

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Perancangan Sistem Navigasi *Autonomous Delivery Vehicle* Berbasis Sensor GNSS,
IMU, Dan Odometri Menggunakan *Extended Kalman Filter* Serta *Smac Hybrid - A**
Pada Navigation2

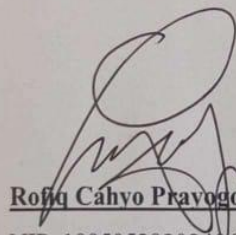
Diajukan Oleh:

Azka Bintang Nur Taqwa

NIM. 40040322650003

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Dosen Pembimbing,



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

NIP. 199505292024061001

Semarang, 24 September 2026

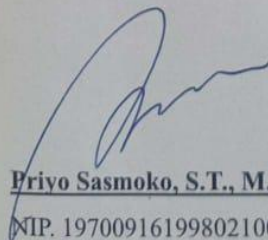
Mengetahui,

Ketua

Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



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

NIP. 197009161998021001

Semarang, 24 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Perancangan Sistem Navigasi *Autonomous Delivery Vehicle* Berbasis Sensor GNSS,
IMU, Dan Odometri Menggunakan *Extended Kalman Filter* Serta *Smac Hybrid - A**
Pada Navigation2

Disusun oleh:

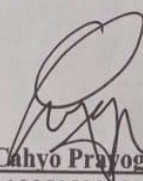
Azka Bintang Nur Taqwa

NIM 40040322650003

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji

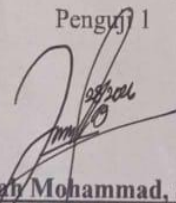
24 September 2026

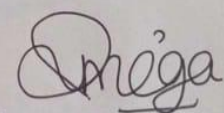
Tim penguji,
Dosen Pembimbing


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

Penguji 1

Penguji 2


Luthfansyah Mohammad, S.Tr.T., M.T.
NIP. H.7.199609132022041001

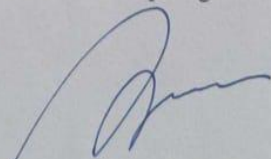

Megarini Hersaputri, S.T., M.T.
NIP. 198902142020122012

Mengetahui,

Ketua Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro


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

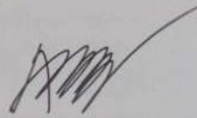
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Nama : Azka Bintang Nur Taqwa
NIM : 40040322650003
Program Studi : S. Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : Perancangan Sistem Navigasi *Autonomous Delivery Vehicle* Berbasis Sensor GNSS, IMU, dan Odometri Menggunakan *Extended Kalman Filter* serta *Smac Hybrid-A** pada Navigation2

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 diacu 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, 24 September 2026



Azka Bintang Nur Taqwa

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “ Perancangan Sistem Navigasi Autonomous Delivery Vehicle Berbasis Sensor GNSS, IMU, dan Odometri Menggunakan Extended Kalman Filter serta Smac Hybrid-A* pada Navigation2” dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kekuatan, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Prof. Dr. Ir. Budiyo, M.Si. selaku Dekan Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
3. Dr. Moh. Ridwan, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknologi Industri.
4. Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro .
5. Rofiq Cahyo Prayogo S.T, M.T selaku dosen pembimbing saya yang dengan sabar dan perhatian membimbing penulis hingga sampai pada titik ini. Terima kasih telah percaya, membantu, membimbing dan selalu mendorong penulis untuk terus berkembang
6. Bapak Luthfansyah Mohammad, S.Tr.T., M.T., selaku Dosen Penguji 1 yang telah memberikan waktu, arahan, masukan, serta saran yang membangun dalam proses evaluasi dan penyempurnaan Tugas Akhir ini.
7. Ibu Megarini Hersaputri, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan waktu, arahan, masukan, serta saran yang membangun dalam proses evaluasi dan penyempurnaan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Teknologi Rekayasa Otomasi Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro yang telah memberikan ilmu-ilmu dan membantu dalam setiap proses yang dilewati penulis.

9. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang senantiasa memberikan kasih sayang, doa, dukungan, serta kepercayaan kepada setiap keputusan yang penulis ambil. Terima kasih atas segala pengorbanan, kerja keras, keringat, air mata, dan tenaga yang telah dicurahkan demi memberikan yang terbaik bagi penulis. Semua pengorbanan tersebut merupakan anugerah yang tidak akan pernah dapat penulis balas, namun akan selalu penulis kenang dan jadikan motivasi untuk terus berusaha menjadi pribadi yang lebih baik.
10. Davi Rizky Pratama dan Firda Amanda Fitri, selaku rekan satu tim Tugas Akhir yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan kerja sama selama proses penyelesaian Tugas Akhir.
11. Teman-teman SATNAYAKA yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan selama masa kuliah. Terima kasih atas segala kebersamaan, cerita, bantuan serta dukungan yang sudah diberikan sehingga masa perkuliahan menjadi pengalaman yang berkesan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis berharap semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, civitas akademika, serta pembaca, dan dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan sistem inspeksi visual berbasis pengolahan citra digital di bidang otomasi industri.

Semarang, 24 September 2026

Azka Bintang Nur Taqwa

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR	ii
HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR	iii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
INTISARI.....	xiv
ABSTRACT	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
DAFTAR SIMBOL.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	7
1.5 Batasan Masalah	7
1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	9
BAB II DASAR TEORI	11
2.1 Tinjauan Pustaka	11
2.2 Autonomous Delivery Vehicle, Sensor Lokalisasi, dan Odometri.....	13
2.3 Sensor GNSS CUAV NEO 3 dan Transformasi Koordinat	14
2.4 Sensor IMU Yahboom ROS 10-Axis.....	17
2.5 Odometry Kendaraan Ackerman	19
2.5 Mini PC Intel NUC	21
2.6 STM32F411CEU6	22
2.7 Extended Kalman Filter	24
2.7.1 Tahap Prediksi	25
2.7.2 Tahap Koreksi.....	25

2.8 Robot Operating System 2 dan Navigation2	26
2.9 Peta dan Global Costmap.....	27
2.10 Smac Hybrid-A* Planner	30
2.11 Parameter Evaluasi Sistem Navigasi.....	31
2.11.1 Evaluasi Data Sensor	31
2.11.2 Parameter Evaluasi Estimasi Keadaan	33
BAB III METODE PENELITIAN.....	37
3.1 Diagram Blok.....	37
3.1.1 Diagram Blok Keseluruhan	38
3.2 Perancangan Mekanik	40
3.3 Prinsip Kerja	43
3.4. Flowchart Sistem Keseluruhan	47
3.4.1 Flowchart Sistem Navigasi.....	49
3.5 Teknik Fabrikasi.....	51
3.5.1 Alat Dan Bahan	51
3.5.2 Perancangan Sistem Elektrik.....	52
3.5.3 Desain PCB	54
3.6 Implementasi Inisialisasi dan Pra-pengolahan Data Sensor	54
3.6.1 Implementasi Inisialisasi dan Validasi GNSS	55
3.6.2 Implementasi Inisialisasi dan Pra-pengolahan IMU	57
3.6.3 Implementasi Feedback Aktuator dan Pembentukan Odometri Kendaraan...	60
3.6.4 Pembentukan dan Validasi <i>Heading</i>	62
3.6.5 Aliran Data Sensor Menuju Estimasi	63
3.7 Arsitektur Extended Kalman Filter Lokal.....	64
3.8 Arsitektur Extended Kalman Filter Global	69
3.9 Arsitektur Localizationcore dan Transformasi Sistem Koordinat.....	73
3.10 Arsitektur Peta dan Global Cost Map	79
3.11 Arsitektur Smac Hybrid-A* Global planner	85
BAB IV ANALISIS DAN HASIL.....	92
4.1 Pengujian Sensor.....	92
4.1.1 Pengujian Dan Analisis GNSS	92
4.1.2 Pengujian IMU	98

4.1.3	Pengujian Feedback Kecepatan dan Steering sebagai Sumber Odometri	103
4.1.4	Pengujian Heading RM3100 dan Inersia	105
4.2	Pengujian dan Analisis Extended Kalman Filter Lokal	107
4.2.1	Pengujian Parameter Frequency	108
4.2.2	Pengujian Parameter sensor_timeout	109
4.2.3	Pengujian Measurement Covariance	111
4.2.4	Pengujian process_noise_covariance	111
4.2.5	Pengujian predict_to_current_time	113
4.3	Pengujian dan Analisis Extended Kalman Filter Global.....	114
4.3.1	Pengujian Parameter Frequency	115
4.3.2	Pengujian Parameter sensor_timeout	117
4.3.3	Pengujian Measurement Covariance GNSS.....	118
4.3.4	Pengujian process_noise_covariance Posisi X-Y	120
4.3.5	Pengujian predict_to_current_time	121
4.4	Pengujian dan Analisis Smac Hybrid-A* Planner	122
4.4.1	Pengujian minimum_turning_radius	122
4.4.2	Pengujian downsampling_factor	124
4.4.3	Pengujian Planner Tolerance	125
4.4.4	Pengujian Goal Checker dan Pencapaian Goal	126
4.5	Sintesis Hasil Pengujian.....	128
BAB V	PENUTUP	133
5.1	Kesimpulan	133
5.2	Saran	135
DAFTAR PUSTAKA		137
LAMPIRAN		141

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka	12
Tabel 2. 2 Spesifikasi CUAV NEO 3	14
Tabel 2. 3 Spesifikasi IMU	17
Tabel 2. 4 Spesifikasi Jetson Orin Nano	21
Tabel 2. 5 Spesifikasi STM32F4.....	23
Tabel 3. 1 Alat Dan Bahan	51
Tabel 3. 2 Parameter inisialisasi dan quality gate GNSS aktif.....	55
Tabel 3. 3 Parameter Pra Pengolahan IMU aktif	58
Tabel 3. 4 Parameter aktuator, <i>steering</i> , dan odometri aktif	60
Tabel 3. 5 Sumber Measurement dan State aktif EKF Lokal.....	65
Tabel 3. 6 Parameter Runtime EKF local Baseline.....	66
Tabel 3. 7 Nilai diagonal process noise EKF lokal baseline.....	68
Tabel 3. 8 Sumber measurement dan state aktif EKF global	69
Tabel 3. 9 Parameter runtime EKF global baseline	71
Tabel 3. 10 Nilai Diagonal process noise EKF global baseline	73
Tabel 3. 11 Parameter transformasi dan koreksi LocalizationCore aktif	76
Tabel 3. 12 Parameter pembentukan peta dan global costmap	79
Tabel 3. 13 Parameter Smac Hybrid-A* baseline aktif.....	86
Tabel 3. 14 Relevansi implementasi terhadap pengujian BAB IV	91
Tabel 4. 1 Batas Penerimaan GNSS.....	93
Tabel 4. 2 Ringkasan Pengujian Indoor/Outdoor.....	94
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian 9 sudut.....	99
Tabel 4. 4 Ringkasan Karakteristik Linearitas IMU	100
Tabel 4. 5 Statistik Utama Feedback Kendaraan	103
Tabel 4. 6 Ringkasan Heading RM3100 dan Inersia	106
Tabel 4. 7 Profile Konfigurasi Lokal yang di uji	107
Tabel 4. 8 Hasil akhir pengujian frequency EKF lokal.....	108
Tabel 4. 9 Hasil Profile Sensor_Timeout EKF Lokal	109
Tabel 4. 10 Measurement Covariance Yang Terekam Pada EKF Lokal	111
Tabel 4. 11 Proses Noise dan Ketidakpastian EKF Lokal.....	112

Tabel 4. 12 Hasil Predict_To_Current Time EKF Lokal	113
Tabel 4. 13 Profil konfigurasi EKF global yang diuji.....	115
Tabel 4. 14 Hasil Akhir Frekuensi EKF Global	115
Tabel 4. 15 Hasil Profile Sensor_Timeout EKF Global.....	117
Tabel 4. 16 Measurement Covariance dan Residual EKF Global.....	118
Tabel 4. 17 Proses dan Noise dan Ketidakpastian EKF Global	120
Tabel 4. 18 Hasil Predict_To_Current Time EKF Global	121
Tabel 4. 19 Hasil Planner Pada Constraint Radius Putar Yang Digunakan	123
Tabel 4. 20 Hasil Downsampling Global Costmap.....	124
Tabel 4. 21 Planner Tolerance dan Endpoint Error	125
Tabel 4. 22 Hasil akhir goal checker dan Navigation2	126
Tabel 4. 23 Ringkasan indikator utama tiga profil.....	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 CUAV NEO 3	14
Gambar 2. 2 IMU	17
Gambar 2. 3 Model Ackerman.....	19
Gambar 2. 4 Mini PC NUC.....	21
Gambar 2. 5 STM32F4	23
Gambar 2. 6 ROS	27
Gambar 2. 7 Planner.....	31
Gambar 3. 1 Diagram Blok Power	37
Gambar 3. 2 Diagram Blok Keseluruhan.....	39
Gambar 3. 3 Bagian Atas	41
Gambar 3. 4 Tampak Atas	41
Gambar 3. 5 Tampak Bawah.....	42
Gambar 3. 6 Flowchart Sistem Keseluruhan	48
Gambar 3. 7 Flowchart Sistem Navigasi	50
Gambar 3. 8 Perancangan Sistem Elektrik.....	52
Gambar 3. 9 Design PCB.....	54
Gambar 4. 1 Kualitas Fix GNSS Pada Kondisi Indoor.....	95
Gambar 4. 2 Kualitas Fix GNSS Pada Kondisi Outdoor	95
Gambar 4. 3 Sebaran Posisi GNSS Pada Kondisi Indoor	96
Gambar 4. 4 Sebaran Posisi GNSS Pada Kondisi Outdoor	96
Gambar 4. 5 Linearitas Heading IMU Terhadap Sudut Refrensi.....	100
Gambar 4. 6 Stabilitas Keluaran Gyro-Z IMU saat diam	102
Gambar 4. 7 Kecepatan Perintah, Feedback ESC Dan GNSS	104
Gambar 4. 8 Steering Perintah Dan Feedback Setelah Penyetaraan Refrensi	105
Gambar 4. 9 Heading RM3100 Dan Heading Inersia Terhadap Waktu	106
Gambar 4. 10 Perbandingan RMSE residual kecepatan EKF lokal.....	109
Gambar 4. 11 P95 measurement age EKF lokal	110
Gambar 4. 12 Perkembangan mean sigma X EKF lokal	112
Gambar 4. 13 Perbandingan RMSE residual posisi EKF global	116
Gambar 4. 14 Mean measurement age EKF global	118

Gambar 4. 15	Perubahan posisi maksimum pada EKF global.....	119
Gambar 4. 16	Mean sigma X pada EKF global	121
Gambar 4. 17	Kontinuitas keluaran EKF global.....	122
Gambar 4. 18	Planning time pada tiga profil planner	123
Gambar 4. 19	Minimum clearance pada profil planner	125
Gambar 4. 20	Hubungan tolerance dan endpoint error pada profil planner	126
Gambar 4. 21	Jarak akhir kendaraan terhadap goal	127

INTISARI

PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI *AUTONOMOUS DELIVERY VEHICLE* BERBASIS SENSOR GNSS, IMU, DAN ODOMETRI MENGGUNAKAN *EXTENDED KALMAN FILTER* SERTA *SMAC HYBRID - A** PADA NAVIGATION2

Azka Bintang Nur Taqwa

Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Autonomous Delivery Vehicle (ADV) memerlukan estimasi posisi dan orientasi yang kontinu agar proses navigasi menuju tujuan dapat dilakukan secara konsisten. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem navigasi ADV berbasis GNSS, IMU, dan odometri menggunakan *Extended Kalman Filter* (EKF) lokal-global serta Smac Hybrid-A* pada Navigation2. EKF lokal digunakan untuk menghasilkan estimasi gerak pada frame odom, sedangkan EKF global membentuk estimasi pose pada frame map dengan memanfaatkan posisi GNSS dan heading tervalidasi. Hasil lokalisasi kemudian digunakan oleh Smac Hybrid-A* untuk membentuk *global path* sesuai karakteristik kendaraan Ackermann. Pengujian GNSS outdoor menghasilkan rata-rata 16 satelit, pDOP 0,978, hAcc 1,204 m, *quality gate pass* 100%, dan RMS dispersi 0,817 m. IMU menghasilkan laju 48,671 Hz, R^2 0,999987, dan RMSE heading 1,002°. Konfigurasi Baseline EKF lokal menghasilkan RMSE residual 0,04154 m/s, P95 *measurement age* 0,126 s, dan continuity 99,2%, sedangkan EKF global menghasilkan RMSE residual XY 0,23774 m, P95 age 0,123 s, continuity 99,6%, serta *maximum position jump* 1,99236 m. Smac Hybrid-A* menghasilkan *planning time* 925 ms, *endpoint error* 0,04472 m, dan *final distance* 0,45047 m dengan status SUCCEEDED. Baseline dipertahankan karena memberikan *trade-off* kinerja paling seimbang.

Kata kunci: *Autonomous Delivery Vehicle*; GNSS; IMU; *Extended Kalman Filter*; Smac Hybrid-A*; Navigation2.

ABSTRACT

PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI *AUTONOMOUS DELIVERY VEHICLE* BERBASIS SENSOR GNSS, IMU, DAN ODOMETRI MENGGUNAKAN *EXTENDED* *KALMAN FILTER* SERTA *SMAC HYBRID - A** PADA NAVIGATION2

Azka Bintang Nur Taqwa

Automation Engineering Technology Study Program, Vocational School, Diponegoro
University

An *Autonomous Delivery Vehicle* (ADV) requires continuous position and orientation estimation for navigation toward a target. This study designed an ADV navigation system using GNSS, IMU, and odometry integrated through local-global *Extended Kalman Filters* (EKF) and Smac Hybrid-A* in Navigation2. The local EKF estimated motion in the odom frame, while the global EKF produced pose in the map frame using GNSS position and validated heading. The localization output was used by Smac Hybrid-A* to generate a global path considering Ackermann kinematics. Outdoor GNSS testing produced 16 satellites on average, pDOP 0.978, hAcc 1.204 m, 100% quality-gate pass, and 0.817 m RMS dispersion. The IMU achieved 48.671 Hz, R^2 0.999987, and 1.002° heading RMSE. The Baseline local EKF produced 0.04154 m/s residual RMSE, 0.126 s P95 measurement age, and 99.2% continuity. The global EKF produced 0.23774 m XY residual RMSE, 0.123 s P95 age, 99.6% continuity, and 1.99236 m maximum position jump. Smac Hybrid-A* achieved 925 ms planning time, 0.04472 m endpoint error, and 0.45047 m final distance with SUCCEEDED status. Baseline was retained for its balanced estimation quality, data freshness, continuity, global correction stability, and navigation performance.

Keywords: *Autonomous Delivery Vehicle*; GNSS; IMU; *Extended Kalman Filter*; Smac Hybrid-A*; Navigation2.

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Kepanjangan
ADV	Autonomous Delivery Vehicle
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
EKF	Extended Kalman Filter
RMSE	Root Mean Square Error
RPM	Revolutions Per Minute
ROS 2	Robot Operating System 2
DDS	Data Distribution Service
QoS	Quality of Service
TF	Transform Framework
TF2	Transform Framework 2
Nav2	Navigation2
A*	A-star
MPPI	Model Predictive Path Integral
DOP	Dilution of Precision
pDOP	Position Dilution of Precision
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
hAcc	Horizontal Accuracy
NMEA	National Marine Electronics Association
PCB	Printed Circuit Board
ESC	Electronic Speed Controller
BLDC	Brushless Direct Current
FOC	Field Oriented Control
PWM	Pulse Width Modulation
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
RTK	Real-Time Kinematic
INS	Inertial Navigation System
NLOS	Non-Line-of-Sight

Singkatan	Kepanjangan
OBD2	On-Board Diagnostics II
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
UWB	Ultra-Wideband
URDF	Unified Robot Description Format
YAML	YAML Ain't Markup Language

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
(x)	Posisi kendaraan pada sumbu X	m
(y)	Posisi kendaraan pada sumbu Y	m
(x_0)	Titik referensi posisi X	m
(y_0)	Titik referensi posisi Y	m
(ψ)	Orientasi yaw kendaraan	rad
(δ)	Sudut kemudi	rad
(v)	Kecepatan linear kendaraan	m/s
(v_x)	Kecepatan longitudinal kendaraan	m/s
(ω)	Kecepatan sudut/yaw rate	rad/s
(ω_z)	Kecepatan sudut terhadap sumbu Z	rad/s
(R)	Radius putar kendaraan	m
(L)	Wheelbase kendaraan	m
(κ)	Kurvatur lintasan	1/m
(Δt)	Selang waktu antar sampel	s
(t_i)	Timestamp pengukuran ke-(i)	s
$(t_{\{\mathrm{now}\}})$	Waktu saat ini	s
(a_i)	Umur data (<i>measurement age</i>)	s
(g_i)	<i>Synchronization gap</i>	s
(Σ)	Matriks covariance	—
(P)	Matriks covariance keadaan EKF	—
(Q)	Matriks <i>process noise covariance</i>	—
(R)	Matriks <i>measurement noise covariance</i>	—
(F_i)	Status <i>freshness</i> data	—
(N)	Jumlah sampel/data	—
(i)	Indeks sampel	—

Simbol	Keterangan	Satuan
(r)	Resolusi peta	m/sel
(d)	Jarak terhadap obstacle	m
(L_{path})	Panjang global path	m
(e_{goal})	Error endpoint terhadap goal	m
(J_{max})	Perubahan posisi maksimum	m
(SR)	<i>Success rate</i> planner	%
$(\bar{t}_{\mathrm{plan}})$	Rata-rata waktu perencanaan	ms

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi kendaraan otonom telah mendorong pemanfaatan robot bergerak pada berbagai bidang, termasuk distribusi dan pengiriman barang melalui *Autonomous Delivery Vehicle* (ADV). Dalam konteks *last-mile delivery*, kendaraan pengiriman otonom dikembangkan untuk membawa barang kepada pengguna dengan tingkat intervensi manusia yang minimal. Agar dapat bergerak secara mandiri dari posisi awal menuju lokasi tujuan, sistem navigasi robot melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu persepsi, lokalisasi, perencanaan jalur, dan pengendalian gerak. Di antara tahapan tersebut, lokalisasi memiliki peran penting dalam memperkirakan posisi dan orientasi kendaraan serta memperbarui keadaan kendaraan selama proses navigasi. Ketidakpastian pada estimasi posisi dan orientasi dapat memengaruhi konsistensi informasi pose yang digunakan pada tahapan navigasi berikutnya sehingga kualitas lokalisasi menjadi salah satu aspek penting dalam membangun sistem navigasi kendaraan otonom [1], [11].

Pada lingkungan luar ruang, *Global Navigation Satellite System* (GNSS) digunakan untuk menentukan posisi kendaraan berdasarkan sinyal yang diterima dari konstelasi satelit. Meskipun mampu memberikan informasi posisi dengan baik pada kondisi *open sky*, performa GNSS dapat mengalami penurunan pada lingkungan yang memiliki banyak penghalang. Bangunan tinggi dan objek di sekitar kendaraan dapat menghalangi penerimaan langsung sinyal satelit, mengurangi visibilitas satelit, serta menimbulkan efek *non-line-of-sight* dan *multipath*. Pada kondisi *urban canyon*, keterbatasan visibilitas satelit, peningkatan kecepatan kendaraan, dan rendahnya ketinggian penerima dapat meningkatkan kesalahan penentuan posisi. Dalam kondisi tertentu, jumlah satelit yang dapat digunakan juga dapat menjadi tidak mencukupi sehingga solusi posisi GNSS mandiri tidak dapat diperoleh. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan GNSS secara mandiri memiliki keterbatasan ketika digunakan sebagai satu-satunya sumber informasi lokalisasi pada kendaraan otonom [2].

Keterbatasan GNSS dalam menyediakan informasi posisi yang stabil pada setiap kondisi menyebabkan sistem navigasi memerlukan informasi gerak relatif untuk mempertahankan kontinuitas estimasi kendaraan. Informasi gerak tersebut dapat

diperoleh melalui odometri yang memperkirakan perubahan posisi kendaraan berdasarkan pergerakan roda dan parameter geometrik kendaraan. Meskipun mampu menyediakan informasi gerak secara kontinu, odometri tetap memiliki keterbatasan karena kesalahan pada parameter sistem dapat menyebabkan penyimpangan estimasi posisi yang terakumulasi selama kendaraan bergerak. Ketidakpastian parameter geometrik, termasuk *effective wheelbase* dan perbedaan karakteristik roda, merupakan salah satu sumber galat sistematis yang dapat memengaruhi ketelitian odometri. Oleh karena itu, karakteristik dan parameter odometri perlu diperiksa serta dikalibrasi sebelum datanya digunakan sebagai masukan dalam sistem estimasi posisi kendaraan [3].

Perbedaan karakteristik antara sumber informasi gerak dan posisi menunjukkan perlunya penggabungan beberapa sensor agar estimasi keadaan kendaraan tidak bergantung pada satu jenis pengukuran. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan *sensor fusion* pada sistem kendaraan dengan model gerak nonlinier adalah *Extended Kalman Filter* (EKF). Metode ini bekerja melalui tahap prediksi untuk memperkirakan keadaan kendaraan berdasarkan model gerak dan tahap koreksi untuk memperbarui hasil prediksi menggunakan pengukuran yang tersedia. Pada penelitian berbasis kendaraan, informasi kecepatan dari OBD2 dan kecepatan sudut dari IMU digunakan sebagai masukan model kinematika untuk memprediksi posisi dan orientasi, sedangkan pengukuran GNSS digunakan sebagai koreksi melalui EKF. Penerapan tersebut menunjukkan bahwa pembaruan estimasi menggunakan GNSS mampu mengurangi penyimpangan hasil prediksi dan menurunkan *drift error* sekitar 40–60%. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggabungan informasi gerak relatif dan posisi absolut melalui EKF dapat meningkatkan konsistensi estimasi posisi kendaraan dibandingkan hanya mengandalkan prediksi gerak secara terus-menerus [4].

Penerapan sensor fusion berbasis EKF juga telah dikaji pada robot bergerak Clearpath Husky dengan mengintegrasikan data GPS, IMU, dan odometri. Pada penelitian tersebut, odometri digunakan untuk merepresentasikan pergerakan relatif robot, IMU menyediakan informasi orientasi, sedangkan GPS memberikan koreksi posisi absolut. Ketiga sumber pengukuran tersebut digabungkan melalui EKF dan diuji menggunakan simulasi ROS serta Gazebo pada model Husky A200. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi GPS, IMU, dan odometri menghasilkan penyimpangan posisi yang

lebih kecil dibandingkan penggunaan odometri saja, sedangkan pembaruan GPS yang memiliki laju lebih rendah tetap dapat mengoreksi akumulasi kesalahan estimasi secara berkala. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggabungan sensor dengan karakteristik pengukuran yang berbeda dapat meningkatkan kualitas estimasi posisi, tetapi penerapannya tetap perlu disesuaikan dengan karakteristik platform dan sistem navigasi yang digunakan [5].

Integrasi GNSS, IMU, dan odometer berbiaya rendah juga telah diterapkan menggunakan *Extended Kalman Filter* pada estimasi gerak dua dimensi dengan mekanisme pembobotan dinamis. Pada penelitian tersebut, data odometer dan kecepatan sudut IMU digunakan pada tahap prediksi, sedangkan informasi posisi dan azimuth dari GNSS digunakan pada tahap koreksi. Pengujian dilakukan pada kondisi *open horizon*, kondisi horizon yang sebagian terhalang, serta lintasan di dekat dinding untuk mengevaluasi kestabilan estimasi pada kualitas penerimaan GNSS yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas estimasi dipengaruhi tidak hanya oleh karakteristik sensor, tetapi juga oleh pengaturan *measurement noise*, *process noise*, pembobotan pengukuran, serta ketepatan sinkronisasi waktu antarsensor. Penerapan *dynamic weighting* berdasarkan kualitas solusi GNSS dan penyesuaian parameter filter mampu meningkatkan kualitas estimasi posisi dan arah dibandingkan penggunaan GNSS secara mandiri. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pada sistem lokalisasi multisensor, kualitas data masukan, konfigurasi kovariansi, dan kesesuaian waktu pengukuran merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan sebelum hasil estimasi digunakan pada sistem navigasi kendaraan [6].

Pengembangan sistem lokalisasi multisensor pada robot bergerak juga telah dilakukan di Indonesia. Salah satu penerapannya menggunakan Ultra-Wideband (UWB) DWM1000 dan sensor inersia pada mobile robot pertanian otonom. Pada sistem tersebut, posisi robot ditentukan berdasarkan pengukuran jarak terhadap tiga titik anchor menggunakan metode trilaterasi, kemudian data posisi pada sumbu X dan Y diperhalus menggunakan Kalman Filter, sedangkan sensor inersia digunakan untuk memberikan informasi arah atau heading robot. Pengujian dilakukan secara langsung pada kendaraan pertanian dan menunjukkan bahwa sistem UWB mampu menghasilkan estimasi posisi dengan simpangan rata-rata sekitar 0,33 m. Meskipun demikian, metode UWB

memerlukan pemasangan anchor pada area operasi sehingga cakupan lokalisasinya bergantung pada infrastruktur yang telah disiapkan. Dalam konteks ADV yang dirancang untuk beroperasi pada area luar ruang dengan cakupan peta yang lebih luas, kondisi tersebut menunjukkan perlunya sumber posisi global yang tidak bergantung pada pemasangan anchor di sepanjang lingkungan operasi [7].

Setelah informasi posisi dan orientasi kendaraan diperoleh, kemampuan kendaraan untuk mencapai tujuan juga ditentukan oleh mekanisme navigasi dan pengendalian arah yang digunakan. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah navigasi berbasis *waypoint*, yaitu kendaraan bergerak mengikuti serangkaian titik koordinat yang telah ditentukan. Implementasi pada prototipe *autonomous car* menggunakan GPS untuk memperoleh posisi, kombinasi kompas dan IMU untuk menentukan *heading*, serta pengendali PI untuk mengatur sudut kemudi menuju *waypoint*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kendaraan mampu mencapai rangkaian titik tujuan, meskipun masih terdapat variasi kesalahan posisi dan *heading* selama proses navigasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan kendaraan mencapai tujuan tidak hanya bergantung pada ketersediaan informasi posisi, tetapi juga pada kemampuan sistem dalam menentukan arah tujuan dan mengendalikan kemudi secara konsisten selama mengikuti lintasan [8].

Setelah informasi posisi dan orientasi kendaraan tersedia, sistem navigasi memerlukan mekanisme perencanaan jalur untuk menentukan lintasan dari posisi awal menuju titik tujuan dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan. Salah satu algoritma yang banyak digunakan dalam perencanaan jalur adalah A*, yang menentukan jalur berdasarkan kombinasi biaya perjalanan dari titik awal dan estimasi biaya menuju titik tujuan. Penerapan algoritma A* pada *Robot Operating System* (ROS) telah digunakan untuk merencanakan pergerakan robot dengan mempertimbangkan keberadaan rintangan dinamis. Pada penelitian tersebut, posisi robot lawan direpresentasikan sebagai area yang tidak dapat dilalui sehingga algoritma dapat menghasilkan jalur alternatif menuju tujuan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan A* mampu meningkatkan keberhasilan robot dalam menghindari rintangan sekaligus menghasilkan jalur yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hal tersebut menunjukkan bahwa perencanaan jalur berbasis pencarian heuristik dapat membantu robot menentukan lintasan menuju

tujuan tanpa hanya bergantung pada rangkaian koordinat *waypoint* yang telah ditentukan sebelumnya [9].

Kendaraan dengan sistem kemudi Ackermann memiliki keterbatasan gerak karena tidak dapat melakukan perpindahan lateral maupun berputar secara langsung pada satu titik. Oleh karena itu, jalur yang hanya mempertimbangkan keterhubungan posisi pada peta belum tentu dapat diikuti kendaraan secara fisik. Smac Hybrid-A* pada Navigation2 melakukan pencarian jalur dengan mempertimbangkan posisi, orientasi, biaya lingkungan, serta batasan kinematika kendaraan sehingga lebih sesuai diterapkan pada kendaraan dengan karakteristik nonholonomik. Meskipun penelitian sebelumnya telah membahas lokalisasi multisensor, navigasi berbasis *waypoint*, dan perencanaan jalur secara terpisah, masih diperlukan integrasi antara kualitas data sensor, estimasi pose, dan perencanaan jalur yang sesuai dengan karakteristik kendaraan Ackermann dalam satu sistem navigasi [10].

Pengembangan ADV pada penelitian ini merupakan bagian dari sistem terintegrasi yang dikerjakan bersama dalam satu tim Tugas Akhir. Sistem kendaraan secara keseluruhan dibagi menjadi beberapa subsistem yang saling berhubungan, yaitu sistem navigasi, sistem persepsi lingkungan, dan sistem pengendalian aktuator. Subsistem persepsi dibahas secara khusus pada Tugas Akhir berjudul “Implementasi YOLOv2 Pada Sistem Persepsi Visual *Autonomous Delivery Vehicle*”, yang berfokus pada pengolahan data kamera untuk memperoleh informasi lingkungan, obstacle, dan kondisi jalur. Sementara itu, subsistem pengendalian aktuator dibahas pada Tugas Akhir berjudul “Perancangan Sistem Kendali Posisi Steering Motor BLDC Berbasis *Field Oriented Control (FOC)* Menggunakan STM32F103RCT6 Dan Sensor Encoder Pada *Autonomous Delivery Vehicle*”, yang berfokus pada pengendalian motor penggerak dan steering melalui ESC serta pengolahan feedback aktuator. Penelitian ini mengambil fokus pada subsistem navigasi, yaitu validasi data GNSS, IMU, dan odometri, estimasi pose menggunakan EKF lokal dan global, pengelolaan sistem koordinat map-odom, serta perencanaan jalur menggunakan Smac Hybrid-A* pada Navigation2. Ketiga subsistem tersebut bekerja pada platform ADV yang sama dan saling bertukar data selama kendaraan beroperasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik dan kualitas data GNSS, IMU, umpan balik sudut kemudi, dan umpan balik RPM sebagai dasar pembentukan odometri serta masukan sistem lokalisasi pada *Autonomous Delivery Vehicle*?
2. Bagaimana konfigurasi dan kinerja Extended Kalman Filter lokal dalam mengolah data odometri kendaraan dan IMU untuk menghasilkan estimasi gerak lokal kendaraan yang kontinu, responsif, dan konsisten?
3. Bagaimana konfigurasi dan kinerja *Extended Kalman Filter* global dalam mengolah posisi GNSS serta informasi gerak dan arah yang telah melalui proses validasi untuk menghasilkan estimasi posisi global kendaraan yang stabil, kontinu, dan konsisten terhadap kerangka peta?
4. Bagaimana konfigurasi dan kinerja Smac Hybrid-A* dalam menghasilkan *global path* yang sesuai dengan karakteristik kinematika kendaraan Ackermann berdasarkan waktu perencanaan, keberhasilan pembentukan jalur, galat titik akhir (*endpoint error*) terhadap tujuan, dan kelayakan jalur terhadap *global costmap*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian dan penyusunan laporan ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik dan kualitas data GNSS, IMU, umpan balik sudut kemudi, dan umpan balik RPM sebagai dasar pembentukan odometri serta masukan sistem lokalisasi pada *Autonomous Delivery Vehicle*.
2. Menentukan konfigurasi dan menganalisis kinerja Extended Kalman Filter lokal dalam mengintegrasikan data odometri dan kecepatan sudut sumbu Z dari IMU untuk menghasilkan estimasi gerak lokal kendaraan yang kontinu, responsif, dan konsisten.
3. Menentukan konfigurasi dan menganalisis kinerja Extended Kalman Filter global dalam mengolah posisi GNSS serta informasi gerak dan arah yang telah melalui proses validasi untuk menghasilkan estimasi posisi global kendaraan yang stabil, kontinu, dan konsisten terhadap kerangka peta.
4. Menentukan konfigurasi dan menganalisis kinerja Smac Hybrid-A* dalam menghasilkan *global path* yang sesuai dengan karakteristik kinematika kendaraan

Ackermann berdasarkan waktu perencanaan, keberhasilan pembentukan jalur, kesesuaian titik akhir jalur terhadap tujuan, dan kelayakan jalur terhadap global costmap.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoretis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai keterkaitan karakteristik data GNSS, IMU, umpan balik sudut kemudi, umpan balik RPM, dan odometri dengan proses estimasi keadaan kendaraan menggunakan *Extended Kalman Filter*. Penelitian ini juga memberikan gambaran mengenai penerapan EKF lokal dan EKF global berdasarkan fungsi serta kerangka koordinat masing-masing dalam sistem lokalisasi kendaraan. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi mengenai penerapan Smac Hybrid-A* pada Navigation2 untuk membentuk *global path* yang mempertimbangkan karakteristik kinematika kendaraan Ackermann dan representasi lingkungan pada *global costmap*.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam mengevaluasi kualitas data GNSS, IMU, umpan balik sudut kemudi, dan umpan balik RPM sebelum digunakan sebagai masukan sistem lokalisasi kendaraan. Hasil pengujian EKF lokal dan EKF global dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi estimator untuk menghasilkan informasi gerak lokal dan posisi global kendaraan yang kontinu dan konsisten. Hasil pengujian Smac Hybrid-A* juga dapat menjadi acuan dalam menentukan konfigurasi *global planner* yang sesuai dengan karakteristik kinematika kendaraan Ackermann dan kondisi lingkungan pada *global costmap*. Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan dan penyempurnaan sistem navigasi *Autonomous Delivery Vehicle* berbasis ROS 2 dan Navigation2.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian memiliki ruang lingkup yang jelas, batasan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian berfokus pada sistem navigasi Autonomous Delivery Vehicle (ADV), meliputi lokalisasi, odometri, EKF lokal dan global, serta global path planning menggunakan Navigation2.
2. Data lokalisasi menggunakan GNSS CUAV NEO 3, IMU Yahboom ROS 10-Axis, serta odometri yang dibentuk dari informasi RPM dan sudut kemudi kendaraan.
3. Estimasi pose kendaraan dibatasi pada gerak dua dimensi pada bidang planar, sehingga gerak vertikal, roll, dan pitch tidak menjadi fokus penelitian.
4. Metode fusi sensor yang digunakan hanya Extended Kalman Filter (EKF), yang terdiri atas EKF lokal dan EKF global tanpa membandingkan metode estimasi lainnya.
5. EKF lokal mengolah data odometri dan IMU, sedangkan EKF global digunakan untuk membentuk estimasi pose kendaraan terhadap peta dengan memanfaatkan informasi posisi global.
6. Sistem koordinat yang dianalisis dibatasi pada hubungan frame map, odom, base_footprint, serta frame sensor yang diperlukan dalam Navigation2.
7. URDF digunakan untuk mendefinisikan struktur frame, joint, posisi sensor, dimensi kendaraan, dan footprint tanpa membahas analisis mekanik kendaraan.
8. Global planner yang dianalisis hanya Smac Hybrid-A* pada Navigation2 tanpa melakukan perbandingan dengan algoritma global path planning lainnya.
9. Evaluasi Smac Hybrid-A* meliputi keberhasilan pembentukan jalur, waktu perencanaan, kesesuaian titik akhir terhadap goal, serta kelayakan jalur terhadap global costmap.
10. MPPI digunakan sebagai local controller untuk mendukung pergerakan kendaraan, tetapi tuning dan evaluasi performa MPPI tidak menjadi objek penelitian.
11. Sistem persepsi seperti kamera, LiDAR, YOLOv2, obstacle detection, dan lane detection berada di luar ruang lingkup penelitian.
12. Sistem aktuasi seperti FOC, ESC, STM32, kontrol motor, kecepatan, dan steering tidak dievaluasi, kecuali data RPM dan sudut kemudi yang digunakan dalam pembentukan odometri.
13. Pengujian dilakukan pada prototipe ADV dan lingkungan pengujian yang telah ditentukan, bukan pada jalan umum atau kondisi lalu lintas dinamis.

1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Proposal Tugas Akhir ini dibagi menjadi tiga bab yang saling berhubungan satu sama lain. Sistematika penulisan dan pembahasan dalam penulisan ini yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pada BAB ini akan menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan, dan sistematika penulisan. Bab ini memberikan alasan mengapa sensor fusion diperlukan dan mengapa EKF serta Navigation2 dipilih sebagai bagian sistem navigasi.

BAB II DASAR TEORI

Pada BAB ini akan membahas dasar teori dan tinjauan pustaka. Pembahasan dimulai dari konsep Autonomous Delivery Vehicle dan sistem navigasi, dilanjutkan dengan GNSS, IMU, odometri, sensor fusion, Extended Kalman Filter, sistem koordinat ROS 2, Navigation2, peta dan costmap, algoritma A*, Smac Planner, controller, tracking jalur, serta parameter evaluasi. Bab ini berfungsi sebagai fondasi konseptual untuk menjelaskan setiap keputusan yang dibuat pada metode penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada BAB ini akan menjelaskan metode penelitian secara rinci. Pembahasan mencakup diagram blok sistem, aspek mekanik yang memengaruhi navigasi, prinsip kerja, flowchart, teknik fabrikasi, kelistrikan, arsitektur perangkat lunak, akuisisi sensor, konfigurasi EKF, TF, peta, costmap, Smac Planner, controller, komunikasi Jetson–STM32, serta rancangan pengujian. Bab ini harus cukup rinci sehingga konfigurasi dapat direplikasi atau setidaknya ditelusuri oleh pembaca.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan pembahasan yang meliputi karakteristik data GNSS, IMU, umpan balik sudut kemudi, dan umpan balik RPM; pengujian serta penentuan konfigurasi EKF lokal; pengujian serta penentuan konfigurasi EKF global; serta pengujian Smac Hybrid-A* berdasarkan waktu perencanaan, keberhasilan pembentukan jalur, kesesuaian titik akhir jalur terhadap tujuan, dan kelayakan jalur terhadap global costmap.

BAB V PENUTUP

Pada BAB ini berisi kesimpulan dan saran. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian, bukan berdasarkan ekspektasi teori. Setiap kesimpulan harus menjawab

rumusan masalah dan didukung oleh angka yang sudah ditampilkan pada BAB IV. Saran diarahkan pada peningkatan hardware sensor, tuning EKF, penyempurnaan model, planner/controller, serta perluasan skenario pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bagian ini memuat referensi penulisan serta sumber yang dikutip oleh penulis.