

LAPORAN TUGAS AKHIR

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM *SIMULTANEOUS
LOCALIZATION AND MAPPING* (SLAM) DAN NAVIGASI GLOBAL BERBASIS
LIDAR 2D UNTUK *AUTOMATED GUIDED VEHICLE* (AGV) *FORKLIFT*

Diajukan oleh:

Ernanta Fidel Mahardhika

40040322650058

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T.

NIP. 199505292024061001

Semarang, 25 September 2026

Mengetahui,

Ketua

Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng

NIP. 197009161998021001

Semarang, 25 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM *SIMULTANEOUS
LOCALIZATION AND MAPPING* (SLAM) DAN NAVIGASI GLOBAL
BERBASIS LIDAR 2D UNTUK *AUTOMATED GUIDED VEHICLE* (AGV)
*FORKLIFT***

Disusun oleh:

Ernanta Fidel Mahardhika

40040322650058

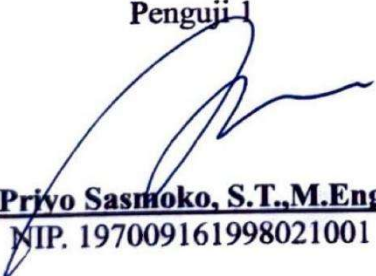
Telah diajukan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji pada tanggal

25 September 2026

Tim Penguji,
Pembimbing


Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T.
NIP. 199505292024061001

Penguji 1


Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng
NIP. 197009161998021001

Penguji 2


Ari Bawono Putranto, S.Si., M.Si.
NIP. 198501252019031007

Mengetahui,
Ketua Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri
Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro


Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng
NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ernanta Fidel Mahardhika
NIM : 40040322650058
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM
SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING
(SLAM) DAN NAVIGASI GLOBAL BERBASIS
LIDAR 2D UNTUK *AUTOMATED GUIDED*
VEHICLE (AGV) FORKLIFT

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dirujuk dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar Pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No. 17 tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 25 September 2026

Yang membuat pernyataan,



Ernanta Fidel Mahardhika

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perancangan dan Implementasi Sistem *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) dan Navigasi Global Berbasis LiDAR 2D untuk *Automated Guided Vehicle* (AGV) *Forklift*”. Tersusunnya laporan ini tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

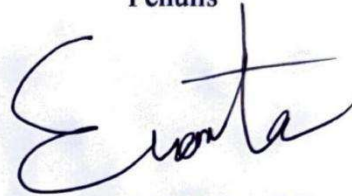
1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, kesehatan, serta kemudahan sehingga laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
2. Kedua Orang Tua yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, dan motivasi selama proses perkuliahan hingga penyelesaian Tugas Akhir.
3. Prof Dr. Ir. Budiyo, M.Si., selaku Dekan Sekolah Vokasi.
4. Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
5. Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta dukungan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
6. Ikbal Ahnaf Khairullah dan Nadia Nur Rufaidhah selaku rekan satu kelompok yang telah bekerja sama, berbagi ide, berdiskusi, serta saling membantu selama proses perancangan, pengujian, hingga penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman ODGJ.T, yang telah kebersamai penulis sejak awal perkuliahan hingga saat ini dan menjadi bagian dari berbagai pengalaman serta cerita selama menjalani masa perkuliahan. Semoga setiap langkah yang ditempuh setelah menyelesaikan pendidikan dapat membawa kita menuju jalan masing-masing tanpa menghilangkan persahabatan dan kebersamaan yang telah terjalin.
8. Teman-teman Satnayaka, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama menempuh pendidikan, mulai dari kegiatan perkuliahan, praktikum, pengerjaan tugas, hingga proses penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan dan penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir

ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan sistem navigasi pada *Automated Guided Vehicle (AGV)*.

Semarang, 25 September 2026

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ernanta', with a stylized flourish at the end.

Ernanta Fidel Mahardhika

DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR	i
HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xii
INTISARI	xviii
ABSTRACT	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Tugas Akhir	4
1.4. Manfaat Tugas Akhir	4
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Tugas Akhir	6
BAB II DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.2. <i>Automated Guided Vehicle</i> (AGV)	11
2.3. NVIDIA Jetson Orin Nano	12
2.4. LiDAR 2D (<i>Light Detection and Ranging</i>)	15
2.4.1. Evaluasi Akurasi dan Presisi Data LiDAR	18
2.4.2. Pengaruh Getaran dan Aktuator terhadap LiDAR	21

2.5.	<i>Inertial Measurement Unit (IMU)</i>	21
2.6.	<i>Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)</i>	26
2.7.	<i>Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL)</i>	29
2.8.	<i>Odometri</i>	30
2.9.	<i>Global Path Planning</i>	32
2.10.	<i>Hybrid A*</i>	33
2.11.	<i>Reeds-Shepp</i>	35
2.12.	<i>Navigation2 (Nav2)</i>	36
2.13.	<i>Costmap 2D</i>	38
2.14.	<i>Model Predictive Path Integral (MPPI)</i>	38
2.15.	<i>Collision Monitor</i>	39
2.16.	<i>Robot Operating System 2 (ROS 2)</i>	40
BAB III METODE PENELITIAN		43
3.1	Diagram Blok dan Flowchart	43
3.1.1.	Diagram Blok Sistem	43
3.1.2.	Flowchart Sistem Keseluruhan	45
3.1.3.	Flowchart Sistem Navigasi	47
3.2.	Gambar 3D	49
3.3.	Spesifikasi dan Fitur Alat	51
3.4.	Teknik Fabrikasi	53
3.4.1.	Pembuatan Desain PCB	53
3.4.2.	Pembuatan Rangkaian Elektrik	55
3.5.	Akuisisi dan Integrasi Sensor Navigasi	57
3.5.1.	Akuisisi dan Filtering Data LiDAR 2D	57
3.5.2.	Akuisisi Data IMU	59

3.5.3.	Akuisisi dan Integrasi Odometri Kecepatan <i>Longitudinal</i> (v_x).....	60
3.5.4.	Sinkronisasi, Freshness, dan Kesehatan Sensor	62
3.6.	Perancangan Sistem SLAM.....	63
3.6.1.	Pencocokan Pemindaian dan Pembaruan Peta	63
3.6.2.	Penyimpanan dan Pemilihan Peta.....	66
3.6.3.	Strategi Pembentukan dan Validasi Peta.....	66
3.7.	Perancangan Lokalisasi AMCL	67
3.7.1	Particle Filter dan Parameter AMCL	67
3.7.2	Initial Pose dan Validasi Konvergensi	69
3.7.3	Kriteria Kesiapan Lokalisasi	70
3.8.	Perancangan <i>Navigation2</i> (Nav2).....	70
3.8.1	Global Costmap dan Local Costmap	70
3.8.2	Perencanaan Jalur Menggunakan SmacPlannerHybrid / Hybrid A*	72
3.8.3	Model Reeds-Shepp dan Radius Belok	73
3.8.4	MPPI Controller Model Ackermann.....	74
3.8.5	Velocity Smoother dan Collision Monitor.....	75
3.8.6	Alur Goal Pose dan Eksekusi Navigasi	75
3.9.	Parameter Kinematika dan Geometri AGV	76
3.9.1	Footprint dan Batas Gerak	77
3.9.2	Validasi Radius Belok dan Footprint	78
3.10.	Metode Pengujian dan Pengambilan Data.....	78
3.10.1	Pengujian Data Raw Sensor	78
3.10.2	Pengujian SLAM	79
3.10.3	Pengujian AMCL.....	80
3.10.4	Pengujian SmacPlannerHybrid dan MPPI.....	81

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA.....	83
4.1. Pengujian Data Raw Sensor	83
4.1.1. Pengujian Data Raw LiDAR	83
4.1.2. Pengujian Data Raw IMU.....	87
4.1.3. Analisis Sinkronisasi LiDAR dan IMU.....	90
4.2. Pengujian SLAM.....	92
4.2.1. Hasil Mapping 1	92
4.2.2. Hasil Mapping 2	94
4.2.3. Hasil Mapping 3	95
4.2.4. <i>Loop Closure, Drift</i> , dan Kualitas Struktur Map	97
4.3. Pengujian AMCL.....	99
4.3.1. Akurasi Pose Statis AMCL.....	99
4.3.2. Waktu Konvergensi Initial Pose	100
4.4. Pengujian dan Analisis Navigasi Global AGV	102
4.4.1. Validasi <i>Global Costmap</i> dan <i>Hybrid A*</i>	102
4.4.2. Pengujian <i>Smac Planner Hybrid</i>	104
BAB V PENUTUP	107
5.1. Kesimpulan.....	107
5.2. Saran.....	108
DAFTAR PUSTAKA	109

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka	7
Tabel 2. 2 Spesifikasi Jetson Orin Nano	14
Tabel 2. 3 Spesifikasi YDLiDAR.....	17
Tabel 2. 4 Spesifikasi Yahboom IMU 10-Axis	23
Tabel 3. 1 Spesifikasi Komponen Sistem AGV	51
Tabel 3. 2 Sumber masukan EKF pada mode navigasi.....	62
Tabel 3. 3 Parameter Geometri dan Batas Gerak AGV	77
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Data Raw LiDAR	83
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Data Raw Yaw IMU.....	88
Tabel 4. 3 Hasil Evaluasi Loop Closure, Error Yaw, dan Pergeseran Koridor pada Pengujian Mapping.....	97
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Akurasi Pose Statis AMCL	99
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Waktu Konvergensi Initial Pose.....	101
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian SmacPlannerHybrid pada Variasi Start-Goal.....	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Automated Guided Vehicle (AGV)</i> [4]	12
Gambar 2. 2 Jetson Orin Nano [12]	14
Gambar 2. 3 Sensor YDLiDAR T-Mini-Plus 25 [14]	17
Gambar 2. 4 Yahboom IMU 10-Axis [17]	22
Gambar 2. 5 Pengujian AGV menggunakan SLAM.....	27
Gambar 2. 6 <i>Global Path Planning</i> [21].	32
Gambar 2. 7 <i>Publisher Subscriber</i> ROS 2 [28]	41
Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem Keseluruhan AGV.....	44
Gambar 3. 2 Flowchart Sistem Keseluruhan	46
Gambar 3. 3 Flowchart Sistem Navigasi.....	48
Gambar 3. 4 Desain 3D AGV Forklift	50
Gambar 3. 5 Desain PCB AGV.....	54
Gambar 3. 6 Rangkaian Elektrik AGV Forklift	56
Gambar 4. 1 Perbandingan Jarak Referensi dan Mean Raw LiDAR.....	85
Gambar 4. 2 Error Mean, MAE, dan RMSE Raw LiDAR	86
Gambar 4. 3 Perbandingan Sudut Referensi dan Raw Yaw IMU	89
Gambar 4. 4 Error, MAE, dan RMSE Raw Yaw IMU.....	90
Gambar 4. 5 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 1.....	93
Gambar 4. 6 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 2.....	94
Gambar 4. 7 Hasil Pemetaan Lingkungan pada Pengujian Mapping 3	96
Gambar 4. 8 (A) Tampilan Global Inflation dan Local Costmap pada Peta Navigasi (B) Kondisi Fisik AGV Forklift.....	103
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian SmacPlannerHybrid pada Variasi Start-Goal.....	105

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Definisi
2D	Dua dimensi
3D	Tiga dimensi
ABI	Kanal A, B, dan Index pada encoder inkremental
AGV	Automated Guided Vehicle
AI	Artificial Intelligence
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
ARM	Arsitektur prosesor Arm
ASL-SLAM	LiDAR SLAM dengan loop closure berbasis activity semantics
BLDC	Brushless Direct Current
bps	Bits per second
BT	Behavior Tree
CC	Constant Current
CDC	Communications Device Class pada USB
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
DDS	Data Distribution Service
DIR	Direction; sinyal arah gerak
DWA	Dynamic Window Approach
DWB	Dynamic Window Based; digunakan pada DWBLocalPlanner
EKF	Extended Kalman Filter
eRPM	Electrical Revolutions per Minute
ESC	Electronic Speed Controller
E-Stop	Emergency Stop
F-LOAM	Fast LiDAR Odometry and Mapping
FSM	Finite State Machine
GND	Ground; acuan tegangan rangkaian
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPU	Graphics Processing Unit
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
IMU	Inertial Measurement Unit

Singkatan	Definisi
IoT	Internet of Things
LiDAR	Light Detection and Ranging
LiFePO ₄	Lithium Iron Phosphate; litium besi fosfat
LPDDR5	Low-Power Double Data Rate 5
MAE	Mean Absolute Error
MEMS	Microelectromechanical Systems
microSD	Micro Secure Digital
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MPC	Model Predictive Control
MPPI	Model Predictive Path Integral
Nav2	Navigation2
NRST	Pin reset aktif rendah pada mikrokontroler
NVMe	Non-Volatile Memory Express
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PGM	Portable Graymap
PWM	Pulse Width Modulation
QoS	Quality of Service
RAM	Random Access Memory
RMSE	Root Mean Square Error
ROS	Robot Operating System
ROS 2	Robot Operating System 2
RRT	Rapidly-exploring Random Tree
SBC	Single-Board Computer
SDK	Software Development Kit
SHA256	Secure Hash Algorithm 256-bit
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPI	Serial Peripheral Interface
SR	Success Rate
SSD	Solid-State Drive
STM32	Mikrokontroler 32-bit dari STMicroelectronics
TEB	Timed Elastic Band
TF	Transform; transformasi antarkerangka koordinat pada ROS
TFT	Thin-Film Transistor
ToF	Time of Flight
TOPS	Tera Operations per Second

Singkatan	Definisi
TUM	Technische Universität München
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UNP	Profil baja kanal U yang digunakan pada rangka
USB	Universal Serial Bus
VESC	Vedder Electronic Speed Controller
YAML	YAML Ain't Markup Language
YOLO	You Only Look Once

Simbol	Definisi	Satuan
d	Jarak antara sensor LiDAR dan objek	m
c	Kecepatan cahaya di udara	m/s
Δt	Waktu tempuh pulsa laser pergi dan kembali	s
r	Jarak hasil pengukuran LiDAR terhadap objek	m
x, y	Koordinat titik hasil pemindaian atau posisi robot pada bidang dua dimensi, sesuai kerangka acuan	m
z	Koordinat pada sumbu vertikal dalam susunan keadaan EKF	m
θ	Sudut arah pemindaian LiDAR; pada pose robot menyatakan orientasi kendaraan	rad atau °
i	Indeks sampel pengukuran atau titik penyusun jalur	—
n	Jumlah sampel pengukuran	—
N	Jumlah titik penyusun jalur; pada keterangan Persamaan (2.11) digunakan untuk jumlah sampel	—
d_i	Jarak hasil pembacaan LiDAR pada sampel ke- i	m
d_{ref}	Jarak referensi hasil pengukuran langsung	m
e_i	Error pengukuran jarak pada sampel ke- i	m
x_i	Nilai sampel pengukuran pada Persamaan (2.7)	m
$\bar{x}$	Nilai rata-rata seluruh sampel pengukuran	m
σ_x	Simpangan baku sampel pengukuran jarak	m
MAE	Rata-rata error absolut jarak atau posisi; untuk orientasi mengikuti satuan sudut	m, rad, °
$RMSE$	Akar rata-rata kuadrat error jarak atau posisi; untuk orientasi mengikuti satuan sudut	m, rad, °
ψ	Sudut yaw yang dihitung dari quaternion orientasi IMU	rad atau °
q_w	Komponen skalar quaternion orientasi	—
q_x, q_y, q_z	Komponen vektor quaternion orientasi	—
ψ_i	Yaw hasil pengukuran IMU pada sampel ke- i	rad atau °
$\psi_{ref,i}$	Yaw referensi pada sampel ke- i	rad atau °
$e_{\psi,i}$	Error yaw pada sampel ke- i setelah pembatasan selisih sudut	rad atau °
MAE_{ψ}	Rata-rata error absolut orientasi yaw	rad atau °
$RMSE_{\psi}$	Akar rata-rata kuadrat error orientasi yaw	rad atau °
$atan2$	Fungsi arkus tangen dua argumen yang mempertahankan kuadran sudut	rad

Simbol	Definisi	Satuan
$wrap$	Fungsi pembatas selisih sudut ke rentang $-\pi$ sampai π	rad
π	Konstanta pi, sekitar 3,14159	—
e_{loop}	Error posisi akhir terhadap posisi awal setelah lintasan tertutup	m
x_0, y_0	Koordinat posisi awal lintasan tertutup	m
x_f, y_f	Koordinat posisi akhir setelah kembali ke titik awal	m
x_i, y_i	Koordinat hasil estimasi AMCL atau titik jalur ke-i, sesuai konteks persamaan	m
$x_{ref,i}, y_{ref,i}$	Koordinat posisi referensi pada sampel ke-i	m
$e_{p,i}; e_p$	Error posisi hasil lokalisasi; e_p digunakan pada Tabel 4.4	m
e_{xy}	Error posisi pada waktu pengamatan konvergensi	m
$e_\theta; e_\theta $	Error orientasi dan nilai absolutnya	rad atau °
t, τ	Waktu pengamatan dan variabel waktu dalam selang pengamatan	s
τ_{xy}	Batas toleransi error posisi	m
τ_θ	Batas toleransi error orientasi	rad
ΔT	Lama selang pengamatan kestabilan lokalisasi	s
t_{conv}	Waktu konvergensi lokalisasi	s
σ_{xy}	Simpangan posisi hasil pengujian pose statis AMCL	m
cov_x, cov_y	Komponen diagonal kovarians posisi pada sumbu x dan y	m ²
cov_yaw	Komponen diagonal kovarians orientasi yaw	rad ²
L_{path}	Panjang total jalur global	m
x_{i+1}, y_{i+1}	Koordinat titik jalur setelah titik ke-i	m
$t_{request}$	Waktu permintaan perencanaan jalur dikirimkan	s
t_{path}	Waktu jalur hasil perencanaan tersedia	s
t_{plan}	Durasi perencanaan jalur; pada Tabel 4.6 disajikan dalam milidetik	s atau ms
R	Radius kelengkungan lintasan	m
R_{min}	Radius belok minimum yang dicatat pada pengujian jalur	m
κ	Kelengkungan lintasan pada titik yang ditinjau	m ⁻¹
t_{start}	Waktu eksekusi tujuan navigasi dimulai	s
$t_{goal\ reached}$	Waktu tujuan navigasi dinyatakan tercapai	s

Simbol	Definisi	Satuan
t_{nav}	Durasi total navigasi	s
$N_{berhasil}$	Jumlah percobaan yang berhasil sesuai kriteria pengujian	—
N_{total}	Jumlah seluruh percobaan pada pengujian terkait	—
SR	Tingkat keberhasilan pengujian	%
v	Kecepatan linear kendaraan yang diperintahkan pengendali	m/s
v_x, v_y, v_z	Komponen kecepatan linear; v_x menyatakan kecepatan longitudinal kendaraan	m/s
ω	Kecepatan sudut atau laju yaw kendaraan	rad/s
$roll, pitch, yaw$	Orientasi rotasi terhadap sumbu x, y, dan z	rad atau °
$v_{roll}, v_{pitch}, v_{yaw}$	Komponen laju perubahan roll, pitch, dan yaw dalam susunan keadaan EKF	rad/s
a_x, a_y, a_z	Komponen percepatan linear pada sumbu x, y, dan z	m/s ²
Vbat	Label jalur tegangan baterai pada skematik	V
VOUT	Label jalur tegangan keluaran pada skematik	V

INTISARI

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM *SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING* (SLAM) DAN NAVIGASI GLOBAL BERBASIS LIDAR 2D UNTUK *AUTOMATED GUIDED VEHICLE* (AGV) FORKLIFT

Ernanta Fidel Mahardhika

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro

Automated Guided Vehicle (AGV) forklift memerlukan sistem navigasi yang mampu membentuk peta, memperkirakan pose, dan merencanakan jalur sesuai keterbatasan gerak kendaraan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) serta navigasi global berbasis LiDAR 2D pada AGV forklift. Sistem menggunakan Hector SLAM untuk pemetaan, Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) untuk lokalisasi, Nav2 SmacPlannerHybrid dengan model Reeds-Shepp untuk perencanaan jalur, dan Model Predictive Path Integral (MPPI) sebagai controller. Pengujian dilakukan pada lingkungan indoor melalui tiga sesi pemetaan, lima titik referensi lokalisasi, dan lima skenario perencanaan jalur. Mapping 1 menghasilkan error loop closure 0,109 m, error yaw closure 0,62°, dan pergeseran koridor 0,109 m. AMCL menghasilkan error posisi 0,125–0,144 m dengan MAE dan RMSE posisi 0,131 m, serta waktu konvergensi rata-rata 2,4 s pada known pose dan 9,6 s pada global localization. SmacPlannerHybrid menghasilkan panjang jalur 3,63–4,65 m, waktu perencanaan 71–84 ms, dan keberhasilan pembentukan jalur 93,33%. Validasi radius belok minimum 2,75 m menghasilkan radius jalur 2,75–2,81 m. Sistem mampu melakukan pemetaan, lokalisasi, dan perencanaan jalur global, tetapi konsistensi radius pada variasi start-goal dan evaluasi navigasi end-to-end menggunakan MPPI masih memerlukan pengujian lanjutan.

Kata Kunci: AGV Forklift, LiDAR 2D, SLAM, AMCL, SmacPlannerHybrid.

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 2D LIDAR-BASED SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING (SLAM) AND GLOBAL NAVIGATION SYSTEM FOR AN AUTOMATED GUIDED VEHICLE (AGV) FORKLIFT

Ernanta Fidel Mahardhika

Automation Engineering Technology Study Program, Vocational School, Diponegoro University

Automated Guided Vehicle (AGV) forklifts require navigation capable of mapping, pose estimation, and path planning under vehicle motion constraints. This study designs and implements a 2D LiDAR-based Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and global navigation system for an AGV forklift. Hector SLAM is used for mapping, Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) for localization, Nav2 SmacPlannerHybrid with the Reeds-Shepp model for global path planning, and Model Predictive Path Integral (MPPI) as the controller. Tests were conducted indoors through three mapping sessions, five localization reference points, and five path-planning scenarios. Mapping 1 produced a loop-closure error of 0.109 m, a yaw-closure error of 0.62° , and a corridor shift of 0.109 m. AMCL produced position errors of 0.125–0.144 m with position MAE and RMSE of 0.131 m, while average convergence times were 2.4 s for known pose and 9.6 s for global localization. SmacPlannerHybrid generated path lengths of 3.63–4.65 m, planning times of 71–84 ms, and a 93.33% path-generation success rate. Validation of a 2.75 m minimum turning radius produced path radii of 2.75–2.81 m. The system supports mapping, localization, and global path planning, but turning-radius consistency across start-goal variations and end-to-end MPPI navigation still require further testing.

Keywords: AGV Forklift, 2D LiDAR, SLAM, AMCL, SmacPlannerHybrid

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Aktivitas pengangkatan dan pemindahan barang merupakan bagian penting dalam proses operasional pada sektor industri, pergudangan, dan logistik. Pada beberapa perusahaan, proses pemindahan barang masih dilakukan secara manual oleh pekerja dengan mengandalkan tenaga fisik. Aktivitas pengangkatan beban berat yang dilakukan secara berulang dapat meningkatkan risiko cedera otot, kelelahan kerja, serta kecelakaan kerja yang disebabkan oleh kesalahan manusia. Kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada kesehatan pekerja, tetapi juga dapat menurunkan tingkat keselamatan kerja dan efisiensi operasional di lingkungan industri. Hal ini sejalan dengan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2003 tentang Ketenagakerjaan, khususnya Pasal 86, yang menyatakan bahwa setiap pekerja berhak memperoleh perlindungan atas keselamatan dan kesehatan kerja selama menjalankan aktivitasnya [1]. Untuk mengurangi risiko kecelakaan akibat aktivitas pengangkatan secara manual, berbagai industri mulai memanfaatkan alat bantu material handling seperti *forklift*. *Forklift* merupakan kendaraan industri yang dirancang untuk mengangkat, memindahkan, serta menata barang dengan kapasitas yang lebih besar dibandingkan tenaga manusia. Penggunaan *forklift* terbukti mampu meningkatkan efisiensi proses pemindahan barang serta mengurangi beban kerja fisik pekerja di lingkungan industri. Selain itu, *forklift* menjadi salah satu komponen penting dalam sistem logistik modern karena mampu mempercepat proses distribusi barang dalam area operasional [2].

Meskipun demikian, sebagian besar *forklift* yang digunakan saat ini masih dioperasikan secara manual oleh operator manusia. Ketergantungan terhadap operator ini menimbulkan berbagai permasalahan, seperti kesalahan navigasi, keterlambatan operasional, serta potensi kecelakaan akibat *human error*. Penelitian menunjukkan bahwa kesalahan manusia merupakan salah satu penyebab utama kecelakaan pada operasi *forklift*, yang dipengaruhi oleh faktor seperti kurangnya perhatian, kesalahan persepsi, dan rendahnya situational *awareness* saat mengoperasikan kendaraan [3]. Selain itu, lingkungan gudang yang kompleks dengan banyak rintangan semakin meningkatkan

risiko terjadinya tabrakan maupun kesalahan jalur, sehingga menurunkan tingkat keselamatan dan efisiensi operasional.

Seiring dengan perkembangan teknologi otomasi dan robotika, berbagai penelitian mulai mengembangkan kendaraan industri berbasis *Automated Guided Vehicle* (AGV) yang mampu beroperasi secara otomatis tanpa operator manusia secara langsung. AGV memanfaatkan berbagai sensor dan algoritma cerdas untuk melakukan persepsi lingkungan, menentukan posisi, serta merencanakan jalur pergerakan secara mandiri. Salah satu metode utama yang digunakan dalam sistem navigasi kendaraan otonom adalah *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), yaitu metode yang memungkinkan robot untuk membangun peta lingkungan sekaligus menentukan posisinya secara *real-time* pada lingkungan yang belum diketahui sebelumnya [4]. Dalam implementasinya, penggunaan sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan dalam sistem SLAM. Pada penelitian ini digunakan sensor LiDAR 2 dimensi, yaitu YDLiDAR, yang bekerja dengan cara memancarkan sinar laser secara horizontal untuk mengukur jarak objek di sekitarnya. Sensor ini menghasilkan data berupa scan dalam bidang 2D yang kemudian direpresentasikan sebagai *point cloud* dua dimensi. Data tersebut digunakan dalam proses pemetaan (*mapping*) dan estimasi posisi (*localization*) kendaraan secara *real-time*. Meskipun hanya bekerja pada bidang dua dimensi, LiDAR 2D cukup efektif digunakan pada lingkungan indoor seperti gudang karena memiliki tingkat akurasi yang baik serta mampu mendeteksi rintangan di sekitar kendaraan secara cepat dan stabil [4][5].

Namun demikian, sistem navigasi AGV tidak hanya membutuhkan kemampuan untuk membangun peta dan mengetahui posisi kendaraan, tetapi juga membutuhkan metode perencanaan jalur yang sesuai dengan karakteristik gerak kendaraan. Hal ini menjadi penting pada AGV forklift karena kendaraan memiliki bentuk dan batasan gerak tertentu, terutama dalam melakukan belokan. Oleh karena itu, metode perencanaan jalur perlu mempertimbangkan posisi, arah kendaraan, serta batas radius belok agar jalur yang dihasilkan dapat benar-benar diikuti oleh AGV. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Hybrid A**, yaitu pengembangan dari algoritma *A** yang mempertimbangkan kondisi gerak kendaraan dalam proses pencarian jalur. Metode ini dapat menghasilkan jalur yang lebih sesuai dengan kendaraan yang memiliki keterbatasan dalam arah dan pola

pergerakannya, serta dapat mempertimbangkan batasan gerak dan kondisi lingkungan. Penelitian oleh Schäfle dan Uchiyama menunjukkan bahwa *Hybrid A** dapat digunakan untuk menghasilkan jalur yang aman dengan mempertimbangkan bentuk kendaraan, batasan gerak, serta ketidakpastian pada lingkungan [6].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan dan implementasi sistem SLAM dan navigasi global berbasis LiDAR pada *Automated Guided Vehicle (AGV) forklift*. Sensor LiDAR digunakan untuk memperoleh informasi lingkungan yang kemudian diproses menggunakan metode SLAM untuk membangun peta lingkungan. Setelah peta diperoleh, metode *Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL)* digunakan untuk menentukan posisi AGV pada peta secara *real-time*. Selanjutnya, peta dan informasi posisi tersebut digunakan sebagai dasar perencanaan jalur global menggunakan metode Hybrid A* melalui Nav2 SmacPlannerHybrid. Metode ini dipilih karena dapat mempertimbangkan posisi dan orientasi kendaraan serta batas radius belok dalam menentukan jalur yang sesuai dengan karakteristik AGV forklift. Pada proses perencanaan jalur, digunakan model *Reeds-Shepp* yang memungkinkan AGV mempertimbangkan pergerakan maju maupun mundur ketika menuju titik tujuan. Jalur yang dihasilkan kemudian digunakan oleh sistem kontrol untuk mengatur pergerakan AGV agar dapat mengikuti jalur menuju tujuan dengan tetap memperhatikan kondisi lingkungan dan rintangan yang terdeteksi oleh sensor LiDAR. Dengan menggabungkan proses pemetaan, lokalisasi, perencanaan jalur, dan pengendalian pergerakan dalam satu sistem navigasi, AGV diharapkan mampu bergerak secara lebih terarah, aman, dan sesuai dengan karakteristik pergerakannya.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan menimplementasikan sistem *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)* berbasis sensor LiDAR yang mampu melakukan pemetaan lingkungan secara *real time* pada *Automated Guided Vehicle (AGV)*?
2. Bagaimana merancang lokalisasi berbasis AMCL yang memanfaatkan peta hasil SLAM dan data sensor navigasi sehingga *pose* AGV dapat diestimasi secara stabil pada lingkungan *indoor*?

3. Bagaimana merancang dan mengevaluasi navigasi global AGV menggunakan Nav2 SmacPlannerHybrid dengan model gerak Reeds-Shepp serta controller MPPI agar jalur yang terbentuk sesuai dengan batas gerak kendaraan?

1.3. Tujuan Tugas Akhir

Berdasarkan rumusan masalah yang telah didapatkan, maka tujuan Tugas Akhir ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem SLAM berbasis sensor LiDAR 2D yang mampu melakukan pemetaan lingkungan dan menentukan posisi AGV secara *real-time* pada lingkungan *indoor*.
2. Merancang dan mengevaluasi sistem lokalisasi AMCL pada peta hasil SLAM, dengan menilai akurasi pose statis, *repeatability*, waktu konvergensi, dan kestabilan kovarians.
3. Merancang dan mengevaluasi navigasi global berbasis Nav2 *SmacPlannerHybrid* dengan model *Reeds-Shepp* serta MPPI sebagai controller lintasan, kemudian menilai kinerjanya menggunakan metrik panjang jalur, waktu perencanaan, waktu navigasi, dan tingkat keberhasilan mencapai tujuan.

1.4. Manfaat Tugas Akhir

Adapun manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan sistem AGV forklift berbasis navigasi otonom yang dapat meningkatkan efisiensi dalam proses pemindahan barang di lingkungan industri atau pergudangan.
2. Mengurangi ketergantungan terhadap operator manusia sehingga dapat meminimalkan risiko kecelakaan kerja akibat *human error*.
3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi robotika, khususnya pada sistem navigasi berbasis LiDAR dan SLAM pada *robot mobile*.

1.5. Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Sumber utama data lingkungan untuk pemetaan, dan lokalisasi adalah LiDAR 2D YDLiDAR T-mini Plus, sedangkan IMU dan odometri roda hanya digunakan sebagai data pendukung estimasi gerak.
2. Metode pemetaan yang digunakan adalah Hector SLAM dan metode lokalisasi yang digunakan adalah AMCL, sehingga metode SLAM dan lokalisasi lain tidak dibahas secara mendalam.
3. Sistem navigasi dibatasi pada perencanaan jalur dan pergerakan dasar robot tanpa membahas metode kontrol lanjutan secara kompleks.
4. Pengujian sistem dilakukan pada lingkungan *indoor* dengan kondisi yang terstruktur.
5. Sistem tidak membahas secara mendalam aspek *industrial safety standard* maupun implementasi skala industri secara penuh.
6. Penelitian hanya membahas proses pembentukan peta (*mapping*) dan estimasi posisi (*localization*) menggunakan sensor LiDAR 2D dalam kerangka metode SLAM.
7. Perencanaan jalur global pada penelitian menggunakan Nav2 SmacPlannerHybrid (Hybrid A*) dengan motion model Reeds-Shepp, algoritma global planner lain seperti Dijkstra, A* grid konvensional, dan RRT tidak dianalisis sebagai metode utama.
8. Sistem hanya mendeteksi rintangan berdasarkan data LiDAR tanpa melakukan klasifikasi objek.
9. Pembahasan Hybrid A* dibatasi pada konfigurasi dan kinerja implementasi SmacPlannerHybrid, meliputi validitas costmap, pembentukan path, panjang path, waktu planning, kemampuan manuver maju-mundur, dan konsistensi terhadap batas radius belok AGV.
10. Lingkungan pengujian diasumsikan statis atau memiliki perubahan yang terbatas selama proses pemetaan dan navigasi.
11. Peta lingkungan yang digunakan berbasis 2D yang hanya merepresentasikan posisi objek pada bidang datar tanpa mempertimbangkan dimensi ketinggian (3D).
12. Pada penelitian ini, proses pengisian baterai pada AGV masih dilakukan secara manual. Oleh karena itu, sistem charging tidak menjadi bagian dari perancangan maupun pembahasan dalam penelitian ini.

1.6. Sistematika Tugas Akhir

Pada penulisan laporan tugas akhir ini, terdapat beberapa sistematika sebagai pedoman laporan diantaranya:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika laporan tugas akhir sesuai topik yang diangkat oleh penulis.

BAB II DASAR TEORI

Bagian ini berisi tentang teori-teori yang dikaitkan dengan topik yang diangkat pada laporan tugas akhir.

BAB III METODE PENELITIAN

Bagian ini berisi tentang metode penelitian yang akan digunakan oleh penulis.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Bagian ini berisi tentang pengujian dan analisa dari alat yang telah dibuat oleh penulis.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisi tentang kesimpulan dari alat yang telah dibuat oleh penulis.