IMPLEMENTASI DETEKSI HALANGAN BERBASIS YOLOV8N DAN COVERAGE PATH PLANNING PADA ROBOT PEMOTONG RUMPUT OTONOM

Proposal Prototipe

diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

oleh

Muhammad Nabel Al Fayyed
NIM. 2305110037

PROGRAM STUDI TEKNIK KOMPUTER
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2026

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Prototipe berjudul "IMPLEMENTASI DETEKSI HALANGAN BERBASIS YOLOV8N DAN COVERAGE PATH PLANNING PADA ROBOT PEMOTONG RUMPUT OTONOM" yang disusun oleh

Nama	:	**Muhammad Nabel Al Fayyed**
NIM	:	**2305110037**
Prodi/Fakultas	:	**Teknik Komputer/Teknik**

telah disetujui untuk diajukan ke penilaian proposal prototipe.

Semarang, 28 September 2026
Pembimbing,

Dr. Feddy Setio Pribadi, S.Pd., M.T.
NIP. 197808222003121002

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING ii
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL v
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN vii
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Prototipe 4
1.4 Manfaat Prototipe 4
1.4.1 Bagi Penulis 4
1.4.2 Bagi Universitas Negeri Semarang 4
1.4.3 Bagi Pengelola Ruang Terbuka Hijau dan Masyarakat 5
1.4.4 Bagi Lingkungan 5
1.4.5 Bagi Industri 5
1.4.6 Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi 5
1.4.7 Bagi Negara 5
1.5 Potensi Dampak Fungsional/Komersial 5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA 8
2.1 Tinjauan Pustaka 8
2.1.1 Identifikasi Kesenjangan Penelitian (Research Gap) dan Kebaruan Prototipe 11
2.2 Landasan Teoretik 11
2.2.1 Arsitektur Jaringan YOLOv8n dan Prinsip Anchor-Free 11
2.2.2 Kuantisasi Model INT8 dan Pipeline NPU Allwinner A733 14
2.2.3 Geometri Perspective Region of Interest (ROI) Trapesium dan Estimasi Jarak Monokuler 15
2.2.4 Teori Coverage Path Planning (CPP) dan Boustrophedon Cellular Decomposition 16
2.2.5 Sistem Penentuan Posisi Global GNSS dan Protokol NMEA 0183 18
2.2.6 Logika Penghindaran Halangan Dinamis dan State Machine Navigasi 19
BAB 3 METODE PELAKSANAAN 21
3.1 Pendekatan Perancangan 21
3.2 Lokasi dan Waktu 22

3.2.1 Lokasi Pelaksanaan 22
3.2.2 Jadwal Pelaksanaan 22
3.3 Prosedur Perancangan 23
3.4 Teknik Perancangan 26
3.4.1 Desain Arsitektur Sistem dan Alur Operasi 26
3.4.2 Spesifikasi Perangkat Keras Komputasi Cerdas dan Penginderaan 29
3.4.3 Desain Fisik dan Pengkabelan (Wiring) 32
3.4.4 Spesifikasi Protokol Komunikasi Antar-Perangkat 34
3.4.5 Desain Antarmuka Aplikasi Android Controller 35
3.5 Teknik Uji Kelayakan Hasil 36
3.5.1 Pengujian Kinerja Inferensi Model YOLOv8n pada NPU 36
3.5.2 Pengujian Respons Sistem Penghindaran Halangan 37
3.5.3 Pengujian Navigasi Coverage Path Planning 38
3.5.4 Matriks Indikator Capaian Kuantitatif Prototipe Keseluruhan 38
DAFTAR PUSTAKA 39
LAMPIRAN 42

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan robot pemotong rumput komersial dengan prototipe. 6
Tabel 2.1 Matriks Komparasi Penelitian Terdahulu dan Posisi Prototipe 10
Tabel 3.1 Jadwal Rencana Kerja Perancangan Prototipe (5 Bulan)..... 23
Tabel 3.2 Spesifikasi Hardware Single Board Computer Orange Pi 4 Pro..... 30
Tabel 3.3 Spesifikasi Teknis Modul Kamera Jete W21 31
Tabel 3.4 Spesifikasi Teknis Modul Navigasi GNSS u-blox M10 32
Tabel 3.5 Alokasi Port dan Wiring 34
Tabel 3.6 Format Spesifikasi Protokol Komunikasi Antar-Subsistem 34
Tabel 3.7 Spesifikasi Protokol Perintah Kendali Gerak Serial UART 35
Tabel 3.8 Parameter Pengujian Kinerja Inferensi Model YOLOv8n NPU..... 37
Tabel 3.9 Parameter Pengujian Respons Sistem Penghindaran Halangan..... 37
Tabel 3.10 Parameter Pengujian Navigasi Coverage Path Planning..... 38
Tabel 3.11 Matriks Indikator Capaian Kuantitatif Prototipe Keseluruhan 38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arsitektur Jaringan YOLOv8n 14
Gambar 2.2 Pipeline Alur Konversi Model PyTorch ke Format Binary NPU (.nb) 15
Gambar 2.3 (a) dan (b) Pemodelan Geometri ROI Trapesium 3-Zona 16
Gambar 2.4 Prinsip Jalur pemotongan Boustrophedon Cellular Decomposition 18
Gambar 2.5 Flowchart Logika Penghindaran Halangan 20
Gambar 3.1 Diagram Tahapan Engineering Design Process (EDP) 22
Gambar 3.2 Diagram Blok Arsitektur Sistem 4 Subsistem Terintegrasi 27
Gambar 3.3 Flowchart Sistem Operasi Keseluruhan Robot 28
Gambar 3.4 Single Board Computer Orange Pi 4 Pro 29
Gambar 3.5 Modul Kamera USB Jete W21 31
Gambar 3.6 Modul Navigasi GNSS u-blox M10 31
Gambar 3.7 Sketsa Desain Fisik dan Dimensi Prototipe Robot Mower 33
Gambar 3.8 Diagram Pengkabelan (Wiring) Sistem Komputasi Cerdas Prototipe 33
Gambar 3.9 Antarmuka Aplikasi Android: (a) Mode Manual, Telemetri, dan Live Video Feed; (b) Mode Otomatis Virtual Geofencing dan Perencanaan Jalur 36

DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

AI	Artificial Intelligence (Kecerdasan Buatan)
BCD	Boustrophedon Cellular Decomposition
CIoU	Complete Intersection over Union
CPP	Coverage Path Planning (Perencanaan Lintasan Cakupan)
DFL	Distribution Focal Loss
EDP	Engineering Design Process (Metode Rekayasa Perancangan)
FPS	Frames Per Second (Bingkai per Detik)
GNSS	Global Navigation Satellite System
IoU	Intersection over Union
mAP	Mean Average Precision
NMS	Non-Maximum Suppression
NPU	Neural Processing Unit (Unit Pemroses Jaringan Saraf)
PTQ	Post-Training Quantization
PWM	Pulse Width Modulation
ROI	Region of Interest (Wilayah Perhatian Citra)
SBC	Single Board Computer (Komputer Papan Tunggal)
SoC	System on Chip
TOPS	Tera Operations Per Second (Triliun Operasi per Detik)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
VIPLite	Vivante Intelligent Processing Lightweight Runtime
FSM	Finite State Machine (Mesin Status Berhingga)
YOLO	You Only Look Once (Arsitektur Deteksi Objek Real-time)
INT8	8-bit Signed Integer (Format Bilangan Bulat 8-bit)

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemeliharaan ruang terbuka berumput merupakan kegiatan yang diperlukan untuk menjaga kerapian, kenyamanan, dan fungsi suatu kawasan. Area seperti lapangan olahraga, taman, lingkungan kampus, dan kawasan perumahan memerlukan pemotongan rumput secara berkala. Penggunaan mesin pemotong rumput konvensional masih membutuhkan keterlibatan operator untuk mengarahkan mesin, mengatur lintasan, menghindari halangan, dan memastikan seluruh area telah dikerjakan. Pada area yang luas, kegiatan tersebut membutuhkan waktu dan tenaga serta berpotensi menghasilkan pengulangan lintasan maupun bagian area yang belum terpotong. Meskipun saat ini telah hadir robot pemotong rumput komersial tanpa kawat batas di pasar global (seperti Husqvarna Automower® 450X NERA, Mammotion LUBA 3 AWD, dan Segway Navimow i105), produk-produk tersebut dibanderol dengan harga yang sangat tinggi serta belum menyediakan fleksibilitas integrasi pemeliharaan vegetasi terarah. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi otomasi robot pemotong rumput cerdas yang terintegrasi, adaptif terhadap variasi medan, dan terjangkau.

Salah satu lokasi yang menjadi perhatian dalam pengembangan teknologi tersebut adalah Lapangan Woodball Universitas Negeri Semarang. Lapangan ini ditetapkan sebagai lokasi studi kasus dan rencana pengujian robot pemotong rumput otonom. Berdasarkan pengukuran awal menggunakan Google Earth, luas area yang ditinjau diperkirakan sekitar 3.058 m² dengan bentuk batas yang tidak beraturan. Pengukuran tersebut merupakan estimasi awal yang perlu diverifikasi di lapangan. Untuk menyesuaikan pengujian dengan kemampuan prototipe, tahap awal pengujian direncanakan pada petak seluas 100 m² di dalam area tersebut. Karakteristik lokasi menjadi pertimbangan dalam penentuan batas operasi, penyusunan lintasan, dan evaluasi kemampuan robot.

Robot pemotong rumput otonom memerlukan kemampuan untuk mengetahui posisi, mengenali lingkungan, dan menentukan arah pergerakan. Informasi posisi saja belum cukup untuk menggambarkan keberadaan halangan di sekitar robot. Inoue dkk. (2019) mengembangkan sistem navigasi dan penghindaran halangan pada robot pemotong rumput menggunakan kamera stereo dan pembelajaran mendalam. Penelitian tersebut menunjukkan penerapan informasi visual untuk mengenali lingkungan dan mendukung pergerakan robot ketika navigasi tidak hanya mengandalkan sinyal satelit. Pendekatan ini menjadi salah satu dasar pengembangan sistem navigasi yang menggabungkan informasi posisi dengan persepsi lingkungan.

Dalam penelitian ini, navigasi dirancang dengan memanfaatkan Global Positioning System (GPS) sebagai referensi posisi global, deteksi halangan berbasis

YOLOv8n, serta coverage path planning untuk menyusun lintasan cakupan area. Perencanaan lintasan diperlukan agar robot dapat mengerjakan area secara sistematis dan mengurangi pengulangan lintasan yang tidak diperlukan. Sementara itu, informasi dari kamera digunakan untuk mengenali halangan pada jalur kerja sebagai dasar pengambilan keputusan untuk melanjutkan pergerakan, melakukan manuver, atau menghentikan operasi. Kemampuan tersebut perlu dihubungkan dengan sistem kendali gerak agar keputusan navigasi dapat diterjemahkan menjadi gerakan fisik robot.

Pengoperasian robot pada permukaan berumput juga menghadapi variasi kondisi tanah, kemiringan, kelembapan, dan traksi. Perbedaan kondisi tersebut dapat menimbulkan slip dan penyimpangan lintasan, terutama pada robot dengan penggerak sabuk rantai yang berbelok melalui perbedaan kecepatan sisi kiri dan kanan. Sathyamoorthy dkk. (2022), melalui pengembangan TerraPN, memanfaatkan informasi interaksi robot dengan medan, termasuk getaran IMU dan galat odometri, untuk mendukung navigasi pada permukaan yang memiliki karakteristik berbeda. Temuan tersebut menjadi pertimbangan bahwa kondisi medan perlu diperhatikan dalam perancangan kendali robot luar ruangan. Pada prototipe yang dikembangkan, data odometri dan Inertial Measurement Unit (IMU) dipadukan untuk membantu estimasi perpindahan serta orientasi, sedangkan kendali fuzzy Sugeno digunakan untuk mengatur respons gerak terhadap kesalahan arah dan lintasan.

Selain navigasi dan pergerakan, mekanisme pemotongan merupakan bagian utama yang menentukan kemampuan robot dalam menjalankan tugasnya. Perbedaan tinggi dan kepadatan rumput dapat menyebabkan perubahan beban pada motor pemotong. Oleh karena itu, rancangan robot perlu menyediakan mekanisme pengaturan elevasi dek pemotong agar posisi pemotongan dapat disesuaikan dengan kondisi operasi. Penelitian ini merencanakan penggunaan sensor arus sebagai umpan balik beban motor, kendali Proportional–Integral–Derivative (PID), dan aktuator linear untuk mengatur elevasi dek. Mekanisme self-locking pada aktuator dimanfaatkan untuk mempertahankan posisi dek tanpa pengaktifan motor aktuator secara terus-menerus. Kinerja pengaturan tersebut perlu dievaluasi melalui pengukuran perubahan ketinggian, respons terhadap peningkatan beban, dan konsumsi energi.

Robot juga dilengkapi fungsi penyemprotan berbasis Variable Rate Application (VRA) sebagai bagian dari pengembangan pemeliharaan vegetasi. Pendekatan ini diarahkan untuk menyesuaikan keluaran penyemprotan berdasarkan informasi kondisi area sasaran. Rahimi Azghadi dkk. (2024) menunjukkan bahwa penyemprotan robotik berbasis visi komputer pada lahan tebu dapat mengurangi penggunaan herbisida rata-rata sebesar 35% dibandingkan penyemprotan menyeluruh. Hasil tersebut memberikan dasar mengenai potensi penyemprotan terarah, meskipun kinerjanya tidak dapat langsung dianggap sama pada prototipe dan lingkungan pengujian yang berbeda. Dalam penelitian ini, indeks VRA dari

pengolahan citra diproses menggunakan fuzzy Mamdani untuk menghasilkan perintah kendali pompa melalui sinyal Pulse Width Modulation (PWM).

Penggabungan seluruh fungsi tersebut membutuhkan koordinasi antarsubsistem. Perubahan lintasan akibat halangan harus diteruskan kepada pengendali gerak, sedangkan pengoperasian pemotong dan penyemprot perlu mengikuti kondisi serta status misi robot. Pengaturan elevasi dek juga harus berlangsung tanpa menghambat pembacaan sensor maupun komunikasi antarpengendali. Dengan demikian, evaluasi robot perlu mencakup kemampuan setiap subsistem sekaligus keberhasilan integrasinya dalam menjalankan suatu misi. Pengujian dilakukan secara bertahap agar hubungan antara keputusan perangkat lunak dan respons perangkat keras dapat diperiksa.

Kontribusi utama pengembangan ini terletak pada integrasi visi komputer dan perencanaan jalur, kendali gerak dan fusi sensor, mekanisme pemotongan dan pengelolaan daya, serta penyemprotan VRA dalam satu platform robot. Perancangan juga mempertimbangkan ketersediaan komponen, kemudahan perawatan, dan batas biaya pengembangan. Kesesuaian rancangan terhadap kebutuhan pengguna perlu dibuktikan melalui pengujian pada lokasi studi kasus, sehingga penilaian terhadap prototipe didasarkan pada data kinerja yang diperoleh.

Berdasarkan permasalahan tersebut, dilakukan penelitian berjudul "Perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas". Penelitian diarahkan untuk menghasilkan prototipe yang mampu menjalankan pemotongan rumput melalui lintasan yang direncanakan, merespons halangan, menyesuaikan kendali gerak terhadap kondisi medan, mengatur elevasi dek, dan mengendalikan penyemprotan sesuai masukan. Prototipe beserta hasil pengujiannya diharapkan menjadi dasar pengembangan teknologi otomasi pemeliharaan area berumput yang sesuai dengan kebutuhan operasional pengguna.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana pekerjaan pemeliharaan rumput dapat diselesaikan oleh robot sementara operator cukup memantau jalannya pekerjaan. Permasalahan tersebut dirinci sebagai berikut.

1. Bagaimana area berumput dapat dipotong secara merata tanpa operator terus-menerus mengarahkan robot, sekaligus tetap merespons halangan pada jalur kerja?
2. Bagaimana robot dapat mengikuti lintasan yang dituju ketika kondisi permukaan dan traksi berubah, sehingga area yang direncanakan tetap terjangkau?
3. Bagaimana tinggi pemotongan dapat disesuaikan dengan kondisi rumput tanpa menyebabkan motor pemotong terhenti akibat beban berlebih atau menggunakan daya pengatur dek secara terus-menerus?

4. Bagaimana jumlah herbisida yang disemprotkan dapat disesuaikan dengan kondisi area sasaran agar penggunaan cairan lebih terukur?
5. Bagaimana seluruh fungsi tersebut dapat bekerja bersama untuk menyelesaikan misi pada area pengujian dengan pengawasan operator dan biaya pengembangan yang terjangkau?

1.3 Tujuan Prototipe

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan prototipe robot pemotong rumput yang mampu membantu menyelesaikan pekerjaan pemeliharaan area berumput dengan pengawasan operator. Secara khusus, prototipe ditujukan untuk:

1. Mengerjakan area uji secara sistematis dengan target cakupan sekurang-kurangnya 80% serta keberhasilan merespons halangan statis sekurang-kurangnya 80% pada skenario pengujian yang ditetapkan.
2. Mengikuti lintasan acuan pada permukaan berumput dan meningkatkan ketelitian estimasi posisi serta orientasi lokal, dengan target penurunan galat sekurang-kurangnya 20% dibandingkan penggunaan odometri saja.
3. Menyediakan sekurang-kurangnya tiga tingkat ketinggian pemotongan, mempertahankan posisi dek yang dipilih, dan merespons peningkatan beban motor agar proses pemotongan dapat berlangsung.
4. Menyesuaikan penyemprotan herbisida dengan kondisi area sasaran pada sekurang-kurangnya tiga tingkat debit, dengan galat debit aktual terhadap debit acuan tidak lebih dari 10% pada kondisi pengujian yang ditetapkan.
5. Menjalankan fungsi-fungsi tersebut sebagai satu misi dengan target keberhasilan sekurang-kurangnya 80% dari skenario uji tanpa intervensi pengendalian gerak oleh operator selama misi, serta menjaga biaya komponen dalam batas anggaran pengembangan Rp10.000.000.

1.4 Manfaat Prototipe

1.4.1 Bagi Penulis

1. Menambah pengetahuan dan keterampilan dalam merancang serta mengintegrasikan sistem mekanik, elektronika, kendali, dan *computer vision* pada robot otonom.
2. Meningkatkan kemampuan dalam melakukan pengujian, menganalisis kinerja, dan menyelesaikan permasalahan teknis pada sistem robotika.

1.4.2 Bagi Universitas Negeri Semarang

1. Memberikan kontribusi rujukan ilmiah dan pengayaan riset terapan di bidang robotika cerdas, sistem navigasi otonom, dan visi komputer bagi civitas akademika Universitas Negeri Semarang, khususnya di lingkungan Program Studi Teknik Komputer dan Fakultas Teknik.

2. Mendukung program hilirisasi produk inovasi mahasiswa serta menyediakan prototipe teknologi otomasi yang dapat diimplementasikan untuk efisiensi pemeliharaan fasilitas ruang terbuka hijau kampus, khususnya Lapangan Woodball UNNES.

1.4.3 Bagi Pengelola Ruang Terbuka Hijau dan Masyarakat

1. Memberikan alternatif teknologi untuk membantu pekerjaan pemotongan rumput dan penyemprotan secara otomatis.
2. Mengurangi keterlibatan langsung operator sehingga pekerjaan pemeliharaan lahan dapat dilakukan dengan lebih aman dan efisien.

1.4.4 Bagi Lingkungan

1. Mendukung penyemprotan cairan secara lebih terukur berdasarkan kondisi area yang terdeteksi oleh sistem.
2. Mengurangi potensi penggunaan herbisida secara berlebihan melalui penerapan sistem penyemprotan VRA.

1.4.5 Bagi Industri

1. Mendukung pengembangan teknologi robotika dalam negeri untuk membantu pemeliharaan ruang terbuka hijau secara lebih efisien.
2. Menjadi langkah awal menuju kemandirian pengembangan robot pemotong rumput otonom yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi lahan di Indonesia.

1.4.6 Bagi Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi

1. Memberikan kontribusi terhadap penerapan GPS, *coverage path planning*, YOLOv8n, fuzzy logic, PID, dan fusi sensor pada robot pemeliharaan lahan.
2. Menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya dalam meningkatkan akurasi navigasi, efisiensi energi, kualitas pemotongan, serta ketepatan penyemprotan.

1.4.7 Bagi Negara

1. Mendukung pengembangan teknologi oleh mahasiswa Indonesia.
2. Menjadi dasar pengembangan sistem yang sesuai dengan kebutuhan pemeliharaan area berumput di dalam negeri.

1.5 Potensi Dampak Fungsional/Komersial

1. Potensi dampak fungsional: Robot berpotensi mengurangi pekerjaan manual dalam pemotongan rumput dan penyemprotan pada area pengujian. GPS dan coverage path planning membantu robot mengikuti lintasan yang terencana, sedangkan deteksi halangan dan kendali gerak mendukung penyesuaian pergerakan saat terdapat halangan statis. Elevasi dek dapat diatur sesuai tinggi pemotongan yang dibutuhkan, sementara pemantauan arus motor dan kendali

PID membantu sistem merespons perubahan beban. Sistem variable rate application (VRA) berpotensi menyesuaikan debit penyemprotan berdasarkan kondisi area yang terdeteksi kamera. Dampak tersebut akan dinilai melalui pengujian cakupan area, penghindaran halangan, kinerja pemotongan, ketepatan debit, dan keberhasilan misi tanpa intervensi manual.

2. Potensi dampak komersial: Prototipe ini berpotensi dikembangkan menjadi produk pemeliharaan rumput yang menggabungkan navigasi otonom, pemotongan, dan penyemprotan sesuai kebutuhan. Calon penggunanya meliputi pengelola fasilitas kampus, lapangan olahraga, kawasan perumahan, dan penyedia jasa pemeliharaan taman. Sebagai karya yang dikembangkan dan dirakit oleh tim mahasiswa Indonesia, robot ditargetkan memiliki harga jual maksimal Rp15.000.000 per unit sehingga berpotensi menjadi alternatif yang lebih terjangkau dibandingkan beberapa produk impor pada Tabel 1.1. Kelayakan produk dan keunggulan harganya masih perlu dibuktikan melalui pengujian kinerja, keselamatan, ketahanan, serta perhitungan biaya produksi dan layanan purnajual.

Tabel 1.1 Perbandingan robot pemotong rumput komersial dengan prototipe.

Nama Produk	Gambar Produk	Harga Produk	Kelebihan	Kekurangan
Husqvarna Automower 450X NERA		Rp 98.480.000	1. Kapasitas dan jangkauan pemotongan jauh lebih luas hingga 5.000 m². 2. Memiliki deteksi halangan dan pengaturan zona kerja.	1. Harga lebih mahal dibandingkan dengan prototipe. 2. Tidak dilengkapi penyemprotan. 3. Perangkat EPOS tidak termasuk dalam harga varian dasar. 4. Alat jauh lebih besar dan berat dibanding prototipe sehingga tidak fleksibel dipindahkan.
Mammotion LUBA 3 AWD 1500		Rp 40.595.654	1. Menggunakan LIDAR 360° 2. Sudah dilengkapi asisten berbasis AI	1. Harga lebih mahal. 2. Sparepart susah dicari karena barang luar negeri. 3. Maintenance sulit karena kita harus maintenance sendiri.

Segway Navimow i105		Rp 14.325.771	1. Memiliki sistem navigasi EFLS 2.0 2. Memiliki sistem Mapping dan deteksi halangan. 3. Harga sedikit lebih murah dibanding target harga jual prototipe	1. Pengaturan tinggi pemotongan rumput masih manual dengan sistem bongkar pasang. 2. Tidak dilengkapi penyemprotan. 3. Konfigurasi mapping agak lama.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Perancangan prototipe robot pemotong rumput otonom ini dilandasi oleh kajian terhadap publikasi ilmiah dan penelitian terdahulu. Tinjauan literatur difokuskan pada tiga topik utama: (1) robotika pemeliharaan rumput dan otomasi berbasis kecerdasan buatan, (2) teknik akselerasi dan kuantisasi model *deep learning* pada perangkat komputasi *edge*, serta (3) algoritma *Coverage Path Planning* (CPP) untuk pemotongan area terstruktur.

Pada bidang penelitian robot pemotong rumput, Kanade et al. (2025) mengembangkan prototipe robot pemotong rumput otonom yang dikendalikan oleh modul Raspberry Pi 4 Model B dengan dukungan sensor GPS u-blox NEO-M8N dan kamera monokuler. Untuk mendeteksi halangan, penelitian tersebut menerapkan arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) berbasis model YOLOv5. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot mampu mendeteksi objek manusia, hewan, dan batu dengan akurasi mAP@0.5 sebesar 78,4%. Namun, kecepatan inferensi pada prosesor quad-core ARM Cortex-A72 hanya mencapai 8,3 FPS, yang menyebabkan latensi deteksi cukup tinggi (sekitar 120 ms). Keterbatasan komputasi CPU tersebut memaksa robot membatasi kecepatan jalannya di bawah 0,3 m/s guna mencegah benturan fisik.

Kosri et al. (2025) merancang robot pemotong rumput otonom berbiaya rendah dengan anggaran perangkat keras di bawah $200 menggunakan mikrokontroler Arduino Mega sebagai pengendali gerak, Raspberry Pi 4 untuk komputasi visi YOLOv8, dan modul GPS ganda (GY-NEO6M) yang dipadukan dengan kompas digital QMC5883 untuk penentuan arah haluan (heading). Sistem penghindaran halangan mengandalkan sensor ultrasonik jarak pendek dan kamera USB yang membedakan area rumput tinggi dan bukan rumput. Keterbatasan dari penelitian tersebut adalah akurasi posisi GPS standar yang memiliki deviasi sekitar ±1 meter di area terbuka dan bertambah hingga > 2 meter ketika berada di dekat pepohonan, serta ketiadaan algoritma perencanaan lintasan terstruktur sehingga cakupan pemotongan tidak merata.

Inoue *et al.* (2019) menginvestigasi penerapan teknik *machine vision* konvensional pada robot pemotong rumput di area perkebunan pohon Tanashi, Universitas Tokyo. Sistem menggunakan kamera stereo Intel RealSense D435 yang dipadukan dengan algoritma Visual SLAM (RTAB-Map) dan deteksi halangan YOLOv3. Pengujian membuktikan bahwa integrasi sensor inersia (IMU) dan penanda visual (*landmark*) mampu mereduksi akumulasi *drift* posisi dari 5,83 meter menjadi 0,36 meter. Namun demikian, kebutuhan pemrosesan data *point-cloud* dari kamera stereo menuntut unit komputasi berat berupa NVIDIA Jetson Xavier yang

memiliki konsumsi daya tinggi dan harga yang kurang terjangkau untuk aplikasi robot domestik.

Adewumi et al. (2025) melakukan investigasi komparatif mengenai efisiensi pemotongan rumput otonom menggunakan model MobileNetV2 dan YOLOv8n yang dioptimasi untuk komputasi edge. Mereka menemukan bahwa efisiensi kerja lapangan (field efficiency) sangat dipengaruhi oleh ketinggian vegetasi rumput, kontur permukaan tanah, dan kelembapan permukaan. Penggunaan model deteksi ringan dengan resolusi input terkompresi mampu menekan latensi inferensi hingga 85 ms pada prosesor berdaya rendah, namun tetap menghasilkan akurasi klasifikasi halangan di atas 92% (AUROC 0,94).

Haider et al. (2025) menyusun kajian menyeluruh mengenai evolusi sistem navigasi dan persepsi pada robot pemotong rumput selama tiga dekade terakhir. Mereka memetakan pergeseran paradigma dari sistem kawat pembatas fisik generasi awal menuju navigasi hibrida (fusi GNSS, VIO, dan AI vision). Studi ini menekankan bahwa integrasi model deteksi objek modern seperti YOLOv8n dengan unit akselerator NPU hemat daya (< 2 Watt) merupakan arah masa depan yang menjanjikan untuk menghadirkan robot pemotong rumput otonom berbiaya terjangkau di skala industri.

Terkait akselerasi model AI pada perangkat edge, Cantero et al. (2022) melakukan pengujian performa komparatif terhadap model deteksi objek pada berbagai papan pengembang embedded (Raspberry Pi 4, NVIDIA Jetson Nano, dan Google Coral EdgeTPU). Hasil studi menegaskan bahwa proses kuantisasi ke format integer 8-bit (INT8) merupakan prasyarat untuk mencapai kecepatan pemrosesan real-time (> 20 FPS) pada akselerator perangkat keras, di mana eksekusi model terkuantisasi mampu menghasilkan percepatan hingga 4–10 kali lipat dibanding eksekusi FP32 pada CPU tanpa penurunan akurasi yang berarti.

Zhou et al. (2024) mengusulkan model deteksi halangan lahan pertanian berbasis perbaikan arsitektur YOLOv8 (dinamai CBBI-YOLO) dengan menyematkan modul atensi CBAM pada backbone dan BiFPN pada neck. Model ini mencapai mAP@0.5 sebesar 82,5% pada 52 FPS di GPU desktop. Sementara itu, Liu et al. (2025) mempublikasikan model UCIW-YOLO untuk deteksi multi-kategori halangan mesin pertanian dengan mengintegrasikan Universal Inverted Bottleneck dari MobileNetV4 ke dalam kerangka YOLOv5/YOLOv8, menghasilkan penurunan parameter sebesar 23,6% dan penurunan komputasi FLOPs sebesar 26,6% dengan kecepatan 10 FPS pada Jetson Orin NX.

Dalam aspek perencanaan lintasan cakupan area, Bähnemann et al. (2019) merumuskan kembali algoritma Boustrophedon Coverage Path Planning sebagai Equality Generalized Traveling Salesman Problem (E-GTSP). Mereka membuktikan bahwa dekomposisi area poligon menjadi sel-sel konveks dengan pola pemotongan bolak-balik mampu memangkas panjang lintasan hingga 14%

dibandingkan metode TSP standar pada peta dengan banyak rintangan. Selanjutnya, Nikunj et al. (2025) merancang kerangka kerja end-to-end untuk robot pemotong rumput berbasis dekomposisi seluler dan penggabungan area adaptif (adaptive merging). Uji lapangan membuktikan bahwa algoritma ini mampu memangkas jarak non-pemotongan (non-mowing travel) hingga 80% dan mencapai efisiensi cakupan area sebesar 97,2% dibandingkan metode dekomposisi trapesium konvensional.

Tabel 2.1 Matriks Komparasi Penelitian Terdahulu dan Posisi Prototipe

No	Peneliti (Tahun)	Platform Komputasi	Model Deteksi / AI	Kecepatan / Akurasi	Metode Navigasi	Kesenjangan / Gap Riset
1	Kanade et al. (2025)	Raspberry Pi 4	YOLOv5 (CPU)	8,3 FPS / mAP 78,4%	GPS u-blox + Waypoint	Inferensi CPU lambat, navigasi belum optimal
2	Kosri et al. (2025)	Arduino Mega + RPi 4	YOLOv8 (CPU)	~6-9 s delay / 90% avoid	Dual GPS + Kompas digital	Latensi deteksi tinggi, deviasi GPS besar (±1,5m)
3	Inoue et al. (2019)	NVIDIA Jetson Xavier	YOLOv3 + Stereo RealSense	Real-time / Error 0,36m	Visual SLAM (RTAB-Map)	Biaya perangkat keras sangat mahal, daya tinggi
4	Adewumi et al. (2025)	ESP32-CAM + Edge AI	MobileNetV2 (pruned)	11,8 FPS / mAP 92%	Boustrophedon (Simulasi)	Kamera resolusi rendah, evaluasi dominan simulasi
5	Cantero et al. (2022)	Jetson Nano & Coral TPU	YOLOv5, INT8 PTQ	20-30 FPS / mAP degradasi <2%	Benchmarking model	Menggunakan CUDA bukan NPU
6	Zhou et al. (2024)	PC Desktop RTX 3090	YOLOv8 + CBAM + BiFPN	52 FPS / mAP 82,5%	Off-board processing	Hanya diuji pada GPU desktop, bukan perangkat edge
7	Bähnemann et al. (2019)	Intel i7 CPU (PC)	Algoritma E-GTSP	Lintasan 14% lebih hemat	Boustrophedon CPP (BCD)	Fokus pada drone MAV, bukan robot darat bergerak
8	Nikunj et al. (2025)	Sistem Lawnmower	Adaptive Decomp CPP	Coverage 97,2% / Cut non-mow 80%	Cellular Decomposition	Asumsi medan datar ideal tanpa deteksi AI terintegrasi
9	Prototipe Ini (2026)	Orange Pi 4 Pro (NPU A733)	YOLOv8n INT8 (.nb)	Target ≥ 20 FPS / mAP ≥ 85%	Boustrophedon CPP + Android GPS	integrasi Edge AI NPU murah + CPP

2.1.1 Identifikasi Kesenjangan Penelitian (Research Gap) dan Kebaruan Prototipe

Berdasarkan sintesis komparatif pada Tabel 2.1, teridentifikasi tiga kesenjangan mendasar dalam penelitian robot pemotong rumput otonom saat ini:

1. Ketiadaan Evaluasi YOLOv8 pada NPU Allwinner A733: Sebagian besar literatur Edge AI terkonsentrasi pada ekosistem NVIDIA Jetson atau Google Coral. Belum ada penelitian yang mendokumentasikan implementasi dan kuantisasi INT8 YOLOv8n menggunakan toolchain Acuity/Pegasus dan runtime VIPLite pada SoC Allwinner A733 (Vivante 3,0 TOPS) untuk robot otonom luar ruangan.
2. Fragmentasi antara Sistem Persepsi AI dan Sistem Navigasi CPP: Riset yang ada umumnya memisahkan antara pengembangan model deteksi objek visual dengan perancangan lintasan area pemotongan. Penelitian deteksi objek umumnya berhenti pada pengujian inferensi citra, sedangkan penelitian CPP umumnya menggunakan simulasi atau mengasumsikan sensor ideal tanpa dinamika halangan lapangan nyata.
3. Tingginya Biaya Solusi Otonom Komersial Saat Ini: Sistem otonom tanpa kawat batas yang handal saat ini bergantung pada sensor LiDAR 2D/3D atau modul RTK-GPS sentimeter yang sangat mahal. Diperlukan solusi cerdas yang mengombinasikan kamera monokuler tunggal dengan GPS standar dan NPU terjangkau untuk menekan biaya manufaktur hingga dapat dijangkau oleh pengguna umum.

2.2 Landasan Teoretik

2.2.1 Arsitektur Jaringan YOLOv8n dan Prinsip Anchor-Free

YOLOv8 merupakan arsitektur deteksi objek satu tahap (*single-stage detector*) generasi mutakhir yang dirancang untuk menghasilkan keseimbangan optimal antara akurasi deteksi tinggi dan kecepatan inferensi *real-time* pada komputasi *edge* (Zhou et al., 2024; Zhang et al., 2025). Berbeda dari generasi keluarga YOLO terdahulu (seperti YOLOv3 hingga YOLOv5) yang mengandalkan kotak acuan apriori (*anchor-based*), YOLOv8 menerapkan paradigma *anchor-free* (Liu et al., 2023; Rey et al., 2025). Pada pendekatan *anchor-free*, jaringan secara langsung memprediksi lokasi titik pusat objek dan jarak offset menuju keempat sisi batas kotak pada bidang citra tanpa memerlukan proses clustering dimensi anchor terlebih dahulu. Eliminasi *anchor box* ini secara signifikan memangkas kompleksitas komputasi pasca-pemrosesan (*Non-Maximum Suppression / NMS*), mereduksi hiperparameter yang harus disetel secara manual, serta meningkatkan kemampuan generalisasi model terhadap halangan di lingkungan rumput luar ruangan yang memiliki variasi rasio aspek bentuk tidak seragam (Zhou et al., 2024).

Pemilihan YOLOv8n varian nano didasarkan pada komparasi performa deteksi halangan luar ruangan oleh Zhang et al. (2025). Dibandingkan model *two-stage* seperti Faster R-CNN yang menuntut komputasi berat (201 GFLOPs) dengan kecepatan hanya 14,5 FPS, arsitektur *single-stage* YOLOv8n mampu mencapai akurasi mAP 91,6% pada 60,9 FPS dengan komputasi hanya 8,1 GFLOPs. Selain itu, dibandingkan varian yang lebih baru seperti YOLOv9t yang mengalami penurunan latensi hingga 26,4 FPS akibat kompleksitas layer PGI, YOLOv8n menawarkan stabilitas kuantisasi INT8 terbaik pada akselerator komputasi *edge* berdaya rendah (Rey et al., 2025).

Arsitektur YOLOv8n (varian nano dengan parameter teringan ~3,2 juta parameter) tersusun atas tiga blok modular utama (Zhou et al., 2024; Zhang et al., 2025):

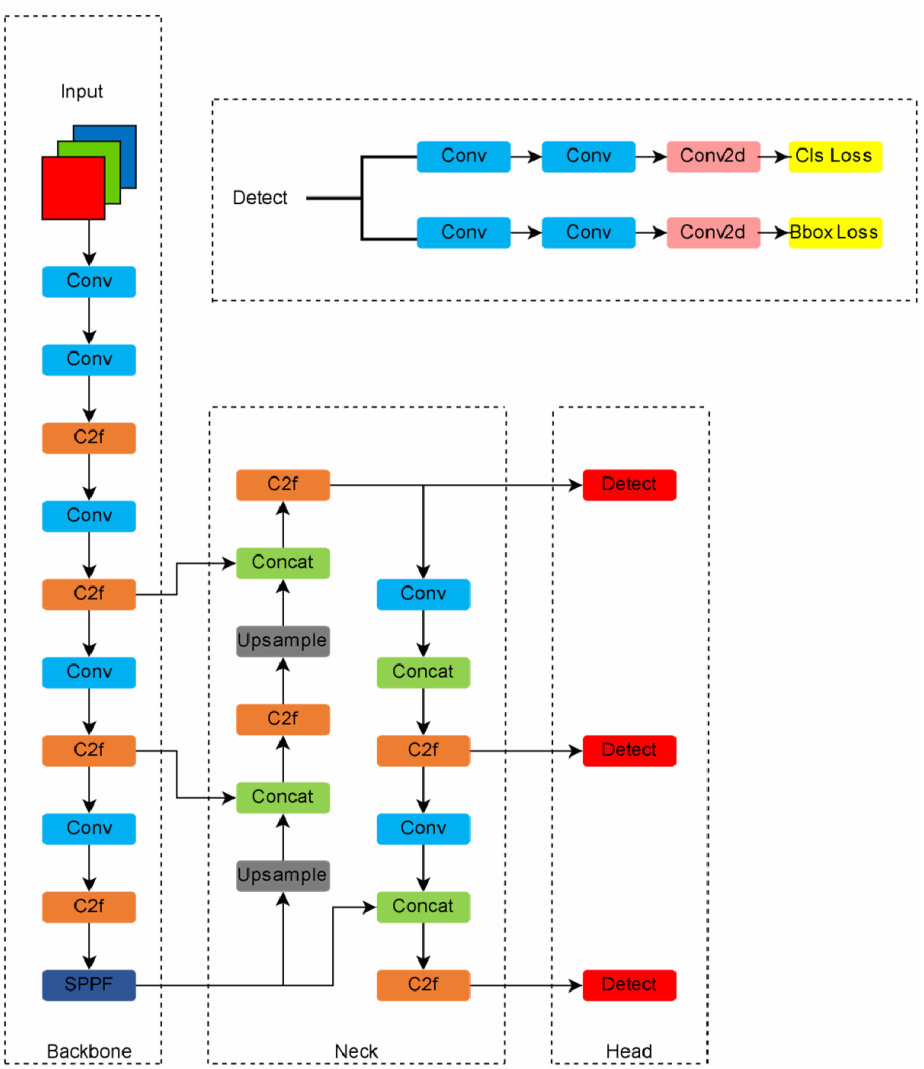
1. Backbone (CSPDarknet53 Termodifikasi): Berfungsi mengekstraksi hierarki representasi fitur spasial dan semantik dari citra masukan beresolusi 640×640×3. Komponen inti pada backbone ini adalah modul Cross Stage Partial with 2 bottlenecks (C2f). Modul C2f menggabungkan konsep arsitektur CSPNet dengan modul ELAN (Efficient Layer Aggregation Network), yang membagi peta fitur menjadi dua cabang dan menggabungkan beberapa lapisan bottleneck residual melalui koneksi skip-connection bersilang. Struktur ini memperbaiki aliran gradien saat pelatihan (gradient flow) selama proses backpropagation tanpa menimbulkan degradasi kecepatan komputasi. Pada bagian ujung backbone, disematkan modul Spatial Pyramid Pooling - Fast (SPPF) yang menerapkan operasi max pooling berjenjang (ukuran kernel 5×5) untuk memperluas bidang reseptif (receptive field) fitur global tanpa membebani latensi.
2. Neck (FPN + PAN): Mengintegrasikan arsitektur Feature Pyramid Network (FPN) dengan Path Aggregation Network (PAN). Aliran piramida fitur dari atas ke bawah (top-down) mentransmisikan informasi semantik kuat dari lapisan dalam menuju lapisan dangkal, sementara jalur agregasi dari bawah ke atas (bottom-up) membawa informasi lokalisasi piksel presisi tinggi menuju lapisan atas. Fusi fitur multi-skala ini diproses melalui blok C2f tambahan untuk menghasilkan tiga skala keluaran representasi: skala dangkal P3 (80×80) untuk halangan kecil, skala menengah P4 (40×40) untuk halangan sedang, dan skala dalam P5 (20×20) untuk halangan besar.
3. Decoupled Head: Berbeda dari struktur coupled head konvensional yang menyatukan cabang prediksi, YOLOv8 memisahkan secara independen (decoupled) antara cabang klasifikasi kategori kelas objek dan cabang regresi koordinat bounding box (Liu et al., 2023; Zhou et al., 2024). Pemisahan ini mengatasi konflik inheren pada representasi fitur laten, di mana tugas klasifikasi membutuhkan representasi fitur yang invarian terhadap translasi spasial, sedangkan tugas regresi lokalisasi menuntut kepekaan posisi spasial

yang sangat tinggi. Cabang klasifikasi mengevaluasi fungsi kerugian Binary Cross-Entropy (BCE), sedangkan cabang regresi koordinat dioptimasi secara terintegrasi menggunakan Complete Intersection over Union (CIoU) dan Distribution Focal Loss (DFL) (Zhou et al., 2024; Wang et al., 2025).

$$L_total = \lambda_cls \cdot L_cls + \lambda_box \cdot L_CIoU + \lambda_dfl \cdot L_DFL$$

di mana parameter pada formula fungsi kerugian (Zhou et al., 2024; Zhang et al., 2025; Wang et al., 2025) didefinisikan sebagai berikut:

1. L_total : Fungsi kerugian total yang diminimalkan selama proses pelatihan jaringan.
2. L_cls : Kerugian klasifikasi berbasis Binary Cross-Entropy (BCE) untuk mengevaluasi akurasi prediksi probabilitas 7 kelas objek halangan target.
3. L_CIoU : Kerugian regresi kotak pembatas berbasis Complete Intersection over Union (CIoU) yang secara simultan memperhitungkan rasio tumpang-tindih area (overlap), jarak Euclidean antara titik pusat kotak prediksi dan kotak ground truth, serta konsistensi rasio aspek (lebar dan tinggi).
4. L_DFL : Kerugian Distribution Focal Loss (DFL) yang memodelkan koordinat tepi batas kotak sebagai representasi distribusi probabilitas kontinu di sekitar label acuan target guna mengakomodasi ketidakpastian batas objek di lingkungan luar ruang yang kompleks.
5. λ_cls, λ_box, λ_dfl : Parameter bobot penyeimbang kontribusi kerugian masing-masing komponen, di mana konfigurasi default berbobot λ_cls = 0,5, λ_box = 7,5, dan λ_dfl = 1,5.



Gambar 2.1 Arsitektur Jaringan YOLOv8n

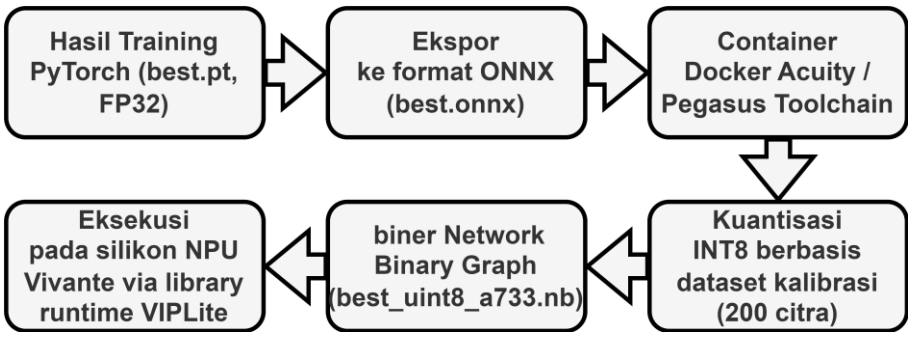
2.2.2 Kuantisasi Model INT8 dan Pipeline NPU Allwinner A733

Kuantisasi pasca-pelatihan (*Post-Training Quantization* / PTQ) adalah proses konversi parameter bobot (*weights*) dan aktivasi jaringan saraf dari format bilangan mengambang presisi tunggal (*32-bit floating point* / FP32) ke representasi bilangan bulat 8-bit bertanda (*signed integer* / INT8). Transformasi matematis pemetaan nilai kontinu x ke nilai bulat q didefinisikan sebagai:

$$q = round(x / S) + Z$$

di mana S merepresentasikan faktor skala (scale factor) dan Z adalah nilai titik nol (zero-point offset). Kuantisasi INT8 mereduksi kebutuhan memori model hingga 75% (dari ~6,3 MB menjadi ~2,1 MB pada YOLOv8n) serta mengurangi pemakaian bandwidth memori, sehingga memungkinkan eksekusi inferensi berkecepatan tinggi pada prosesor tensor integer (Cantero et al., 2022; Burkus et al., 2024; Rey et al., 2025).

Pada SoC Allwinner A733, akselerator kecerdasan buatan NPU Vivante/VeriSilicon 3,0 TOPS mengeksekusi model dalam format biner khusus yang disebut Network Binary Graph (.nb). Alur kompilasi dilakukan menggunakan perangkat lunak resmi Acuity/Pegasus Toolkit di dalam lingkungan Docker, di mana model PyTorch (.pt) diekspor ke ONNX, dikalibrasi menggunakan subset citra halangan nyata untuk meminimalkan error kuantisasi, dan dikompilasi menjadi berkas best_uint8_a733.nb yang dioperasikan melalui API pustaka libvnn_vnc VIPLite pada sistem operasi Linux Orange Pi 4 Pro.



Gambar 2.2 Pipeline Alur Konversi Model PyTorch ke Format Binary NPU (.nb)

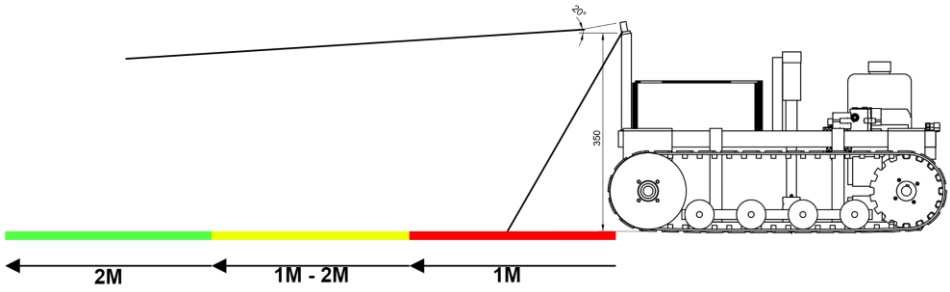
2.2.3 Geometri Perspective Region of Interest (ROI) Trapesium dan Estimasi Jarak Monokuler

Estimasi jarak objek halangan dan pemodelan koridor navigasi menggunakan kamera monokuler pada prototipe robot ini didasarkan pada prinsip geometri proyeksi perspektif dengan asumsi bidang tanah datar (ground plane assumption). Kamera USB dipasang pada tiang penyangga robot pada ketinggian fisik h = 35 cm dari permukaan tanah dengan sudut kemiringan (pitch angle) statis sebesar $\theta = 20°$ menghadap ke arah lintasan potong di depan robot. Akibat efek proyeksi perspektif kamera lensa tunggal, objek yang berada lebih jauh dari robot akan terproyeksikan pada baris piksel yang lebih tinggi (nilai koordinat v lebih kecil) serta tampak lebih menyempit di bidang citra 2D. Untuk membatasi komputasi visual hanya pada koridor jalur kerja robot serta mengeliminasi latar belakang yang tidak relevan (seperti langit atau pepohonan di kejauhan), dibentuk Region of Interest (ROI) berbentuk trapesium simetris. Sisi bawah trapesium membentang selebar bidang pandang dekat bemper robot, sedangkan sisi atas menyempit proporsional mengikuti garis pandang koridor pemotongan pisau.

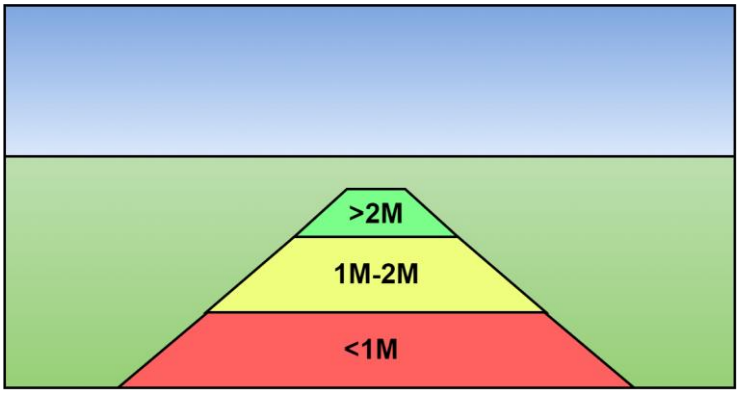
Berdasarkan formulasi geometris tersebut dan hasil kalibrasi pengukuran langsung di lapangan pada resolusi 640×480 piksel, koridor ROI trapesium dibagi ke dalam 3 (tiga) zona jarak operasional:

1. Zona Hijau (Zona Pantau / Aman): Didefinisikan pada jarak fisik halangan $d > 2$ meter di depan robot. Pada zona ini, lintasan kerja dinyatakan aman, robot bergerak maju lurus dengan kecepatan nominal 100%, dan status deteksi hanya dipantau tanpa memicu perubahan manuver.

2. Zona Kuning (Zona Waspada / Persiapan Hindar): Didefinisikan pada jarak fisik halangan 1 meter hingga 2 meter. Robot mulai mengurangi laju hingga 50% untuk memperluas margin pengereman. Jika terdeteksi pembatas paving (curb), robot bersiap memutar haluan; jika terdeteksi objek statis (pohon, batu, tiang), algoritma mengevaluasi ruang terbuka pada sisi kiri dan kanan untuk mempersiapkan manuver menghindar ('D').
3. Zona Merah (Zona Bahaya / Pengereman Darurat): Didefinisikan pada jarak fisik kritis halangan < 1 meter tepat di depan bemper robot. Pada zona ini, sistem mengambil tindakan proteksi instan: jika terdeteksi objek dinamis (manusia atau hewan peliharaan), sistem memicu pengereman darurat penuh (perintah serial 'S') dengan kedua motor penggerak berhenti total; jika terdeteksi objek statis, robot mengeksekusi manuver belok menghindar.



(a)



(b)

Gambar 2.3 (a) dan (b) Pemodelan Geometri ROI Trapesium 3-Zona

2.2.4 Teori Coverage Path Planning (CPP) dan Boustrophedon Cellular Decomposition

Coverage Path Planning (CPP) adalah cabang dari perencanaan gerak robotika yang bertujuan menentukan rute perjalanan agar sensor atau efektor akhir robot menyapu seluruh ruang bebas (free space) dari suatu lingkungan kerja poligon tertutup tanpa bertabrakan dengan halangan (Bähnemann et al., 2019; Jonnarth et al., 2024). Berdasarkan dekomposisi geometris, Boustrophedon Cellular Decomposition (BCD) membagi area non-konveks menjadi sejumlah sub-sel

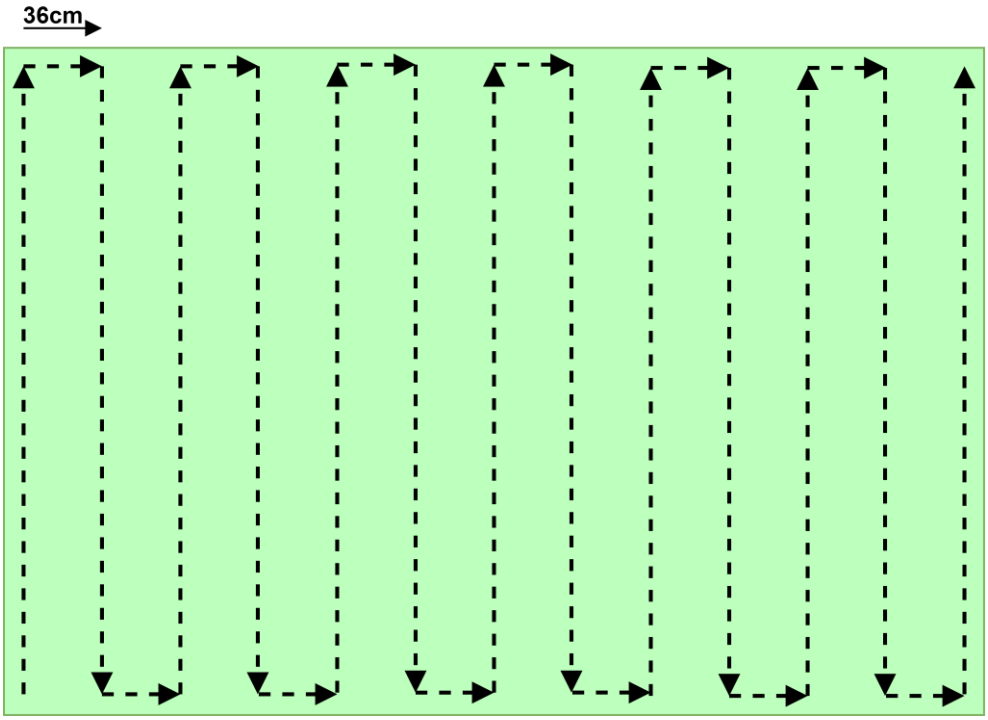
konveks menggunakan garis pemisah imajiner yang ditarik melalui titik-titik kritis (critical points), yaitu titik di mana konektivitas ruang bebas mengalami percabangan (split) atau penggabungan (merge) terhadap garis pemotongan (Bähnemann et al., 2019; Nikunj et al., 2025; Jonnarth et al., 2025).

Dalam domain robot pemotong rumput otonom, pemilihan metode *Coverage Path Planning* (CPP) sangat krusial terhadap efisiensi energi. Sebagaimana dipetakan oleh Haider et al. (2025), metode navigasi acak (*random walk*) konvensional menghasilkan tingkat pengulangan area (*revisitation rate*) hingga 40–60% yang memboroskan daya baterai. Sementara itu, metode berbasis sel kisi (*grid-based wavefront*) menghasilkan lintasan diskrit dengan frekuensi belokan 90° yang tinggi, berisiko merusak permukaan rumput akibat selip roda. Oleh karena itu, pendekatan *exact cellular decomposition* berbasis Boustrophedon (BCD) dipilih karena membagi ruang bebas hanya pada titik-titik kritis (*critical points*), menghasilkan sapuan lajur lurus paralel teratur serta memangkas jarak perjalanan tanpa pemotongan (*non-mowing travel*) hingga 80% dibandingkan metode dekomposisi trapesium klasik (Nikunj et al., 2025).

Setiap sub-sel konveks disapu menggunakan pola lintasan bolak-balik paralel (boustrophedon paths). Jarak pergeseran antar-lajur (Delta W) ditentukan berdasarkan lebar pemotongan efektif pisau robot W_cut dengan faktor overlap pengaman alpha:

$$\mathbf{\Delta W = W_cut \cdot (1 - \alpha)}$$

di mana ΔW adalah jarak pergeseran lateral antar-lajur paralel (lane spacing atau stride), W_cut adalah lebar pemotongan efektif pisau robot (pada prototipe ini dirancang sebesar 40 cm), dan α adalah faktor rasio tumpang-tindih pengaman (safety overlap ratio) sebesar 10% (α = 0,10) digunakan agar tidak ada rumput yang terlewat akibat dinamika selip roda. Berdasarkan parameter tersebut, jarak antar-lajur diatur sebesar ΔW = 40 cm × (1 - 0,10) = 36 cm. Setelah seluruh lajur dalam satu jalur selesai terpotong, robot berpindah ke jalur berikutnya.



Gambar 2.4 Prinsip Jalur pemotongan Boustrophedon Cellular Decomposition

2.2.5 Sistem Penentuan Posisi Global GNSS dan Protokol NMEA 0183

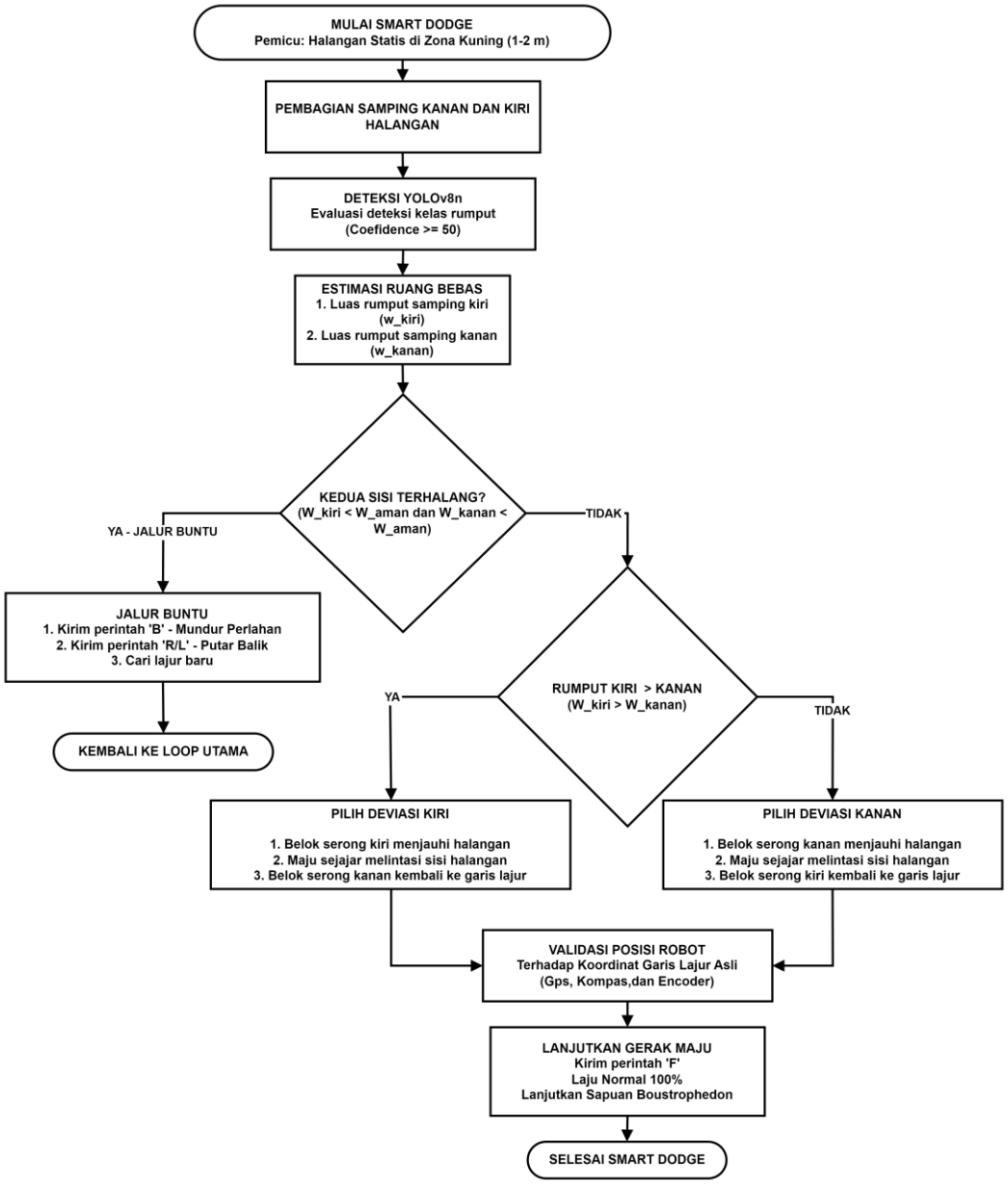
Sistem Navigasi Satelit Global (*Global Navigation Satellite System* / GNSS) menyediakan estimasi koordinat geospasial global (lintang, bujur, dan ketinggian). Modul GNSS modern seperti u-blox M10 mengintegrasikan penerima multi-konstelasi (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) yang mampu melacak sinyal dari puluhan satelit secara simultan, menghasilkan pembaruan posisi dengan frekuensi hingga 10 Hz dan akurasi horizontal CEP ~1,5 meter pada kondisi langit terbuka tanpa halangan.

Data navigasi ditransmisikan ke Orange Pi 4 Pro melalui antarmuka serial UART pada kecepatan 115200 bps menggunakan format kalimat standar NMEA 0183. Karakter tanda dolar ($) merupakan karakter pembuka wajib (start delimiter) pada setiap kalimat protokol. Dua karakter berikutnya ('GN') menandakan penerimaan data satelit gabungan multi-konstelasi (GPS, GLONASS, Galileo, dan BeiDou). Kalimat utama yang diekstrak meliputi $GNRMC (Recommended Minimum Specific GNSS Data) untuk memperoleh lintang, bujur, kecepatan, dan arah haluan kompas robot, serta $GNGGA (Global Positioning System Fix Data) untuk memverifikasi kualitas fiksasi sinyal, jumlah satelit aktif yang terkunci, dan nilai DOP. Nilai posisi ini dikonversi dari koordinat geodetik (WGS84) ke sistem koordinat kartesian lokal (East-North-Up / ENU) untuk memvalidasi posisi aktual robot relatif terhadap poligon batas kerja yang ditentukan.

2.2.6 Logika Penghindaran Halangan Dinamis dan State Machine Navigasi

Penghindaran halangan dinamis pada robot pemotong rumput otonom diimplementasikan menggunakan arsitektur Finite State Machine (FSM) yang terintegrasi secara langsung dengan hasil estimasi zona bahaya pada bidang citra kamera. Logika navigasi pada modul app_yolov8.py di Orange Pi 4 Pro mengevaluasi kotak deteksi (*bounding box*) objek secara terus-menerus pada setiap *frame* dan mengelompokkan kondisi kerja robot ke dalam empat status operasional utama:

1. STATE_PATROL: Robot bergerak maju dengan kecepatan penuh (100%) mengikuti lajur lurus pemotongan Boustrophedon yang telah direncanakan oleh modul CPP. Kamera memantau ruang bebas (free space) di depan robot secara kontinu pada frekuensi ≥ 20 FPS.
2. STATE_SLOWDOWN: Terpicu saat objek halangan terdeteksi di Zona Kuning (rentang estimasi jarak 1–2 meter). Robot mengurangi kecepatan laju hingga 50% untuk memperluas margin reaksi pengereman dan mempersiapkan kalkulasi lintasan deviasi.
3. STATE_EMERGENCY_STOP: Terpicu jika halangan dinamis berisiko tinggi (terutama kelas person atau pets) terdeteksi memasuki batas kritis Zona Merah (jarak < 1 meter). Orange Pi 4 Pro secara instan mengirimkan instruksi pengereman keras ('S') ke ESP32 guna memutus sinyal PWM motor penggerak roda, menjamin keselamatan kerja sebelum terjadi kontak fisik.
4. STATE_SMART_DODGE: Terpicu saat halangan statis (seperti batu, pohon, atau tiang) terdeteksi pada lajur potong di Zona Kuning (rentang estimasi jarak 1–2 meter). Sistem mengevaluasi ruang lintasan secara langsung menggunakan hasil inferensi model YOLOv8 untuk kelas area rumput. Algoritma membagi ruang pandang lateral di samping kotak halangan menjadi koridor kiri dan koridor kanan, lalu memeriksa keberadaan deteksi kelas area rumput yang bebas dari objek halangan lain. Jika sektor kanan lebih aman, manuver deviasi diarahkan ke kanan. Apabila kedua sisi terhalang atau tidak terdeteksi area rumput yang memadai, robot mengidentifikasi kondisi jalur buntu, menghentikan gerak maju ('S'), melakukan mundur perlahan ('B'), dan meminta pembaruan lintasan baru dari modul perencanaan lintasan. Alur pengambilan keputusan penghindaran halangan ini dirangkum pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Flowchart Logika Penghindaran Halangan

BAB 3
METODE PELAKSANAAN

Bab ini menguraikan metodologi pelaksanaan yang diterapkan dalam perancangan dan realisasi prototipe robot pemotong rumput otonom, mencakup pendekatan perancangan rekayasa, lokasi dan jadwal pelaksanaan, prosedur tahapan perancangan sistematis, teknik perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta prosedur pengujian kelayakan hasil berdasarkan indikator capaian kuantitatif yang terukur.

3.1 Pendekatan Perancangan

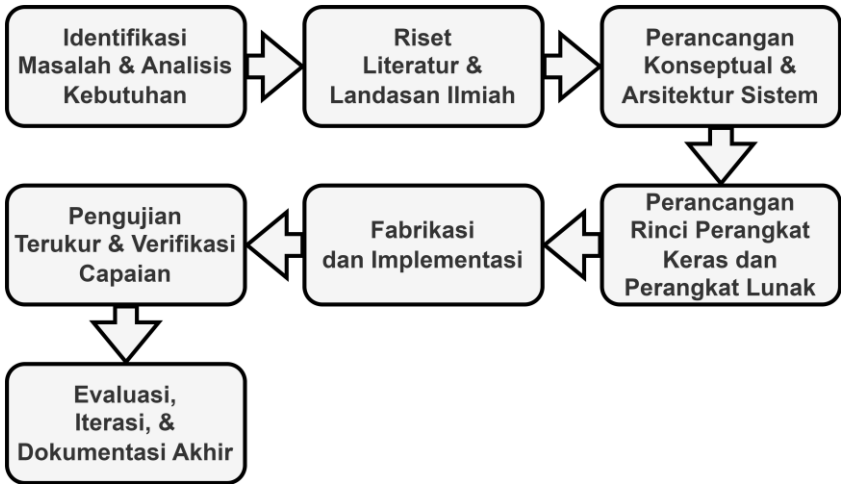
Perancangan prototipe ini mengadopsi model *Engineering Design Process* (EDP) yang bersifat iteratif, sistematis, dan berorientasi pada pemecahan masalah teknis nyata. Pendekatan EDP dipilih karena sesuai untuk pengembangan produk mekatronika dan kecerdasan buatan yang mengintegrasikan perancangan mekanik, rangkaian kelistrikan, algoritma komputasi cerdas, serta program pengendali aktuator. Melalui siklus iterasi EDP, setiap subsistem dirancang, dibangun, diuji, dan disempurnakan secara bertahap hingga seluruh spesifikasi dan target kinerja terpenuhi.

Siklus tahapan EDP yang diterapkan dalam perancangan prototipe ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Identifikasi Kebutuhan dan Batasan Masalah: Menganalisis kelemahan robot pemotong rumput konvensional, merumuskan spesifikasi teknis target prototipe (kecepatan jelajah 0,5 m/s, bobot total ~20 kg, daya tahan baterai operasional > 30 menit, dan kemampuan inferensi deteksi halangan real-time ≥ 20 FPS pada NPU).
2. Riset Literatur dan Studi Eksisting: Mempelajari model YOLOv8, arsitektur NPU Allwinner A733, algoritma Boustrophedon CPP, dan referensi jurnal internasional terkini.
3. Perancangan Konseptual Sistem: Merumuskan arsitektur sistem modular 4-lapis (Persepsi, Komputasi Utama, Kontrol Aktuasi, Antarmuka Pengguna) dan diagram alir kerja keseluruhan.
4. Perancangan Rinci Perangkat Keras dan Perangkat Lunak: Merancang integrasi mekanik sasis prototipe, skema distribusi daya 24V terisolasi, pemetaan antarmuka kendali gerak ESP32, arsitektur perangkat lunak multi-threaded pada Orange Pi 4 Pro, dan antarmuka aplikasi Android.
5. Fabrikasi dan Implementasi: Mengintegrasikan komponen pada platform prototipe, merangkai jalur komunikasi serial Orange Pi ke ESP32, melatih model YOLOv8n dan mengompilasi model terkuantisasi INT8 (.nb) untuk

NPU Allwinner A733, serta menulis firmware kendali gerak ESP32 dan perangkat lunak navigasi.

6. Pengujian Terukur dan Evaluasi Lapangan: Menjalankan protokol pengujian akurasi deteksi model di NPU, uji respons manuver penghindaran halangan, dan uji efisiensi lintasan navigasi pemotongan Boustrophedon di lapangan rumput nyata.
7. Penyempurnaan Iteratif: Menganalisis log rekaman kegagalan atau deviasi hasil uji untuk melakukan penyetelan ulang parameter (fine-tuning) pada koordinat ROI trapesium, ambang batas deteksi NPU, serta parameter penghindaran halangan.



Gambar 3.1 Diagram Tahapan Engineering Design Process (EDP)

3.2 Lokasi dan Waktu

3.2.1 Lokasi Pelaksanaan

Pelaksanaan perancangan dan pengujian prototipe dilakukan pada dua lokasi utama di lingkungan Universitas Negeri Semarang:

- Laboratorium E11, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang: Digunakan untuk perakitan sistem kelistrikan, pengujian komunikasi serial dan soket TCP, pelatihan model deep learning YOLOv8n, proses kuantisasi dan kompilasi model NPU, serta pemrograman firmware ESP32.
- Area Lapangan Woodball Fakultas Keolahragaan Universitas Negeri Semarang: Digunakan untuk pengambilan dataset citra halangan luar ruangan, kalibrasi geometri kamera dan ROI trapesium, uji pelacakan navigasi Boustrophedon CPP berbasis sinyal satelit GNSS, serta pengujian pemotongan rumput dan penghindaran halangan.

3.2.2 Jadwal Pelaksanaan

Perancangan prototipe ini direncanakan selesai dalam jangka waktu 5 (lima) bulan kerja, dengan jadwal pelaksanaan terinci sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jadwal Rencana Kerja Perancangan Prototipe (5 Bulan)

No	Tahapan Kegiatan	April 2026	Mei 2026	Juni 2026	September 2026	Oktober 2026
1	Studi literatur & analisis kebutuhan teknis					
2	Akuisisi citra & anotasi dataset 7 kelas					
3	Pelatihan YOLOv8n & kompilasi INT8 NPU					
4	Pemrograman firmware kendali ESP32					
5	Pemrograman software Orange Pi					
6	Fabrikasi mekanik sasis & perakitan elektrik					
7	Pengembangan aplikasi Android Controller					
8	Integrasi menyeluruh & uji coba lapangan					
9	Analisis data hasil uji & penyusunan laporan					

3.3 Prosedur Perancangan

Prosedur perancangan prototipe diuraikan secara sistematis ke dalam 7 (tujuh) tahapan pelaksanaan teknis:

Tahap 1: Akuisisi dan Anotasi Dataset Lapangan

Pengambilan dataset citra halangan dilakukan secara langsung di lingkungan lapangan rumput menggunakan kamera webcam Jete W21 dengan resolusi tangkapan 2K QHD (2560 x 1440 piksel) yang kemudian diselaraskan ke ukuran masukan standar inferensi model 640 x 640 piksel. Variasi sudut pandang kamera, intensitas pencahayaan alami (pagi, siang, sore), serta variasi latar belakang rumput direkam secara komprehensif untuk melatih ketahanan deteksi model.

Pelabelan citra dilakukan menggunakan Roboflow dalam format anotasi YOLO (.txt). Anotasi mencakup 7 kelas objek: area rumput, curb (pembatas), person (manusia), pets (kucing/anjing), stone (batu), tree (pohon), dan pole (tiang). Dataset yang terkumpul sebanyak minimal 1.500 citra dibagi secara acak dengan

proporsi 70% data latih (train), 20% data validasi (val), dan 10% data uji independen (test). Teknik augmentasi data diterapkan pada data latih meliputi variasi kecerahan (brightness +/- 25%), rotasi kecil (+/- 10°), horizontal flip, dan mosaic 4-citra untuk meningkatkan ketahanan model terhadap halangan terpotong atau terhalang sebagian.

Tahap 2: Pelatihan Model Deteksi YOLOv8n

Pelatihan model dilakukan menggunakan kerangka kerja Ultralytics YOLOv8 pada stasiun kerja PC berbasis GPU NVIDIA RTX 3050 4GB. Model awal menggunakan bobot pretrained yolov8n.pt. Pelatihan dikonfigurasi dengan hyperparameter: ukuran citra input 640×640 piksel, ukuran batch 16, jumlah epoch maksimal 100. Evaluasi kinerja dilakukan pada akhir setiap epoch dengan memantau kurva box loss, class loss, dfl loss, serta metrik mAP@0.5.

Tahap 3: Kuantisasi INT8 dan Kompilasi Binary NPU (.nb)

Model bobot terbaik berpresisi FP32 (best.pt) diekspor ke format Open Neural Network Exchange (ONNX). Selanjutnya, berkas best.onnx dikonversi menjadi berkas biner Network Binary Graph (.nb) menggunakan toolchain Acuity/Pegasus di dalam lingkungan Docker resmi Allwinner. Proses ini menerapkan kuantisasi pasca-pelatihan (PTQ) berbasis integer 8-bit (UINT8/INT8) menggunakan 200 citra kalibrasi representatif dari dataset lapangan. Berkas akhir best_uint8_a733.nb kemudian diunggah ke penyimpanan Orange Pi 4 Pro dan diintegrasikan dengan modul pemanggil vivante_npu pada script Python.

Tahap 4: Integrasi Komputasi Cerdas, Sensor Deteksi, dan Antarmuka Aplikasi Android

Sasis robot, sistem penggerak roda track (motor DC 24V bertorsi > 40 kgf.cm dengan transmisi worm gear) dan sistem distribusi daya baterai 24V merupakan platform uji mobilitas (mobile testbed) kolaboratif yang dikembangkan bersama tim proyek capstone. Rangka fisik dibangun menggunakan besi hollow profil kotak ringan dengan dimensi panjang 65 cm, lebar 45 cm, dan tinggi 35 cm. Platform ini difungsikan sebagai sarana uji mobilitas fisik yang mengeksekusi instruksi pergerakan navigasi dan manuver penghindaran halangan dari sistem komputasi cerdas.

Kontribusi penelitian ini pada tahap integrasi berfokus secara spesifik pada: (1) Penempatan unit komputer papan tunggal Orange Pi 4 Pro pada wadah kompartemen; (2) Pemasangan modul kamera USB monokuler Jete W21 pada pilar sentral dengan ketinggian h = 35 cm dan sudut kemiringan pitch 20° menghadap ke bawah; (3) Pemasangan modul navigasi GNSS u-blox M10 (tipe SOLOGOOD M10-180) yang dihubungkan ke port USB 2.0 Orange Pi 4 Pro melalui adapter USB-to-TTL; (4) Penyaluran catu daya teregulasi DC 5.0V 3.0A dari dua unit baterai aki 12V 10Ah seri melalui modul konverter DC-DC buck ke port USB

Type-C Orange Pi; serta (5) Pengujian pertukaran paket data nirkabel antara Orange Pi 4 Pro dan smartphone Android pengendali.

Tahap 5: Perancangan Protokol Komunikasi Serial UART Pengendali Gerak (Orange Pi 4 Pro ke ESP32)

Komunikasi antara komputer cerdas Orange Pi 4 Pro dan mikrokontroler ESP32 melalui serial UART berbasis kabel USB internal dengan baudrate 115200 bps. Pada tahap ini, peneliti mengembangkan modul transmisi serial pada skrip app_yolov8.py di sistem operasi Linux Debian Orange Pi 4 Pro. Selain itu, pada modul serial ini menerima umpan balik telemetri dari ESP32 (data baterai, status gerak, dan heading MPU9250) untuk diteruskan ke aplikasi Android.

Tahap 6: Pengembangan Software Utama Orange Pi (app_yolov8.py)

Perangkat lunak utama robot dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python 3.8 pada sistem operasi Linux Debian di Orange Pi 4 Pro. Program mengadopsi arsitektur multi-threading terpisah untuk memaksimalkan utilisasi prosesor multi-core:

- Thread Inferensi Vision & Navigasi: Mengakuisisi frame dari kamera USB via OpenCV, meneruskan tensor citra ke NPU Vivante untuk inferensi YOLOv8n, mengevaluasi posisi koordinat bounding box terhadap batas trapesium ROI, mengestimasi jarak monokuler, dan mengeksekusi mesin status (state machine) navigasi Penghindaran.
- Thread Server MJPEG (Port 8080): Mengompresi frame hasil anotasi ke format JPEG dan men-stream video feed via protokol HTTP multipart secara non-blocking.
- Thread Server TCP (Port 12345): Menangani soket komunikasi dua arah dengan aplikasi Android untuk menerima perintah mode (AUTO/MANUAL), perintah joystick, dan mengirimkan paket telemetri setiap 200 ms.

Tahap 7: Pengembangan Aplikasi Android Controller

Aplikasi Android dikembangkan menggunakan platform Android Studio sebagai pusat kendali dan pemantauan nirkabel. Aplikasi berkomunikasi dengan Orange Pi 4 Pro melalui jaringan Wi-Fi lokal. Fitur utama aplikasi meliputi tampilan layar video feed real-time dari kamera robot, indikator telemetri (tegangan baterai, status halangan, FPS inferensi), kendali joystick manual virtual, tombol pengaturan parameter laju kerja, serta fitur peta interaktif berbasis OpenStreetMap/Google Maps untuk menggambar poligon batas area pemotongan (*virtual geofencing*) dan mengirimkan titik-titik koordinatnya ke modul perencanaan lintasan CPP robot.

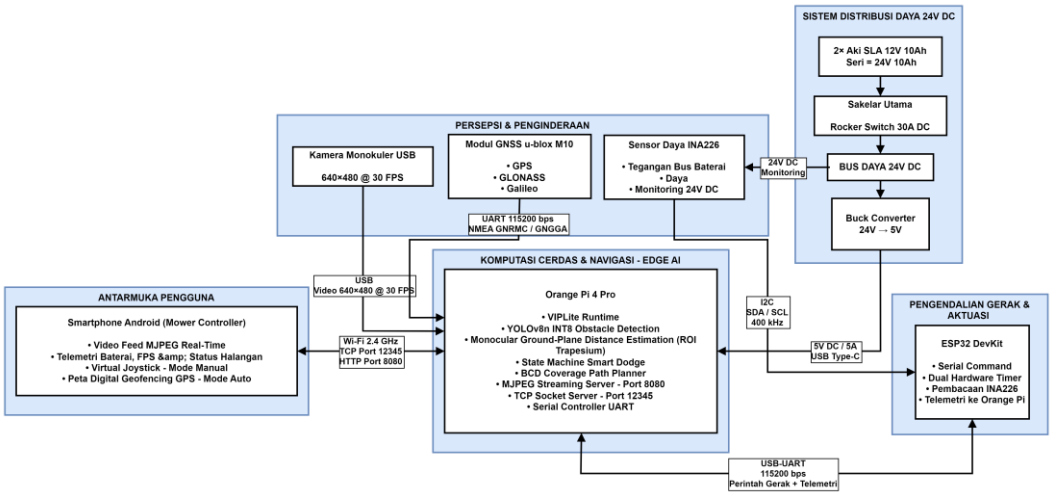
3.4 Teknik Perancangan

Teknik perancangan menyajikan spesifikasi teknis dan rancangan arsitektur sistem prototipe robot pemotong rumput otonom, yang membagi fungsi kerja robot ke dalam empat subsistem utama, diagram alir operasional sistem secara keseluruhan, rancangan fisik dan integrasi perangkat keras komputasi cerdas, spesifikasi protokol komunikasi data, serta rancangan antarmuka aplikasi Android controller.

3.4.1 Desain Arsitektur Sistem dan Alur Operasi

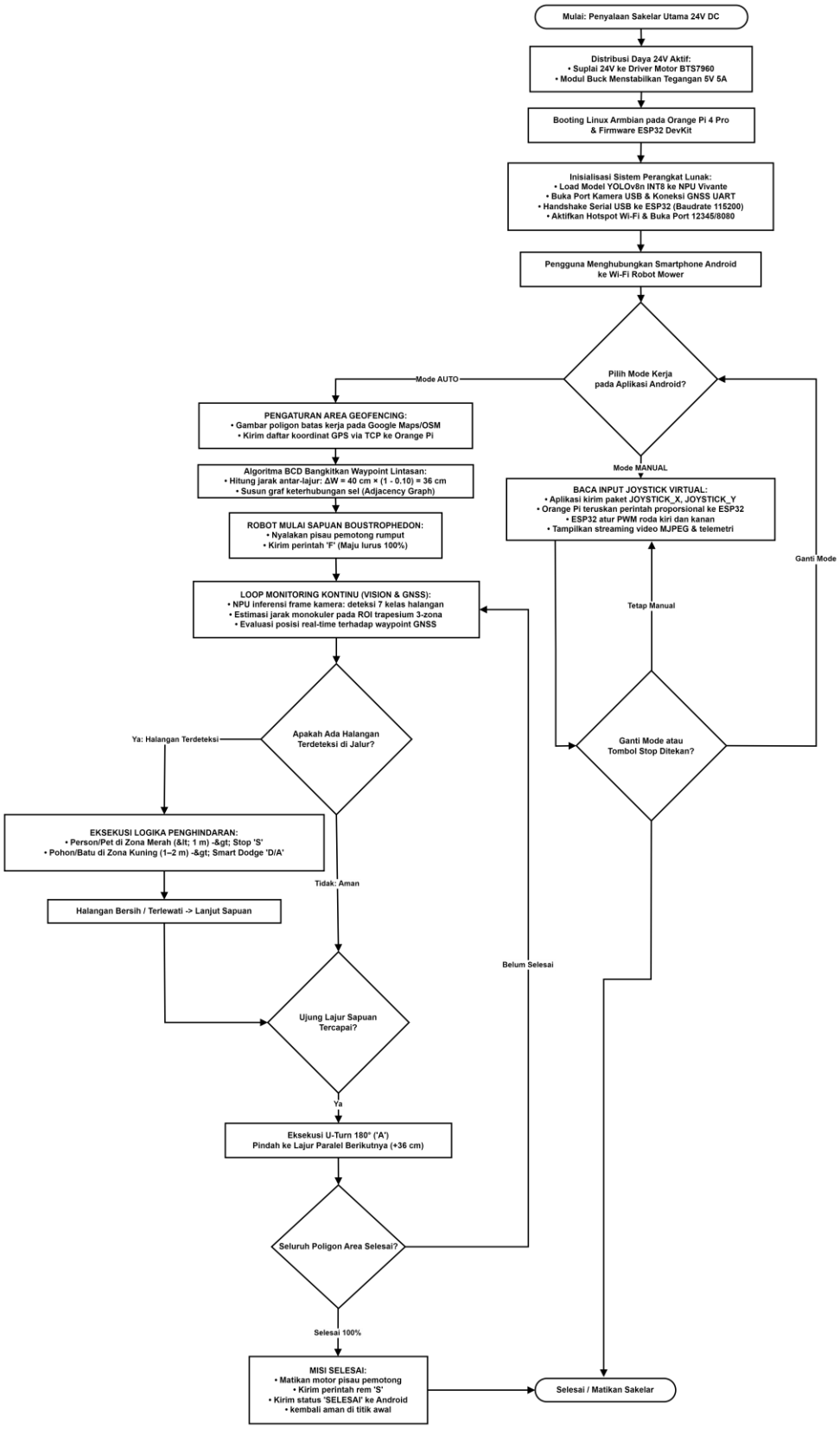
Sistem robot pemotong rumput otonom dirancang menggunakan pendekatan arsitektur modular yang membagi fungsi kerja robot ke dalam empat subsistem utama untuk kemudahan integrasi, sebagaimana diilustrasikan pada diagram blok Gambar 3.2:

1. Subsistem 1 Penginderaan (Sensing Layer): Kamera USB monokuler menangkap citra visual lingkungan depan untuk deteksi halangan, modul GNSS multi-konstelasi u-blox M10 membaca koordinat posisi absolut dari satelit untuk referensi navigasi global, modul IMU 9-axis MPU9250 mengukur orientasi sudut kompas (yaw heading), dan rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) memonitor level tegangan baterai 24V.
2. Subsistem 2 Komputasi Cerdas dan Navigasi (Intelligence & Decision Layer): Orange Pi 4 Pro memproses inferensi model YOLOv8n INT8 pada NPU Vivante Allwinner A733, mengevaluasi geometri ROI trapesium 3-zona untuk estimasi jarak halangan, mengeksekusi logika manuver penghindaran dinamis, merencanakan lajur pemotongan Boustrophedon CPP dari masukan poligon, serta menjalankan server TCP (port 12345) untuk pertukaran data telemetri dan *server HTTP* (port 8080) untuk *streaming* video MJPEG ke aplikasi Android.
3. Subsistem 3 Pengendalian Gerak dan Aktuasi Mobilitas (Control & Actuation Layer): Mikrokontroler ESP32 DevKit bertindak sebagai low-level motion controller yang menerima instruksi navigasi serial UART ('F', 'B', 'L', 'R', 'A', 'D', 'E', 'S') dari Orange Pi 4 Pro, menghasilkan sinyal PWM frekuensi 20 kHz untuk mengendalikan kecepatan dan arah putar motor penggerak roda track melalui modul driver BTS7960, serta membaca sensor rotary encoder, IMU/kompas digital, dan sensor pembagi tegangan baterai untuk dikirimkan kembali ke Orange Pi 4 Pro.
4. Subsistem 4 Antarmuka Pengguna dan Supervisi (User Interface Layer): Smartphone Android terhubung via jaringan nirkabel Wi-Fi untuk menampilkan video streaming MJPEG, memantau telemetri operasional sistem secara real-time serta mengonfigurasi batas poligon area kerja (virtual geofencing).



Gambar 3.2 Diagram Blok Arsitektur Sistem 4 Subsistem Terintegrasi

Alur logika operasional sistem robot pemotong rumput otonom secara end-to-end, mulai dari inisialisasi perangkat keras hingga penyelesaian misi pemotongan rumput pada area geofencing, dimodelkan pada diagram alir Gambar 3.3:



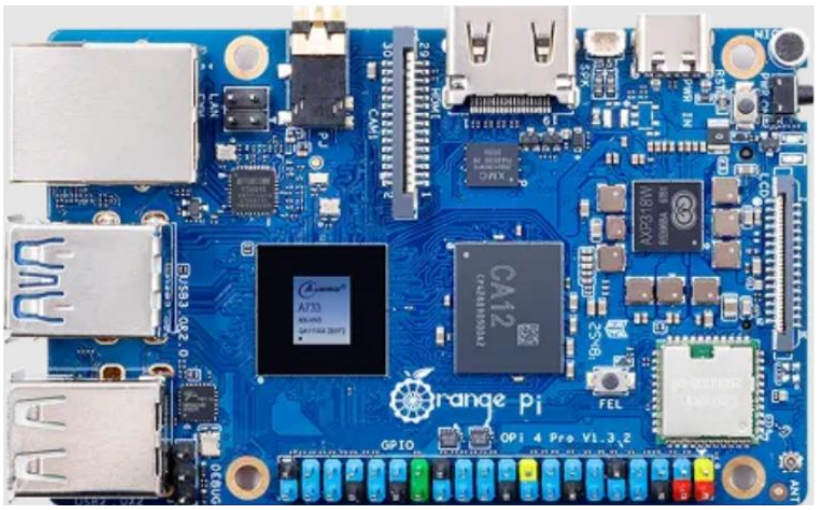
Gambar 3.3 Flowchart Sistem Operasi Keseluruhan Robot

3.4.2 Spesifikasi Perangkat Keras Komputasi Cerdas dan Penginderaan

Sistem komputasi cerdas dan persepsi visual prototipe robot pemotong rumput otonom dirancang dengan mengintegrasikan komponen pemrosesan tepi (edge computing), modul penginderaan visual monokuler, dan modul penentuan posisi global. Pemilihan setiap modul perangkat keras didasarkan pada pertimbangan efisiensi daya komputasi, keandalan inferensi model kecerdasan buatan, latensi transmisi data, serta kesesuaian operasi pada lingkungan luar ruangan (outdoor). Spesifikasi teknis masing-masing modul dijabarkan sebagai berikut:

3.4.2.1 Single Board Computer Orange Pi 4 Pro

Orange Pi 4 Pro difungsikan sebagai unit komputasi cerdas terpusat (central high-level processing unit) pada prototipe robot pemotong rumput. Komputer papan tunggal ini mengusung System on Chip (SoC) Allwinner A733 yang mengintegrasikan prosesor Octa-core ARM (2x Cortex-A76 dan 6x Cortex-A55) berkecepatan hingga 2.0 GHz, memori RAM 6 GB LPDDR5, penyimpanan cepat M.2 SSD 512 GB, serta akselerator kecerdasan buatan Neural Processing Unit (NPU) berkinerja 3.0 TOPS (INT8). NPU terintegrasi tersebut bertugas mengeksekusi model deteksi objek YOLOv8n secara real-time pada kecepatan di atas 30 FPS tanpa membebani CPU utama. Komputer ini mengelola pipeline pemrosesan citra, pembacaan koordinat posisi dari modul GNSS, perencanaan lajur pemotongan Boustrophedon CPP, pengiriman perintah kendali gerak ke mikrokontroler ESP32, serta server telemetri dan live video streaming ke aplikasi Android controller. Bentuk fisik modul Orange Pi 4 Pro diperlihatkan pada Gambar 3.4, sedangkan rincian spesifikasi teknisnya tercantum pada Tabel 3.2:



Gambar 3.4 Single Board Computer Orange Pi 4 Pro

Tabel 3.2 Spesifikasi Hardware Single Board Computer Orange Pi 4 Pro

Spesifikasi	Detail
SoC (System on Chip)	Allwinner A733
CPU	2x Cortex-A76 Cores + 6x Cortex-A55 Cores, Max. Frequency 2.0GHz
NPU (Neural Processing Unit)	3 TOPS @ INT8, supports INT8/INT16/FP16/BF16 mixed precision
Memori RAM	6 GB LPDDR5
Penyimpanan Sistem	M.2 SSD 512 GB
Port Antarmuka USB	1x USB 3.0 Type-A Host, 3x USB 2.0 Type-A Host
Konektivitas Nirkabel	Dual-band Wi-Fi (2.4/5.0 GHz) & Bluetooth 5.4
Catu Daya	DC 5.0 V / 3.0 A (Port USB Type-C)
Sistem Operasi	Linux Debian Bookworm 1.0.6

3.4.2.2 Modul Kamera USB Monokuler

Modul kamera USB monokuler yang digunakan adalah webcam Jete W21 dengan sensor CMOS berformat 1/4 inci yang mendukung resolusi tangkapan hingga 2K QHD (2560 x 1440 piksel) pada frame rate 30 FPS. Kamera ini dilengkapi fitur fokus otomatis (autofocus) dan antarmuka USB Video Class (UVC) berkecepatan tinggi yang dapat langsung dikenali (plug-and-play) oleh sistem operasi Linux Debian pada Orange Pi 4 Pro tanpa memerlukan driver pihak ketiga. Pada sistem deteksi, citra diakuisisi menggunakan pustaka OpenCV pada resolusi operasional 640 x 640 piksel agar sesuai dengan tensor masukan model YOLOv8n. Kamera ditempatkan pada dudukan pilar sentral sasis dengan ketinggian $h = 35$ cm dari permukaan tanah dan sudut kemiringan pitch $\theta = 20°$ menghadap ke bawah, memberikan bidang pandang optimal terhadap koridor kerja sejauh 0,5 meter hingga 4,0 meter di depan robot. Bentuk fisik modul kamera Jete W21 diperlihatkan pada Gambar 3.5, sedangkan spesifikasi teknisnya dirangkum pada Tabel 3.3:



Gambar 3.5 Modul Kamera USB Jete W21

Tabel 3.3 Spesifikasi Teknis Modul Kamera Jete W21

Parameter	Spesifikasi Teknis
Tipe Sensor	CMOS Color Image Sensor (format 1/4 inci)
Resolusi Sensor Maksimum	2K QHD (2560 x 1440 piksel) @ 30 FPS

3.4.2.3 Modul Navigasi GNSS u-blox M10

Modul navigasi GNSS yang digunakan adalah modul u-blox M10 (tipe SOLOGOOD M10-180) yang berfungsi menyediakan data koordinat geografis absolut (latitude dan longitude) robot di area kerja luar ruangan. Berbasis platform komputasi satelit generasi u-blox M10, modul ini memiliki kemampuan pelacakan multi-konstelasi secara simultan (GPS, GLONASS, Galileo, dan BeiDou) dengan konsumsi daya ultra-rendah (<15 mW) serta sensitivitas pelacakan tinggi menggunakan antena keramik aktif 28 dB. Modul GNSS ini dihubungkan langsung ke port USB 2.0 Orange Pi 4 Pro melalui adapter USB-to-TTL serial UART berkecepatan 9600 bps. Data posisi dikirimkan dalam format standar kalimat NMEA 0183 (khususnya kalimat $GNGGA untuk koordinat posisi dan status fix satelit, serta $GNRMC untuk kecepatan dan arah haluan lintasan). Informasi koordinat ini diumpankan secara langsung ke algoritma perencanaan lajur pemotongan Boustrophedon CPP dan modul evaluasi virtual geofencing pada Orange Pi 4 Pro. Bentuk fisik modul navigasi GNSS u-blox M10 diperlihatkan pada Gambar 3.6, sedangkan rincian spesifikasi teknisnya tercantum pada Tabel 3.4:



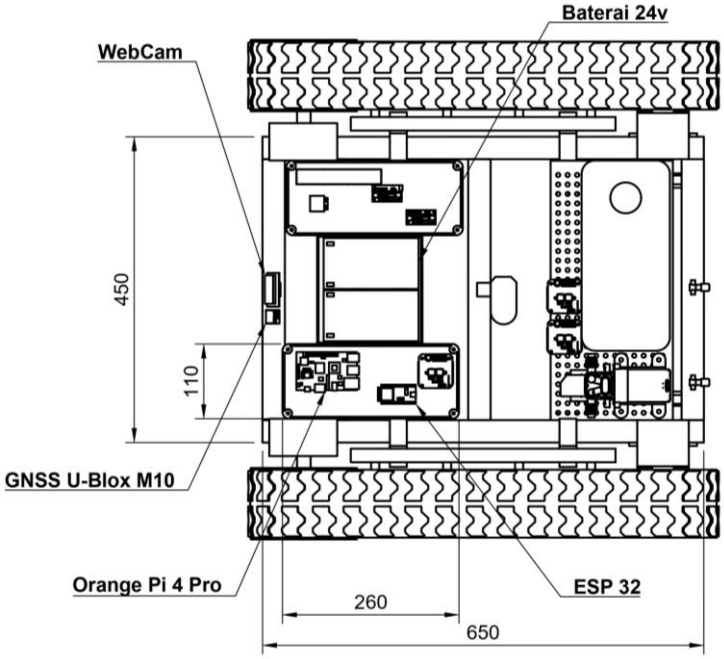
Gambar 3.6 Modul Navigasi GNSS u-blox M10

Tabel 3.4 Spesifikasi Teknis Modul Navigasi GNSS u-blox M10

Spesifikasi	Detail
Chipset Penerima	u-blox UBX-M10050-KB (Generasi Platform M10)
Konstelasi Didukung	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS
Akurasi Posisi Horisontal	1,5 meter CEP (Circular Error Probable)
Frekuensi Pembaruan	Hingga 10 Hz (dikonfigurasi pada 5 Hz)
Format Protokol Output	NMEA 0183 Standar Versi 4.10 & UBX Binary
Antarmuka Komunikasi	Serial Asynchronous UART (TX, RX)
Kecepatan Baud Rate	9600 bps (default) hingga 38400 bps terkonfigurasi
Waktu Tangkap Sinyal (TTFF)	Cold Start: 26 detik, Hot Start: 1 detik
Tipe Antena	Active Ceramic Patch Antenna (Gain 28 dB)
Catu Daya Operasional	DC 3.3 V - 5.0 V

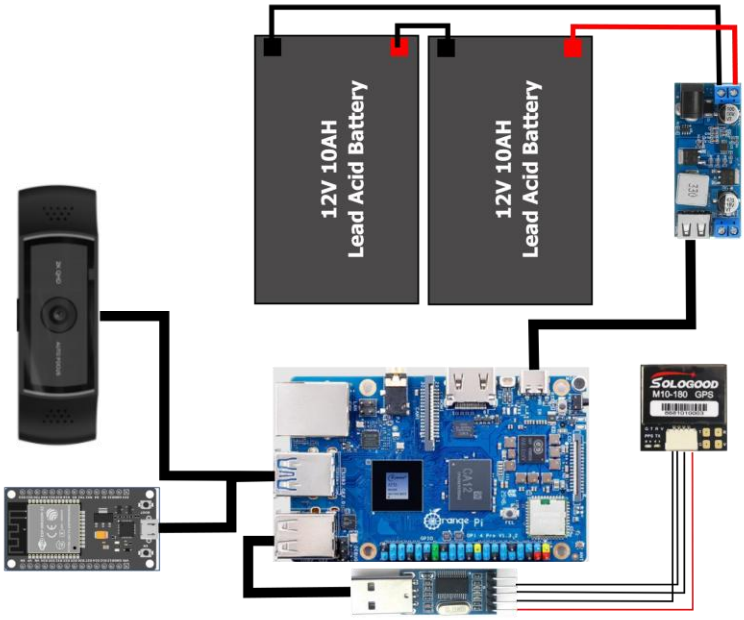
3.4.3 Desain Fisik dan Pengkabelan (Wiring)

Rancangan fisik prototipe dibangun menggunakan sasis rangka profil kotak berdimensi panjang 65 cm, lebar 45 cm, dan tinggi 35 cm. Tata letak komponen dibagi ke dalam dua zona kompartemen utama: kompartemen bawah dialokasikan untuk penempatan dua unit baterai aki (lead-acid battery) 12V 10Ah yang dirangkai secara seri (menghasilkan tegangan kerja sistem 24V dengan kapasitas 10Ah), motor penggerak wiper, dan mekanisme bilah pemotong rumput; sedangkan kompartemen atas dialokasikan sebagai baki sistem elektronika dan komputasi cerdas yang terlindung dari getaran mekanis, cipratan air, dan serpihan rumput. Dudukan kamera USB dipasang pada pilar sentral dengan ketinggian h = 35 cm dan sudut kemiringan pitch 20° menghadap ke bawah, sedangkan antena GNSS diposisikan pada titik tertinggi rangka agar bebas dari halangan elektromagnetik motor. Sketsa visual desain fisik prototipe diperlihatkan pada Gambar 3.7:



Gambar 3.7 Sketsa Desain Fisik dan Dimensi Prototipe Robot Mower

Integrasi perkabelan fisik antar-perangkat keras komputasi cerdas, modul penginderaan visual, mikrokontroler penggerak, modul navigasi satelit, dan sistem catu daya baterai digambarkan melalui diagram pengkabelan pada Gambar 3.8:



Gambar 3.8 Diagram Pengkabelan (Wiring) Sistem Komputasi Cerdas Prototipe

Untuk memastikan integrasi fisik yang aman, andal, dan modular antara unit pemrosesan cerdas Orange Pi 4 Pro, mikrokontroler ESP32, kamera visual, modul GNSS, dan suplai daya baterai, disusun matriks alokasi port fisik dan pengkabelan sebagaimana dipetakan pada Tabel 3.5:

Tabel 3.5 Alokasi Port dan Wiring

No	Port / Antarmuka	Tipe Konektor	Perangkat Terhubung
1	Port USB 3.0 Type-A	USB Type-A Male/Female	Kamera Webcam Jete W21
2	Port USB 2.0 Type-A	USB Type-A to Micro-USB	Mikrokontroler ESP32 (Port USB/UART)
3	Port USB 2.0 Type-A	USB Type-A to TTL Dongle	Modul GNSS u-blox M10 (SOLOGOOD M10-180)
4	Port Daya USB Type-C ("PWR IN")	USB Type-C Female	DC-DC Buck Converter

3.4.4 Spesifikasi Protokol Komunikasi Antar-Perangkat

Pertukaran data antar-komponen dalam sistem diatur menggunakan protokol komunikasi berbasis teks terstruktur untuk mempermudah proses penelusuran (debugging) dan memastikan integritas data, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.6:

Tabel 3.6 Format Spesifikasi Protokol Komunikasi Antar-Subsistem

Saluran Komunikasi	Media Fisik	Protokol / Port	Format Payload Data	Contoh Pesan Data
Orange Pi - ESP32	Kabel USB (Virtual COM)	UART Serial (115200 bps)	Karakter ASCII deterministik 1-byte	'F', 'B', 'L', 'R', 'A', 'D', 'E', 'S'
ESP32 - Orange Pi	Kabel USB (Virtual COM)	UART Serial (115200 bps)	String terstruktur prefix BAT: & NAV:	'BAT:85 (25.12V) STAT:MAJU...\n', 'NAV:LAT=-7.051,LON=110.412,HDG=85.2,SAT=12\n'
Android - Orange Pi	Nirkabel Wi-Fi (WLAN)	TCP Socket (Port 12345)	Perintah teks terstruktur	'MODE:AUTO\n', 'JOYSTICK_X:0.50,JOYSTICK_Y:0.80\n'
Orange Pi – Android	Nirkabel Wi-Fi (WLAN)	TCP Socket (Port 12345)	Telemetri teks terstruktur	'MODE:AUTO | RUMPUT:ADA | FPS:22.4 | ESP:...\n', 'TELEMETRI:LAT=...,LON=...\n'
Orange Pi – Android	Nirkabel Wi-Fi (WLAN)	HTTP Stream (Port 8080)	MJPEG multipart stream	Header Content-Type: image/jpeg + Binary JPEG data
GNSS u-blox M10 -> Orange Pi	Modul USB-to-TTL (Port USB 2.0)	Serial UART /dev/ttyUSB1 (9600 bps)	Kalimat standar NMEA 0183	'$GNRMC,083559.00,A,0703.1234,S,11024.5678,E,...\n', '$GNGGA,...\n'

Instruksi kendali gerak navigasi dari Orange Pi 4 Pro ke ESP32 dikirimkan melalui format 1 karakter ASCII agar data mudah dan cepat dieksekusi oleh ESP32

tanpa memerlukan proses pembacaan data yang rumit. Rincian aksi penggerak dan pemicu keputusan tercantum pada Tabel 3.7:

Tabel 3.7 Spesifikasi Protokol Perintah Kendali Gerak Serial UART

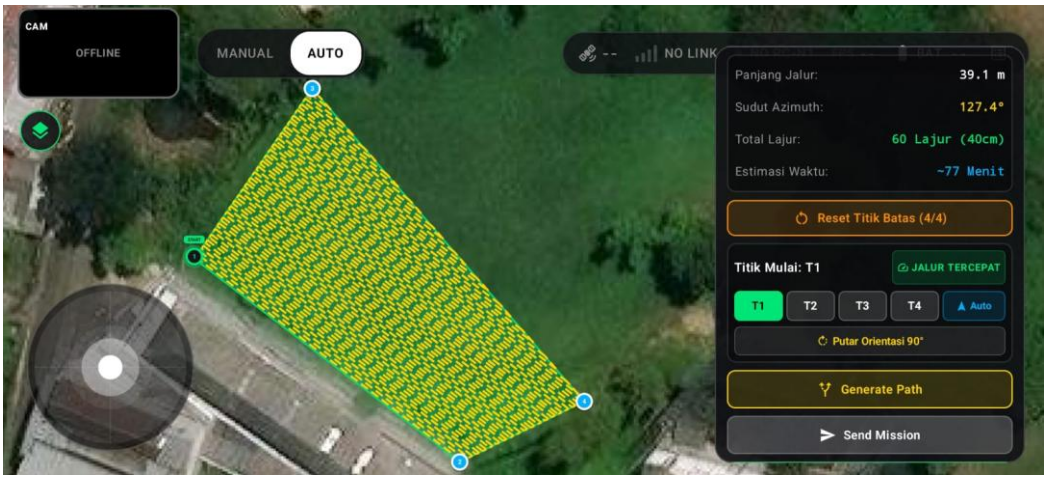
No	Karakter Serial	Perintah Gerak	Aksi Uji (Robot Mower)	Decision Trigger
1	**'F'**	Maju	Kedua roda bergerak maju lurus dengan kecepatan nominal (100% PWM)	Koridor trapesium ROI aman / lajur kerja Boustrophedon CPP bebas halangan
2	**'B'**	Mundur	Kedua roda berputar mundur dengan kecepatan teratur	Koreksi manuver saat robot terhimpit halangan atau keluar dari area kerja
3	**'L'**	Putar Kiri di Tempat	Roda kiri mundur, roda kanan maju (kecepatan putar diferensial)	Manuver U-Turn kiri pada akhir lajur
4	**'R'**	Putar Kanan di Tempat	Roda kiri maju, roda kanan mundur (kecepatan putar diferensial)	Manuver U-Turn kanan pada akhir lajur
5	**'A'**	Belok Kiri Maju	Roda kiri 40% PWM, roda kanan 100% PWM	Manuver menghindar deviasi kiri (rumput kiri lebih luas)
6	**'D'**	Belok Kanan Maju	Roda kiri 100% PWM, roda kanan 40% PWM	Manuver menghindar deviasi kanan (rumput kanan lebih luas)
7	**'E'**	U-Turn	Manuver putar balik cepat satu siklus penuh	Transisi pergantian lajur pemotongan Boustrophedon pada batas poligon geofencing
8	**'S'**	Emergency Stop	Rem aktif seketika, kedua motor penggerak berhenti total (0% PWM)	Deteksi manusia/hewan di Zona Merah (< 1 m), kehilangan heartbeat kamera, atau tombol darurat Android

3.4.5 Desain Antarmuka Aplikasi Android Controller

Antarmuka aplikasi Android Mower Controller dirancang menggunakan Android Studio sebagai pusat kendali dan supervisi operasional robot. Antarmuka terbagi menjadi dua mode utama: (a) Mode Manual yang menyediakan live video streaming dari kamera robot (HTTP port 8080), monitoring telemetri real-time (tegangan baterai, heading, FPS, status halangan via TCP port 12345), dan virtual joystick; serta (b) Mode Otomatis yang menampilkan peta satelit interaktif untuk menggambar batas area pemotongan (virtual geofencing) dan pemantauan lajur lintasan pemotongan Boustrophedon CPP, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.9:



(a)



(b)

Gambar 3.9 Antarmuka Aplikasi Android: (a) Mode Manual, Telemetri, dan Live Video Feed; (b) Mode Otomatis Virtual Geofencing dan Perencanaan Jalur

3.5 Teknik Uji Kelayakan Hasil

Pengujian kelayakan prototipe dilakukan melalui serangkaian prosedur eksperimental kuantitatif untuk memvalidasi kinerja sistem terhadap rumusan masalah dan tujuan yang telah ditetapkan. Pengujian dikelompokkan ke dalam empat kategori utama:

3.5.1 Pengujian Kinerja Inferensi Model YOLOv8n pada NPU

Pengujian ini bertujuan memvalidasi bahwa model YOLOv8n INT8 yang dijalankan pada NPU Allwinner A733 (3.0 TOPS) serta memenuhi syarat keandalan akurasi dan kecepatan real-time di lingkungan luar ruangan mencakup 7 kelas target halangan. Pengukuran parameter kinerja (Tabel 3.8) dilakukan melalui prosedur teknis:

• Akurasi Deteksi (mAP@0.5): Dihitung berdasarkan nilai presisi dan recall deteksi seluruh kelas pada IoU threshold 0,5 menggunakan skrip evaluasi mAP.

• Kecepatan NPU (FPS) & Durasi Inferensi per Frame (ms): Diukur secara presisi menggunakan pewaktuan time.perf_counter() di Python persis pada blok eksekusi komputasi forward tensor NPU (.nb) selama 500 frame kontinu untuk memperoleh nilai rata-rata, minimum, dan maksimum durasi inferensi komputasi NPU.
• Latensi Total Pipeline Vision (ms): Diukur secara end-to-end mencakup durasi capture citra kamera via OpenCV, pra-pemrosesan (resize 640×640), inferensi tensor NPU, penapisan kotak Non-Maximum Suppression (NMS), hingga kalkulasi zona ROI trapesium selesai sebelum pengiriman serial UART.
• Degradasi Akurasi Kuantisasi INT8 (%): Diukur dengan membandingkan selisih capaian mAP@0.5 antara model PyTorch 32-bit (best.pt) dengan model terkuantisasi 8-bit (best_uint8_a733.nb) pada NPU untuk memeriksa apakah penurunan akurasi akibat proses kuantisasi masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima (≤ 2,0%). Formula evaluasi degradasi dihitung melalui selisih: ΔDegradasi = mAP@0.5(FP32) - mAP@0.5(INT8).

Tabel 3.8 Parameter Pengujian Kinerja Inferensi Model YOLOv8n NPU

No	Parameter Uji	Metode Pengukuran / Instrumen	Target Capaian	Toleransi Keberhasilan
1	Akurasi Deteksi Keseluruhan (mAP@0.5)	Evaluasi pada dataset uji 7 kelas via skrip evaluasi mAP	>= 85,0%	Minimum 80,0%
2	Kecepatan Inferensi NPU (FPS)	Rata-rata frekuensi frame per detik selama 500 frame kontinu	>= 20,0 FPS	Minimum 16,0 FPS
3	Durasi Inferensi per Frame	Pengukuran waktu eksekusi fungsi npy.inference() (ms)	<= 45,0 ms	Maksimum 55,0 ms
4	Latensi Total Pipeline Vision	Durasi capture citra + inferensi NPU + NMS + kalkulasi ROI	<= 80,0 ms	Maksimum 100,0 ms
5	Degradasi Akurasi Kuantisasi INT8	Perbandingan mAP@0.5 model FP32 (PyTorch) vs INT8 (NPU .nb)	<= 2,0%	Maksimum penurunan 5%

3.5.2 Pengujian Respons Sistem Penghindaran Halangan

Pengujian ini mengevaluasi keandalan robot dalam merespons kehadiran halangan fisik di lapangan rumput nyata pada berbagai variasi jarak dan jenis objek, dengan skenario pengujian sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.9:

Tabel 3.9 Parameter Pengujian Respons Sistem Penghindaran Halangan

No	Skenario Uji Halangan	Variabel Pengujian	Jumlah Uji	Target Capaian Kuantitatif
1	Deteksi Manusia / Hewan (Safety Stop)	Objek bergerak memasuki Zona Merah (< 1 m)	20 kali uji	Keberhasilan pengereman darurat 100%

2	Penghindaran Halangan Statis (Pohon/Batu)	Objek diam di koridor tengah lajur potong	20 kali uji	Keberhasilan manuver Menghindar >= 80%
3	Latensi Respons Sistem Menyeluruh	Durasi waktu dari objek terdeteksi hingga motor roda bereaksi	30 kali ukur	Rata-rata latensi <= 100 ms
4	Failsafe Kamera Terhalang (Blind Mode)	Penutupan lensa kamera secara sengaja saat robot melaju	10 kali uji	Robot berhenti total dalam waktu <= 2,0 detik

3.5.3 Pengujian Navigasi Coverage Path Planning

Pengujian navigasi bertujuan mengukur efektivitas pola pemotongan Boustrophedon dalam mencakup seluruh permukaan area kerja yang dibatasi secara virtual oleh koordinat poligon GPS, dengan parameter uji sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.10:

Tabel 3.10 Parameter Pengujian Navigasi Coverage Path Planning

No	Parameter Uji Navigasi CPP	Bentuk Area Uji	Metode Pengukuran	Target Capaian
1	Persentase Cakupan Area (Coverage %)	Persegi Panjang (20x10 m)	Rasio jejak pemotongan GPS terhadap luas poligon	>= 80,0%
2	Keberhasilan Manuver Putar Balik (Berpindah Lajur)	Ujung setiap lajur Pemotongan	Keberhasilan transisi haluan 180° tanpa keluar poligon	≥ 90,0%

3.5.4 Matriks Indikator Capaian Kuantitatif Prototipe Keseluruhan

Keberhasilan perancangan prototipe robot pemotong rumput otonom diukur berdasarkan matriks indikator capaian kuantitatif terpadu yang memadukan parameter kinerja komputasi kecerdasan buatan, akurasi estimasi jarak, efisiensi perencanaan lintasan, dan keselamatan operasional sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Matriks Indikator Capaian Kuantitatif Prototipe Keseluruhan

No	Dimensi Pengujian	Indikator Capaian Kuantitatif	Target Luaran	Toleransi Minimal
1	Kinerja Deteksi AI (NPU)	Akurasi mAP@0.5 pada 7 kelas halangan	≥ 85,0%	Minimum 80,0%
2	Kecepatan Komputasi Edge	Frame rate inferensi YOLOv8n INT8 di NPU	≥ 20,0 FPS	Minimum 16,0 FPS
3	Efisiensi Navigasi CPP	Persentase cakupan area (area coverage ratio)	≥ 80,0%	Minimum 80,0%
4	Kemampuan Pengereman	Tingkat keberhasilan pengereman Zona Merah	100,0%	Minimum 100,0%
5	Keberhasilan Menghindar	Tingkat keberhasilan manuver halangan statis	≥ 85,0%	Minimum 80,0%

DAFTAR PUSTAKA

Abioye, A. E., Larbi, P. A., & Hadwan, A. A. K. (2024). Deep learning guided variable rate robotic sprayer prototype. Smart Agricultural Technology, 9, Article 100540, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100540

Adewumi, I. O., Ilori, T. A., & Adebisi, J. A. (2025). Edge AI-powered obstacle detection and efficiency analysis in autonomous lawn mowers for smart agriculture. London Journal of Physics, 2(2), 1–15.

Bähnemann, R., Lawrance, N., Chung, J. J., Pantic, M., Siegwart, R., & Nieto, J. (2019). Revisiting Boustrophedon coverage path planning as a Generalized Traveling Salesman Problem. In Field and Service Robotics (Springer Proceedings in Advanced Robotics, Vol. 16, pp. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9460-1_1

Burkus, E., Lestyán, B., Dénes-Fazakas, L., & Eigner, G. (2024). Quantized vs. full-precision YOLO models on edge devices: A performance benchmark for real-time license plate detection in smart parking systems. Sensors, 26(16), Article 5034, 1–21. https://doi.org/10.3390/s26165034

Cantero, D., Esnaola-Gonzalez, I., Miguel-Alonso, J., & Jauregi, E. (2022). Benchmarking object detection deep learning models in embedded devices. Sensors, 22(11), Article 4205, 1–21. https://doi.org/10.3390/s22114205

Haider, M. H., Ali, H., Shah, S. S. A., Zheng, D., & He, B. (2025). Outdoor autonomy for mobile robots: The evolution of sensing, perception, and navigation with robotic mowers as a case study. SSRN Electronic Journal, Article 6220131, 1–28. https://doi.org/10.2139/ssrn.6220131

Husqvarna. (2024). Husqvarna Automower® 450X NERA: Commercial robotic mower with EPOS satellite navigation. Husqvarna AB. https://www.husqvarna.com/uk/robotic-lawn-mowers/automower-450x-nera/

Inoue, K., Kaizu, Y., Igarashi, S., & Imou, K. (2019). The development of autonomous navigation and obstacle avoidance for a robotic mower using machine vision technique. IFAC-PapersOnLine, 52(30), 173–177. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.517

Jonnarth, A., Zhao, J., & Felsberg, M. (2024). Learning coverage paths in unknown environments with deep reinforcement learning. In Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning (PMLR, Vol. 235, pp. 1–16).

Jonnarth, A., Johansson, O., Zhao, J., & Felsberg, M. (2025). Sim-to-real transfer of deep reinforcement learning agents for online coverage path planning. IEEE Access, 13, Article 3581035, 1–14. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3581035

Kanade, P., Kumar, D., Ghatwal, S., Kanade, S., & Sathish, T. (2025). AI-powered robotic lawn mower with autonomous navigation and control using Raspberry Pi. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 12(9), 175–183.

Kosri, T., Seekhamharn, T., Phoonsrichaiyasit, P., Khungpo, P., Sirisuk, P., & Wiangtong, T. (2025). A low-cost autonomous lawn mower with AI-based obstacle avoidance and GPS guidance system. Engineering and Technology Horizon, 42(3), Article 420305, 1–12.

Liu, G., Jin, C., Ni, Y., Yang, T., & Liu, Z. (2025). UCIW-YOLO: Multi-category and high-precision obstacle detection model for agricultural machinery in unstructured farmland environments. Expert Systems with Applications, 294, Article 128686, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128686

Liu, S., Zha, J., Sun, J., Li, Z., & Wang, G. (2023). EdgeYOLO: An edge-real-time object detector. arXiv preprint arXiv:2302.07483, 1–11. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07483

Mammotion. (2024). LUBA 3 AWD robotic mower: Perimeter wire-free autonomous mower with 3D vision and RTK-GNSS. Mammotion Tech. https://us.mammotion.com/products/luba-3-awd-robot-lawn-mower

Nikunj, S., Dey, U., & Nishimiya, K. (2025). End-to-end framework for robot lawnmower coverage path planning using cellular decomposition. In Proceedings of the IEEE ICRA Workshop on Field Robotics (pp. 1–8). IEEE.

Rahimi Azghadi, M., Olsen, A., Wood, J., Saleh, A., Calvert, B., Granshaw, T., Fillols, E., & Philippa, B. (2024). Precise robotic weed spot-spraying for reduced herbicide usage and improved environmental outcomes: A real-world case study. arXiv preprint arXiv:2401.13931, 1–12. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.13931

Rey, L., Bernardos, A. M., Dobrzycki, A. D., Carramiñana, D., Bergesio, L., Besada, J. A., & Casar, J. R. (2025). A performance analysis of You Only Look Once models for deployment on constrained computational edge devices in drone applications. Electronics, 14(3), Article 638, 1–24. https://doi.org/10.3390/electronics14030638

Sathyamoorthy, A. J., Weerakoon, K., Guan, T., Liang, J., & Manocha, D. (2022). TerraPN: Unstructured terrain navigation using online self-supervised learning. In 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 7197–7204). IEEE. https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981942

Segway Navimow. (2024). Navimow i105 robotic lawn mower with EFLS 2.0 AI-assisted vision positioning. Segway Inc. https://navimow.com/products/navimow-i105

Syed, T. N., Zhou, J., Marinello, F., Lakhiar, I. A., Chandio, F. A., Rottok, L. T., Zheng, Y., & Gamechu, T. T. (2025). Definition of a reference standard for performance evaluation of autonomous vehicles real-time obstacle detection and distance estimation in complex environments. Computers and Electronics in Agriculture, 232, Article 110143, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110143

Syed, T. N., Zhou, J., Lakhiar, I. A., Marinello, F., Gemechu, T. T., Rottok, L. T., & Jiang, Z. (2025). Enhancing autonomous orchard navigation: A real-time convolutional neural network-based obstacle classification system for distinguishing 'real' and 'fake' obstacles in agricultural robotics. Agriculture, 15(8), Article 827, 1–18. https://doi.org/10.3390/agriculture15080827

Wang, H., Dang, Z., Cui, M., Shi, H., Qu, Y., Ye, H., Zhao, J., & Wu, D. (2025). ADG-YOLO: A lightweight and efficient framework for real-time UAV target detection and ranging. Drones, 9(10), Article 707, 1–23. https://doi.org/10.3390/drones9100707

Zhang, Y., Mu, Z., Tian, K., Zhang, B., & Huang, J. (2025). Design and research on a reed field obstacle detection and safety warning system based on improved YOLOv8n. Agronomy, 15(5), Article 1158, 1–19. https://doi.org/10.3390/agronomy15051158

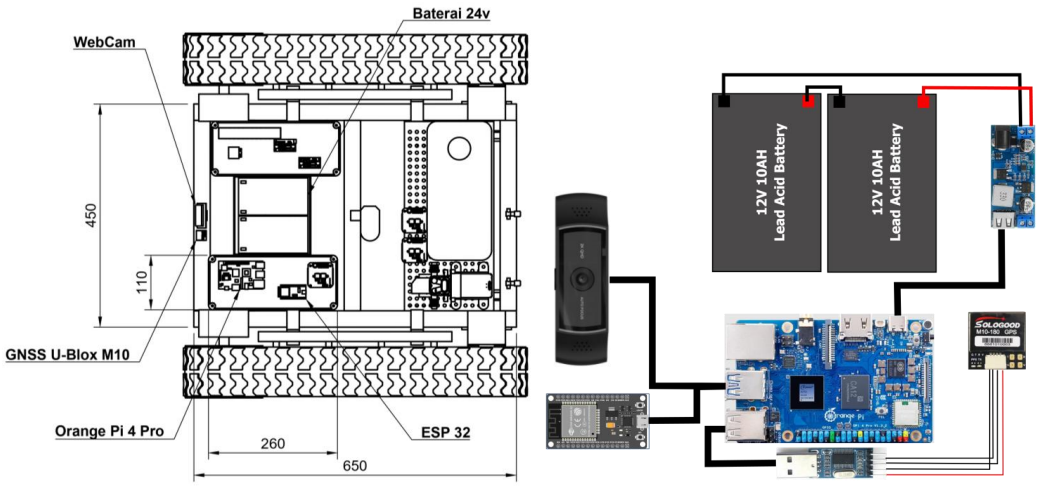
Zhou, X., Chen, W., & Wei, X. (2024). Improved field obstacle detection algorithm based on YOLOv8. Agriculture, 14(12), Article 2263, 1–19. https://doi.org/10.3390/agriculture14122263

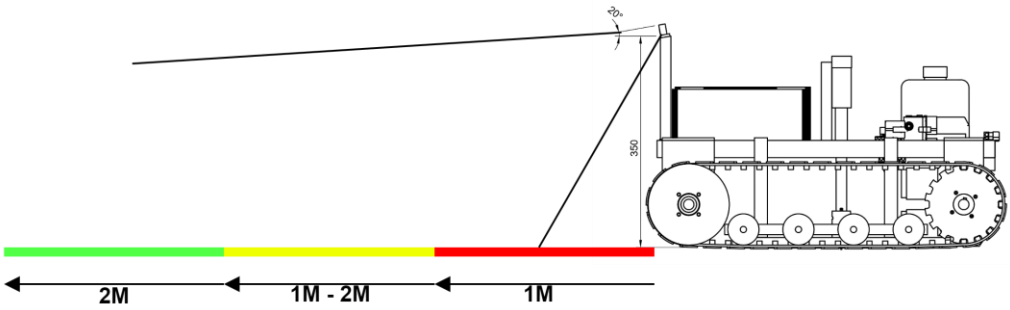
LAMPIRAN

Lampiran 1: Biodata Penulis

Nama Lengkap	:	Muhammad Nabel Al Fayyed
Nomor Induk Mahasiswa	:	2305110037
Tempat, Tanggal Lahir	:	Ngawi, 17 Mei 2004
Program Studi	:	Teknik Komputer (S1)
Fakultas	:	Fakultas Teknik
Perguruan Tinggi	:	Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Alamat (Email)	:	Muhammadnabel70@students.unnes.ac.id
Bidang Minat Penelitian	:	Embedded Systems, Edge AI, Robotics, Computer Vision, GIS, Android Developer, Networking

Lampiran 2: Draf Karya / Sketsa / Lembar Kerja Prototipe





Lampiran 3: Surat Keputusan / Lembar Penugasan Dosen Pembimbing

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK

Gedung Dekanat, Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229.
Telepon: 0248508101
Laman: http://ft.unnes.ac.id, surel: ft@mail.unnes.ac.id

KEPUTUSAN
DEKAN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
Nomor: B/948/UN37.1.5/TD.06/2026
Tentang
PENETAPAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI/TUGAS AKHIR SEMESTER GASAL/GENAP
TAHUN AKADEMIK 2026/2027

Menimbang : Bahwa untuk memperlancar mahasiswa Prodi Teknik Komputer, S1 Fakultas Teknik membuat Skripsi/Tugas Akhir, maka perlu menetapkan Dosen-dosen Prodi Teknik Komputer, S1 Fakultas Teknik UNNES untuk menjadi pembimbing.

Mengingat :
1. Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional;
2. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi;
3. Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2022 tentang Perguruan Tinggi Negeri Badan Hukum Universitas Negeri Semarang;
4. Peraturan Rektor Universitas Negeri Semarang Nomor 88 Tahun 2024 tentang Panduan Tugas Akhir Sarjana dan Diploma Universitas Negeri Semarang;

Menimbang : Usulan Koordinator Prodi Teknik Komputer, S1 Tanggal 1 September 2026

MEMUTUSKAN

Menetapkan :

PERTAMA : Menunjuk dan menugaskan kepada:

Nama	: Dr. Feddy Setio Pribadi, S.Pd., M.T.
NIP	: 197808222003121002
Pangkat/Golongan	: Penata Tk. I - III/d
Jabatan Akademik	: Lektor

Sebagai Pembimbing

Untuk membimbing mahasiswa penyusun skripsi/Tugas Akhir :

Nama	: MUHAMMAD NABEL AL FAYYED
NIM	: 2305110037
Prodi	: Teknik Komputer, S1
Topik	: Perancangan dan Implementasi Robot Pemotong Rumput Otonom dengan Sistem Navigasi Cerdas untuk Pemeliharaan Halaman Rumah

KEDUA : Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

Tembusan
1. WD Bid. Akademik dan Mawa
2. Ketua Prodi
3. Pertinggal

2305110037

DITETAPKAN DI : SEMARANG
PADA TANGGAL : 1 September 2026
DEKAN

Prof. Dr. Wirawan Sumbodo, M.T.
NIP 196601051990021002

...:: FM-03-AKD-24/Rev. 00 ::...

Ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik (BSrE), BSSN.