

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PENENTUAN POSISI DAN PENGHINDARAN HALANGAN PADA ROBOT BERGERAK PEMUNGUT SAMPAH BERBASIS FPGA

1st Bulan Indira Nur Hendrawan

D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

bulanindira@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Denny Darlis, S. SI., MT

D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

dennydarlis@telkomuniversity.ac.id

3rd Aris Hartaman, S.T., M.T.

D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

arishartaman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Tugas Akhir ini membahas perancangan serta implementasi sistem monitoring orientasi dan deteksi sampah pada robot mobile yang berbasis kombinasi FPGA DE0-Nano dan mikrokontroler. Sistem dirancang untuk memanfaatkan sensor MPU6050 dalam membaca data percepatan (accelerometer) serta kecepatan sudut (gyroscope) pada tiga sumbu koordinat (X, Y, Z). Pada konfigurasi default, accelerometer menghasilkan data mentah 16-bit yang kemudian dikonversi ke dalam satuan percepatan, sedangkan gyroscope memiliki rentang pengukuran $-250^\circ/s$ hingga $+250^\circ/s$ dengan sensitivitas tertentu. Nilai keluaran mentah dari kedua sensor diolah sehingga diperoleh representasi sudut orientasi yang dapat ditampilkan secara real-time. Walaupun FPGA DE0-Nano telah dilengkapi sensor accelerometer internal, adanya keterbatasan teknis mendorong pemanfaatan MPU6050 sebagai alternatif yang lebih andal. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan sensor ultrasonik yang berfungsi untuk mendeteksi keberadaan sampah berdasarkan ambang batas jarak tertentu. Dengan demikian, robot dapat memberikan respon terhadap objek di sekitarnya secara cepat dan tepat. Proses komunikasi data antarperangkat dilakukan menggunakan protokol UART yang disinkronisasi dengan clock internal FPGA. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pembacaan orientasi secara akurat serta memberikan indikasi dini keberadaan sampah pada jarak kritis, sehingga mendukung kinerja robot secara efektif.

Kata kunci: Ultrasonik, FPGA DE0-Nano, ESP32, MPU6050, WiFi, Ground Control Station

I. PENDAHULUAN

persoalan serius bagi pemerintah [1]. Kondisi ini menuntut solusi inovatif, salah satunya dengan pengembangan robot pemungut sampah. Inovasi ini tidak hanya membantu menjaga kebersihan secara efektif, tetapi juga mengedukasi masyarakat mengenai pentingnya peran aktif dalam pengelolaan sampah. Teknologi Visible Light Communication (VLC) menjadi salah satu fitur penting karena mampu menyediakan komunikasi data cepat dan andal dengan memanfaatkan cahaya tampak, sehingga robot dapat beroperasi secara optimal di area yang luas [2]. Robot pemungut sampah ini juga dilengkapi sensor ultrasonik untuk mendeteksi rintangan, sensor posisi untuk menentukan lokasi, serta sensor MPU6050 sebagai accelerometer dan gyroscope guna memantau orientasi serta gerakan robot secara presisi [3]. FPGA DE0-Nano digunakan sebagai pengendali utama karena memiliki keunggulan dalam pemrosesan paralel, fleksibilitas desain, konsumsi daya

rendah, serta waktu eksekusi cepat, sehingga mendukung kinerja robot pada aplikasi real-time.

II. KAJIAN TEORI

A. Robot Bergerak

Perkembangan teknologi robotik telah memberikan dampak besar di berbagai sektor, karena robot mampu melaksanakan tugas dengan presisi tinggi, baik secara otomatis maupun dengan kendali manusia [4]. Robot bergerak kini memanfaatkan navigasi dan kecerdasan buatan (AI) untuk mengambil keputusan secara mandiri, menghindari rintangan, serta menyelesaikan tugas secara efektif. Di era Industry 4.0, dukungan jaringan cepat seperti 5G semakin meningkatkan responsivitas dan efisiensi operasi, sehingga robot berperan penting dalam meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi risiko keselamatan manusia [5].

B. Field Programmable Gate Array (FPGA)

Field Programmable Gate Array (FPGA) adalah komponen semikonduktor dengan blok logika yang dapat diprogram secara fleksibel untuk berbagai fungsi digital. Fleksibilitas dan kecepatannya membuat FPGA banyak digunakan pada aplikasi seperti robotik dan pemrosesan sinyal. Pada tugas akhir ini digunakan FPGA DE0-Nano berbasis Altera Cyclone IV karena memiliki antarmuka I/O yang optimal untuk mendukung sistem tertanam.

C. Field Programmable Gate Array (FPGA)

FPGA adalah chip semikonduktor yang dapat diprogram ulang untuk menjalankan berbagai fungsi logika digital [7]. FPGA memungkinkan fleksibilitas dalam pengembangan sistem tertanam karena mampu menggantikan fungsi perangkat keras secara langsung. Pada penelitian ini, digunakan DE0-Nano yang berbasis Altera Cyclone IV, dilengkapi dengan antarmuka GPIO, memori SDRAM 32 MB, ADC 12-bit, dan akselerometer digital. Clock utama berasal dari osilator 50 MHz yang terhubung ke pin R8 pada FPGA dan digunakan untuk sinkronisasi modul logika seperti UART dan timer.

D. Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah chip SoC yang sudah memiliki WiFi, Bluetooth, prosesor, memori, dan GPIO, sehingga bisa menjadi alternatif Arduino karena dapat langsung terhubung ke jaringan tanpa modul tambahan [6]. Pada sistem ini,

ESP32 digunakan untuk membaca data dari sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor MPU6050, menerima data tambahan dari FPGA DE0-Nano lewat UART, lalu menampilkan hasilnya di serial monitor dan mengirimkannya ke Ground Control Station (GCS) melalui WiFi.

E. Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik yang dipantulkan kembali oleh objek dan diterima oleh receiver untuk menghitung jarak berdasarkan selisih waktu tempuh gelombang [7]. Sensor ini mudah dihubungkan ke mikrokontroler seperti Arduino Uno dan umum digunakan dalam aplikasi robotika untuk mendeteksi hambatan; jika jarak terdeteksi lebih kecil dari ambang batas, sistem dapat mengendalikan aktuator untuk berhenti atau bermanuver agar robot terhindar dari tabrakan.

F. MPU6050

Sensor MPU6050 merupakan sensor 6 sumbu yang menggabungkan gyroscope 3 sumbu, accelerometer 3 sumbu, serta Digital Motion Processor (DMP), dan melalui komunikasi I2C dapat dipadukan dengan sensor kompas 3 sumbu untuk menghasilkan 9 sumbu motion fusion [8]. Data gerakan dihasilkan dengan teknologi MEMS yang dikonversi menjadi sinyal digital melalui ADC 16-bit, lalu dibaca oleh mikrokontroler ESP32 melalui jalur SCL dan SDA. Pemrograman menggunakan Arduino IDE memungkinkan data orientasi sumbu X, Y, dan Z ditampilkan secara real-time pada serial monitor untuk analisis gerakan.

G. Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)

UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) merupakan protokol komunikasi serial asinkron yang mengonversi data paralel menjadi serial saat pengiriman dan sebaliknya saat penerimaan, menggunakan jalur TX, RX, serta GND sebagai referensi tegangan. Setiap *byte* data dilengkapi *start bit*, *stop bit*, dan *opsional parity bit*, dengan kecepatan ditentukan oleh *baud rate* yang harus sama pada kedua perangkat. Karena sederhana dan andal, UART banyak digunakan pada mikrokontroler, modul sensor, serta sistem komunikasi berkabel maupun nirkabel [9].

H. Quartus

Quartus merupakan software untuk merancang dan mensimulasikan rangkaian logika digital menggunakan VHDL atau Verilog, serta dilengkapi fitur seperti *Pin Planner*, *Timing Analyzer*, *Simulation Tools*, *IP Catalog*, *Signal Tap Logic Analyzer*, dan *Compiler Optimization* yang mendukung pemetaan pin, analisis performa, integrasi modul, hingga pengujian desain, sehingga menjadi salah satu perangkat lunak utama dalam pengembangan sistem digital [10].

I. Arduino IDE

Baud rate Arduino IDE (Integrated Development Environment) adalah aplikasi pemrograman berbasis Java yang dirancang untuk memudahkan pembuatan, pengeditan, dan pengunggahan program ke mikrokontroler Arduino [11]. Dengan pustaka C++ bawaan, IDE ini mendukung berbagai modul dan sensor melalui manajemen library, serta menyediakan fitur Serial Monitor untuk menampilkan data

secara real-time, sehingga memudahkan pengguna dalam pemantauan, pengujian, dan debugging program [12].

III. METODE

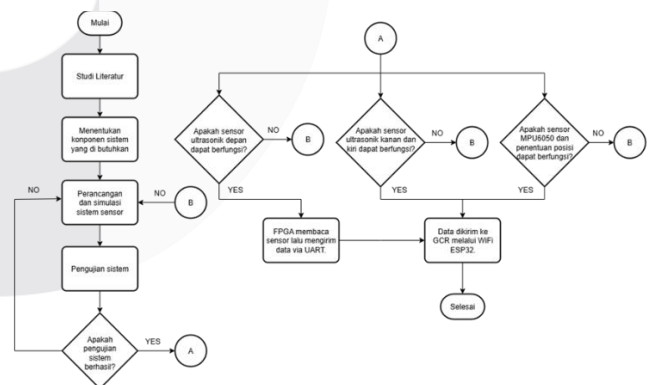
Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental dengan merancang dan mengimplementasikan sistem komunikasi satu arah berbasis UART dan sensor untuk robot mobile penghindar halangan. Metode ini mencakup perancangan arsitektur sistem, pemodelan, implementasi sensor ultrasonik dan MPU6050, integrasi dengan ESP32 dan FPGA, serta pengujian pengiriman data sensor secara real-time.

A. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem ini dirancang untuk robot mobile yang dapat menghindari halangan dan memantau orientasi menggunakan sensor ultrasonik, MPU6050, ESP32, dan FPGA DE0-Nano. Dua sensor ultrasonik kiri dan kanan terhubung ke ESP32 melalui Arduino untuk mendeteksi halangan, sedangkan sensor depan terhubung ke FPGA menggunakan Verilog, lalu datanya dikirim ke ESP32 via UART dan ditampilkan di Serial Monitor. MPU6050 terhubung ke ESP32 melalui I2C untuk membaca orientasi (yaw, pitch, roll) dari sumbu X, Y, dan Z. Integrasi ini memungkinkan robot memantau jarak, orientasi, dan posisi secara real-time, mendukung navigasi yang responsif dan presisi tinggi.

B. Tahapan perencanaan

Tahapan Perancangan sistem dilakukan secara terstruktur, dimulai dari studi literatur dan pemilihan komponen seperti FPGA DE0-Nano, ESP32, sensor ultrasonik, dan MPU6050. Selanjutnya dirancang arsitektur sistem dari pembacaan sensor, pengolahan di FPGA, hingga pengiriman data ke ESP32 dan Ground Control Station. Implementasi dilakukan dengan kode Verilog pada FPGA dan pemrograman ESP32, lalu diakhiri dengan pengujian komponen secara terpisah dan pengujian integrasi sistem secara keseluruhan.

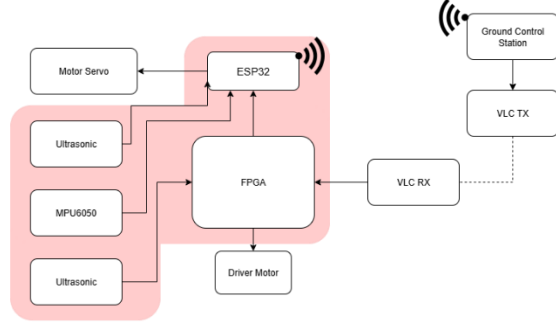


Gambar 1.
Alur Perencanaan Sistem

C. Pemodelan Sistem

Pemodelan Sistem robot terdiri dari Ground Control Station (GCS) yang menerima data jarak dari sensor ultrasonik, orientasi dari MPU6050, dan posisi dari modul penentuan posisi. FPGA DE0-Nano memproses semua data sensor dan mengirimkannya ke ESP32 melalui UART, yang kemudian menyalurkan data secara nirkabel ke GCS melalui Wi-Fi. Sistem ini memungkinkan pemantauan dan navigasi

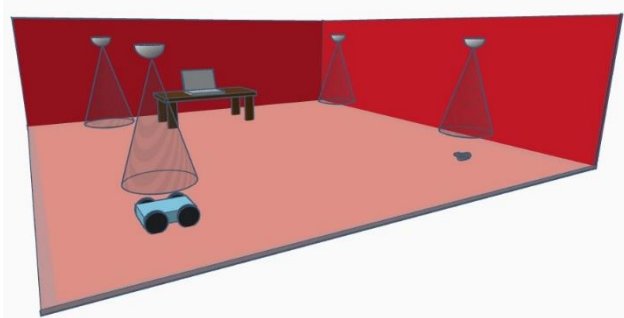
robot dengan komunikasi efektif dan ramah lingkungan.



Gambar 2
Blok Diagram Sistem

D. Skenario Pengujian

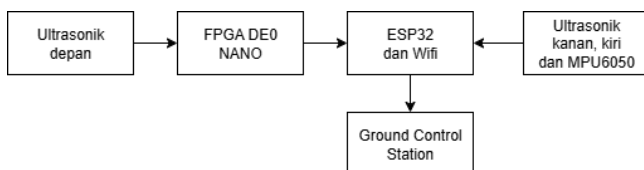
Dalam pengujian ini, *Ground Control Station* (GCS) mengirim instruksi ke robot melalui pemancar cahaya VLC (TX1–TX4) untuk memastikan jangkauan komunikasi yang baik. Robot menggunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi jarak dan MPU6050 untuk memantau orientasi, sementara ESP32 memproses data sensor dan mengendalikan pergerakan servo lengan robotik. Data hasil sensor kemudian dikirim kembali ke GCS melalui *Wi-Fi*, sehingga operator dapat memantau kondisi robot secara *real-time*, dengan VLC sebagai media kendali utama dan ESP32 sebagai pengolah data dan aktuator.



Gambar 3
Skenario Pengujian

E. Konfigurasi Sensor

Sistem robot ini mengintegrasikan sensor ultrasonik di depan, kiri, dan kanan untuk mendeteksi jarak, serta sensor MPU6050 untuk memantau orientasi dan percepatan pada sumbu X, Y, dan Z. Data sensor diproses oleh FPGA DE0-Nano sebagai pusat pemrosesan utama, kemudian dikirim ke ESP32 melalui UART untuk komunikasi nirkabel ke *Ground Control Station* (GCS). GCS menerima informasi jarak, orientasi, dan status robot sekaligus dapat mengirim perintah kembali, sehingga robot dapat menavigasi dengan akurat, menghindari rintangan, dan memberikan umpan balik *real-time* kepada operator, mendukung operasi jarak jauh yang responsif dan presisi.



Gambar 4
Blok Diagram Konfigurasi Sensor

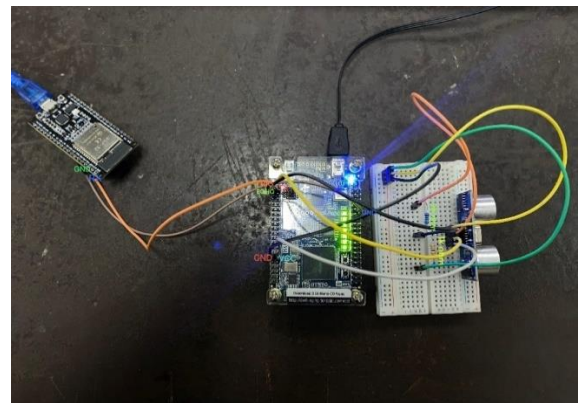
F. Integrasi dan Pengujian Sistem

Setelah perakit sistem sensor dan modul komunikasi, pengujian dilakukan dengan mengirimkan data dari *Ground Control Station* (GCS) ke robot. FPGA DE0-Nano memproses data sensor dan instruksi yang diterima, sementara ESP32 mengeksekusi perintah untuk membaca sensor ultrasonik dan MPU6050 serta mengirimkan informasi kembali ke GCS. Pengujian bertujuan memastikan komunikasi data berjalan stabil dan *responsive*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

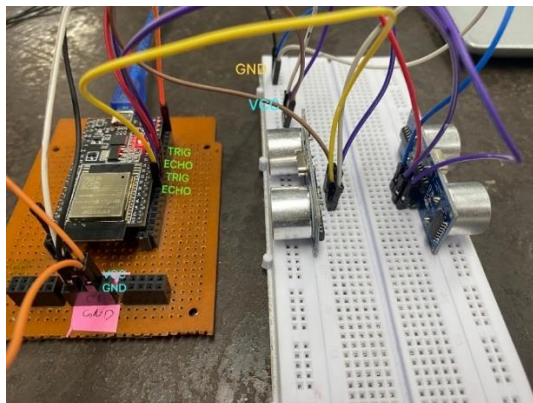
A. Implementasi Sistem

Sensor ultrasonik HC-SR04 dihubungkan ke FPGA menggunakan rangkaian pembagi tegangan untuk menyesuaikan level *ECHO* dari 5 V ke 3,3 V. Kode Verilog dikembangkan untuk membaca data jarak sensor, dikompilasi, dan dikonfigurasi pin *ECHO*, *TRIG*, *TX*, dan *CLK*. Data jarak dikirim ke ESP32 melalui UART dengan *baud rate* 9600 bps, ditampilkan di Serial Monitor Arduino IDE, dan diteruskan ke *Ground Control Station* melalui *Wi-Fi*. Pada penelitian ini, hanya satu sensor ultrasonik yang terhubung ke FPGA, sedangkan dua sensor lainnya dikendalikan langsung oleh ESP32 untuk memastikan kelancaran pengujian dan mempermudah *troubleshooting*. (Gambar 5).



Gambar 5
Hasil Perancangan Ultrasonik Depan

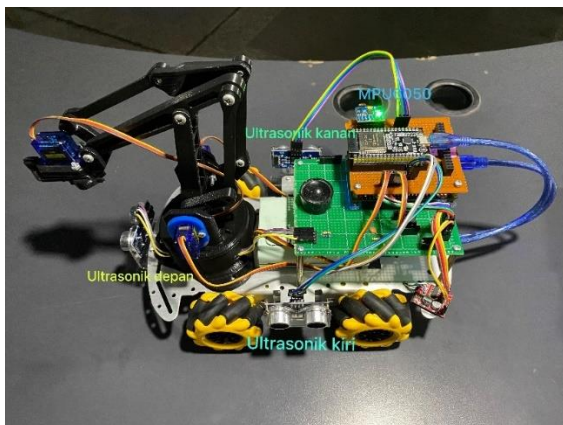
Pada perancangan ini, dua sensor ultrasonik HC-SR04 dipasang pada *project board* dan dihubungkan ke ESP32 dengan konfigurasi pin *TRIG* dan *ECHO* masing-masing serta jalur *VCC* dan *GND* yang digabungkan. ESP32 bertugas membaca sinyal sensor dan menampilkan jarak objek pada Serial Monitor. Selain itu, data jarak dikirimkan ke *Ground Control Station* (GCS) melalui koneksi *Wi-Fi* menggunakan protokol MQTT. Pengiriman data ini menyebabkan jeda, karena sistem harus terlebih dahulu terhubung ke jaringan, mengirim data melalui broker MQTT, dan menampilkan hasil pada GCS.



GAMBAR 6

Hasil Perancangan Ultrasonik kanan dan kiri

Sistem Pada perancangan ini, modul sensor MPU6050 dihubungkan ke ESP32 dengan pin VCC ke 3,3 V, GND ke ground, SCL ke GPIO 22, dan SDA ke GPIO 21. Sensor ini mengukur percepatan (accelerometer) dan kecepatan sudut (*gyroscope*) pada sumbu X, Y, dan Z, yang kemudian diolah menjadi orientasi sudut menggunakan metode *Yaw*, *Pitch*, dan *Roll*. Data digital mentah dari sensor dikonversi menjadi satuan fisik sesuai faktor *sensitivitas*, sehingga sistem dapat mendeteksi perubahan posisi dan pergerakan robot secara *real-time*

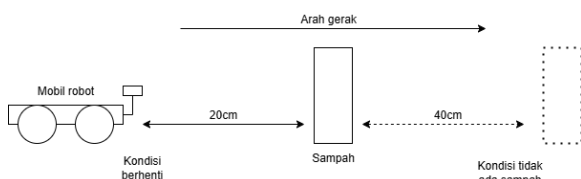


Gambar 7

Hasil Implementasi Hasil

B. Pengujian Sistem

Pada pengujian ini, sensor ultrasonik dipasang di bagian depan robot untuk mendeteksi keberadaan sampah dengan mengukur jarak antara robot dan objek di depannya. Sensor memancarkan gelombang ultrasonik yang dipantulkan kembali oleh objek, dan sistem memberikan peringatan jika jarak objek sekitar 20 cm. Namun, sensor hanya dapat mengukur jarak tanpa membedakan jenis objek, sehingga deteksi dianggap sebagai sampah meskipun objek yang terdeteksi bisa berupa penghalang lain, karena sistem belum dilengkapi kamera atau sensor visual untuk identifikasi spesifik jarak.



GAMBAR 8
Hasil Pengujian Ultrasonik

Tabel 1
Hasil Keluaran Sensor Ultrasonik

NO	Jarak	Hasil Deteksi Sampah
1.	10 cm	Terdeteksi
2.	20 cm	Terdeteksi
3.	40 cm	Tidak Terdeteksi
4.	60 cm	Tidak Terdeteksi
5.	80 cm	Tidak Terdeteksi
6.	100 cm	Tidak Terdeteksi
7.	120 cm	Tidak Terdeteksi
8.	140 cm	Tidak Terdeteksi

Tabel 2

Hasil Keluaran MPU6050

NO	Sumbu X (°/s)	Sumbu Y (°/s)	Sumbu Z (°/s)	Kondisi Robot
1.	3.92	0.40	1.13	Robot bergerak ke depan
2.	-4.12	0.67	1.18	Robot bergerak ke belakang
3.	0.29	-4.19	1.58	Robot bergerak ke samping
4.	0.31	0.22	0.12	Robot berhenti
5.	0.21	-4.22	1.50	Robot bergerak ke samping
6.	1.91	1.23	-4.47	Robot bergerak ke belakang
7.	1.18	0.20	-4.23	Robot bergerak ke samping
8.	10.23	0.12	0.54	Robot bergerak ke depan
9.	3.54	-4.12	1.70	Robot bergerak ke samping
10.	-4.02	-4.38	3.57	Robot bergerak ke belakang

Berdasarkan Tabel 1, hasil pengujian sensor ultrasonik menunjukkan perbedaan status deteksi berdasarkan jarak objek, di mana pada jarak 20 cm atau lebih dekat sensor memberikan status “Terdeteksi adanya sampah”, sedangkan

pada jarak lebih jauh statusnya “Tidak Terdeteksi”. Sementara itu, Tabel 2 memperlihatkan hasil pengujian sensor *gyroscope* pada sumbu X, Y, dan Z yang menunjukkan adanya perubahan orientasi dan rotasi robot saat bergerak, berbelok, maupun mengalami getaran. Kedua hasil ini membuktikan bahwa sensor ultrasonik efektif mengenali sampah dalam jangkauan kritis, dan sensor *gyroscope* membantu menjaga kestabilan serta arah gerak robot.

C. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan akuisisi dan transmisi data sensor secara *real-time* dengan stabil. FPGA DE0-Nano dapat memproses data dari sensor ultrasonik dan mengirimkannya ke ESP32 melalui UART secara efisien, dengan pemanfaatan *logic elements* yang sangat kecil sehingga masih tersedia ruang untuk pengembangan fitur tambahan. ESP32 kemudian mengelola data dari sensor ultrasonik maupun MPU6050 dan mengirimkannya ke *Ground Control Station* melalui koneksi *Wi-Fi*. Namun, performa sistem dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti jarak objek, sudut deteksi sensor, serta kondisi interferensi jaringan *Wi-Fi*. Oleh karena itu, penempatan sensor, konfigurasi komunikasi, dan pengolahan data menjadi aspek penting untuk memastikan keandalan sistem dalam aplikasi nyata pada *robot mobile*.

V. KESIMPULAN

Sistem robot mobile yang dikembangkan dengan kombinasi sensor ultrasonik, MPU6050, ESP32, dan FPGA DE0-Nano terbukti mampu bekerja dengan baik sesuai tujuan penelitian. Sensor ultrasonik dapat mendeteksi objek pada jarak di bawah 20 cm untuk mengenali keberadaan sampah atau halangan, sedangkan MPU6050 memberikan data orientasi yang akurat melalui nilai *yaw*, *pitch*, dan *roll*. FPGA berperan dalam mengolah data dari sensor ultrasonik depan menggunakan kode Verilog dan mengirimkannya ke ESP32 melalui UART, sementara ESP32 mengintegrasikan seluruh data sensor dan menampilkannya pada Serial Monitor. Secara keseluruhan, sistem ini handal, efisien, dan stabil, serta memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut dalam aplikasi robotika *mobile modern*.

REFERENSI

- [1] I. Iskandar, *Rancang Bangun Prototype Robot Pemungut Sampah Berbasis Arduino Mega*, Skripsi, Universitas Negeri Makassar, 2020.
- [2] F. Gade, “Pengembangan robot pemungut sampah dengan menggunakan tenaga surya hemat biaya,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terapan*, vol. 13, no. 2, 2025.
- [3] Y. Nantan and W. S. A. WS, “Pemodelan kotak 3D menggunakan sensor MPU6050,” in *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI)*, vol. 8, no. 1, pp. 37–40, 2022.
- [4] A. R. Patta and I. Iskandar, “Prototype robot pemungut sampah berbasis Arduino Mega,” *J. Rekayasa Teknol. Inform. (JURTI)*, vol. 3, no. 2, pp. 155–164, 2019.
- [5] F. Sulistyawan and S. Waluyanti, “Kinerja dari prototipe robot visual pengumpul sampah perairan dengan remote control menggunakan telemetri,” *Elinvo (Electron., Inform., Vocational Educ.)*, vol. 4, no. 1, pp. 69–74, 2019.
- [6] M. A. U. Fab, “Rancang Bangun Robot Penghindar Halangan Dengan Metode PID,” *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, vol. 2, no. 3, pp. 212–222, 2023.
- [7] F. T. Ashegaf, B. A. D. Naipospos, B. B. Bimantoro, and A. Triwiyatno, “Kursi roda elektrik dengan sistem pemantauan kesehatan pengguna, lokasi, dan pendeteksi kecelakaan berbasis IoT,” *Transient*, vol. 8, no. 2, p. 1, 2019.
- [8] Y. Nantan and W. S. A. Ws, “Pemodelan Kotak 3D Menggunakan Sensor MPU6050,” in *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI)*, vol. 8, no. 1, pp. 37–40, 2022.
- [9] S. P. A. Nugraha and L. Sunuharjo, “Komunikasi Arduino I2C, SPI dan UART,” *Switch: Jurnal Sains dan Teknologi Informasi*, vol. 2, no. 4, pp. 80–85, 2024.
- [10] A. Zubair, A. Achmad, and F. A. Samman, “Ultrasonic Cleaner Berbasis Field Programmable Gate Array (FPGA),” *Jurnal Penelitian Enjiniring*, vol. 21, no. 2, pp. 39–44, 2017.
- [11] N. S. Agustin, K. Joni, D. Rahmawati, and A. K. Saputro, “Rancang Bangun Alat Pengusir Hama Burung Pada Tanaman Padi Berbasis Mikrokontroler,” *Procedia Engineering and Life Science*, vol. 1, no. 1, pp. 2–3, 2021.
- [12] R. Rismawati, S. Paembonan, and R. Suppa, “Rancang Bangun Keamanan Pintu Otomatis Menggunakan E-KTP Berbasis Arduino Uno,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, 2024.