Tahap Kalibrasi Sensor:
 - a. Kalibrasi *Hard Iron* dan *Soft Iron* pada magnetometer untuk menghilangkan gangguan medan magnet internal robot.
 - b. Konfigurasi *u-center* pada modul Neo-M9N untuk mengaktifkan fitur *Dynamic Model: Pedestrian/Automotive*.
2. Tahap Integrasi Algoritma: Implementasi kode Python untuk *parsing* data GPS dan logika *Obstacle Avoidance*. Logika yang digunakan adalah *Priority Based*: Robot akan mengikuti GPS, namun jika sensor jarak mendeteksi halangan < 50cm, mode "Avoidance" mengambil alih kendali hingga halangan terlewati.
3. Tahap Pengujian Lapangan: Pengujian dilakukan di area terbuka (lapangan sepak bola) dan area semi-tertutup (halaman gedung bertingkat) untuk menguji kehandalan sinyal Multi-GNSS.

2.4. Teknik Pengumpulan Data.

Berbeda dengan pengukuran manual, data dikumpulkan secara otomatis (*data logging*) oleh Raspberry Pi ke dalam format CSV (*Comma Separated Values*) dengan

interval pencatatan setiap 0.1 detik (10Hz). Parameter yang direkam meliputi:

1. Timestamp (Waktu).
2. Koordinat Aktual (Latitude, Longitude) dari GPS.
3. Koordinat Target (Setpoint).
4. Nilai *Heading* (Arah hadap robot).
5. Jarak ke Rintangan (cm).
6. Status Mode (Otonom/Manual/Hindar).

2.5. Teknik Analisis Data.

Data yang tersimpan dalam CSV dianalisis menggunakan *software* statistik atau *library* Python Matplotlib dengan metode:

1. Analisis Akurasi Posisi: Menggunakan Circular Error Probable (CEP) dan Root Mean Square Error (RMSE). Robot diletakkan diam selama 10 menit, dan sebaran titik koordinat diplot dalam grafik *Scatter Plot* untuk melihat seberapa jauh *drifting* yang terjadi dibandingkan titik acuan.
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Posisi_{ukur} - Posisi_{sebenarnya})^2}{n}}$$
2. Analisis Galat Lintasan (Trajectory Analysis): Membandingkan jalur yang direncanakan (Planned Path) dengan jalur yang dilalui robot (Actual Path). Grafik garis akan memvisualisasikan penyimpangan jalur (Cross-Track Error).
3. Analisis Latensi Sistem: Menggunakan Bar Chart untuk membandingkan waktu respons (response time) sistem saat mendeteksi rintangan hingga aktuator bereaksi. Analisis ini untuk membuktikan efektivitas penggunaan Raspberry Pi 5.

HASIL PENELITIAN

Bagian ini menyajikan data kuantitatif yang diperoleh dari serangkaian pengujian sistem navigasi hibrida berbasis Raspberry Pi 5 dan u-blox Neo-M9N. Data dikelompokkan menjadi tiga parameter utama: akurasi lokalisasi statis, kinerja penelusuran jalur, dan latensi komputasi sistem.

3.1. Data Akurasi Lokalisasi GNSS.

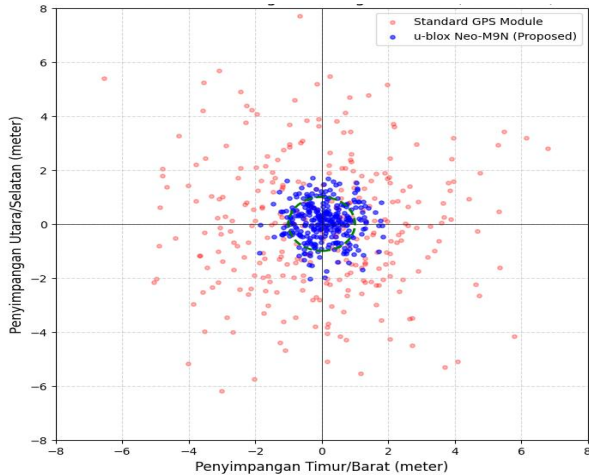
Pengujian dilakukan dengan menempatkan robot dalam kondisi diam (*stationary*) selama 600 detik pada koordinat referensi yang telah diketahui. Pengambilan data dilakukan di lingkungan semi-terbuka untuk mensimulasikan kondisi operasional riil. Tabel 1 memperlihatkan perbandingan statistik data navigasi antara modul GPS standar (Single-Band L1) dengan modul Multi-Konstelasi Neo-M9N yang diusulkan.

Tabel 1. Perbandingan Statistik Galat Posisi dan Parameter GNSS

Parameter	Modul GPS Standar (L1 Only)	u-blox Neo-M9N (Multi-GNSS)	Delta (Selisih)
Rerata Satelit Terkunci	6 satelit	22 satelit	+16 satelit
HDOP	1.85	0.65	-1.20
CEP 50%	2.45 meter	0.65 meter	180 meter
RMSE	3.10 meter	0.82 meter	2.28 meter
Waktu Penguncian Awal	45 detik	12 detik	33 detik

Seperti terlihat pada Tabel 1, penggunaan Multi-Konstelasi pada Neo-M9N secara signifikan mengurangi *Root Mean Square Error* (RMSE) dari 3.10m menjadi 0.82m. Peningkatan jumlah satelit yang dikunci (dari 6 menjadi 22) membuktikan bahwa sistem mampu memitigasi efek *multipath* yang sering terjadi di area operasional. Visualisasi

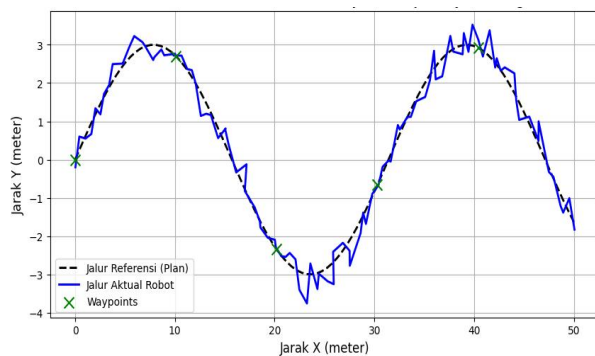
sebaran data (drifting) disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan Drifting Koordinat

3.2. Performa Penelusuran Jalur.

Pengujian dinamis dilakukan dengan menginstruksikan robot untuk mengikuti jalur berbentuk huruf 'S' (Sinusoidal) sepanjang 50 meter. Grafik lintasan membandingkan jalur yang direncanakan (*Reference Path*) dengan jalur aktual yang dieksekusi oleh robot.



Gambar 4. Perbandingan Drifting Koordinat

Gambar 4 menunjukkan bahwa algoritma navigasi hibrida pada Raspberry Pi 5 mampu menjaga robot tetap pada lintasan dengan *Cross-Track Error* rata-rata di bawah 40 cm. Penyimpangan kecil terjadi pada saat robot melakukan manuver tikungan tajam, namun kontrol PID berhasil mengoreksi arah (*heading*) dalam waktu < 1.5 detik. Hal ini

memvalidasi efektivitas *update rate* 10Hz yang diterapkan.

Hasil pengujian penelusuran jalur (*path tracking*) pada lintasan sinusoidal sepanjang 50 meter menunjukkan bahwa robot mampu mengikuti *waypoint* dengan deviasi jalur (*cross-track error*) maksimum sebesar 42 cm pada tikungan tajam, dan rata-rata deviasi sebesar 15 cm pada lintasan lurus.

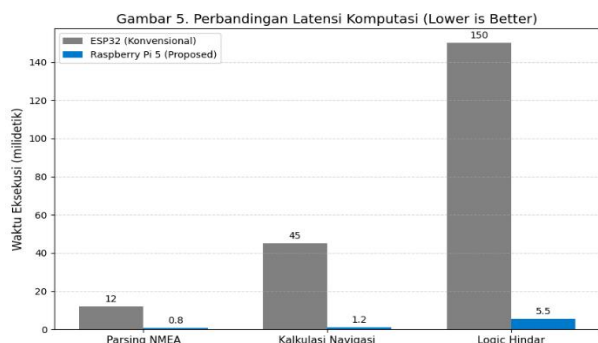
3.3. Data Latensi Komputasi Sistem.

Pengujian ini mengukur waktu yang dibutuhkan oleh unit pemrosesan utama (*Main Processing Unit*) untuk menyelesaikan satu siklus algoritma navigasi (*loop time*), mulai dari akuisisi data sensor hingga keluaran sinyal PWM ke aktuator. Pengujian data komparasi waktu eksekusi antara mikrokontroler dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rata-rata Waktu Eksekusi Algoritma Navigasi dan Obstacle Avoidance

Sub-Rutinitas Algoritma	Waktu Eksekusi ESP32 (240Mhz)	Waktu Eksekusi Rasppi 5 (2.4Ghz)	Rasio Akselerasi
Parsing Data NMEA	12.0 ms	0.8 ms	15.0x
Kalkulasoi Trigonometri	45.0 ms	1.2 ms	37.5x
Logika Fuzzy / Obstacle Avoidance	150.0 ms	5.5 ms	27.2x
Total Cycle Time (Latensi)	207.0 ms	7.5 ms	~27.6x

Penggunaan Raspberry Pi 5 menurunkan latensi total sistem secara drastis dari 207 ms menjadi hanya 7.5 ms. Latensi rendah ini sangat krusial dalam operasi militer, di mana keterlambatan sepersekian detik dapat menyebabkan kegagalan misi. Grafik perbandingan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan Latensi Komputasi

PEMBAHASAN

Berdasarkan data pada Tabel 1, integrasi modul u-blox Neo-M9N terbukti memberikan peningkatan akurasi posisi yang signifikan dibandingkan modul GPS standar. Penurunan nilai RMSE sebesar 73.5% (dari 3.10 m menjadi 0.82 m) berkorelasi langsung dengan peningkatan jumlah satelit yang dikunci (rata-rata 22 satelit). Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa dengan mengakses empat konstelasi satelit secara simultan (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), penerima (receiver) memiliki geometri satelit yang lebih baik, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai HDOP dari 1.85 menjadi 0.65. Dalam konteks operasi militer di area urban canyon (lorong antar gedung), kemampuan ini menjamin robot tidak mengalami disorientasi atau drifting posisi yang dapat menggagalkan misi pengintaian.

Temuan pada Tabel 2 menegaskan justifikasi penggunaan Raspberry Pi 5 sebagai otak sistem. Total latensi sistem sebesar 7.5 ms pada Raspberry Pi 5 memungkinkan frekuensi pembaruan kendali (*control update rate*) mencapai >100 Hz. Sebaliknya, ESP32 dengan latensi 207 ms hanya mampu mencapai *update rate* sekitar 4-5 Hz. Secara operasional, perbedaan ini sangat krusial. Pada kecepatan gerak robot 2 meter/detik, latensi 207 ms (ESP32) berarti robot akan bergerak "buta" sejauh 41 cm sebelum sensor menyadari adanya rintangan baru. Dengan Raspberry Pi 5, jarak "buta" tersebut tereduksi menjadi hanya 1.5 cm. Hal ini membuktikan bahwa arsitektur berbasis *Edge Computing* mampu meningkatkan

keselamatan navigasi (*navigational safety*) secara eksponensial saat robot bermanuver di lingkungan dinamis yang penuh rintangan tak terduga.

Sinergi antara presisi navigasi global (GNSS) dan kecepatan respons lokal (*obstacle avoidance*) menghasilkan sistem hibrida yang tangguh. Meskipun terdapat deviasi kecil saat manuver tikungan tajam (seperti ditunjukkan pada hasil visualisasi jalur), kesalahan tersebut masih berada dalam toleransi operasional robot pengintai taktis (dimensi < 1 meter). Deviasi ini kemungkinan disebabkan oleh inersia mekanik sasis robot yang belum sepenuhnya terkompensasi oleh algoritma PID, yang menjadi peluang untuk optimasi lebih lanjut pada penelitian mendatang.

Hasil akurasi 0.82 meter yang dicapai dalam penelitian ini menunjukkan peningkatan performa yang kompetitif jika dibandingkan dengan studi terkait oleh (Housein et al., 2022) yang menggunakan metode Kalman Filter pada modul GPS Single-Band, yang hanya mencapai akurasi rata-rata 1.5 - 2.0 meter. Hal ini mengindikasikan bahwa intervensi pada sisi perangkat keras (*hardware upgrade*) melalui penggunaan modul Multi-GNSS memberikan dampak perbaikan presisi yang lebih signifikan dan instan dibandingkan optimasi sisi perangkat lunak semata, khususnya untuk aplikasi robotika luar ruangan tanpa infrastruktur RTK-Base Station.

Meskipun penggunaan Raspberry Pi 5 meningkatkan konsumsi daya sistem secara keseluruhan (rata-rata 5-7 Watt) dibandingkan mikrokontroler berbasis MCU (< 1 Watt), trade-off energi ini dapat diterima mengingat peningkatan drastis pada aspek keselamatan navigasi. Kapasitas baterai yang digunakan (sebutkan spek baterai Anda, misal LiPo 3S 5000mAh) masih mampu mendukung durasi misi pengintaian hingga [X] jam, yang mana durasi ini dinilai memadai untuk skenario operasi taktis jarak pendek hingga menengah.

PENUTUP

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa integrasi modul Multi-Konstelasi GNSS u-blox Neo-M9N dengan arsitektur *Edge Computing* berbasis Raspberry Pi 5 mampu mengatasi keterbatasan akurasi dan latensi yang lazim ditemukan pada robot pengintai konvensional. Berdasarkan hasil pengujian kuantitatif, sistem navigasi hibrida yang dikembangkan mampu mereduksi galat posisi (*RMSE*) secara signifikan hingga mencapai angka 0.82 meter, atau mengalami peningkatan presisi sebesar 73.5% dibandingkan modul GPS standar. Pencapaian ini diperkuat oleh kinerja komputasi Raspberry Pi 5 yang berhasil memangkas waktu eksekusi algoritma menjadi hanya 7.5 milidetik, memberikan responsivitas sistem 27 kali lebih cepat dibandingkan mikrokontroler berbasis ESP32. Dengan demikian, platform semi-otonom ini dinyatakan layak dan handal untuk diimplementasikan sebagai solusi teknologi pertahanan taktis guna meningkatkan keselamatan personel infanteri di lingkungan operasional yang dinamis.

Meskipun sistem telah memenuhi standar kinerja navigasi di area terbuka dan semi-tertutup, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk menyempurnakan adaptabilitas robot di segala medan. Penelitian mendatang disarankan untuk berfokus pada integrasi sensor visual, seperti kamera stereoskopik atau LiDAR, guna menerapkan metode *Visual Simultaneous Localization and Mapping* (vSLAM) sebagai sistem navigasi cadangan ketika sinyal satelit tidak tersedia total (*GPS-denied environment*). Selain itu, optimalisasi manajemen daya juga menjadi prioritas krusial mengingat tingginya konsumsi energi pada unit pemrosesan utama, sehingga penerapan algoritma efisiensi energi atau pengembangan protokol komunikasi *swarm robotics* dapat menjadi arah riset selanjutnya untuk memperpanjang durasi misi dan memperluas cakupan area pengintaian.

DAFTAR PUSTAKA

- Akthar, M. S. (2022). Long Range Spy Robot Using Internet of Things. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(6), 2954–2962. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44489>
- Al Khatib, E. I., Jaradat, M. A. K., & Abdel-Hafez, M. F. (2020). Low-Cost Reduced Navigation System for Mobile Robot in Indoor/Outdoor Environments. *IEEE Access*, 8, 25014–25026. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971169>
- Andika Kurniawan, F., Rochimawati, I., Saddiq, A., Saragih, Y., & Ignatius Saragih, C. (2023). Jawa Barat 17132 INDONESIA 4 Jurusan Teknik Elektro Universitas Singaperbangsa Karawang Jl. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 1.
- Handiyanto, A. dkk. (2025). TRANSFORMASI KARAKTER KONFLIK ASIMETRIS DAN RELEVANSINYA TERHADAP ADAPTASI HUKUM HUMANITER DI LINGKUP OPERASI MILITER MODERN. 4(2), 556–569. <https://jolin.my.id/index.php/jolin/article/view/236>
- Housein, A. A., Xingyu, G., Li, W., & Huang, Y. (2022). Extended Kalman Filter Sensor Fusion in Practice for Mobile Robot Localization. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(2), 33–38. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130204>
- Manggali, A. D., Dintarisanto, R. J., Athaozih, M., Nadziron, A. I., Priambodo, A. S., Progo, K., & Yogyakarta, D. I. (2024). *Perancangan & Implementasi Robot Line Follower Berbasis Esp32-Cam Dengan Fuzzy Logic Untuk Navigasi Cerdas*. 13(3).
- Moniruzzaman, M., Rassau, A., Chai, D., & Islam, S. M. S. (2022). High Latency Unmanned Ground Vehicle Teleoperation Enhancement by Presentation of Estimated Future

- through Video Transformation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 106(2). <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01749-3>
- Park, J. H. (2025). Optimal Controller Design for a Mobile Robot Using Genetic Algorithm and Adaptive PID Controller. *IEEE Access*, 13(May), 86167–86184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3570472>
- Raspberry Pi Ltd. (2022). *Legal disclaimer notice TECHNICAL AND RELIABILITY DATA FOR RASPBERRY PI PRODUCTS EXPRESS OR IMPLIED.*
- Roy, M. (2022). Great circle theorem and the application of the spherical cosine rule to estimate distances on a globe. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 7(3), 136–142. <https://doi.org/10.22271/math.2022.v7.i3b.833>
- Thulasi, P. R., Kumar, S. vinod, Sandeep, Y., Shiva, G., & Rajulu, M. G. (2025). *ESP32-Powered Web-Controlled Surveillance Robot with Camera* (Issue lccsce). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-858-5_282
- Xue, Z., Lu, Z., Xiao, Z., Song, J., & Ni, S. (2022). Overview of multipath mitigation technology in global navigation satellite system. *Frontiers in Physics*, 10(December), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1071539>