

PROTOTIPE KENDALI KURSI RODA *HANDS-FREE* BERBASIS ORIENTASI WAJAH MENGGUNAKAN ESP32-CAM DAN LOGIKA FUZZY HIBRIDA SEBAGAI MEDIA TRAINER PEMBELAJARAN

¹⁾Khairul Adib Ramadhan, ²⁾I Gede Made Surya Bumi Pracasitaram, ³⁾I Gede Ratnaya

^{1,2,3)}Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Ganesha

¹⁾khairul@student.undiksha.ac.id, ²⁾ipracasitaram@undiksha.ac.id, ³⁾gede.ratnaya@undiksha.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 4 Mei 2026

Disetujui : 29 Mei 2026

Kata Kunci :

Kursi Roda Pintar, MediaPipe, Logika Fuzzy, Diskritisasi PWM, Kendali *Hands-free*.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan dan pengolahan citra membuka peluang besar untuk menciptakan alat bantu mobilitas yang intuitif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kendali prototipe kursi roda *hands-free* berbasis orientasi wajah menggunakan integrasi MediaPipe Face Mesh, OpenCV, dan ESP32-Cam sebagai unit akuisisi citra nirkabel. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada perancangan arsitektur kendali hibrida terpadu yang menggabungkan validasi *rule-based* dan *fuzzy logic*, diskritisasi sinyal PWM untuk menekan osilasi aktuator, perlindungan anti-tabrak mundur otomatis berbasis sensor ultrasonik, serta fitur deselerasi bertahap sebagai pengaman saat wajah kehilangan pelacakan (*no face*). Berdasarkan hasil pengujian, sistem menunjukkan tingkat kesesuaian respons mekanik motor yang sangat presisi dengan akurasi mencapai 99,10% hingga 100%. Pada pengujian keselamatan anti-tabrak, interupsi sensor ultrasonik mencatatkan tingkat akurasi sebesar 99,60% pada kondisi rintangan diam. Sementara itu, pengujian keseluruhan sistem secara menyeluruh menghasilkan persentase keberhasilan operasional sebesar 86,96%, dengan sisa kegagalan minor (13,04%) yang murni diakibatkan oleh fluktuasi latensi jaringan (*delay*). Secara keseluruhan, prototipe ini terbukti memiliki kinerja yang stabil, aman, dan responsif, sehingga sangat relevan dan layak diimplementasikan sebagai *Trainer* Pembelajaran pada mata kuliah Sistem Kendali Cerdas.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : May 4, 2026

Accepted : May 29, 2026

Keywords:

Smart Wheelchair, MediaPipe, Fuzzy Logic, PWM Discretization, Hands-free Control.

ABSTRACT

Advances in artificial intelligence and image processing technologies open up significant opportunities for creating intuitive mobility aids. This study aims to design a prototype control system for a hands-free wheelchair based on facial orientation, utilizing the integration of MediaPipe Face Mesh, OpenCV, and the ESP32-Cam as a wireless image acquisition unit. The novelty of this research lies in the design of an integrated hybrid control architecture that combines rule-based and fuzzy logic validation, PWM signal discretization to suppress actuator oscillations, automatic anti-reverse collision protection based on ultrasonic sensors, and a gradual deceleration feature as a safety measure when face tracking is lost (no face). Based on the test results, the system demonstrated a very precise level of motor-mechanical response alignment with an accuracy ranging from 99.10% to 100%. In anti-collision safety testing, ultrasonic sensor interruptions recorded an accuracy rate of 99.60% under

stationary obstacle conditions. Meanwhile, comprehensive testing of the entire system yielded an operational success rate of 86.96%, with the remaining minor failures (13.04%) solely caused by network latency fluctuations (delay). Overall, this prototype has proven to be stable, safe, and responsive, making it highly relevant and suitable for implementation as a learning tool in the Intelligent Control Systems course.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan Perkembangan kecerdasan buatan dan pengolahan citra digital telah mencapai tahap di mana integrasi sistem visi komputer mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan alat bantu mobilitas yang intuitif. Sistem penggerak berbasis visi komputer dan *Deep Learning* diketahui mampu mencapai tingkat akurasi navigasi hingga 96% dengan beban fisik dan kognitif yang minimal bagi pengguna (Chatzidimitriadis, et al, 2023). Dalam konteks penyandang disabilitas fisik, kursi roda merupakan instrumen transportasi vital yang menuntut inovasi sistem navigasi mandiri agar tidak lagi bergantung pada kendali manual. Pemanfaatan teknologi asistif berbasis IPTEK terbukti memberikan dampak nyata terhadap peningkatan kualitas layanan dan kemandirian individu dengan keterbatasan sensorik maupun motorik (Suarjana, et al., 2024). Namun, metode kendali konvensional, seperti penggunaan joystick, mensyaratkan kekuatan motorik tangan yang mumpuni, sehingga menjadi hambatan bagi pengguna dengan disabilitas fisik berat. Oleh karena itu, pengembangan sistem navigasi hands-free berbasis orientasi wajah menjadi solusi strategis guna meningkatkan efisiensi interaksi manusia-mesin di era industri 4.0 menuju era *society 5.0*.

Temuan terhadap modalitas kendali alternatif telah dilakukan melalui berbagai penelitian terdahulu. Namun, pendekatan tersebut masih memiliki celah penelitian yang signifikan. Sistem kendali berbasis biosinyal seperti *Electromyography* (EMG) dan *Electroencephalography* (EEG) memerlukan proses akuisisi serta klasifikasi sinyal dengan beban komputasi yang relatif tinggi (Kasor, et al., 2025). Selain itu, penelitian dari An et al. dan Abdallah et al. (2025) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis biosinyal masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti rasio *signal-to-noise* (SNR) yang rendah, munculnya kelelahan

kognitif pada pengguna, serta kelelahan otot leher akibat penggunaan dalam durasi tertentu. Kondisi tersebut dapat memengaruhi akurasi pembacaan sinyal dan menimbulkan latensi pada proses pengenalan pola, sehingga berisiko terhadap sistem navigasi kursi roda cerdas yang membutuhkan respons cepat. Di sisi lain, kendali perintah suara memiliki sensitivitas buruk terhadap derau lingkungan, di mana akurasi modul pengenalan suara dapat menurun drastis pada kondisi bising (Akinsanmi et al., 2026). Sementara itu, penggunaan sensor fisik seperti akselerometer atau giroskop MPU6050 memaksa pengguna untuk menempatkan perangkat keras secara fisik pada area dahi atau lingkaran kepala pengguna et al., 2021). Keharusan menopang beban perangkat keras pada area kepala ini dinilai kurang ergonomis dan memicu kelelahan fisik bagi pengguna dalam penggunaan jangka panjang. Di sisi lain, sistem visi komputer yang telah dikembangkan sebelumnya Gao, et al. (2023) kerap terkendala oleh ketergantungan pada kamera beresolusi tinggi dan beban komputasi lokal yang berlebihan, sehingga stabilitas respons mekanis sering terganggu oleh fluktuasi data koordinat visual.

Sejalan dengan efisiensi perangkat keras, inovasi navigasi kursi roda pintar kini diarahkan pada arsitektur berbasis IoT yang ekonomis. Penelitian ini menawarkan pendekatan arsitektur offloading komputasi guna mengatasi keterbatasan memori pada mikrokontroler untuk menjalankan algoritma kompleks secara on-board. Modul ESP32-Cam difungsikan sebagai unit akuisisi citra nirkabel yang mentransmisikan data visual ke server eksternal untuk diproses menggunakan pustaka OpenCV melalui teknik head pose estimation secara langsung. Hasil ekstraksi perintah dari server kemudian diteruskan ke mikrokontroler kedua yang bertugas secara spesifik mengeksekusi aktuasi motor, sehingga potensi sistem berhenti merespons dapat diminimalisir.

Sebagai kontribusi kebaruan, penelitian ini mengimplementasikan arsitektur kendali hibrida berlapis yang mengombinasikan logika kondisional (*rule-based*) sebagai lapisan validasi awal dengan algoritma *Fuzzy Mamdani* untuk pengaturan kecepatan (Merta, et al., 2025). Lapisan validasi *rule-based* memastikan bahwa orientasi wajah pengguna terklasifikasi secara presisi ke dalam arah gerak yang spesifik, sehingga meminimalisir pergerakan liar yang tidak disengaja. Untuk menjamin kehalusan pergerakan motor DC dan mencegah osilasi akibat perubahan sinyal PWM yang dinamis, diterapkan metode diskritisasi pada tahap defuzzifikasi dengan membatasi output pada tiga level kecepatan statis (PWM 215, 235, dan 255).

Aspek keselamatan kritis diintegrasikan melalui prinsip keamanan transportasi yang menekankan pentingnya respons adaptif untuk meminimalkan dampak kecelakaan pada perangkat mobilitas (Wulansari, 2025). Dimana sistem menggunakan interupsi sensor ultrasonik untuk pencegahan tabrakan mundur otomatis pada blind spot pengguna. Juga fitur proteksi kehilangan visual (*no face detection*) yang mengadopsi prinsip adaptif guna menurunkan kecepatan secara bertahap setiap 0,5 detik saat wajah tidak terdeteksi, alih-alih melakukan penghentian mendadak yang berisiko mencederai pengguna. Melalui kombinasi terpadu antara ekstraksi titik MediaPipe Face Mesh, logika kondisional, kendali kecepatan *Fuzzy Mamdani*, diskritisasi sinyal PWM, serta sistem keselamatan sensor ultrasonik, penelitian ini menawarkan sistem kendali kursi roda hands-free yang komprehensif, aman, dan stabil sebagai media Trainer pembelajaran aplikatif pada mata kuliah Sistem Kendali Cerdas..

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)* yang bertujuan untuk mengembangkan dan menguji trainer sistem kendali kursi roda cerdas (Andika, et al., 2023). Proses pengembangan sistem berbasis mikrokontroler mencakup perancangan perangkat keras dan pemrograman perangkat lunak guna memastikan integrasi antar komponen (Gitakarma, et al., 2024). Selain itu, pendekatan *Experimental Method* digunakan untuk memperoleh data pengujian melalui

variasi input (orientasi wajah) dan pengukuran *output* sistem berdasarkan nilai PWM dengan tegangan. Pengujian integrasi dilakukan menggunakan *Black Box Testing* untuk mengevaluasi kesesuaian antara *input* dan *output* sistem (Permana, et al., 2024).

2.1 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui empat tahapan yang disusun secara terstruktur guna memastikan sistem kendali kursi roda cerdas dapat bekerja dengan baik serta sesuai dengan tujuan penelitian. Setiap tahapan saling berkaitan, mulai dari proses perancangan hingga pengujian sistem secara menyeluruh. Tahapan dipaparkan sebagai berikut:

a) Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

Tahap awal dilakukan untuk memetakan kebutuhan mobilitas pengguna kursi roda. Studi literatur difokuskan pada teknik *Head Pose Estimation* menggunakan MediaPipe Face Mesh, arsitektur komunikasi *edge-to-server*, serta penerapan metode logika *Fuzzy* untuk sistem kendali nirkabel yang stabil.

b) Perancangan Sistem

Pada tahap ini dilakukan proses perancangan sistem yang mencakup perancangan perangkat keras dan perangkat lunak agar seluruh komponen dapat bekerja secara optimal.

Perancangan perangkat keras meliputi integrasi modul ESP32-CAM sebagai media pengambilan citra wajah pengguna, ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali aktuator, serta sensor ultrasonik yang digunakan sebagai sistem keamanan untuk mendeteksi keberadaan hambatan di sekitar kursi roda.

Sementara itu, perancangan perangkat lunak dilakukan dengan menyusun alur komunikasi data antara server dan mikrokontroler menggunakan protokol HTTP. Proses ini bertujuan agar data hasil pendeteksian dapat dikirim dan diproses secara langsung sehingga sistem mampu memberikan respons kendali yang sesuai terhadap pergerakan kursi roda (Wukkadada et al., 2018).

c) Implementasi Algoritma

Tahap ini merupakan proses utama dalam pengembangan sistem, yaitu implementasi algoritma yang digunakan untuk mengolah data serta mengendalikan pergerakan kursi roda cerdas.

Pada sisi server, dilakukan pengembangan program menggunakan Python untuk melakukan proses ekstraksi titik landmark wajah, pengolahan arah gerakan kepala, serta penerapan logika *Fuzzy Mamdani* dalam menentukan tingkat kecepatan gerak kursi roda. Selain itu, dilakukan proses diskritisasi kecepatan guna menghasilkan nilai PWM yang lebih stabil sehingga pergerakan motor menjadi lebih halus dan terkontrol.

Sementara itu, pada sisi mikrokontroler dilakukan pengembangan firmware menggunakan bahasa C++ untuk mengatur penerimaan dan pengolahan perintah berbasis HTTP. Perintah yang diterima kemudian diterjemahkan menjadi sinyal kendali motor sesuai arah gerakan yang dihasilkan sistem. Selain itu, ditambahkan pula logika interupsi pada sensor ultrasonik sebagai mekanisme keamanan untuk mendeteksi hambatan dan mencegah terjadinya tabrakan saat kursi roda beroperasi.

- d) Pengujian dan Evaluasi Tahap akhir difokuskan pada validasi performa sistem, yang meliputi:
1. Pengujian Integrasi yaitu Evaluasi kesesuaian input (*yaw* dan *pitch*) dengan *output* motor menggunakan *Black Box Testing*.
 2. Pengujian Teknis dimana Pengukuran latensi pengiriman data pada kondisi transmisi nirkabel.
 3. Pengujian Keamanan merupakan Validasi sistem fail-safe untuk memastikan kursi roda berhenti secara instan saat mendeteksi rintangan pada jarak kritis dan berhenti bertahap jika terjadi *no face*.

2.2 Arsitektur dan Komunikasi Nirkabel

Sistem ini menerapkan arsitektur *edge-to-server* untuk membagi proses komputasi antara perangkat *embedded* dan server lokal.

Pendekatan tersebut memungkinkan perangkat *edge* difokuskan pada proses akuisisi data serta eksekusi aktuator, sedangkan proses Computer Vision dijalankan pada server yang memiliki kemampuan komputasi lebih tinggi sehingga kinerja sistem menjadi lebih optimal (Shu *et al.*, 2019). Komunikasi antar-node menggunakan protokol HTTP karena mendukung interoperabilitas serta mempermudah integrasi antar perangkat pada sistem berbasis *Internet of Things* dan client-server (Wukkadada *et al.*, 2018).

a) Perangkat Keras

1. Unit Akuisisi (*Edge Node*):
Menggunakan ESP32-CAM sebagai unit penangkap citra yang mengirimkan aliran data video secara nirkabel ke server.
2. Unit Pemrosesan (Server/Laptop):
Perangkat komputer laptop yang berfungsi sebagai pusat komputasi berat. Unit ini menjalankan algoritma Python untuk deteksi wajah menggunakan MediaPipe dan ekstraksi nilai sudut kemiringan kepala (*yaw* dan *pitch*).
3. Unit Aktuasi (*Actuator Node*):
Menggunakan ESP32 DevKit V1 yang menerima perintah dari server dan menerjemahkannya menjadi sinyal kendali untuk motor DC.

b) Perangkat Lunak Server

Pengembangan perangkat lunak pada sisi server menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan beberapa pustaka pendukung untuk pengolahan citra, komunikasi jaringan, dan sistem kendali. OpenCV digunakan untuk proses pengolahan frame video, sedangkan MediaPipe *Face Mesh* dimanfaatkan untuk mendeteksi titik *landmark* wajah dan mengekstraksi nilai orientasi kepala berupa *yaw* dan *pitch*. Selain itu, sistem juga memanfaatkan *library* komunikasi HTTP untuk mengirimkan data kendali menuju mikrokontroler secara optimal. Rincian pustaka utama yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Tabel :

Tabel 1. *Library Server*

Kategori Pustaka	Nama Pustaka	Versi	Fungsi Utama
Visi Komputer	opencv-python	4.11.0.86	Akuisisi <i>video stream</i> , konversi ruang warna, dan visualisasi <i>frame</i> .
AI & Deteksi	mediapipe	00.10.21	Ekstraksi 5 <i>landmark</i> wajah untuk analisis orientasi kepala (<i>Yaw</i> dan <i>Pitch</i>).
Logika Kontrol	scikit-fuzzy	00.05.00	Implementasi <i>Fuzzy Mamdani</i> untuk inferensi kecepatan motor yang proporsional.
Komunikasi	requests	02.32.03	Eksekusi protokol HTTP untuk pengiriman perintah gerak ke mikrokontroler.
Operasi Data	numpy	01.26.04	Perhitungan numerik koordinat matriks <i>landmark</i> wajah.
Konkurensi	threading / queue	<i>Built-in</i>	Manajemen <i>multiprocessing</i> untuk menjaga kestabilan <i>stream</i> dan latensi sistem.

c) Perangkat Lunak Mikrokontroler

Perangkat lunak mikrokontroler pada penelitian ini berfungsi sebagai media akuisisi data, komunikasi jaringan, streaming citra, serta eksekusi perintah kendali yang dikirimkan oleh server pengolahan utama. Sistem dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C++ pada Arduino IDE dengan memanfaatkan beberapa library pendukung seperti WiFi.h, WebServer.h, esp_camera.h, dan esp_http_server.h. Implementasi perangkat lunak tersebut memungkinkan komunikasi antara ESP32-CAM, ESP32 DevKit V1, dan server Python berlangsung secara terintegrasi melalui jaringan WiFi.

Pada ESP32-CAM, perangkat lunak digunakan untuk menginisialisasi kamera OV3660 dan mengirimkan video streaming menuju server Python untuk proses deteksi wajah dan estimasi arah kepala berbasis MediaPipe. Sistem dikonfigurasi menggunakan resolusi QVGA sebesar 320×240 piksel karena mampu memberikan keseimbangan antara kualitas citra, kestabilan frame rate, dan rendahnya delay transmisi. Pengaturan kualitas JPEG, frame buffer, serta optimasi sensor kamera juga diterapkan untuk meningkatkan performa streaming.

Sementara itu, perangkat lunak pada ESP32 DevKit V1 berfungsi sebagai penerima perintah gerakan dari server Python sekaligus pengendali aktuator motor DC. Perintah yang diterima berupa command text seperti maju, mundur, belok kanan, dan belok kiri dengan beberapa tingkat kecepatan. Data tersebut kemudian diterjemahkan menjadi sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengontrol driver motor. Selain itu, mikrokontroler juga melakukan pembacaan sensor ultrasonik secara kontinu sebagai sistem keselamatan untuk mendeteksi

halangan pada jarak tertentu. Apabila objek terdeteksi berada di bawah batas aman, sistem akan menghentikan pergerakan secara otomatis guna mengurangi risiko tabrakan.

2.3 Perancangan Logika Kendali Hibrida

Mekanisme kendali hibrida yang diimplementasikan pada kursi roda ini melibatkan enam tahapan utama dari akuisisi data hingga aksi motor, meliputi:

a) Akuisisi Citra

Proses Proses dimulai pada *edge node* menggunakan modul ESP32-CAM yang menangkap aliran video (*video streaming*) wajah pengguna secara kontinu. Proses *computation offloading* dan pengolahan citra dilakukan pada sisi server menggunakan bahasa pemrograman Python, di mana pemindahan beban kerja komputasi berat dari node sensorik lokal terbukti secara signifikan menghemat kapasitas memori perangkat *edge* serta mengoptimalkan latensi waktu nyata (Shu et al., 2019).

Implementasi sistem memanfaatkan pustaka OpenCV versi 4.11.0.86 untuk proses akuisisi dan pra-pemrosesan citra, sedangkan ekstraksi fitur wajah dilakukan menggunakan MediaPipe Face Mesh versi 0.10.21. Model tersebut digunakan untuk memperoleh koordinat *landmark* wajah sebagai parameter estimasi arah kepala secara langsung. Selain itu, proses inferensi logika *fuzzy* diimplementasikan menggunakan *Scikit-Fuzzy* versi 0.5.0, sementara manipulasi data numerik dan transmisi perintah HTTP didukung oleh NumPy versi 1.26.4 serta *Requests* versi 2.32.3.

Penentuan parameter gerakan kepala dilakukan menggunakan lima titik *landmark* utama pada wajah, yaitu titik hidung, sisi kiri wajah, sisi kanan wajah, bagian dahi, dan bagian dagu. *Landmark* tersebut digunakan untuk memperoleh nilai *yaw* dan

pitch sebagai representasi orientasi kepala pengguna. Nilai *yaw* digunakan untuk mendeteksi arah kanan dan kiri, sedangkan nilai *pitch* digunakan untuk mendeteksi gerakan mendongak dan menunduk. Sebelum sistem dijalankan, dilakukan proses kalibrasi awal untuk memperoleh posisi netral dengan nilai *yaw* dan *pitch* mendekati 0,0.

b) Ekstraksi Yaw dan Pitch

Server memproses citra menggunakan pustaka *Computer Vision* dan model pembelajaran mesin *MediaPipe Face Mesh*. Sistem mengekstraksi lima titik *landmark* spesifik pada wajah hidung, ujung mata/pipi kiri-kanan, dahi, dan dagu untuk mengkalkulasi sudut orientasi kepala secara spasial, yaitu pergerakan *horizontal* (*Yaw*) dan *vertikal* (*Pitch*). Pemanfaatan matriks koordinat visual ini menggantikan sensor kinematik fisik di kepala yang tidak ergonomis, meminimalkan efek kelelahan serviks (*cervical fatigue*), serta mengeliminasi akumulasi galat penyimpangan (*drift error*) (Chatzidimitriadis, et al., 2023).

c) Keputusan Berbasis Aturan

Nilai *yaw* dan *pitch* dievaluasi melalui logika kondisional (*if-else*) untuk menentukan arah gerakan maju, mundur, atau belok. Pada tahap ini, sistem juga menetapkan zona nyaman (*relax state* atau *dead-zone*) pada rentang posisi kepala netral. Jika sudut pergerakan masih berada dalam zona ini, sistem akan menginstruksikan kursi roda untuk tetap berhenti guna menghindari pergerakan tidak disengaja akibat tremor atau aktivitas observasi biasa. Aturan penentu arah dasar ini bertindak sebagai gerbang penyaring (*filter*) awal sebelum variabel dilewatkan pada lapisan inferensi fuzzy tingkat lanjut (Merta, et al, 2025).

d) Logika Fuzzy Mamdani

Secara paralel, nilai sudut *Yaw* dan *Pitch* menjadi masukan (*antecedent*) ke dalam Sistem Inferensi Fuzzy Mamdani. Proses ini

bertujuan untuk menentukan tingkat kecepatan (*consequent*) secara proporsional seperti lambat, sedang, atau cepat berdasarkan seberapa tajam sudut kemiringan kepala pengguna, sehingga menghasilkan pergerakan transisi kecepatan motor yang halus dan adaptif terhadap respons *non-linear* (Kharrat and Mercorelli, 2026).

e) Diskritisasi PWM

Penerapan Penerapan dua lapis logika kendali yang bekerja secara terintegrasi ini memanfaatkan logika kondisional (*rule-based*) sebagai lapisan pertama untuk memvalidasi kategori arah gerak, seperti maju, mundur, dan belok, kemudian metode Fuzzy Mamdani diterapkan untuk menentukan tingkat kecepatan pergerakan secara proporsional (Waspada and Sutikno, 2018).

Namun, hasil defuzzifikasi tidak langsung digunakan sebagai nilai PWM kontinu, melainkan dipetakan ke dalam tiga level PWM statis, yaitu 215, 235, dan 255 melalui proses diskritisasi yang didapat dari uji nilai PWM pengukuran tegangan dan berputarnya roda atau tidak. Pendekatan ini diterapkan berdasarkan pengujian eksperimental terukur guna memetakan karakteristik respons fisik dan mengatasi gaya gesek statis (*static friction*) dari motor DC (Andika, et al., 2023).

Berdasarkan hasil pengujian PWM pada motor DC, nilai PWM yang terlalu rendah menyebabkan *gear* motor mulai berbunyi namun roda belum mampu berputar secara optimal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa motor telah menerima tegangan awal, tetapi torsi yang dihasilkan masih belum cukup untuk menggerakkan beban sistem. Oleh karena itu, pemilihan level PWM dilakukan pada rentang tertentu agar motor dapat bergerak lebih stabil, mengurangi getaran mekanis, serta menjaga kestabilan torsi saat sistem beroperasi.

f) Eksekusi Motor

Tahap akhir dari alur ini adalah pengiriman paket perintah dari server ke mikrokontroler ESP32 aktuator melalui protokol nirkabel HTTP. Penggunaan protokol HTTP berbasis model *request-response* sinkron ini menjamin keandalan penyampaian status (*state reliability*) komando kritis pada sistem *client-server* IoT, sehingga memudahkan pendeteksian kegagalan komunikasi secara deterministik demi alasan keamanan (Wukkadada *et al.*, 2018).

Perintah dikemas dalam format parameter, contohnya pemanggilan URL dengan parameter *cmd*. Di sisi ESP32, terdapat fungsi *command handler* yang bertugas mengurai (*parsing*) data perintah tersebut menjadi dua instruksi perangkat keras:

- (1) logika status pin (High/Low) pada motor driver untuk mengatur arah putaran roda maju, mundur, atau belok
- (2) injeksi sinyal PWM (215, 235, atau 255) untuk mengeksekusi kecepatan secara sinkron pada kedua roda.

2.4 Prosedur Diskritisasi Kecepatan

Bagian inti dari metodologi ini adalah penerapan dua lapis logika kendali. Pertama, logika kondisional (*rule-based*) diterapkan untuk memvalidasi kategori arah (Maju, Mundur, Belok). Setelah arah gerak terkunci, Logika fuzzy Mamdani digunakan untuk menentukan besaran kecepatan (PWM). Namun, berbeda dengan sistem fuzzy konvensional, penelitian ini menerapkan prosedur Diskritisasi pada nilai akhir (Radwitya and Alkadri, 2025).

Hasil perhitungan *centroid* pada tahap *defuzzifikasi* dipetakan ke dalam tiga level kecepatan statis: PWM 215, 235, dan 255. Langkah prosedural ini diambil sebagai solusi teknis untuk mengatasi masalah inersia motor DC dan osilasi mekanis. Dengan mengunci *output* pada level statis, mikrokontroler tidak perlu menerima data *float* yang terus berubah, melainkan cukup menerima indeks kecepatan statis, yang secara signifikan mereduksi beban

trafik jaringan dan menjaga torsi motor tetap stabil (Hannan and Chusyairi, 2024).

2.5 Prosedur Keamanan Operasional

Sistem ini mengimplementasikan protokol keamanan multimodal yang dirancang untuk memitigasi dua risiko utama dalam operasional kursi roda: risiko tabrakan dengan objek fisik dan risiko kehilangan kendali akibat ketiadaan pengguna. Protokol ini beroperasi secara otonom untuk memastikan keselamatan pengguna dalam segala kondisi.

a) Keamanan Berbasis Lingkungan

Protokol ini berfungsi sebagai sistem *fail-safe* untuk menghindari tabrakan fisik dengan hambatan di belakang kursi roda, mengingat jarak pandang mata pengguna yang sangat terbatas pada area tersebut. Untuk menjamin akurasi pembacaan jarak dan menghindari *false-positive*, sistem tidak menggunakan data mentah dari sensor. Sebagai gantinya, sistem menerapkan teknik *median filter* dan *rolling buffer* dengan ukuran sampel tertentu guna menstabilkan pembacaan jarak dari gangguan sinyal (*noise*) lingkungan sekitar (Saputra, 2024).

Belok Protokol ini dikonfigurasi menggunakan arsitektur *interrupt-driven* yang memiliki hak akses prioritas tertinggi pada mikrokontroler. Apabila sensor mendeteksi hambatan pada saat kursi roda bergerak mundur dengan jarak kritis kurang dari 25 cm, sistem akan secara instan memaksa motor masuk ke kondisi berhenti darurat (*emergency stop*). Dalam kondisi terblokir ini, mikrokontroler akan secara mutlak mengabaikan seluruh perintah gerak mundur tambahan yang masuk dari server hingga rintangan dinyatakan aman atau tidak lagi terdeteksi. Sistem hanya akan membuka blokir tersebut jika menerima perintah navigasi yang menjauhi rintangan, seperti maju atau belok.

b) Keamanan Berbasis Kehadiran Pengguna (*No-Face Detection*)

Protokol keselamatan ini dijalankan pada sisi server guna memitigasi risiko pergerakan yang tidak terkendali apabila sistem kehilangan pelacakan visual pengguna. Kondisi ini umumnya terjadi ketika orientasi

wajah berada di luar bingkai kamera atau ketika lensa terhalang oleh objek lain. Melalui pemantauan *landmark* wajah secara langsung menggunakan *MediaPipe Face Mesh*, *server* secara otomatis mengambil alih kendali komputasi sesaat setelah wajah tidak terdeteksi (Akanbi dan Ayomoh, 2026).

Sistem diimplementasikan untuk menghindari penghentian motor secara mendadak (*hard stop*) demi menjaga stabilitas postur pengguna. Hentakan fisik akibat pengereman ekstrem dihindari karena berisiko memicu cedera leher atau punggung bagi pengguna dengan keterbatasan fisik. Sebagai alternatif, algoritma ini menerapkan mekanisme pelambatan bertahap (*graceful deceleration*) yang mengadaptasi prinsip *Adaptive Cruise Control* (Wulansari, dkk., 2025). Ketika wajah tidak lagi terdeteksi, *server* akan mempertahankan data kecepatan terakhir, kemudian menurunkan nilai instruksi PWM secara terukur dengan jeda setiap 0,5 detik hingga kursi roda berhenti sepenuhnya. Prosedur ini menjamin keselamatan pengguna dengan meredam laju kendaraan secara halus dan terkendali pada saat sistem tidak mendeteksi wajah pada saat terlalu menengok atau pencahayaan sangat minim.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menerapkan arsitektur *edge to server* untuk mengoptimalkan kinerja sistem kendali kursi roda cerdas. Proses pengolahan citra dilakukan pada server lokal sehingga beban komputasi pada mikrokontroler dapat dikurangi secara signifikan. Dengan demikian, perangkat *embedded* dapat difokuskan pada proses akuisisi data dan pengendalian aktuator, sehingga stabilitas kontrol motor serta respons sistem secara langsung dapat dipertahankan dengan lebih baik.

3.1 Analisis Kebutuhan Hardware

Perangkat keras yang digunakan pada sistem ini terdiri atas 2 mikrokontroler, server dan beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk mendukung proses pengambilan data, pengolahan sistem, dan pengendalian aktuator. Setiap komponen memiliki fungsi dan konfigurasi pin yang

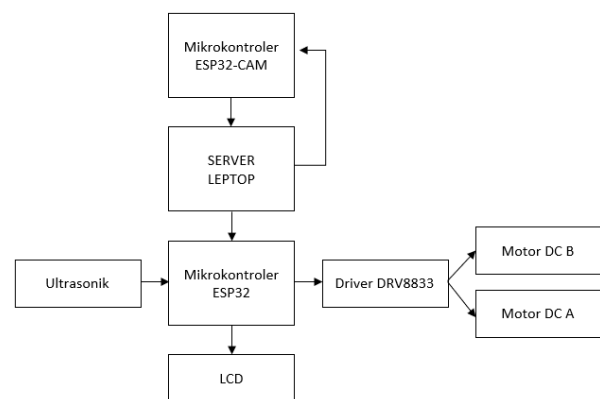
berbeda sesuai kebutuhan sistem kendali kursi roda cerdas.

Tabel 2. Daftar Komponen

Gambar	Nama Komponen	Keterangan
	ESP32-CAM	Akuisisi citra
	ESP32 DEVKIT V1	Kontrol Output dan
	Leptop	Server
	Ultrasonik	Penangkap jarak
	Motor DC 5V & gearbox	Melihat Putaran
	LCDi2c	Menampilkan perintah dan jarak
	Driver DRV8833	Driver pengendali 2 motor & arah

3.2 Diagram Blok

Sistem kendali prototipe kursi roda ini menggunakan ESP32-Cam sebagai pengambil citra wajah dan ESP32 sebagai pengendali utama unit penggerak untuk mengontrol perangkat secara otomatis berdasarkan data orientasi wajah pengguna. Perangkat motor DC akan bergerak otomatis sesuai instruksi dari server.

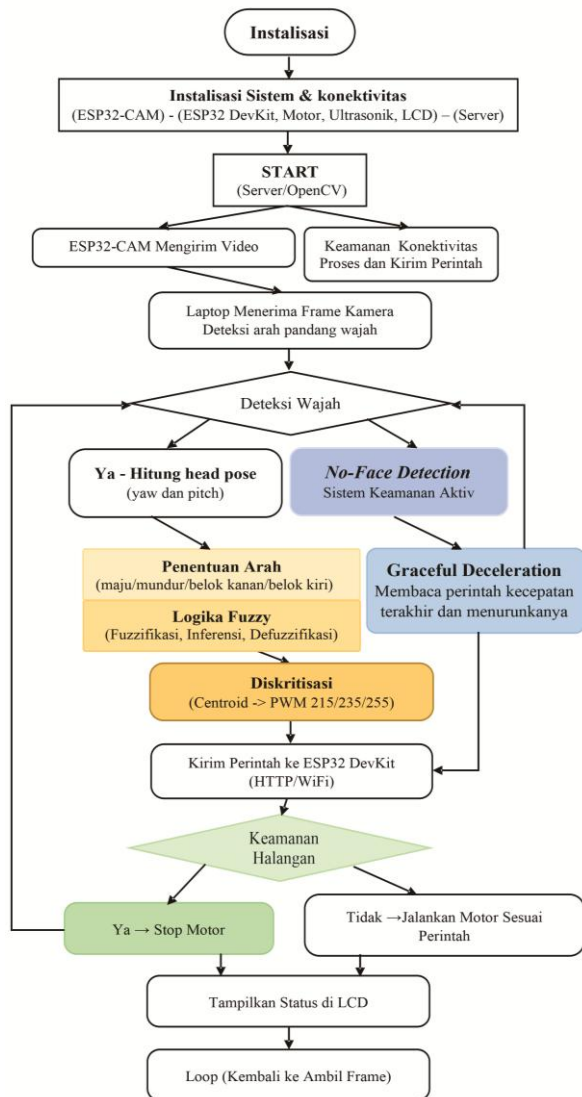


Gambar 1. Blok Diagram

3.3 Flowchart Sistem

Integrasi sistem kendali pada kursi roda ini dirancang untuk menggabungkan pemrosesan citra wajah dengan sistem keamanan fisik berbasis sensor dan analisa *headpose*. Pada tahap

ini dilakukan perancangan alur kerja sistem kendali kursi roda yang dimulai dari inialisasi kamera hingga pemrosesan *output* berupa perintah, LCD dan gerak motor DC.



Gambar 2. Flowchart Sistem

Perancangan alur kerja sistem kendali kursi roda yang dimulai dari inialisasi kamera pada ESP32-CAM, sensor ultrasonik, dan pembukaan *port* komunikasi nirkabel. Sistem kemudian menangkap citra wajah untuk diekstraksi menggunakan MediaPipe *Face Mesh* guna mendapatkan koordinat *landmark* yang dikirim ke server. Di dalam server, dilakukan proses Hibrida: pertama, logika kondisional (*rule-based*) diterapkan untuk memvalidasi kategori arah (Maju, Mundur, atau Belok). Setelah arah gerak terkunci, Logika Fuzzy Mamdani digunakan untuk menentukan besaran kecepatan (PWM). Sebelum instruksi dikirimkan kembali

ke ESP32, diterapkan prosedur Diskritisasi untuk memetakan hasil *defuzzifikasi* ke dalam tiga level kecepatan statis (PWM 215, 245 dan 255) Proses berakhir dengan pengiriman data matang ke ESP32 untuk menggerakkan motor DC secara stabil, dan siklus ini terus berulang secara dengan optimal.

3.2 Perancangan Sistem

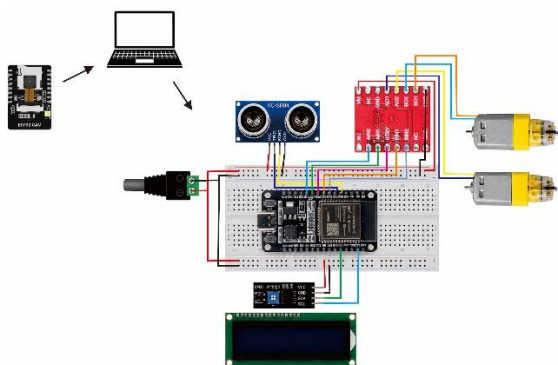
Pada tahap ini dilakukan perancangan arsitektur prototipe sistem kendali kursi roda otomatis yang mencakup semua komponen.

Tabel 3. Port PIN

Nama Komponen	Pin Komponen	Menuju		Fungsi / Keterangan
		Pin	Komponen	
Driver Motor DRV8833	AIN1	Pin 25	ESP32	Kontrol arah motor kiri
	AIN2	Pin 26	ESP32	Kontrol arah motor kiri
	BIN1	Pin 27	ESP32	Kontrol arah motor kanan
	BIN2	Pin 14	ESP32	Kontrol arah motor kanan
	AO1	+	Motor gearbox	Kanan
	AO2	-	Motor gearbox	Kanan
	BO1	+	Motor gearbox	Kiri
	BO2	-	Motor gearbox	Kiri
	VM	5V	Daya	Tegangan untuk motor
	STBY	Pin 33	ESP32	Pin Standby (Aktif tinggi)
Sensor Ultrasonik HC-SR05	VCC	5V	Daya	Mengirim sinyal
	TRIG	Pin 32	ESP32	Mengirim sinyal
	ECHO	Pin 35	ESP32	Menerima pantulan sinyal
LCD I2C (16x2)	VCC	5V	Daya	Tegangan
	SDA	Pin 21	ESP32	Jalur Data (I2C)
	SCL	Pin 22	ESP32	Jalur Clock (I2C)
Semua Komponen	GND	GND	ESP32	Jalur Ground

Perancangan perangkat keras sistem kendali kursi roda cerdas menggunakan modul ESP32-CAM sebagai *Edge Node* yang dilengkapi dengan sensor kamera OV3600 untuk proses akuisisi citra pada resolusi QVGA. Sebagai pusat kendali aktuator (*Actuator Node*), digunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 yang mengelola pergerakan motor DC melalui driver motor dengan konfigurasi pin kontrol pada GPIO 25, 26, 27, dan 14, serta pin *standby* pada GPIO 33. Untuk mendukung fitur keamanan operasional, sistem dilengkapi dengan sensor ultrasonik HC-SR04 yang dihubungkan melalui *trigger* pada pin 32 dan *echo* pada pin 35. Selain itu, sistem menyertakan modul layar LCD dengan protokol komunikasi I2C yang menggunakan pin SDA pada GPIO 21 dan SCL pada GPIO 22 untuk menampilkan status operasional sistem secara *real-time*.

Sistem ini dirancang untuk mengontrol trainer kursi roda berbasis *edge to server* melalui komunikasi *wi-fi*. Rangkaian ini menggunakan tiga komponen utama: Driver Motor untuk menggerakkan roda, Sensor untuk mencegah hambatan, dan Layar LCD I2C untuk menampilkan perintah dan jarak.



Gambar 3. Rangkaian Sistem



Gambar 4. Rangkaian Trainer

3.3 Pengolahan Citra

Sistem ini melakukan computation offloading di sisi server menggunakan Python dengan pustaka OpenCV untuk akuisisi citra dan MediaPipe Face Mesh untuk ekstraksi koordinat landmark wajah hidung, sisi wajah, dahi, dan dagu. Orientasi kepala dipetakan melalui nilai *Yaw* (kiri-kanan) dan *Pitch* (mendongak-menunduk) yang dikalibrasi ke titik netral (0,0).

Logika kendali diimplementasikan menggunakan *Scikit-Fuzzy* untuk mengonversi orientasi wajah menjadi perintah gerakan motor. Sistem memiliki 13 skenario *output* berdasarkan rentang dominan parameter citra, di mana setiap perintah memiliki kategori kecepatan lambat, sedang, cepat yang disesuaikan dengan keluaran PWM (215–255). Contohnya, pergerakan BELOK_KANAN_SEDANG dipicu oleh *Yaw* 28–38, sementara perintah MAJU_CEPAT aktif saat *Pitch* >13. Integrasi ini terbukti mampu menerjemahkan koordinat visual menjadi respons mekanik dengan tingkat kesesuaian 99,10–100%.

Tabel 4. Pembagian PWM

No	Output Sistem	Perintah Dasar	Hasil Fuzzy (PWM)	Level
1	BELOK_KANAN_LAMBAT	Belok kanan	215–227	Lambat
2	BELOK_KANAN_SEDANG	Belok kanan	228–241	Sedang
3	BELOK_KANAN_CEPAT	Belok kanan	242–255	Cepat
4	BELOK_KIRI_LAMBAT	Belok kiri	215–227	Lambat
5	BELOK_KIRI_SEDANG	Belok kiri	228–241	Sedang
6	BELOK_KIRI_CEPAT	Belok kiri	242–255	Cepat
7	MAJU_LAMBAT	Maju	215–227	Lambat
8	MAJU_SEDANG	Maju	228–241	Sedang
9	MAJU_CEPAT	Maju	242–255	Cepat
10	MUNDUR_LAMBAT	Mundur	215–227	Lambat
11	MUNDUR_SEDANG	Mundur	228–241	Sedang
12	MUNDUR_CEPAT	Mundur	242–255	Cepat
13	STOP	Stop	-	-

Tabel menunjukkan hubungan antara rentang dominan nilai *yaw* dan *pitch* terhadap perintah gerakan yang dihasilkan oleh sistem. Pada penelitian ini, metode *rule-based* digunakan terlebih dahulu untuk menentukan arah dasar gerakan, yaitu belok kanan, belok kiri, maju, mundur, atau stop berdasarkan orientasi kepala pengguna. Nilai *yaw* digunakan sebagai parameter deteksi gerakan kanan dan kiri, sedangkan nilai *pitch* digunakan untuk mendeteksi gerakan mendongak dan menunduk. Ketika nilai *yaw* dan *pitch* berada pada rentang netral, sistem akan memberikan perintah stop sebagai kondisi diam.

Setelah arah dasar gerakan diperoleh, sistem kemudian menerapkan metode *Fuzzy Logic* Mamdani untuk menentukan level kecepatan gerakan. Hasil Inferensi Fuzzy berupa nilai PWM selanjutnya didiskritisasi menjadi tiga kategori, yaitu lambat, sedang, dan cepat. Sebagai contoh, perintah belok kanan dengan rentang *yaw* 16 sampai 28 menghasilkan kategori lambat dengan rentang PWM 215–227 sehingga sistem mengeluarkan *output* BELOK_KANAN_LAMBAT. Sementara itu, nilai *yaw* yang lebih besar akan menghasilkan level kecepatan yang lebih tinggi, seperti sedang dan cepat. Pendekatan ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya memanfaatkan orientasi kepala untuk menentukan arah gerakan, tetapi juga menggunakan tingkat perubahan orientasi kepala sebagai dasar penentuan kecepatan kursi roda.

3.4 Pengujian

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja prototipe dalam merespon variasi *input* berupa sudut *yaw* dan *pitch* yang dihasilkan dari proses pengolahan citra. Parameter yang diamati meliputi kesesuaian

perintah antara server dan tampilan LCD, serta tegangan yang dihasilkan pada motor sebagai indikator keluaran sistem. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk memastikan sistem keamanan bekerja dengan baik berdasarkan jarak yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik.

3.4.1 Pengujian Gerak Dasar



Gambar 5. Hasil Uji Citra Sistem

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem kendali pergerakan berbasis pengolahan citra bekerja secara stabil dan presisi. Pengujian dilakukan melalui 11 kali percobaan mencakup perintah maju, mundur, dan berhenti. Parameter utama yang diproses meliputi nilai *Pitch* dan *Yaw* sebagai input citra, serta nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) sebagai *output* kendali motor. Sistem mampu menampilkan data real-time yang selaras dengan perintah yang diberikan, seperti terlihat pada pembacaan *Pitch* 6.0 dan *Yaw* 4.0 yang secara otomatis merespons dengan perintah MAJU_LAMBAT pada nilai PWM 222.8.

Tabel 5. Hasil Uji Identifikasi Gerak Dasar

Per Cb Ke-	Nilai Citra		Perintah	Kesesuaian Motor			
	PITCH	YAW		A	B	selisih	%
1	6.0	4.0	MAJU LAMBAT	4.44	-4.40	0.04	99.10%
2	7.4	-2.0	MAJU SEDANG	4.67	-4.68	0.02	99.57%
3	13.5	-0.2	MAJU CEPAT	5.10	-5.11	0.01	99.80%
4	6.3	0.2	MAJU LAMBAT	4.43	-4.42	0.01	99.77%
5	10.8	-1.3	MAJU SEDANG	4.67	-4.66	0.01	99.79%
6	-6.4	-0.6	MUNDUR LAMBAT	-4.43	4.42	0.01	99.77%
7	-8.5	-0.9	MUNDUR SEDANG	-4.63	4.64	0.01	99.78%
8	-11.0	-1.3	MUNDUR CEPAT	-5.09	5.09	0.00	100.00%
9	-8.9	-1.3	MUNDUR SEDANG	-4.64	4.64	0.00	100.00%
10	-10.7	-1.0	MUNDUR CEPAT	-5.09	5.10	0.01	99.80%
11	4.1	4.4	STOP	0.01	0.01	0.00	100.00%

Hasil pengujian menunjukkan tingkat kesesuaian motor yang sangat tinggi, dengan akurasi mencapai 99,10% hingga 100% di seluruh skenario pengujian. Nilai selisih antara motor A dan motor B yang sangat kecil (0,00–0,04) membuktikan bahwa sistem mampu menerjemahkan koordinat visual menjadi respons yang akurat dan konsisten di setiap kondisi pergerakan.



Gambar 6. Pengukuran Tegangan Gerak Dasar

3.4.2 Pengujian Belok



Gambar 7. Hasil Uji Citra Sistem

Pengujian implementasi menunjukkan bahwa sistem kendali pergerakan berbasis pengolahan citra bekerja dengan stabil dan presisi dalam berbagai skenario manuver. Pengujian dilakukan terhadap 11 kali percobaan yang mencakup perintah belok kanan, belok kiri, hingga berhenti, dengan parameter *Pitch* dan *Yaw* sebagai input utama. Sistem mampu memproses data real-time dengan akurat, seperti yang terlihat pada eksekusi perintah BELOK_KANAN_SEDANG dengan input *Pitch* -0.1, *Yaw* 21.7, dan nilai PWM sebesar 229.5

Tabel 6. Hasil Uji Identifikasi Gerak Dasar

Per Cb Ke-	Nilai Citra		Perintah	Kesesuaian Motor			
	PITCH	YAW		A	B	selisih	%
1	-1.0	16.5	BELOK KANAN LAMBAT	4.50	0.04	4.46	99.11%
2	-0.1	21.7	BELOK KANAN SEDANG	4.70	0.02	4.68	99.57%
3	3.2	32.7	BELOK KANAN CEPAT	5.15	0.01	5.14	99.81%
4	-0.6	19.0	BELOK KANAN LAMBAT	4.49	0.01	4.48	99.78%
5	2.0	31.2	BELOK KANAN SEDANG	4.70	0.01	4.69	99.79%
6	2.3	-19.9	BELOK KIRI LAMBAT	0.00	-4.32	6.32	100.00%
7	3.1	-28.1	BELOK KIRI SEDANG	0.00	-4.61	4.61	100.00%
8	3.3	-35.0	BELOK KIRI CEPAT	0.02	-5.13	5.15	99.61%
9	2.1	-26.1	BELOK KIRI SEDANG	0.01	-4.63	4.64	99.78%
10	3.0	-31.6	BELOK KIRI CEPAT	0.03	-5.15	5.18	99.42%
11	0.9	-11.6	STOP	0.01	0.00	0.01	100.00%

Berdasarkan pengujian yang dilakukan 11 kali menunjukkan tingkat kesesuaian motor yang sangat tinggi, dengan akurasi mencapai 99,11% hingga 100% di seluruh skenario. Konsistensi output pada motor A dan motor B membuktikan bahwa sistem memiliki keandalan yang baik

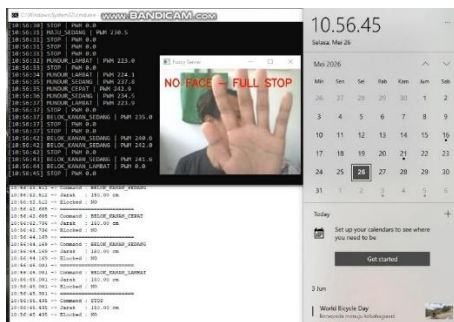
dalam menerjemahkan koordinat visual menjadi respons mekanik yang tepat, sehingga pergerakan robot dapat terjaga kestabilannya sesuai dengan perintah yang diberikan.



Gambar 8. Pengukuran Tegangan Sistem Belok

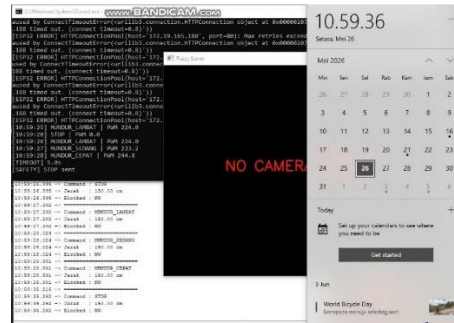
Berdasarkan hasil pengujian, gerakan belok dihasilkan dengan mengaktifkan salah satu motor sementara motor lainnya berada dalam kondisi tidak aktif. Pola ini memungkinkan sistem untuk menghasilkan arah belok secara terarah. Hal ini menunjukkan bahwa logika kendali yang diterapkan mampu bekerja secara selektif dalam menentukan arah gerakan.

3.4.3 Pengujian Komunikasi Konektivitas



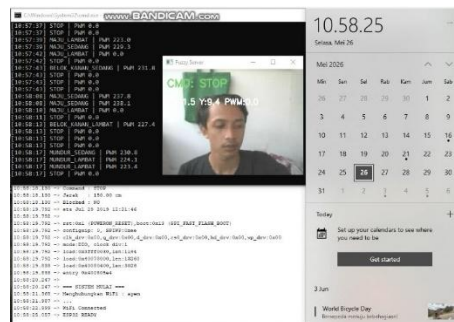
Gambar 9. Uji Sistem No Face

Pada pengujian pertama, sistem diuji saat menghadapi kondisi *No Face*, di mana fitur wajah pengguna tidak terdeteksi oleh kamera. Respons sistem yaitu menurunkan kecepatan bertahap secara otomatis sampai mengirimkan perintah STOP dengan nilai PWM 0.0 ke aktuator. Mekanisme ini memastikan bahwa robot segera menurunkan kecepatan beroperasi untuk menghindari risiko pergerakan yang tidak terkendali saat kehilangan objek kendali utama.



Gambar 10. Uji Sistem Komunikasi Cam

Pada pengujian kedua, sistem diuji terhadap skenario terputusnya koneksi kamera (*No Camera*) yang memicu *timeout* pada modul komunikasi. Sistem berhasil mendeteksi kegagalan feed video dan segera mengaktifkan protokol keamanan dengan mengirimkan perintah STOP *sent* ke perangkat ESP32. Deteksi otomatis ini membuktikan bahwa perangkat lunak mampu memantau integritas input secara real-time dan memberikan respons penghentian darurat sesaat setelah terjadi gangguan pada hardware kamera.



Gambar 11. Uji sistem Komunikasi ESP32

Pada pengujian ketiga, fokus pengujian dialihkan pada stabilitas sistem saat menghadapi kendala konektivitas Wi-Fi antara server dan modul ESP32. Meskipun terjadi *ConnectTimeoutError* berulang pada transmisi HTTP. Setelah koneksi berhasil dipulihkan melalui proses *re-initialization* otomatis, sistem kembali ke status "ESP32 READY" dan siap menerima perintah baru, menunjukkan ketangguhan sistem dalam melakukan pemulihan mandiri dari kegagalan komunikasi jaringan.

3.4.4 Pengujian Sistem Keamanan

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor ultrasonik dalam membaca jarak rintangan pada kondisi

diam dan bergerak. Hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan pengukuran menggunakan penggaris, kemudian dihitung nilai selisih dan persentase akurasi untuk mengevaluasi kinerja sistem.

Gambar 7. Uji Sistem Keamanan Jarak

Percobaan	Rintangian	Kesesuaian Sistem				
		Gerak/ Diam	Monitor cm	Pengaris cm	Kec. Rintangian	Selisih
1	Diam	3 - 6	5	-	-	-
2	Diam	10.79	10	-	0.79	92.11
3	Diam	20.17	20	-	0.17	99.15
4	Diam	29.88	30	-	0.12	99.60
5	Diam	39.32	40	-	0.68	98.30
6	Gerak	24.97	25	Lambat	0.03	99.88
7	Gerak	24.72	25	Lambat	0.28	98.88
8	Gerak	20.43	25	Sedang	4.57	81.72
9	Gerak	22.16	25	Sedang	2.84	88.64
10	Gerak	15.70	25	Cepat	9.30	62.80
11	Gerak	10.08	25	Cepat	14.92	40.32

Berdasarkan hasil pengujian, sistem menunjukkan akurasi yang sangat baik pada kondisi rintangan diam dengan nilai mencapai 99,60%. Pada kondisi rintangan bergerak, sistem masih mampu mendeteksi kategori kecepatan rintangan seperti lambat, sedang, dan cepat. Namun, akurasi cenderung menurun pada pergerakan cepat karena perubahan posisi objek terjadi terlalu cepat sehingga pembacaan sensor menjadi kurang stabil. Secara keseluruhan, sistem bekerja optimal pada kondisi diam serta gerakan lambat hingga sedang.

3.4.5 Uji Keseluruhan Sistem

Tabel 8. Hasil Uji Menyeluruh

Per cobaan	Nilai Citra		PWM	Arah	Kecepatan	Kesesuaian	Keamanan
	PITCH	YAW					
1	0.2	-2.3	0.0	tengah	stop	sesuai	aman
2	0.5	9.9	226.0	kanan	lambat	sesuai	aman
3	1.2	3.9	0.0	tengah	stop	sesuai	aman
4	1.8	2.3	222.9	atas	lambat	sesuai	aman
5	5.5	2.5	223.3	atas	lambat	sesuai	aman
6	1.4	4.8	0.0	tengah	stop	sesuai	aman
7	-5.5	4.5	223.8	bawah	lambat	sesuai	aman
8	-0.3	-18.0	222.8	kiri	lambat	sesuai	aman
9	0.5	-33.1	244.2	kiri	cepat	sesuai	aman
10	-11	1.7	247.2	bawah	cepat	sesuai	halangan
11	-12.9	2.7	247.2	bawah	cepat	sesuai	halangan
12	-11.4	2.0	247.2	bawah	cepat	sesuai	halangan
13	-	-	-	-	-	sesuai	NoFace
14	-	-	-	-	-	sesuai	NoFace
15	-	-	-	-	-	sesuai	NoFace
16	-2.6	2.9	0.0	tengah	stop	sesuai	Restart
17	-1.9	17.7	222.9	kanan	lambat	sesuai	aman
18	-3.1	1.0	0.0	tengah	stop	sesuai	Restart
19	-	-	-	-	-	sesuai	No Cam
20	-4.4	23.4	232.9	kanan	sedang	sesuai	aman
21	-	-	-	-	-	sesuai	aman
22	-4.6	17.2	223.2	kanan	lama	sesuai	aman
23	-	-	-	-	-	sesuai	halangan

Keputusan						
CMD Last		ESP32 Last		Kategori		
Time	OUT	Time	OUT	Time Real layar	Time	
14.08.09	stop	0.0	14.08.10	no bloked	14.08.12	baik
14.08.17	Kanan Lambat	226.6	14.08.17	no bloked	14.08.17	baik
14.08.18	stop	0.0	14.08.18	no bloked	14.08.18	baik
14.08.27	Maju Lambat	222.9	14.08.27	no bloked	14.08.27	baik
14.08.28	Maju Lambat	223.3	14.08.28	no bloked	14.08.28	baik
14.08.32	stop	0.0	14.08.32	no bloked	14.08.33	baik
14.08.32	stop	0.0	14.08.32	no bloked	14.08.33	delay
14.08.41	Kiri Lambat	222.8	14.08.41	no bloked	14.08.41	baik
14.08.42	Kiri Sedang	236.0	14.08.43	no bloked	14.08.44	delay
14.09.10	Mundur Cepat	244.5	14.09.09	bloked	14.09.10	baik
14.09.28	Mundur Cepat	247.2	14.09.39	bloked	14.09.39	baik
14.09.43	Mundur Cepat	246.4	14.09.40	bloked	14.09.49	baik
14.09.57	Kanan Lambat	245.7	14.09.57	no bloked	14.09.59	baik
14.10.00	stop	0.0	14.10.01	no bloked	14.10.01	baik
14.10.11	Mundur Lambat	14.10.11	14.10.11	no bloked	14.10.11	baik
14.10.11	Stop	14.10.27	14.10.27	Wifi Connected	14.10.28	baik
14.10.33	Kanan Lambat	222.9	14.10.34	no bloked	14.10.34	baik
14.10.35	stop	0.0	14.10.43	Wifi Connected	14.10.42	baik
Safety	Stop Sent	232.9	14.10.58	no bloked	14.10.59	baik
14.11.26	kanan Sedang	232.9	14.11.26	no bloked	14.11.26	baik
timeout	5.1scc	-	14.11.31	no bloked	14.11.40	delay
14.11.07	kanan lama	223.2	14.12.07	no bloked	14.12.07	baik
Exit	server shutdown	-	14.12.29	halangan	14.12.29	baik

Pengujian keseluruhan sistem yang dilakukan sebanyak 23 kali menghasilkan persentase keberhasilan sebesar 86,96% (20 percobaan berkategori "Baik") dan persentase kegagalan akibat keterlambatan respon (*delay*) sebesar 13,04% dalam 3 percobaan. Dengan tingkat kesesuaian perintah yang mencapai 100%, sistem pemrosesan citra berbasis ESP32 ini terbukti efektif dalam mengenali orientasi objek dan mengirimkan instruksi kecepatan (PWM) secara akurat.

3.5 Pembahasan

Sistem ini menggunakan logika hibrida (*rule-based* dan *fuzzy*) karena terbukti lebih stabil dibandingkan hanya menggunakan Fuzzy tunggal. Logika fuzzy sangat sensitif terhadap pergerakan kecil wajah, yang dapat membuat putaran motor menjadi tidak beraturan. Melalui pendekatan hibrida, aturan *rule-based* bertindak sebagai filter awal untuk memastikan bahwa hanya gerakan wajah yang disengaja yang akan diproses. Setelah tervalidasi, barulah logika Fuzzy bekerja mengatur akselerasi secara halus. Stabilitas ini semakin optimal dengan penerapan diskritisasi PWM. Jika nilai PWM dibiarkan berubah-ubah secara kontinu, motor DC cenderung berosilasi atau bergerak tersendat. Oleh karena itu, keluaran PWM dibatasi menjadi tiga level kecepatan tetap, yaitu 215, 235, dan 255. Nilai 215 ditetapkan sebagai batas bawah (*threshold*) kecepatan lambat karena berdasarkan hasil eksperimen, pada titik tersebut motor baru mulai berputar secara stabil dan tidak sekadar mengeluarkan bunyi dengung tegangan. Pembatasan level kecepatan ini secara signifikan berhasil menurunkan osilasi, sehingga pergerakan kursi roda jauh lebih nyaman bagi pengguna.

Selain aspek kenyamanan, sistem ini juga memprioritaskan keamanan berlapis melalui fungsi interupsi sensor ultrasonik serta algoritma proteksi kehilangan visual (*no face*). Sensor ultrasonik sengaja difokuskan pada bagian belakang kursi roda untuk menutupi kelemahan jarak pandang (*blind spot*) dan ruang gerak pengguna yang terbatas untuk menoleh ke belakang saat mengendalikan pergerakan mundur (Suwardika, et al., 2025). Ketika sensor mendeteksi adanya halangan di jarak kritis, sistem akan otomatis mengabaikan perintah dari

kamera wajah dan memicu *emergency stop* dengan mengirim nilai PWM 0 ke motor. Sementara itu, fitur *no face* dirancang sebagai langkah antisipasi kritis apabila kamera kehilangan pelacakan wajah pengguna secara tiba-tiba, baik karena gangguan pencahayaan ekstrem maupun pergerakan kepala yang terlalu cepat keluar dari *frame*. Alih-alih memutus aliran motor secara mendadak yang berisiko membuat pengguna dengan keterbatasan fisik terlempar ke depan, sistem akan mencari data kecepatan terakhir yang terekam, lalu menurunkannya secara bertahap (*gradual deceleration*) dengan jeda waktu penurunan setiap 0,5 detik hingga kursi roda berhenti sepenuhnya secara halus.

Untuk mendukung mobilitas yang utuh, keandalan komunikasi nirkabel pada sistem ini juga diperkuat. Sistem dirancang agar *server* pengolahan data tidak mengalami *freeze* (berhenti merespons) ketika terjadi gangguan sinyal atau saat salah satu mikrokontroler terlepas koneksinya. Hal ini diatasi dengan menanamkan pemacu penghubung kembali (*auto-reconnect trigger*). Melalui mekanisme ini, mikrokontroler akan secara otomatis memulihkan koneksi ke *server* sehingga transmisi data perintah tetap berjalan lancar tanpa memerlukan *restart* sistem secara manual. Secara keseluruhan, kebaruan dari penelitian ini tidak hanya terletak pada pemanfaatan wajah sebagai kemudi, melainkan pada keberhasilannya merancang arsitektur kendali *hands-free* yang aman, stabil, dan terpadu.

Prototipe ini secara unik mengintegrasikan validasi niat pengguna melalui *rule-based*, kenyamanan akselerasi menggunakan *fuzzy logic*, pencegahan osilasi melalui diskritisasi PWM yang terkalibrasi, keamanan anti-tabrakan otomatis mundur, proteksi hilangnya deteksi visual melalui deselerasi bertahap *no face*, serta arsitektur nirkabel yang tangguh. Kombinasi penyelesaian teknis inilah yang menjadikan prototipe ini memiliki kinerja yang sangat relevan, stabil, dan responsif untuk difungsikan sebagai *Trainer* Pembelajaran pada mata kuliah Sistem Kendali Cerdas.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, prototipe sistem kendali kursi roda *hands-free* berbasis orientasi wajah ini menunjukkan performa komputasi dan mekanik yang sangat mumpuni. Melalui kalibrasi posisi netral pada lima titik *landmark* utama wajah, sistem mampu menerjemahkan koordinat visual menjadi perintah kendali dengan tingkat kesesuaian mencapai 100%. Pengujian keseluruhan sistem mencatatkan persentase keberhasilan sebesar 86,96%, dengan sisa kegagalan minor (13,04%) murni disebabkan oleh keterlambatan respons jaringan (*delay*). Akurasi respons mekanik motor DC terbukti sangat tinggi, berkisar antara 99,10% hingga 100% di seluruh skenario, serta didukung oleh keandalan sensor ultrasonik yang mencapai tingkat akurasi 99,60% pada pendeteksian rintangan diam. Secara eksplisit, kebaruan dari penelitian ini terletak pada perancangan arsitektur kendali hibrida yang terpadu dan aman. Sistem ini terbukti lebih stabil berkat penerapan diskritisasi keluaran PWM (215, 235, 255) untuk menekan osilasi aktuator, perlindungan tabrakan mundur otomatis berbasis sensor ultrasonik, serta fitur keselamatan *no face* yang mampu mencegah pengereman ekstrem dengan cara menurunkan kecepatan terakhir secara bertahap setiap 0,5 detik saat visual wajah terputus.

4.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan sistem lebih lanjut. Untuk penyempurnaan dan pengembangan, disarankan adanya penerapan filter tingkat lanjut seperti *Kalman Filter* untuk mendampingi filter EMA yang sudah ada, sehingga ekstraksi data sudut wajah lebih kebal terhadap derau (*noise*). Sistem juga dapat dikembangkan menjadi kursi roda cerdas yang adaptif terhadap sensitivitas alami kebiasaan gerakan kepala masing-masing pengguna. Dalam implementasi nyatanya, penambahan variabel beban (berat tubuh pengguna) ke dalam perhitungan logika kendali perlu dipertimbangkan agar sistem dapat menyesuaikan torsi dan akselerasi secara presisi. Dari segi efisiensi perangkat keras, arsitektur

sistem disarankan untuk dioptimalkan agar pemrosesan citra dan aktuasi kendali dapat berjalan secara terintegrasi (*on-board computation*) pada satu mikrokontroler berkinerja tinggi, guna secara signifikan memangkas latensi jaringan. Terakhir, peningkatan kesadaran lingkungan (*environmental awareness*) krusial untuk memperkuat aspek keamanan, di antaranya melalui penambahan sensor hambatan lateral (sisi samping), kemampuan deteksi objek dinamis di sekitar kursi roda, serta adaptasi terhadap variasi pencahayaan ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdallah, I. Ben, Bouteraa, Y. and Alotaibi, A. (2025) ‘A hybrid EMG-EEG interface for robust intention detection and fatigue-adaptive control of an elbow rehabilitation robot.’, *Scientific reports*, 15(1), p. 40895. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24831-w>.
- Akanbi, I. and Ayomoh, M. (2026) ‘Event-Based Vision Application on Autonomous Unmanned Aerial Vehicle: A Systematic Review of Prospects and Challenges’, *Sensors*, 26(1). Available at: <https://doi.org/10.3390/s26010081>.
- Akinsanmi, O. *et al.* (2026) ‘Development of a Voice-Controlled Wheelchair to Improve Mobility, Independence, and Accessibility for Persons with Mobility Disabilities’. Available at: <https://testing.engineering.fuoye.edu.ng/index.php/engineer/article/view/1510>.
- An, R. *et al.* (2025) ‘Multi-Modal EEG–Fusion Neurointerface Wheelchair Control System’, *Applied Sciences*, 15(23). Available at: <https://doi.org/10.3390/app152312577>.
- Andika, I.G., Ratnaya, I.G. and Pracasitaram, I.G.M.S.B. (2023) ‘Media Pembelajaran Penyetabil Tegangan Catu Daya Pada Mata Kuliah Rangkaian Listrik’. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.23887/jjpte.v12i3.66510>.
- Chatzidimitriadis, S., Bafti, S.M. and Sirlantzis, K. (2023) ‘Non-intrusive head movement control for powered wheelchairs: A vision-based approach’, *IEEE Access*, 11, pp. 65663–65674.
- Gao, P., Luo, H. and Li, Y. (2023) ‘Vision-based head posture control wheelchair system research’, in *2023 2nd International Symposium on Sensor Technology and Control (ISSTC)*, pp. 232–237.
- Gitakarma, M.S., Ariawan, K.U. and Pracasitaram, I.G.M.S.B. (2024) ‘Peran mikrokontroler dalam pengembangan aplikasi IoT: tinjauan konseptual dan implementasi’, *KOMTEKS*, 3(2), pp. 18–24. Available at: <https://doi.org/10.37637/komteks.v3i2.2231>.
- Hannan, M. and Chusyairi, A. (2024) ‘Implementasi Sistem Kursi Roda Elektrik Berbasis Nodemcu Esp8266 Pada SLB Dinamika Bekasi’, *Jurnal Ilmiah Informatika*, 9(2), pp. 101–111.
- Kasor, J.R.W., Pracasitaram, I.G.M.S.B. and Santiyadnya, N. (2025) ‘Media Pembelajaran Sensor Electromyography (EMG) Berbasis IoT Pada Mata Kuliah Sensor dan Aktuator’, *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro Undiksha*, 14(2), pp. 137–147.
- Kharrat, M. and Mercorelli, P. (2026) ‘A Comprehensive Review of Adaptive Control for Nonlinear Systems with Nonlinearities and Faults Using Fuzzy Logic and Neural Network Techniques’, *Mathematics*, 14(8). Available at: <https://doi.org/10.3390/math14081256>.
- Merta, I.W.B., Santiyadnya, N. and Pracasitaram, I.G.S.B. (2025) ‘Media Pembelajaran Pengatur Suhu dan Kelembapan Inkubator Fermentasi Tempe Dengan Kontrol Fuzzy Pada Mata Kuliah Sistem Kendali Cerdas’, *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro Undiksha*, 14(2), pp. 176–186.
- Permana, A.A.J., Setemen, K. and Pracasitaram, I.G.M.S.B. (2024) ‘Development Of Balinese Puppet Educational Game And Usability Testing Using Sus, Umux, And Umux Lite’, *Conhecimento & Diversidade*, 16(43), pp. 53–70.
- Prilian, T., Rusmana, I. and Handayani, T. (2021) ‘Kursi Roda Elektrik dengan Kendali Gestur Kepala’, *Aviation*

- Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, Controls*, 3(1), pp. 29–42.
- Radwitya, E. and Alkadri, S.I. (2025) ‘Pemodelan Matematis dan Validasi Eksperimental Sistem Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Fuzzy Logic’, *JURNAL SIMETRIK*, 15(2), pp. 128–137.
- Saputra, Z.G. (2024) ‘Rancang Bangun Sistem Kendali Jarak Jauh Pada Robot Telepresensi’.
- Shu, C. *et al.* (2019) ‘Dependency-Aware and Latency-Optimal Computation Offloading for Multi-User Edge Computing Networks’, in *2019 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1109/SAHCN.2019.8824941>.
- Suarjana, I.M., Setemen, K. and Diputra, K.S. (2024) ‘Virtual manipulatives berbasis bahasa isyarat: teknologi asistif untuk mendukung siswa kolok (penyandang disabilitas tunarungu-wicara) dalam pembelajaran matematika di sekolah dasar’, *International Journal of Community Service Learning*, 8(4), pp. 422–429.
- Suwardika, K.A.S., Pracasitaram, I.G.M.S.B. and Ratnaya, I.G. (2025) ‘Trainer Pembelajaran Berbasis Sensor Ultrasonik Pada Mata Kuliah Sensor Dan Transduser’, *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro Undiksha*, 14(2), pp. 148–160.
- Waspada, I. and Sutikno, sutikno (2018) ‘Perbandingan metode defuzzifikasi sistem kendali logika fuzzy model mamdani pada motor DC’, *Jurnal Masyarakat Informatika*, 2(3), pp. 27–38.
- Wukkadada, B. *et al.* (2018) ‘Comparison with HTTP and MQTT In Internet of Things (IoT)’, in *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 249–253. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597401>.
- Wulansari, I. (2025) ‘Penerapan Prinsip-Prinsip Dasar Keselamatan Transportasi Dalam Perencanaan Sistem Transportasi Kota Makassar’, *Citizen: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 5(5), pp. 1494–1500. Available at: <https://doi.org/10.53866/jimi.v5i5.1023>.
-