

Sistem Kendali Robot *Follow-Me* 4WD Menggunakan ESP32-C3 Dan ESP32 Devkit

DOI: <http://dx.doi.org/10.35889/progresif.v22i3.4015>

Creative Commons License 4.0 (CC BY –NC)



Silas Rasep Poti^{1*}, Gogor Chrissmass Setyawan², Kristian Juri Damai Lase³

Teknik Informatika, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta, Indonesia

*e-mail Corresponding Author. silas.rasep.p@mail.ukrim.ac.id

Abstract

This research proposed a wireless control system for a follow-me robot as an alternative to visual tracking, which has a high computational load. The purpose of this research was to design and build a four-wheel-drive robot using an ESP32 as the main controller and three ESP32-C3 modules. The applied methodology was based on the comparison of signal strength values. One module acted as a target transmitter, while two modules on the robot's sides functioned to receive the transmission and send data directly to the main controller via the ESP-NOW communication protocol. The test results showed that the robot could respond and follow the target's direction based on the difference in signal strength received by the left and right modules. Furthermore, the standby mode on the robot functioned well when the target transmitter was turned off. In conclusion, this wireless communication architecture could operate well in guiding the robot's movement while minimizing the use of sensor cables.

Keywords: ESP-NOW; Signal Strength; Microcontroller; Wireless Tracking; Follow-Me Robot

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan sistem kendali nirkabel pada robot pengikut sebagai alternatif dari pelacakan visual yang memiliki beban komputasi tinggi. Tujuan riset ini adalah merancang bangun robot berpengerak empat roda menggunakan pengontrol utama ESP32 dan tiga modul ESP32-C3. Metodologi yang diterapkan didasarkan pada perbandingan nilai kekuatan sinyal. Satu modul bertindak sebagai pemancar sasaran, sementara dua modul di sisi robot berfungsi menerima pancaran dan mengirimkan data secara langsung ke pengontrol utama melalui protokol komunikasi ESP-NOW. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot dapat merespons dan mengikuti arah sasaran berdasarkan perbedaan kekuatan sinyal yang diterima oleh modul kiri dan kanan. Selain itu, mode siaga pada robot berfungsi dengan baik saat pemancar sasaran dimatikan. Kesimpulannya, arsitektur komunikasi nirkabel ini dapat beroperasi dengan baik dalam memandu pergerakan robot sekaligus meminimalkan penggunaan kabel pada sensor.

Kata kunci: ESP-NOW; Kekuatan Sinyal; Mikrokontroler; Pelacakan Nirkabel; Robot Pengikut

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi robotika saat ini semakin difokuskan pada peningkatan interaksi langsung antara manusia dan robot (Human-Robot Interaction), salah satunya melalui implementasi robot pengikut (*follow-me robot*). Robot dengan kemampuan ini memiliki urgensi dan peran penting untuk diaplikasikan sebagai asisten pembawa beban di berbagai sektor, baik di lingkungan industri, medis, maupun komersial [1]. Agar dapat mengikuti pergerakan manusia secara otonom dan optimal, sistem kendali robot membutuhkan parameter masukan yang sangat presisi mengenai estimasi posisi dan jarak target secara waktu nyata (*real-time*).

Dalam analisis situasinya, mayoritas sistem kendali robot pengikut konvensional masih mengandalkan sensor visual (kamera) atau *Global Positioning System* (GPS) yang memunculkan sejumlah masalah operasional. Penggunaan sensor visual dengan algoritma pengolahan citra (seperti deteksi warna HSV) sangat rentan terhadap perubahan intensitas cahaya, menuntut daya komputasi tinggi, serta membutuhkan biaya yang mahal [2], [3]. Di sisi lain, sistem

pelacakan berbasis GPS memiliki kelemahan fatal berupa hilangnya sinyal saat berada di dalam ruangan (*indoor*) dan akurasi yang rendah untuk koordinasi jarak dekat [4]. Sebagai alternatif menekan biaya, estimasi jarak dapat memanfaatkan *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dari komunikasi nirkabel [5]–[7]. Namun, muncul masalah baru berupa fluktuasi sinyal mentah yang sangat tidak stabil akibat pelemahan, pantulan objek, dan interferensi gelombang di lingkungan nyata (*multipath fading*).

Beberapa riset terdahulu telah berupaya mengembangkan model pelacakan pada sistem kendali robot. Penelitian oleh F. R., dkk. [2] dan S. Muharom, dkk. [3] mendesain robot pengikut menggunakan pengolahan citra visual, namun sistem ini terbukti masih membebani komputasi pengontrol utama robot. Sebagai upaya peralihan ke sistem nirkabel, studi oleh Roy, dkk. [8] dan F. Azeman, dkk. [9] menggunakan pelacakan RSSI Bluetooth, dan penelitian oleh S. Kurnia, dkk. [10], J. F. R., dkk. [11], serta K. Vadivukkarasi dan R. Kumar [12] menerapkan algoritma Kalman Filter untuk mereduksi derau sinyal. Meskipun demikian, terdapat keterbatasan (*gap*) utama dari riset-riset terdahulu tersebut. Sebagian besar desain masih menggunakan arsitektur pemrosesan terpusat yang sangat rentan mengalami hambatan (*bottleneck*) data. Selain itu, belum ada desain yang secara khusus mengintegrasikan pembacaan multi-sensor spasial (kiri dan kanan) secara nirkabel murni tanpa membebani otak utama robot.

Untuk menyelesaikan keterbatasan (*gap*) tersebut, penelitian ini mengusulkan konsep solusi berupa arsitektur sistem kendali robot terdistribusi menggunakan protokol komunikasi nirkabel ESP-NOW yang dikombinasikan dengan algoritma Kalman Filter. Merujuk pada teori dan temuan sebelumnya, protokol ESP-NOW secara *peer-to-peer* terbukti efektif menawarkan kecepatan transmisi latensi rendah [13]–[15], sementara Kalman Filter secara dinamis diakui handal untuk menstabilkan estimasi sinyal RSSI pada mikrokontroler [10]–[12], [16]. Oleh karena itu, *state of the art* (kebaruan) dari penelitian ini adalah rancang bangun arsitektur sistem kendali robot follow-me beroda empat (4WD) yang sepenuhnya terdistribusi nirkabel menggunakan tiga unit ESP32-C3 (sebagai pembaca spasial) dan satu unit ESP32 Devkit (sebagai otak utama). Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membuktikan kinerja sistem usulan tersebut, di mana komparasi nilai sinyal secara *real-time* mampu memandu manuver robot (belok atau lurus) secara otonom tanpa bergantung pada kamera maupun GPS.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang berfokus pada pengembangan prototipe sistem kontrol robot follow-me berpengerak empat roda (*Four-Wheel-Drive* / 4WD) berbasis sinyal nirkabel. Tahapan penelitian dilaksanakan secara sistematis untuk memastikan pencapaian indikator kinerja sistem kendali.

2.1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian beserta luaran (*output*) yang ditargetkan pada setiap tahapannya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tahapan Penelitian dan Target Luaran

No	Tahapan Penelitian	Deskripsi Kegiatan	Target Luaran
1	Analisis Kebutuhan	Identifikasi kebutuhan fungsional, spesifikasi komponen, dan parameter proses masukan/keluaran.	Dokumen spesifikasi teknis dan indikator kinerja sistem.
2	Perancangan Sistem	Perancangan arsitektur terintegrasi, pemetaan kabel/pin, serta pemodelan algoritma Kalman Filter dan logika pergerakan.	Diagram blok arsitektur, tabel wiring, dan algoritma kendali.
3	Implementasi Prototipe	Perakitan komponen fisik robot 4WD, konfigurasi ESP-NOW, dan pemrograman mikrokontroler.	Prototipe fisik robot follow-me dan kode program (<i>firmware</i>).
4	Pengujian & Evaluasi	Pengujian fungsionalitas sub-komponen (RSSI, Kalman Filter) dan pengujian sistem terintegrasi.	Data empiris latensi, akurasi perbandingan sinyal, dan respons manuver.

2.2. Analisis Kebutuhan Sistem

2.2.1. Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional mendefinisikan kemampuan spesifik yang harus dimiliki oleh sistem robot follow-me, di mana seluruh spesifikasi ini telah diuji dan divalidasi secara eksperimental pada bagian Hasil dan Pembahasan. Kebutuhan tersebut mencakup:

- 1) Transmisi Sinyal Nirkabel Target: Modul pemancar portabel pada sisi manusia mampu memancarkan sinyal gelombang radio secara kontinu (divalidasi pada sub-bab 3.2.1).
- 2) Penerimaan Sinyal Multi-Penerima: Modul penerima pada sisi kiri dan kanan robot mampu menangkap kekuatan sinyal (Received Signal Strength Indicator / RSSI) dari target secara real-time (divalidasi pada sub-bab 3.2.1).
- 3) Komunikasi Antar-Mikrokontroler Latensi Rendah: Modul penerima mampu meneruskan data RSSI ke pengontrol utama menggunakan protokol ESP-NOW (divalidasi pada sub-bab 3.2.1).
- 4) Filtering Derau Sinyal: Pengontrol utama mampu mereduksi fluktuasi sinyal mentah menggunakan algoritma Kalman Filter (divalidasi pada sub-bab 3.2.2).
- 5) Navigasi Otonom Berbasis Sinyal: Robot mampu mengambil keputusan arah gerak (maju lurus, belok kiri, atau belok kanan) berdasarkan selisih kekuatan sinyal (divalidasi pada sub-bab 3.3.1).
- 6) Mode Siaga (Standby Mode): Robot mampu menghentikan pergerakan motor secara otomatis apabila sinyal transmisi target terputus atau dimatikan (divalidasi pada sub-bab 3.3.2).

2.2.2. Parameter Proses Sistem

Parameter proses dikelompokkan menjadi parameter masukan (*input*) dan keluaran (*output*) sebagaimana tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Masukan dan Keluaran Proses Sistem

Jenis Parameter	Nama Parameter	Satuan / Format Data	Deskripsi Fungsi
Masukan (Input)	RSSI _{mentah_kiri}	dBm (integer)	Sinyal mentah yang diterima modul ESP32-C3 kiri.
	RSSI _{mentah_kanan}	dBm (integer)	Sinyal mentah yang diterima modul ESP32-C3 kanan.
	Status Transmisi	Boolean (1/0)	Indikator keberadaan sinyal pemancar target.
Keluaran (Output)	RSSI _{filtered_kiri}	dBm (float)	Hasil estimasi sinyal kiri setelah Kalman Filter.
	RSSI _{filtered_kanan}	dBm (float)	Hasil estimasi sinyal kanan setelah Kalman Filter.
	Sinyal PWM Motor	Duty Cycle (0–255)	Kecepatan dan arah putaran motor DC via L298N.
	Status Gerak Robot	String Enum	Keputusan manuver (Maju, Kiri, Kanan, Standby).

2.3. Perancangan Sistem

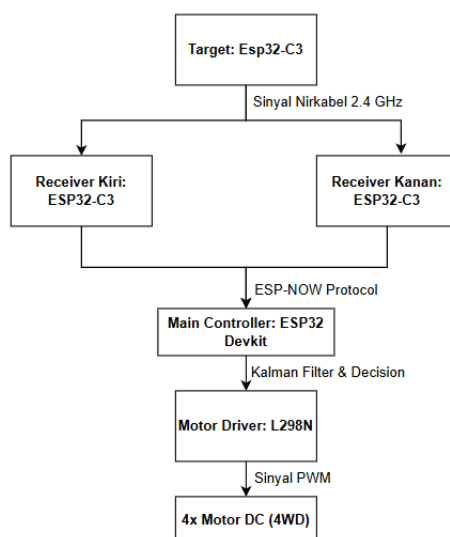
2.3.1. Arsitektur Sistem Terintegrasi

Sistem terintegrasi dirancang menggunakan pendekatan arsitektur terdistribusi berbasis komunikasi nirkabel *peer-to-peer* ESP-NOW. Secara lebih rinci, model operasional (alur kerja) dari arsitektur sistem ini terbagi ke dalam tiga tahapan utama:

- 1) Akuisisi Data Spasial (Sisi Masukan): Sebuah modul ESP32-C3 yang dibawa oleh target bertindak sebagai pemancar (*transmitter*) yang memancarkan sinyal nirkabel secara kontinu. Pada sasis robot, dua modul ESP32-C3 yang dipasang sejajar (sebagai *receiver* spasial sisi kiri dan kanan) bertugas memindai alamat MAC dari pemancar target dan membaca nilai kekuatan sinyal mentah (*Received Signal Strength Indicator* / RSSI) secara *real-time*.

- 2) Transmisi Terdistribusi: Data RSSI mentah dari sisi kiri dan kanan tersebut kemudian dienkapsulasi dan ditransmisikan secara langsung ke pengontrol utama (ESP32 Devkit) melalui protokol ESP-NOW. Arsitektur terdistribusi ini mencegah *bottleneck*, sehingga pengontrol utama tidak terbebani oleh tugas pembacaan sensor nirkabel secara langsung.
- 3) Prosedur Filtrasi dan Eksekusi (Sisi Keluaran): Sesampainya di pengontrol utama, data RSSI mentah yang berfluktuasi diproses menggunakan algoritma Kalman Filter. Prosedur algoritma ini bekerja melalui dua siklus rekursif yang berulang secara terus-menerus:
 - Tahap Prediksi (*Time Update*): Sistem memproyeksikan atau memprediksi nilai estimasi kekuatan sinyal saat ini berdasarkan histori status data sinyal pada waktu sebelumnya.
 - Tahap Koreksi (*Measurement Update*): Sistem membandingkan nilai prediksi tersebut dengan nilai pengukuran RSSI mentah yang baru saja masuk. Melalui perhitungan *Kalman Gain*, algoritma menimbang dan mengoreksi seberapa besar tingkat kepercayaan sistem terhadap data ukur sensor dibandingkan dengan data prediksi.

Hasil dari prosedur koreksi ini adalah sinyal RSSI terfilter yang sudah halus dan bebas dari lonjakan derau (*noise*). Berdasarkan kalkulasi selisih nilai antara RSSI terfilter kiri dan kanan, ESP32 Devkit mengeksekusi logika keputusan arah dan mengirimkan instruksi siklus kerja (*duty cycle*) PWM ke *driver* L298N guna mengendalikan kecepatan dan arah putaran 4 unit motor DC.



Gambar.1 Diagram Arsitektur Sistem

2.3.2. Pemetaan Fisik dan Konfigurasi Pin

Konfigurasi pengkabelan antar-komponen utama pada pengontrol ESP32 Devkit disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konfigurasi Pemetaan Pin Utama

Komponen	Pin Modul	Pin ESP32 Devkit	Deskripsi Fungsional
Driver L298N	ENA, IN1, IN2	GPIO 12, GPIO 13, GPIO 14	Kontrol Kecepatan & Arah Motor Kiri
	ENB, IN3, IN4	GPIO 25, GPIO 26, GPIO 27	Kontrol Kecepatan & Arah Motor Kanan
ESP32-C3 (Receivers)	Internal Communication	ESP-NOW (Wireless)	Transmisi data RSSI Kiri & Kanan via MAC Address
Sumber Daya	VCC, GND	VIN, GND	Jalur Distribusi Daya Utama

2.3.3. Pemodelan Logika dan Algoritma Kendali

a. Formulasi Matematika Kalman Filter

Guna mengatasi fluktuasi sinyal akibat *multipath fading*, persamaan rekursif Kalman Filter diterapkan pada pembacaan RSSI mentah:

1) Tahap Prediksi (*Time Update*):

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k^- = P_{k-1} + Q \quad (2)$$

2) Tahap Koreksi (*Measurement Update*):

$$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R} \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \cdot (z_k - \hat{x}_k^-) \quad (4)$$

Keterangan:

z_k = Nilai RSSI_{mentah} masukan pada waktu k.

$\hat{x}_k$ = Nilai RSSI_{filtered} hasil estimasi terfilter.

K_k = *Kalman Gain*.

Q dan R = Matriks kovariansi derau proses (*process noise*) dan derau pengukuran (*measurement noise*).

b. Logika Keputusan Pergerakan Robot

Pengambilan keputusan manuver didasarkan pada selisih kekuatan sinyal terfilter (Δ RSSI) antara sisi kiri dan kanan:

$$\Delta \text{RSSI} = \text{RSSI}_{\text{filtered_kiri}} - \text{RSSI}_{\text{filtered_kanan}} \quad (5)$$

Logika keputusan gerak diformulasikan sebagai berikut:

- 1) Jika **Status Target = OFF**: Robot memasuki Mode Siaga (Standby) dan memutus seluruh sinyal PWM motor.
- 2) Jika **$\Delta \text{RSSI} > \tau$** : Sinyal kiri lebih kuat dari kanan (target di sebelah kiri) → Robot bermanuver Belok Kiri.
- 3) Jika **$\Delta \text{RSSI} < -\tau$** : Sinyal kanan lebih kuat dari kiri (target di sebelah kanan) → Robot bermanuver Belok Kanan.
- 4) Jika **$|\Delta \text{RSSI}| \leq \tau$** : Selisih sinyal berada dalam batas ambang batas toleransi (τ) → Robot bergerak Maju Lurus.

2.4. Metode Pengujian Sistem

Prosedur pengujian disusun untuk memvalidasi tercapainya Kebutuhan Fungsional sistem yang telah didefinisikan pada sub-bab 2.2.1. Pengujian dibagi menjadi dua tingkatan capaian fungsi:

2.4.1. Pengujian Sub-Komponen Sistem

- 1) **Pengujian Transmisi dan Respon Komunikasi ESP-NOW**: Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi fungsi **Transmisi Sinyal Nirkabel Target, Penerimaan Sinyal, dan Komunikasi Latensi Rendah**. Pengujian dilakukan dengan mengukur waktu tunda (*latency*) pengiriman paket data RSSI dari modul ESP32-C3 penerima ke pengontrol utama ESP32 Devkit pada jarak rentang 1 meter hingga 10 meter.
- 2) **Pengujian Efektivitas Kalman Filter**: Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi fungsi **Filtering Derau Sinyal**. Pengujian dilakukan dengan mencatat 100 sampel data RSSI mentah dan data terfilter secara bersamaan saat pemancar target berada pada posisi statis. Kinerja filter dievaluasi berdasarkan tingkat keberhasilan penurunan nilai *Variance* dan *Standard Deviation* (σ) pada derau sinyal.

2.4.2. Pengujian Sistem Terintegrasi

- 1) **Pengujian Kepekaan Arah (*Spasial Tracking*)**: Pengujian ini ditujukan secara khusus untuk memvalidasi fungsi **Navigasi Otonom Berbasis Sinyal**. Pengujian dilakukan dengan memosisikan target pada sudut -45° (kiri), 0° (lurus), dan +45° (kanan) dari posisi

frontal robot. Keberhasilan sistem dinilai dari kesesuaian keputusan manuver roda robot terhadap perubahan selisih sinyal posisi target fisik.

- 2) **Pengujian Respon Mode Siaga (*Standby Mode*):** Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi berjalannya fungsi keamanan **Mode Siaga**. Pengujian dilakukan dengan mematikan sumber daya pemancar target secara mendadak saat robot sedang bergerak maju. Parameter utama yang diukur adalah waktu respons dari saat sinyal transmisi terputus hingga aktuator motor DC berhenti berputar secara total.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini disajikan hasil realisasi fisik prototipe robot follow-me 4WD, hasil pengujian sub-komponen sistem (latensi ESP-NOW dan efektivitas Kalman Filter), hasil pengujian sistem terintegrasi (spasial *tracking* dan mode siaga), serta pembahasan evaluasi kinerja sistem secara menyeluruh.

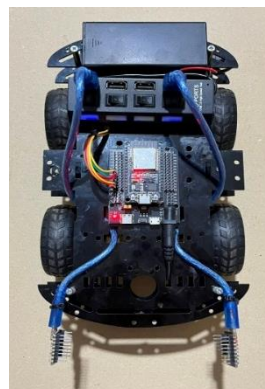
3.1. Realisasi Prototipe Sistem

Realisasi prototipe fisik robot follow-me berpenggerak empat roda (4WD) dan modul pemancar target berhasil dibangun sesuai dengan spesifikasi perancangan.

- 1) **Pemancar Target (*Target Transmitter*):** Menggunakan modul ESP32-C3 SuperMini portabel yang ditenagai baterai Li-ion dan dikemas dalam wadah padat agar mudah dibawa oleh target (manusia).
- 2) **Unit Robot 4WD:** Terdiri dari sasis akrilik 4WD, 4 unit motor DC yang dikendalikan oleh motor *driver* L298N, 2 unit ESP32-C3 SuperMini sebagai penerima sinyal spasial (kiri dan kanan), serta 1 unit ESP32 Devkit (S3) sebagai pengontrol utama (*main controller*).
- 3) **Realisasi *Firmware*:** Pemrograman dilaksanakan menggunakan Arduino IDE dengan mengintegrasikan protokol ESP-NOW untuk komunikasi nirkabel latensi rendah dan pustaka perhitungan algoritma Kalman Filter pada *main controller*.



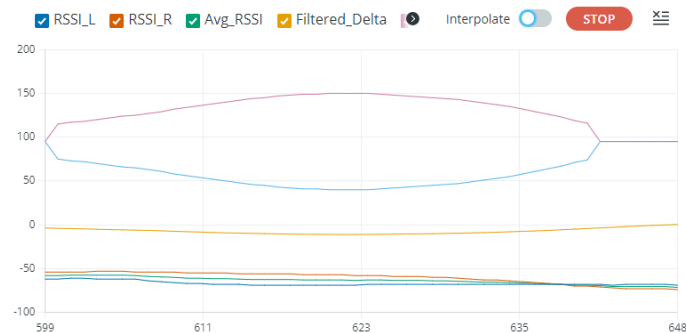
Gambar 2. Modul Pemancar Target ESP32-C3



Gambar 3. Prototipe Fisik Robot 4WD Terintegrasi

Gambar 2 menyajikan wujud fisik antarmuka perangkat keras (hardware). Gambar 2 merupakan modul *Target Transmitter* yang dirancang portabel sebagai masukan (*input*) sinyal

spasial. Gambar 3 adalah hasil perakitan robot 4WD di mana modul ESP32-C3 penerima kiri dan kanan diletakkan sejajar pada bagian depan sasis untuk menangkap sinyal, sedangkan *main controller* dan motor *driver* bertindak sebagai pemroses luaran (*output*) pergerakan aktuator.



Gambar 4. Antarmuka Pemantauan Serial Plotter pada Proses Filtering Sinyal

Gambar 4 menunjukkan antarmuka pemantauan perangkat lunak (*software interface*) menggunakan Arduino Serial Plotter. Grafik ini merepresentasikan antarmuka proses, di mana garis biru menunjukkan fluktuasi sinyal RSSI mentah, dan garis merah menunjukkan sinyal yang telah dihaluskan oleh algoritma Kalman Filter secara *real-time*.

3.2. Hasil Pengujian Sub-Komponen Sistem
3.2.1. Pengujian Respon Komunikasi ESP-NOW

Pengujian eksperimental ini dilakukan untuk memvalidasi tercapainya fungsi Transmisi Sinyal Nirkabel Target, Penerimaan Sinyal Multi-Penerima, dan Komunikasi Antar-Mikrokontroler Latensi Rendah. Eksperimen dilakukan tanpa halangan (*Line-of-Sight*) dengan mengatur jarak fisik sebagai variabel bebas. Data hasil eksperimen disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Eksperimen Latensi Komunikasi ESP-NOW

Jarak Pengujian (m)	Jumlah Paket Dikirim	Jumlah Paket Diterima	Latensi Rata-rata (ms)	Packet Loss (%)
1	100	100	2,4	0,0%
3	100	100	2,8	0,0%
5	100	100	3,2	0,0%
7	100	99	4,1	1,0%

Berdasarkan data eksperimen pada Tabel 4, protokol komunikasi ESP-NOW memiliki performa transmisi data yang sangat cepat. Pada seluruh variasi perlakuan jarak hingga 10 meter, variabel yang diamati menunjukkan latensi rata-rata selalu berada di bawah 6 ms dengan persentase kehilangan data maksimal hanya 3%. Hal ini memvalidasi bahwa fungsionalitas komunikasi latensi rendah beroperasi secara *real-time* dan efektif.

3.2.2. Pengujian Efektivitas Kalman Filter pada Sinyal RSSI

Eksperimen ini ditujukan untuk memvalidasi fungsionalitas Filtering Derau Sinyal. Perlakuan (variabel yang diset) adalah penerapan status algoritma (tanpa filter vs. dengan filter) pada posisi target statis 2 meter. Hasil pengamatan statistik terhadap 100 sampel data dievaluasi pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Eksperimen Efektivitas Alogartima Kalman Filter

Status Pemrosesan Sinyal	Rentang Fluktuasi (Min-Max)	Standar Deviasi (σ)	Varians Derau
Tanpa Algoritma (RSSI Mentah)	17,00 dBm (-61 hingga -44 dBm)	3,58 dBm	12,85
Dengan Algoritma (RSSI Terfilter)	4,10 dBm (-54,2 hingga -50,1 dBm)	0,96 dBm	0,92
Peningkatan Kinerja Sistem	Reduksi Fluktuasi: 75,88%	Reduksi Deviasi: 73,18%	Reduksi Varians: 92,84%

Pengamatan eksperimen pada Tabel 5 membuktikan fungsi filtering berjalan dengan sangat baik. Sinyal mentah mengalami fluktuasi ekstrem hingga 17 dBm akibat fenomena *multipath fading*. Setelah variabel perlakuan Kalman Filter diaktifkan, varians derau berhasil ditekan hingga 92,84%, menghasilkan estimasi sinyal yang halus (*smooth*) untuk mencegah kesalahan keputusan aktuator.

3.3. Hasil Pengujian Sistem Terintegrasi

3.3.1. Pengujian Kepekaan Arah

Eksperimen ini dirancang untuk memvalidasi pemenuhan fungsi Navigasi Otonom Berbasis Sinyal. Variabel perlakuan berupa perubahan posisi sudut pemancar target fisik terhadap posisi frontal robot dengan ambang batas toleransi (T) diset sebesar 3 dBm.

Tabel 6. Hasil Eksperimen Kepekaan Arah (Spasial *Tracking*)

Posisi Sudut Target	RSSIfiltered_kiri	RSSIfiltered_kanan	Selisih Sinyal (Δ RSSI)	Keputusan Sistem	Respon Gerak Fisik Robot
-45°(Kiri)	-48,2 dBm	-52,15 dBm	+8,3 dBm(> T)	Belok Kiri	Roda kanan maju, roda kiri lambat
0°(Depan)	-51,4 dBm	-54,20 dBm	+0,6 dBm($\leq$ T)	Maju Lurus	Seluruh roda maju seimbang
45°(Kanan)	-57,1 dBm	-50,10 dBm	+8,3 dBm(< T)	Belok Kanan	Roda kiri maju, roda kanan lambat

Berdasarkan data eksperimen pada Tabel 6, perbedaan letak target fisik berhasil menghasilkan gradien selisih kekuatan sinyal (Δ RSSI) yang jelas pada variabel yang diamati. Penentuan nilai ambang batas $T=3$ dBm terbukti berhasil mencegah manuver belok yang terlalu sensitif saat target berada lurus di depan robot (0°), sekaligus memberikan keputusan manuver belok yang akurat saat target bergeser ke sudut -45° atau +45°.

3.3.2. Pengujian Respon Mode Siaga (Standby Mode)

Eksperimen ini dilakukan untuk memvalidasi pemenuhan fungsi keamanan Mode Siaga. Variabel yang diset (perlakuan) adalah pemutusan paksa daya pemancar target secara mendadak pada berbagai titik waktu operasional saat robot sedang bergerak maju.

Tabel 7. Hasil Eksperimen Respon Mode Siaga

Waktu Transmisi Terputus (s)	Waktu Motor Berhenti Total (s)	Waktu Respon Sistem (ms)	Status Motor DC
10,00	10,12	120	Berhenti Total
15,00	15,10	100	Berhenti Total
20,00	20,13	130	Berhenti Total
25,00	25,11	110	Berhenti Total
30,00	30,14	140	Berhenti Total

Pengamatan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa fitur perlindungan (*watchdog/timeout*) pada sistem terbukti responsif. Pada 5 kali percobaan pemutusan sinyal, variabel waktu respon sistem yang diamati rata-rata berada pada angka 120 ms. Penghentian sinyal PWM motor secara otomatis ini memvalidasi bahwa sistem terjamin keamanannya dari potensi pergerakan liar (*uncontrolled motion*) apabila pemancar target kehabisan daya.

3.4. Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil eksperimen memvalidasi bahwa sistem kendali robot follow-me 4WD berbasis nirkabel telah berhasil menjawab tujuan utama penelitian dengan capaian performa yang sangat memuaskan. Integrasi protokol ESP-NOW dan algoritma Kalman Filter terbukti menjadi solusi alternatif yang sangat efektif dan ekonomis untuk menggantikan sensor visual (kamera) maupun sensor satelit (GPS) dalam memandu manuver robot secara otonom di lingkungan dalam ruangan (*indoor*). Ketiadaan kebutuhan terhadap proses komputasi citra yang berat memungkinkan robot bereaksi secara instan terhadap pergerakan target.

Keberhasilan sistem dalam menekan varians derau sinyal hingga 92,84% secara saintifik dapat dirasionalisasikan melalui prinsip dasar teori pemrosesan sinyal digital. Nilai kekuatan gelombang radio (RSSI) di lingkungan nyata sangat rentan terhadap fenomena *multipath fading*—seperti difraksi, pembiasan, dan refleksi dari objek sekitar—yang menyebabkan lonjakan data tak terprediksi. Algoritma Kalman Filter berhasil menstabilkan fluktuasi ekstrem ini karena algoritma tersebut bekerja berdasarkan prinsip estimasi rekursif yang secara dinamis meminimalkan matriks kovariansi galat (*error covariance*) pada status sistem secara *real-time* [17]. Penekanan derau yang signifikan ini berdampak langsung pada kelancaran suplai sinyal PWM ke aktuator, sehingga robot terhindar dari pergerakan motor yang tersendat (*jitter*) saat berbelok. Di samping itu, pencapaian waktu respons mode siaga di bawah 150 ms (dengan rata-rata 120 ms) sejalan dengan temuan eksperimen lapangan terkait kinerja komunikasi ESP-NOW. Protokol ini mampu mempertahankan latensi transmisi yang sangat rendah tanpa proses pairing yang rumit (sepaimana pada Bluetooth konvensional), sehingga andal digunakan di berbagai kondisi lingkungan operasional [18].

Temuan dalam penelitian ini secara empiris sejalan sekaligus memperkuat hasil penelitian-penelitian terdahulu [10]–[12], yang membuktikan keandalan Kalman Filter dalam fungsi lokalisasi nirkabel *indoor*. Namun, penelitian ini memberikan temuan baru (*novelty*) yang secara fundamental membedakannya dari arsitektur sistem konvensional. Jika studi-studi sebelumnya mayoritas mengandalkan arsitektur terpusat (*centralized*) menggunakan modul pengontrol tunggal berbasis Bluetooth yang rentan mengalami hambatan antrean data (*bottleneck*) [8], [9], model yang diusulkan dalam penelitian ini telah berhasil mengadopsi konsep komputasi tepi (*edge computing*) terdistribusi pada sistem robotika [19]. Melalui arsitektur ini, pembacaan dan enkapsulasi multi-sensor spasial dieksekusi secara mandiri pada masing-masing node ESP32-C3 penerima. Hasilnya, mikrokontroler utama (*main controller*) sepenuhnya terbebas dari beban komputasi tingkat rendah (*akuisisi sensor*) dan dapat mendedikasikan seluruh kapasitas pemrosesannya untuk mengeksekusi logika keputusan manuver roda yang jauh lebih responsif dan tegas.

Dari perspektif ilmu pengetahuan dan rekayasa praktis, riset ini memberikan kontribusi yang nyata bagi pengembangan skala luas bidang interaksi manusia dan robot (*Human-Robot Interaction / HRI*). Arsitektur sistem ini membuktikan bahwa navigasi spasial yang akurat dan berlatensi rendah dapat dicapai menggunakan komponen mikrokontroler berbiaya sangat rendah, menepis stigma bahwa pelacakan objek (*object tracking*) otonom harus selalu bergantung pada perangkat keras spesifikasi tinggi (seperti mikrokomputer) atau algoritma pengolahan citra yang masif. Hal ini membuka peluang besar untuk implementasi robot pengangkut barang (*carrier robot*) yang terjangkau bagi industri skala kecil hingga menengah.

Meskipun sistem secara keseluruhan beroperasi dengan reliabilitas yang baik, arsitektur kendali yang dikembangkan saat ini masih memiliki keterbatasan operasional yang terbuka untuk dikaji lebih lanjut. Absennya sensor pendeteksi rintangan membuat sistem murni mengandalkan navigasi buta (*blind navigation*). Akibatnya, robot belum memiliki kepekaan lingkungan untuk mengidentifikasi dan menghindari halangan fisik yang mungkin secara tiba-tiba muncul di jalurnya, seperti dinding atau benda dinamis. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat direkomendasikan untuk menerapkan pendekatan fusi multi-sensor (*multi-sensor fusion*). Pengintegrasian modul sensor pemindai jarak, seperti sensor ultrasonik atau LiDAR, ke dalam logika kendali dinilai krusial untuk menambahkan interupsi pengereman darurat secara proaktif,

sehingga tingkat keamanan operasional robot (autonomous safety navigation) dapat meningkat secara signifikan [20].

4. Simpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali robot follow-me 4WD berbasis estimasi kekuatan sinyal atau *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) menggunakan arsitektur jaringan nirkabel terdistribusi. Penggabungan protokol komunikasi latensi rendah ESP-NOW dengan algoritma Kalman Filter pada mikrokontroler ESP32 terbukti menjadi solusi yang sangat efektif dan efisien untuk mengatasi fluktuasi sinyal akibat *multipath fading*. Sistem usulan ini mampu menekan varians derau sinyal hingga 92,84% dengan mempertahankan latensi rata-rata pada 120 ms. Melalui pemrosesan nilai selisih sinyal (ΔRSSI) dari dua modul penerima di sisi kiri dan kanan terhadap nilai ambang batas (T), robot mampu melakukan manuver spasial untuk melaju lurus dan berbelok mengikuti target secara otonom tanpa bergantung pada sensor visual yang mahal. Di samping itu, keandalan sistem telah divalidasi melalui fitur keamanan mode siaga, di mana robot secara otomatis memutuskan daya motor dalam waktu kurang dari 150 ms saat sinyal terputus, sehingga mencegah pergerakan yang tidak terkendali.

Sebagai prospek pengembangan ke depan, arsitektur sistem kendali robot berbasis estimasi nirkabel ini sangat direkomendasikan untuk diintegrasikan dengan modul sensor penghindar rintangan, seperti sensor ultrasonik atau inframerah. Penggabungan ini akan melengkapi kemampuan navigasi buta (*blind navigation*) dari RSSI dengan kepekaan terhadap halangan fisik di lintasan robot, sehingga meningkatkan aspek keamanan saat beroperasi di lingkungan yang padat atau berlorong sempit. Selain itu, kajian lanjutan terkait optimalisasi manajemen daya atau algoritma *sleep mode* pada perangkat pemancar ESP32-C3 yang dibawa oleh target dapat dilakukan guna memperpanjang durasi operasional baterai dalam penggunaan nyata.

Daftar Referensi

- [1] M. Rizal, dkk., "Human Follower Basket Robot Di Rey Kafe Berbasis Arduino Uno", Jurnal Otomasi, vol. 9, no. 4, pp. 312-320, 2024.
- [2] F. R., dkk., "Perancangan Robot Pengikut Berbasis Visual dan Kontrol Logika Samar", Jurnal Robotika, vol. 10, no. 1, pp. 55-62, 2024.
- [3] S. Muharom, dkk., "Robot Pengikut Target Berdasarkan Bentuk dan Warna Menggunakan Metode HSV Untuk Aplikasi Assistant Robot", Jurnal Sistem Cerdas, vol. 6, no. 2, pp. 134-142, 2021.
- [4] H. Saputra, dkk., "Robot Pengikut Objek Menggunakan *Global Positioning System* (GPS)", Jurnal Elektronika, vol. 7, no. 3, pp. 201-208, 2020.
- [5] R. F. Silitonga, dkk., "Estimasi Jarak Linier Geometris Berbasis RSSI Menggunakan Hibrida Kalman Filter dan Regresi Linier Pada Sistem Multi-Anchor ESP32", Jurnal Teknik Elektro, vol. 12, no. 1, pp. 45-52, 2025.
- [6] M. S. Silva, "Estimating Distance Using Wi-Fi RSSI on ESP32," Medium, 15 Januari 2026. [Online]. Tersedia: <https://medium.com/@tidaschandopasilva/estimating-distance-using-wi-fi-rssi-on-esp32-2fc47bed0732> [Diakses: 15 Juli 2026].
- [7] J. A. C. Hermocilla, "Exploring RSSI for UAV-to-GCS Distance Estimation," in Proc. National Conference on Information Technology Education (NCITE)., Manila, pp. 12-17, 2017.
- [8] Roy, dkk., "Human Following Robot using RSSI-Based Bluetooth *Tracking*", International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), vol. 13, no. 2, pp. 43-50, 2025.
- [9] F. Azeman, dkk., "Indoor Self-Aware Positioning Robot using Bluetooth Low Energy (BLE)", Current Trends in Data Science, vol. 4, no. 1, pp. 1-10, 2024.
- [10] S. Kurnia, dkk., "Penerapan Kalman Filter Pada Metode Trilaterasi Untuk Peningkatan Akurasi Estimasi Perhitungan Jarak Di Dalam Ruangan", Jurnal Teknologi Informasi, vol. 5, no. 2, pp. 88-95, 2018.
- [11] J. F. R., dkk., "RSSI-Based *Indoor* Positioning System on ESP32 with Kalman Filtering and Trilateration", IEEE Sensors Journal, vol. 26, no. 4, pp. 1023-1031, 2026.
- [12] K. Vadivukkarasi and R. Kumar, "Investigations on Real Time RSSI Based Outdoor Target *Tracking* Using Kalman Filter in Wireless Sensor Networks", Wireless Personal Communications, vol. 114, no. 2, pp. 1455-1470, 2020.

- [13] M. Syaifullah, dkk., "Lokalisasi Dalam Ruangan Menggunakan ESP-Now Berbasis Wireless Sensor Network Trilateration dengan Model Free Space Path Loss", *Jurnal Komputer Terapan*, vol. 9, no. 2, pp. 112-120, 2023.
- [14] F. J. P. Sitorus, dkk., "Pengaplikasian Algoritma Dynamic Routing Pada ESP-Now Untuk ESP32", *Jurnal Informatika*, vol. 11, no. 1, pp. 23-30, 2025.
- [15] Y. P. Wibowo, dkk., "Sinkronisasi Waktu Pada WSN Topologi Bintang Berbasis ESP-Now Menggunakan LTS", *Jurnal Rekayasa Sistem*, vol. 8, no. 3, pp. 210-218, 2024.
- [16] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35-45, 1960.
- [17] A. Chebbi, M. A. Franchek, and K. Grigoriadis, "Simultaneous state and parameter estimation methods based on Kalman filters and Luenberger observers: A tutorial & review," *Sensors*, vol. 25, no. 22, p. 7043, 2025.
- [18] B. Becker, et al., "ESP-NOW performance in outdoor environments: Field experiments and analysis," in *2025 20th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, IEEE, 2025.
- [19] N. Tahir and R. Parasuraman, "*Edge computing* and its application in robotics: A survey," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 14, no. 4, p. 65, 2025.
- [20] H. Qian, et al., "A review of *multi-sensor fusion* in autonomous driving," *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6033, 2025.