

SKRIPSI

PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI MENGGUNAKAN KINECT V2 DAN LIDAR SERTA SISTEM KONTROL *STEERING* BERBASIS *TYPE 2* *FUZZY LOGIC* PADA *SERVICE ROBOT*



Disusun Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Sriwijaya

Oleh:

SILFANI SANDRA MIRANDA

03041382126104

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI MENGGUNAKAN KINECT V2
DAN LIDAR SERTA SISTEM KONTROL *STEERING* BERBASIS *TYPE 2*
FUZZY LOGIC* PADA *SERVICE ROBOT



SKRIPSI

Disusun Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik Pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh:

SILFANI SANDRA MIRANDA
NIM. 03041382126104

Palembang, 21 Juli 2025

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Mukhammad Abu Bakar Sidik, ST., M.Eng., Ph.D.,
IPU, APEC Eng.
NIP. 197108141999031005

Menyetujui,

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T, M.S, IPM,
NIP. 198407302008122001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tanga dibawah ini:

Nama : Silfani Sandra Miranda
NIM : 03041382126104
Fakultas : Teknik
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro
Universitas : Universitas Sriwijaya

Hasil Pengecekan *Software iThenticate/Turnitin*:11%

Menyatakan bahwa laporan hasil penelitian Saya yang berjudul "Perancangan Sistem Navigasi Menggunakan Kinect V2 Dan Lidar Serta Sistem Kontrol *Steering* Berbasis *Type 2 Fuzzy Logic* Pada *Service Robot*" merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam karya ilmiah ini, maka Saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini Saya buat dengan sebenarnya dan tanpa paksaan.

Palembang, 21 Juli 2025



1000
METERAL
TEMPEL
BUD4AMX38/913/17

Silfani Sandra Miranda

NIM. 03041382126104

LEMBAR PERNYATAAN DOSEN

Saya sebagai pembimbing menyatakan bahwa telah membaca dan menyetujui skripsi ini dan dalam pandangan saya skop dan kuantitas skripsi ini mencakup sebagai mahasiswa sarjana strata satu (S1).

Tanda Tangan

:  _____

Pembimbing Utama

: Dr. Eng. Ir. Suci Dwijayanti, S.T, M.S., IPM

Tanggal

: 21 / Juli/2025

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Silfani Sandra Miranda
NIM : 03041382126104
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah Saya yang berjudul:

PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI BERBASIS 3D DAN KONTROL STEERING MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC TYPE 2* PADA *SERVICE ROBOT*

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tulisan saya sebagai penuli/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Palembang

Pada tanggal : 21 Juli 2025



Silfani Sandra Miranda

NIM. 03041382126104

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur diucapkan kehadirat Allah SWT, serta shalawat dan salam dihaturkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabat. Atas berkat dan rahmat serta ridho Allah SWT, skripsi yang berjudul "Perancangan Sistem Navigasi Berbasis 3D dan Kontrol *Steering* Menggunakan *Fuzzy Logic Type 2* pada *Service Robot*" dapat diselesaikan.

Pembuatan skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Dalam kesempatan ini diucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta. Kepada Papa, terima kasih atas segala doa, semangat, dan dukungan yang tiada henti. Kepada almarhumah Mama, meskipun telah tiada, kasih sayang dan pengorbanan beliau akan selalu hidup dalam hati penulis dan menjadi kekuatan dalam menyelesaikan setiap langkah perjuangan ini. Semoga Allah SWT memberikan tempat terbaik di sisi-Nya untuk beliau. Aamiin.
2. Kakak Chyntia dan adik Ilham yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan semangat kepada penulis.
3. Ibu Dr. Ir. Eng. Suci Dwijayanti S.T., M.S., IPM. selaku pembimbing akademik dan pembimbing skripsi yang telah memberikan ilmu selama proses penulisan skripsi dan perkuliahan, memberikan arahan kepada penulis selama masa perkuliahan dan dukungan dalam menyelesaikan skripsi.
4. Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM, Ibu Ir. Hera Hikmarika, S.T., M.Eng., Bapak Ir. Zaenal Husin, M.Sc., Bapak Ir. Irmawan, S.Si, M.T., dan Bapak Baginda Oloan Siregar, S.T., M.T., Ir. Rendyansyah, S.Kom., M.T. sebagai dosen Teknik Kendali dan Robotika yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan serta selaku pencetus, pengembang ide, dan memberikan arahan pada tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D., IPU. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya.

6. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan.
7. Teman seperjuangan Tugas Akhir *Service Robot*.
8. Aditya Afriansyah yang selalu mendukung, membantu dan memberikan semangat kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir dan penulisan skripsi.
9. Sahabat penulis Mardiana, Ayu Nurhaliza dan Salsanabila Hanifa yang selalu mendukung dan memberikan semangat.
10. Teman-teman anggota klub robotika sekaligus konsentrasi TKK yang telah kebersamai selama masa perkuliahan.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu baik dukungan fisik maupun material sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati menerima segala bentuk kritik dan saran yang membangun agar menjadi bahan evaluasi untuk penulis di masa mendatang.

Palembang, 21 Juli 2025



Silfani Sandra Miranda

NIM. 03041382126104

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI MENGGUNAKAN KINECT V2 DAN LIDAR SERTA SISTEM KONTROL STEERING BERBASIS TYPE 2 FUZZY LOGIC PADA SERVICE ROBOT

(Silfani Sandra Miranda, 03041382126104, 2025, 94 halaman)

Service robot merupakan robot yang dapat membantu manusia di lingkungan kompleks. Agar dapat bergerak aman dan efisien, robot memerlukan sistem pemetaan, lokalisasi, navigasi, dan kendali gerak yang akurat dan stabil, terutama di area *indoor* dengan rintangan kecil yang banyak. Namun, studi yang membahas keempat proses itu dalam satu kesatuan masih sangat terbatas. Sehingga, penelitian ini mengembangkan sistem navigasi dan kendali *steering* berbasis kerangka kerja *positioning, localization, and navigation* (PLAN) yang terintegrasi dengan sensor RPLIDAR A3 dan Kinect v2. Pemetaan dilakukan menggunakan *g-mapping simultaneous localization and mapping* (SLAM) dan *Real Time Appearance Based Mapping* (RTAB-Map), dengan hasil evaluasi menunjukkan nilai *mean square error* (MSE) sebesar 0,26, F1-Score sebesar 0,1714, *recall* sebesar 0,0312, dan *precision* sebesar 0,0498. Hasil ini menunjukkan hasil peta yang baik. Peta 3D dari RTAB-Map dikonversi ke format 2D untuk navigasi. Akurasi *self-localization* ditingkatkan menggunakan *extended Kalman filter* (EKF). Perencanaan jalur *bidirectional RRT** digunakan untuk menentukan rute terbaik dan *artificial potential field* (APF) untuk menghindari rintangan secara dinamis maupun statis. Sementara, hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol *type-2 fuzzy logic member 7* memberikan respon lebih baik dengan *rise time* 0.2901 detik, *settling time* 1.6819 detik, *peak time* 1.6997 detik, *overshoot* 0.4167%, dan *steady state error* 10 (3,6). Sedangkan pada kontrol PID, *rise time* 0.7938 detik, *settling time* 7.2819 detik, *peak time* 7.3255 detik, *overshoot* 1.6736%, dan *steady state error* 11 (3,96). Hal ini membuktikan kontrol *type 2 FLC member 7* lebih cepat, stabil, dan akurat.

Kata Kunci: *Service Robot, Steering, G-Mapping SLAM, RTAB-Map, EKF, Bidirectional RRT*, APF, Fuzzy Logic Type-2, PID.*

ABSTRACT

DESIGN OF A NAVIGATION SYSTEM USING KINECT V2 AND LIDAR WITH A TYPE-2 FUZZY LOGIC–BASED STEERING CONTROL ON A SERVICE ROBOT

(Silfani Sandra Miranda, 03041382126104, 2025, 94 pages)

Service robots are designed to assist humans in complex environments. To operate safely and efficiently, they require accurate and stable mapping, localization, navigation, and motion control systems, particularly in indoor environments with numerous small obstacles. However, studies that integrate all four processes into a single framework remain limited. This study proposes a navigation and steering control system based on the Positioning, Localization, and Navigation (PLAN) framework, integrated with RPLIDAR A3 and Kinect v2 sensors. Mapping is performed using g-mapping Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Real-Time Appearance Based Mapping (RTAB-Map), yielding evaluation results with a mean square error (MSE) of 0.26, an F1-score of 0.1714, a recall of 0.0312, and a precision of 0.0498, indicating good map quality. The 3D map from RTAB-Map is converted into a 2D format for navigation, while self-localization accuracy is enhanced using an Extended Kalman Filter (EKF). Path planning employs bidirectional RRT to determine optimal routes, and an Artificial Potential Field (APF) is applied for dynamic and static obstacle avoidance. Experimental results demonstrate that a type-2 fuzzy logic controller with seven membership functions outperforms a PID controller, achieving a rise time of 0.2901 s, a settling time of 1.6819 s, a peak time of 1.6997 s, an overshoot of 0.4167%, and a steady-state error of 10 (3.6). In contrast, the PID controller shows slower and less stable performance. These findings indicate that the proposed integrated system can provide faster, more stable, and more accurate navigation and steering control for service robots in complex indoor environments.*

Keywords: Service Robot, Steering, G-Mapping SLAM, RTAB-Map, EKF, Bidirectional RRT*, APF, Fuzzy Logic Type-2, PID.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN DOSEN	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Keaslian Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1. <i>State of The Art</i>	8
2.1. <i>Humanoid Robot</i>	16
2.3. G-Mapping SLAM	17
2.4. <i>Real Time Appearance Based Mapping</i> (RTAB-Map)	18
2.5. <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF)	19
2.6. <i>Artificial Potential Field</i> (APF)	21
2.7. <i>Bi-directional Rapidly-exploring Random Tree Star</i> (RRT*).....	21
2.8. <i>Fuzzy Logic Controller</i>	23
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1. Studi Literatur.....	26
3.2. Tahap Perancangan Sistem <i>PLAN</i> (<i>Positioning, Localization, dan Navigation</i>) dan Kendali <i>Steering Service Robot</i>	26
3.3. Pengujian Sistem <i>PLAN</i> (<i>Positioning, Localization dan Navigation</i>)...	45
3.4. Pengujian Sistem Kendali <i>Steering</i>	47

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1. Hasil Perancangan Alat	48
4.2. Pemetaan Secara Simulasi.....	48
4.2.1 Simulasi Pemetaan	48
4.2.2. Perbandingan Pemetaan Secara Simulasi	50
4.3. Pemetaan <i>Real-Time</i>	56
4.4. Sistem Navigasi <i>Service Robot</i>	63
4.5. Pengujian Navigasi <i>Service Robot</i>	68
4.6. Hasil Simulasi Sistem Kendali <i>Type-1 FLC, Type-2 FLC</i> dan <i>PID</i>	73
4.6.1 Simulasi Sistem Kendali <i>Steering Service Robot</i>	73
4.6.1. Hasil Perbandingan Simulasi Fungsi Keanggotaan <i>Type-2 FLC</i>	74
4.6.2. Hasil Perbandingan Simulasi Fungsi Keanggotaan <i>Type-1 FLC</i>	75
4.6.3. Hasil Perbandingan Simulasi <i>PID</i> dan Tanpa Algoritma Kontrol	76
4.6.5. Hasil Perbandingan Simulasi <i>Type-1 FLC, Type-2 FLC</i> dan <i>PID</i>	78
4.7.1. Pengujian Sistem Kendali <i>Type-2 FLC</i> dan <i>PID</i> Secara <i>Real Time</i>	79
4.7.2. Pengujian Kendali <i>Steering</i> Secara <i>Real Time</i> Pada Rute	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	94
5.1. Kesimpulan.....	94
DAFTAR PUSTAKA	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Hasil Pemetaan Real Time Gmapping (1.a), Hasil Pemetaan Simulasi Gmapping (1.b), Hasil Pemetaan Real Time Hector SLAM (2.a), Hasil Pemetaan Simulasi Hector SLAM (2.b), Hasil Pemetaan Real-Time Karto SLAM (3.a), Hasil Pemetaan Simulasi Karto SLAM(3.b), Hasil Pemetaan Real-Time RTAB-Map(4.a), Hasil Pemetaan Simulasi RTAB-Map(4.b)	8
Gambar 2. 2. RTAB-Map Mapping 3D	9
Gambar 2. 3. Path Length di Lingkungan Sederhana 2D penggunaan algortima RRT (a), Path Length di Lingkungan Sederhana 2D penggunaan algortima RRT-APF (b)	12
Gambar 2. 4. Path Length di Lingkungan Sederhana 3D penggunaan algortima RRT (a), Path Length di Lingkungan Sederhana 3D penggunaan algortima RRT-APF (b).....	12
Gambar 2. 5. Path Length di Lingkungan Kompleks 2D penggunaan algortima RRT (a), Path Length di Lingkungan Kompleks 2D penggunaan algortima RRT-APF (b)	12
Gambar 2. 6. Path Length di Lingkungan Kompleks 3D penggunaan algortima RRT (a), Path Length di Lingkungan Kompleks 3D penggunaan algortima RRT-APF (b)	13
Gambar 2. 7. Waktu Mencapai Set Point di Lingkungan Sederhana 2D penggunaan algortima RRT (a), Waktu Mencapai Set Point di Lingkungan Sederhana 3D penggunaan algortima RRT-APF (b)	13
Gambar 2. 8. Waktu Mencapai Set Point di Lingkungan Kompleks 2D penggunaan algortima RRT (a), Waktu Mencapai Set Point di Lingkungan Kompleks 3D penggunaan algortima RRT-APF (b)	13
Gambar 2. 9. Waktu Mencapai Set Point	14
Gambar 2. 10. Perubahan sudut dan trajektori steering	15
Gambar 2. 11. Parameter Kinematik (a) Kurva Yaw Rate, (b) Perbuahan Akselerasi Lateral	15
Gambar 2. 12. Service Robot “Pepper”	17
Gambar 2. 13. Hasil Mapping Algoritma G-mapping SLAM	18

Gambar 2. 14. Hasil Mapping RTAB-Map Menggunakan LiDAR 2D dan RGB-D Kamera	19
Gambar 2. 15. Ilustrasi RTAB-Map Pada Kamera Kinectv2 dan LiDAR.....	19
Gambar 2. 16. Path Planning RRT*	22
Gambar 2. 17. Path Planning Bi-directional RRT*	22
Gambar 2. 18. Perbandingan Dua Algoritma di Lingkungan yang Penuh Hambatan. (a) Algoritma Bi-directional RRT*, (b) Algoritma Bi-directional RRT* dan APF	22
Gambar 2. 19. Fungsi Keanggotaan Upper MF dan Lower MF	24
Gambar 3. 1. Flowchart penelitian.....	25
Gambar 3. 2. Perancangan Sistem Hardware RPLiDAR A3 dan Kinectv2.....	27
Gambar 3. 3. Skematik hardware	27
Gambar 3. 4. RPLIDAR A3.....	27
Gambar 3. 5. Kamera Kinectv2 Microsoft Xbox.....	28
Gambar 3. 6. <i>Rotary Encoder</i>	29
Gambar 3. 7. MPU 6050	29
Gambar 3. 8. <i>Power Window Motor</i>	30
Gambar 3. 9. Arduino Mega 2560	30
Gambar 3. 10. Flowchart Perancangan Sistem ROS	31
Gambar 3. 11. Flowchart Pemrograman Pembuatan Peta.....	33
Gambar 3. 12. Flowchart Perancangan Sistem Navigasi Service Robot	34
Gambar 3. 13. Blok Diagram Sistem Kendali <i>Steering</i>	35
Gambar 3. 14. Grafik Fungsi Keanggotaan Input Error.....	36
Gambar 3. 15. Grafik Fungsi Keanggotaan Input Derror	40
Gambar 3. 16. Perancangan dan Pemrograman Sistem Kendali Steering	45
Gambar 3. 17. Sketsa 2D Laboratorium Kendali dan Robotika	46
Gambar 4. 1. Hasil <i>Service Robot</i> Bagian Kaki	48
Gambar 4. 2. Hasil URDF Service Robot Pada Gazebo	49
Gambar 4. 3. World Laboratorium Kendali Robotika Universitas Sriwijaya.....	50
Gambar 4. 4. Perhitungan Mapping dengan File .ply (a) MSE. (b) F1-Score.	55
Gambar 4. 5. Ruang Pengujian Pemetaan Laboratorium Kendali Robotika.....	60
Gambar 4. 6. Cloud Statis RTAB-Map.....	62

Gambar 4. 7. Performa Sistem Pemetaan Real Time.....	62
Gambar 4. 8. (a). Hasil Peta Export dari 3D ke 2D untuk peta Costmap dalam Navigasi move_base, (b) Hasil Peta 3D.....	63
Gambar 4. 9. Hasil Pemetaan Menggunakan G-mapping SLAM dan RTAB-Map secara Real Time	63
Gambar 4. 10. Hasil Konfigurasi Extend Kalman Filter Menghasilkan Covariance. (a) Kondisi Awal belum menggunakan EKF. (b) Kondisi Robot menggunakan EKF.	64
Gambar 4. 11. Implementasi Path Planning dengan Peta Virtual Gazebo.....	68
Gambar 4. 12. Pembuatan Lintasan Menuju Setpoint Menggunakan PlotJuggler	68
Gambar 4. 13. Pengujian Sensor Secara Real Time Path Planning	69
Gambar 4. 14. Hasil Pembuatan Model Simulink.....	74
Gambar 4. 15. Hasil Perbandingan Fungsi Keanggotaan Simulasi Type-2 FLC .	74
Gambar 4. 16. Hasil Perbandingan Fungsi Keanggotaan Simulasi Type-1 FLC .	76
Gambar 4.17. Hasil Perbandingan Simulasi PID	77
Gambar 4. 18. Hasil Simulasi Type-1 FLC, Type-2 FLC dan PID	78
Gambar 4. 19. Hasil Steering 90° Fuzzy Type 2 7 member	80
Gambar 4. 20. Hasil Steering 90° PID	80
Gambar 4. 21. Hasil Steering 180° Fuzzy Type 2 7 member	81
Gambar 4. 22. Hasil Steering 180° PID	82
Gambar 4. 23. Hasil Pengujian 7 Member Rute Tanpa Obstacle	86
Gambar 4. 24. Hasil Pengujian 7 Member Rute Dengan Obstacle.....	87
Gambar 4. 25. Hasil Pengujian 7 Member Rute Dengan Obstacle Bergerak.....	88
Gambar 4. 26. Hasil Pengujian 5 Member Rute Tanpa Obstacle	88
Gambar 4. 27. Hasil Pengujian 5 Member Rute Dengan Obstacle.....	89
Gambar 4. 28. Hasil Pengujian 5 Member Rute Dengan Obstacle Bergerak.....	90
Gambar 4. 29. Hasil Pengujian 3 Member Rute Tanpa Obstacle	91
Gambar 4. 30. Hasil Pengujian 3 Member Rute Dengan Obstacle.....	91
Gambar 4. 31. Hasil Pengujian 3 Member Rute Dengan Obstacle Bergerak.....	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Indeks SSIM dan Kualitas Perbandingan Simulasi vs Real-Time pada Pemetaan	9
Tabel 2. 2. Perbandingan Nilai APE	10
Tabel 2. 3. Hasil Simulasi Type-2 FLC dan Type-1 FLC 7 member.....	16
Tabel 2. 4. Hasil Pengujian Perfoma Steering Realtime.....	16
Tabel 3. 1. Spesifikasi RPLIDAR A3	28
Tabel 3. 2. Spesifikasi Kamera Kinectv2 Microsoft Xbox	28
Tabel 3. 3. Spesifikasi Laptop.....	30
Tabel 3. 4. Membership Function Input Error	37
Tabel 3. 5. Membership Function Input Derror	40
Tabel 3. 6. Membership Function Output	42
Tabel 3. 7. Rules Type-2 FLC.....	43
Tabel 4. 1. Konfigurasi Simulasi Hector SLAM.....	50
Tabel 4. 2. Konfigurasi Simulasi G-Mapping SLAM.....	51
Tabel 4. 3. Konfigurasi Simulasi Karto SLAM	52
Tabel 4. 4. Hasil Perbandingan Pemetaan Secara Simulasi	53
Tabel 4. 5. Hasil MSE dan F-Score Algoritma SLAM	55
Tabel 4. 6. Konfigurasi G-Mapping SLAM secara Real Time	57
Tabel 4. 7. Konfigurasi RTAB-Map SLAM secara Real Time	58
Tabel 4. 8. Pergerakan Robot Saat Pembuatan Peta Secara Real-Time.....	60
Tabel 4. 9. Konfigurasi Extend Kalman Filter (EKF).....	64
Tabel 4. 10. Konfigurasi Parameter Local_Costmap	65
Tabel 4. 11. Konfigurasi Parameter global_costmap	65
Tabel 4. 12. Konfigurasi Parameter common_costmap	66
Tabel 4. 13. Konfigurasi Parameter sample_planner_params (Global Path Planning)	66
Tabel 4. 14. Konfigurasi Parameter apf_controller_parameter.....	67
Tabel 4. 15. Konfigurasi Parameter move_base	67
Tabel 4. 16. Hasil Pengujian Navigasi secara Real Time Service Robot	72
Tabel 4. 17. Hasil Simulasi Type-2 FLC.....	75
Tabel 4. 18. Hasil Simulasi Type-1 FLC	76

Tabel 4. 19. Hasil Simulasi PID.....	77
Tabel 4. 20. Hasil Steering Setpoint 90°	80
Tabel 4. 21. Hasil Steering Setpoint 180° PID	82
Tabel 4. 22. Hasil Pengujian Realtime Steering Pada Rute	83

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Revolusi industri saat ini telah membawa perubahan signifikan dalam kehidupan, terutama melalui kemajuan teknologi informasi dan perkembangan robot yang dapat membantu manusia menjalankan berbagai tugas kompleks [1]. Ada berbagai jenis robot yang telah dikembangkan, seperti *mobile robot*, *drone militer*, *humanoid robot*, robot di ruang operasi, dan lain sebagainya [2]. Salah satu jenis robot yang mengalami perkembangan yang pesat adalah *humanoid robot* yang menyerupai manusia dengan fitur wajah, mata, lengan dan kaki serta memiliki kemampuan sosial [3]. *Humanoid robot* memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan lingkungan seperti manusia yang menggunakan indera untuk menghadapi perubahan [4]. Bentuk *humanoid robot* yang digunakan untuk memberikan pelayanan dinamakan *service robot*, dimana robot tersebut memiliki kemampuan baik dalam meniru perilaku, berinteraksi, dan melayani secara otonom atau semi otonom layaknya manusia[5].

Service robot telah digunakan untuk mempermudah aktivitas dalam berbagai aspek kehidupan manusia, seperti *E-Butler* yang memiliki fungsi sebagai pelayan hotel [6] dan *service robot* yang menggantikan suster untuk melayani perawatan pasien [7]. Dalam menjalankan fungsinya, *service robot* perlu bergerak secara otonom. Hal ini mengharuskan *service robot* untuk memiliki kemampuan untuk memetakan lingkungan dalam penentuan rute terbaik. Pembuatan peta 3D menggunakan *visual simultaneous localization and mapping* (V-SLAM) berbasis data visual dari kamera (monokular, stereo, atau RGB-D) secara *real-time* untuk menghasilkan model geometri dan visual telah dilakukan pada [8], [9]. RGB-D SLAM merupakan bagian dari V-SLAM yang menggunakan kamera RGB-D dengan sensor kedalaman untuk membangun peta. Pemetaan menggunakan RGB-D SLAM dapat dilakukan dengan *real-time appearance-based mapping* (RTAB-Map), yang menghasilkan peta 2D dari sensor LiDAR dan peta 3D dari kamera RGB untuk mendeteksi objek 3D statis dan dinamis di lingkungan yang selalu berubah [10]. Algoritma *simultaneous localization and mapping* (SLAM) dalam pemetaan, seperti Hector SLAM, *g-mapping*, Karto digunakan untuk sensor LiDAR

yang dimana kualitas peta dan akurasi akan ditampilkan dalam 3D berupa output *point cloud*, *OctoMap*, dan lainnya [11], [12].

Secara keseluruhan, kerangka kerja *service robot* disebut PLAN, yaitu penentuan posisi robot (*positioning*), pemahaman lokasi terhadap lingkungan atau peta (*localization*), dan perencanaan serta penentuan jalur terbaik (*navigation*)[13]. Posisi robot (*positioning*) merupakan kemampuan robot untuk melacak lokasi secara konsisten berdasarkan informasi awal yang diketahui. Akan tetapi, ketidakpastian dalam proses ini dapat menyebabkan kegagalan lokalisasi. Selain itu, robot harus dapat mendeteksi gangguan yang terjadi di lingkungan (relokasi) yang efektif [14]. Algoritma SLAM dapat menerapkan *self-localization* yang efektif dan digunakan oleh *service robot* di zona tidak dikenal. Namun, permasalahan umum dari algoritma ini ialah menciptakan dan memperbarui peta lingkungan secara otomatis [15]. Sehingga perlu adanya algoritma tambahan dalam mengatasi hal tersebut, yaitu *self-localization* probabilistik yang merupakan pendekatan odometri berdasarkan data sensor yang tidak pasti dan ketidaktepatan model gerak robot, seperti *Markov localization*, *Kalman filter localization* dan *adaptive monte carlo localization* (AMCL) [16].

Navigasi (*navigation*) adalah kemampuan untuk membuat perencanaan jalur sehingga robot dapat berpindah dari posisi awal ke posisi tujuan dengan optimal tanpa adanya tabrakan dengan objek di lingkungan sekitar. Untuk mendukung proses ini diperlukan sistem kendali yang mampu mengontrol dan mempertahankan *steering* gerakan robot pada saat bermanuver [17], [18]. Navigasi ini berkaitan dengan *path planning* yang terdiri dari *global path planning* dan *local path planning*. *Global path planning* berfokus pada perencanaan secara *offline* dan mampu memprediksi rute dengan baik tetapi tidak *real-time* dan tidak bisa beradaptasi [19], seperti algoritma *Dijkstra*, *A-star*, *rapidly-exploring random tree* (RRT), *potential field* (PF), *any colony optimization* (ACO) [20]. *Local path planning* ialah perencanaan dinamis secara *online*, dimana robot mampu membuat keputusan secara *real-time* berdasarkan lingkungan sekitar dan baik untuk tugas yang kompleks. Namun, tantangan yang harus dihadapi robot adalah agar tidak bertabrakan dengan objek yang ada di lingkungan [21]. Bagian dari algoritma ini antara lain *dynamic window approach* (DWA) [22], *time elastic band* (TEB), *model*

predictive control (MPC) [23], dan *adaptive monte carlo localization* (AMCL) [16].

Tantangan utama yang sering dihadapi *service robot* meliputi medan bervariasi, adanya *obstacles* kecil yang susah dideteksi, dan perubahan pencahayaan menyebabkan kesalahan dalam pemetaan [24], [25]. Pada penelitian [11] dikembangkan kemampuan untuk menghindari *obstacles*, dan implementasi sistem kontrol yang terintegrasi dengan penggunaan sensor proprioseptif dan sensor eksteroseptif pada *services robot*. Ada berbagai metode sistem kendali yang umum diterapkan, seperti *fuzzy logic* [26], *proportional-integral-derivative* (PID) [27], dan *genetic algorithm* [28]. Sistem kendali robot pada umumnya sering mengalami ketidakpastian dan gangguan yang menyebabkan *steering* memiliki nilai yang tidak akurat sehingga mengurangi efisiensi dalam sistem navigasi robot [18].

Dalam menjalankan kerangka kerja PLAN, *service robot* dilengkapi dengan berbagai sensor, seperti LiDAR dan Kinectv2 XBOX (Kamera RGB). Sensor LiDAR digunakan dalam pemetaan lingkungan sekitar robot dan memberikan jarak akurat untuk mendukung *localization* dan *navigation* [29]. Sedangkan, KinectV2 XBOX dilengkapi dengan kamera RGB yang mampu mendeteksi objek dan mendukung pemetaan 3D serta pengenalan visual guna meningkatkan sistem *localization* melalui SLAM [30]. Selain itu, *service robot* juga perlu dilengkapi sistem kendali. Adanya penggunaan sensor-sensor ini dan algoritma yang digunakan, robot mampu bergerak secara otonom dengan navigasi yang lebih efisien dan akurat di dalam ruangan kompleks [24].

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dibahas, kerangka kerja PLAN belum diterapkan secara menyeluruh pada *service robot*. Setiap bagian dibuat secara terpisah sehingga pada penelitian ini dikembangkan penentuan posisi, lokalisasi, dan navigasi yang terintegrasi pada *service robot*. Selain itu, robot juga perlu dilengkapi dengan sistem kendali untuk memastikan robot dapat bergerak dari posisi awal ke tujuan. Sistem navigasi pada penelitian ini menggunakan algoritma V-SLAM dengan memanfaatkan data odometri yang dihasilkan oleh algoritma *g-mapping* SLAM karena memiliki nilai akurasi baik secara *real-time* lalu dijadikan data odometri pada RTAB-Map outputnya berupa *point cloud* 3D [24]. Sedangkan *self-localization* menggunakan *extend kalman filter* untuk menghindari terjadinya

error pada sensor sehingga tidak terjadi slip roda [31]. *Artificial potential field* (APF) digunakan sebagai *local path-planning* yang digabungkan dengan *global path planning A** dan *Bi-directional RRT** [32],[33],[34]. Lalu, sistem kendali robot menggunakan *fuzzy logic control type-2*[35],[38] sehingga robot mampu bermanuver di lingkungan yang kompleks.

1.2.Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, *service robot* diharapkan dapat mengintegrasikan sistem navigasi yang efisien dan akurat, khususnya dalam pembuatan peta 3D secara *real-time* yang memungkinkan robot merencanakan rute optimal dan menghindari hambatan dengan tepat. Namun, pada penelitian sebelumnya, navigasi yang dibahas belum sepenuhnya sesuai dengan kerangka kerja PLAN. Selain itu, sistem kendali robot masih belum diintegrasikan pada sistem navigasi sehingga robot belum dapat bekerja secara optimal di lingkungan yang kompleks.

1.3.Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan kerangka kerja PLAN pada *service robot*, dimana sistem navigasi 3D dibuat pada *service robot* menggunakan pemetaan 3D yang dibuat oleh RTAB-Map dengan kolaborasi algoritma *g-mapping* SLAM. Kemudian, *self-localization extendkalman filter* digunakan sebagai *localization algorithm*. Pada *local path-planning* digunakan APF yang digabungkan dengan A-Star dengan *Bi-directional RRT* menghasilkan *Bi-directional RRT** sebagai *global path planning*. Selain itu, penelitian ini juga menguji performa dari *fuzzy logic control type-2* yang digunakan sebagai sistem kendali pergerakan robot. Sistem navigasi yang telah dibuat akan diimplementasikan untuk mengetahui kemampuan dari *service robot*.

1.4.Batasan Masalah

Agar penelitian ini tidak keluar dari pembahasannya maka penelitian ini memiliki beberapa batasan, yaitu:

1. Sensor yang digunakan untuk sistem navigasi berupa sensor LiDAR A3, *rotary encoder*, dan MPU 6050 serta penggunaan Kamera *Kinectv2* XBOX.
2. *Actuator* yang digunakan pada *service robot* menggunakan motor *power window*.

3. Sistem kendali yang digunakan ialah *Type-2 Fuzzy Logic Controller* metode sugeno.
4. Pusat kontrol sistem navigasi yang digunakan ialah Laptop.
5. Lingkungan sebagai pemetaan dilakukan di dalam ruangan Laboratorium Kendali dan Robotika Universitas Sriwijaya.
6. Arduino Mega sebagai kontrol penggerak dan sebagai pengola dari *rotary encoder*.
7. *Software* pemetaan 3D berupa RTAB-Map dari ROS Noetic 20.04.

1.5. Keaslian Penelitian

Beberapa penelitian terdahulu yang telah membuat sistem navigasi pada *mobile robot*. Jerin Peter, dkk [24] dalam penelitiannya mengembangkan sebuah *autonomous ground robot* beroda empat menggunakan sensor YD-LiDAR X4 dan Kamera X-BOX 360 Kinect. Sistem ini memanfaatkan RTAB-Map SLAM untuk pemetaan 3D dengan outputnya berupa *point cloud*. *Localization* menggunakan AMCL dan Kalman *filter* untuk menghindari slip pada roda. Pemetaan 2D menggunakan algoritma g-mapping, *local path planning* yang diujicobakan menggunakan *dynamic window approach* (DWA) dan *timed elastic band* (TEB). Penelitian tersebut dapat hasil untuk pemetaan yang baik, akan tetapi tidak memiliki *global path planning* dan hanya diimplementasikan dalam skala prototipe kecil.

Selanjutnya, penelitian David Portugal, dkk [36] membahas sistem pemetaan 3D *indoor* dengan memanfaatkan *software* RTAB-Map dari ROS dan sensor LiDAR A2 serta kamera Microsoft Kinect v2 yang menggunakan data odometri yang dihasilkan oleh algoritma *Hector* SLAM untuk dijadikan data odometri pada RTAB-Map. Namun, penelitian tersebut belum dilengkapi navigasi berupa *self-localization* dan *path planning* serta prototipe yang digunakan berupa teroli dengan roda yang dilengkapi kamera *Kinectv2* dan LiDAR. Penelitian Priyova Muhammad Rafiel, dkk[37] melakukan uji pemetaan dengan memanfaatkan kamera *KinectV2* Xbox, dimana robot dikendalikan dengan *joystick* untuk membuat proses pemetaan di setiap sudut wilayah baik *indoor* maupun *outdoor* dengan algoritma RGB SLAM yang memanfaatkan RTAB-Map. Hasil peta dalam bentuk Octomap dan file mesh menghasilkan gambar yang sangat efektif. Akan tetapi, penelitian ini hanya

berfokus pada pemetaan 3D sehingga tidak membahas kemampuan robot untuk bernavigasi.

Shijie Zhou, dkk [31] melakukan uji coba dan evaluasi di lingkungan *indoor* dengan *mobile robot* menggunakan RTAB-Map. Metode yang diajukan RTAB-Map VIWO mengintegrasikan kamera stereo dan RGB-D serta IMU ke dalam sistem menggunakan *extended kalman filter* (EKF) untuk meminimalkan kesalahan posisi yang disebabkan sensor. Selain itu, peta *point cloud* 3D dibangun menggunakan RTAB-Map untuk meningkatkan akurasi sistem. Selanjutnya, Thi Thoa Mac, dkk [32] membahas mengenai SLAM terintegrasi sensor LiDAR dan kamera RGB-D. V-SLAM dengan menggunakan algoritma RTAB-Map menawarkan fitur 3D dalam pembuatan peta dengan rekonstruksi 3D yang berkualitas tinggi, *path planning* yang digunakan adalah *Bi-directional RRT**, dan pengendali Fuzzy-PID untuk tujuan navigasi otonom. Bolin Zhang dan Changyong Li [33] membahas mengenai optimalisasi *path-planning* menggunakan RRT-APF, dimana apabila kedua algoritma digabungkan maka dapat mengurangi panjang jalur dan waktu pencarian dibandingkan menggunakan algoritma RRT saja. Hal ini menjadikannya lebih efisien dan efektif untuk pencarian jalur di berbagai lingkungan baik sederhana maupun kompleks.

Jiwei Qu, dkk penelitiannya membahas mengenai perbandingan sistem kendali menggunakan fuzzy logic control type 2 dan *proportional integral derivative* (PID). Hasil dari proses simulasi menggunakan kedua algoritma tersebut bahwa *fuzzy logic control type 2* lebih optimal dengan *overshoot* yang lebih kecil serta laju perubahan sudut dan akselerasi lateral menghasilkan nilai yang rendah menunjukkan stabilitas yang lebih baik selama pengendalian[35].

Penelitian oleh S. Dwijayanti, dkk mengembangkan sistem kendali pada *service robot* menggunakan metode *Type-2 Fuzzy Logic Controller*(Type-2 FLC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Type-2 FLC dengan 7 keanggotaan memberikan performa terbaik dibandingkan Type-1 FLC, baik pada simulasi maupun pengujian *real-time*. Pada simulasi, Type-2 FLC mencapai nilai steady-state error sebesar 0,0118, sedangkan pada pengujian *real-time*, Type-2 FLC menunjukkan keunggulan dengan mampu menyelesaikan rute dengan rintangan dalam waktu

32,49 detik. Hal ini membuktikan bahwa metode Type-2 FLC efektif untuk meningkatkan performa kendali dan navigasi *service robot*[38].

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dibahas menunjukkan bahwa berbagai pendekatan telah diusulkan untuk mengoptimalkan sistem navigasi dan kendali robot otonom. Namun, tantangan utama yang dihadapi dalam sistem ini adalah akurasi, efisiensi, dan adaptabilitas. Selain itu, penelitian sebelumnya sebagian besar menggunakan robot otonom, sementara penelitian ini berfokus penggunaan *services robot*. Penelitian sebelumnya umumnya hanya membahas sebagian aspek, seperti penggunaan *path planning* atau pemetaan tanpa integrasi dengan navigasi, serta sistem kendali robot tanpa dilengkapi dengan fitur navigasi. Oleh karena itu, penelitian ini merumuskan kerangka kerja PLAN pada *service robot* yang tidak hanya meningkatkan akurasi dan efisiensi tetapi juga menghasilkan pemetaan dalam bentuk 3D, sistem navigasi, dan sistem kendali yang mampu mengontrol *steering* pada *service robot*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. R. de Lima, S. G. Khan, M. Tufail, S. H. Shah, and M. R. O. A. Maximo, “Humanoid Robot Motion Planning Approaches: a Survey,” *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 110, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s10846-024-02117-z.
- [2] V. Lakshmi and B. Bahli, “Understanding the robotization landscape transformation: A centering resonance analysis,” *J. Innov. Knowl.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–67, 2020, doi: 10.1016/j.jik.2019.01.005.
- [3] C. S. Song and Y. K. Kim, “The role of the human-robot interaction in consumers’ acceptance of humanoid retail service robots,” *J. Bus. Res.*, vol. 146, no. April, pp. 489–503, 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.03.087.
- [4] B. Bai, “A Survey of Autonomous Robots and Multi-robot Navigation: Perception, Planning and Collaboration,” *Physica A*, p. 127546, 2021, doi: 10.1016/j.birob.2024.100197.
- [5] A. H. Chiang and S. Trimi, “Impacts of service robots on service quality,” *Serv. Bus.*, vol. 14, no. 3, pp. 439–459, 2020, doi: 10.1007/s11628-020-00423-8.
- [6] A. A. S. Gunawan, B. Clemons, I. F. Halim, K. Anderson, and M. P. Adianti, “Development of e-butler: Introduction of robot system in hospitality with mobile application,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 216, no. 2019, pp. 67–76, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.12.112.
- [7] L. Lestingi, D. Zerla, M. M. Bersani, and M. Rossi, “Specification, stochastic modeling and analysis of interactive service robotic applications,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 163, p. 104387, 2023, doi: 10.1016/j.robot.2023.104387.
- [8] A. Macario Barros, M. Michel, Y. Moline, G. Corre, and F. Carrel, “A Comprehensive Survey of Visual SLAM Algorithms,” *Robotics*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.3390/robotics11010024.
- [9] B. Al-Tawil, T. Hempel, A. Abdelrahman, and A. Al-Hamadi, “A review of visual SLAM for robotics: evolution, properties, and future applications,” *Front. Robot. AI*, vol. 11, no. April, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3389/frobt.2024.1347985.
- [10] J. Roch, J. Fayyad, and H. Najjaran, “DOPESLAM: High-Precision ROS-Based Semantic 3D SLAM in a Dynamic Environment,” *Sensors*, vol. 23,

- no. 9, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/s23094364.
- [11] M. Labbé and F. Michaud, “RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation,” *J. F. Robot.*, vol. 36, no. 2, pp. 416–446, 2019, doi: 10.1002/rob.21831.
 - [12] P. Sankalprajan, T. Sharma, H. D. Perur, and P. Sekhar Pagala, “Comparative analysis of ROS based 2D and 3D SLAM algorithms for autonomous ground vehicles,” *2020 Int. Conf. Emerg. Technol. INCET 2020*, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1109/INCET49848.2020.9154101.
 - [13] N. El-Sheimy and Y. Li, “Indoor navigation: state of the art and future trends,” *Satell. Navig.*, vol. 2, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s43020-021-00041-3.
 - [14] P. K. Panigrahi and S. K. Bisoy, “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no. 8, pp. 6019–6039, 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.02.015.
 - [15] S. Campbell, N. O’Mahony, A. Carvalho, L. Krpalkova, D. Riordan, and J. Walsh, “Where am I? Localization techniques for Mobile Robots A Review,” *2020 6th Int. Conf. Mechatronics Robot. Eng. ICMRE 2020*, pp. 43–47, 2020, doi: 10.1109/ICMRE49073.2020.9065135.
 - [16] H. Zhou, W. Chou, W. Tuo, Y. Rong, and S. Xu, “Mobile manipulation integrating enhanced amcl high-precision location and dynamic tracking grasp,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 22, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/s20226697.
 - [17] Y. Tao *et al.*, “A mobile service robot global path planning method based on ant colony optimization and fuzzy control,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 8, 2021, doi: 10.3390/app11083605.
 - [18] D. K. Mishra, A. Thomas, J. Kuruvilla, P. Kalyanasundaram, K. R. Prasad, and A. Haldorai, “Design of mobile robot navigation controller using neuro-fuzzy logic system,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 101, no. March, p. 108044, 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108044.
 - [19] G. Daddi, N. Notaristefano, F. Stesina, and S. Corpino, “Assessing an Image-to-Image Approach to Global Path Planning for a Planetary Exploration,”

- Aerospace*, vol. 9, no. 11, 2022, doi: 10.3390/aerospace9110721.
- [20] L. Yang *et al.*, *Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review*, vol. 11, no. 10. 2023. doi: 10.3390/machines11100980.
 - [21] F. Peralta, M. Arzamendia, D. Gregor, D. G. Reina, and S. Toral, “A comparison of local path planning techniques of autonomous surface vehicles for monitoring applications: The Ypacarai lake case-study,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 5, pp. 1–28, 2020, doi: 10.3390/s20051488.
 - [22] P. Wu, L. Zhong, J. Xiong, Y. Zeng, and M. Pei, “Two-level vehicle path planning model for multi-warehouse robots with conflict solution strategies and improved ACO,” *J. Intell. Connect. Veh.*, vol. 6, no. 2, pp. 102–112, 2023, doi: 10.26599/JICV.2023.9210011.
 - [23] A. Staroverov, M. Alhaddad, A. Narendra, K. Mironov, and A. Panov, “Dynamic Neural Potential Field: Online Trajectory Optimization in Presence of Moving Obstacles,” 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2410.06819>
 - [24] J. Peter, M. J. Thomas, and S. Mohan, *Development of an Autonomous Ground Robot Using a Real-Time Appearance Based (RTAB) Algorithm for Enhanced Spatial Mapping: Development of a Ground Robot with Autonomous Navigation Capability*, vol. 1, no. 1. Association for Computing Machinery, 2023. doi: 10.1145/3610419.3610472.
 - [25] M. F. Alrizki, J. T. Elektro, F. Teknik, and U. Sriwijaya, “PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI PADA SERVICE ROBOT,” 2024.
 - [26] B. Arifin, B. Y. Suprpto, S. A. D. Prasetyowati, and Z. Nawawi, “Steering Control in Electric Power Steering Autonomous Vehicle Using Type-2 Fuzzy Logic Control and PI Control,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 13, no. 3, 2022, doi: 10.3390/wevj13030053.
 - [27] W. Fu, Y. Liu, and X. Zhang, “Research on Accurate Motion Trajectory Control Method of Four-Wheel Steering AGV Based on Stanley-PID Control,” *Sensors*, vol. 23, no. 16, 2023, doi: 10.3390/s23167219.
 - [28] G. Bhandari, R. Raj, P. M. Pathak, and J. M. Yang, “Robust control of a planar snake robot based on interval type-2 Takagi–Sugeno fuzzy control using genetic algorithm,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 116, no. June, p.

- 105437, 2022, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105437.
- [29] D. Chatziparaschis, M. G. Lagoudakis, and P. Partsinevelos, “Aerial and ground robot collaboration for autonomous mapping in search and rescue missions,” *Drones*, vol. 4, no. 4, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/DRONES4040079.
 - [30] S. L. Lo, K. S. Leung, and Y. Leung, “Evaluating the LiDAR and Kinect Calibration Methods and Application,” *2021 6th Int. Conf. Control Robot. Eng. ICCRE 2021*, pp. 91–95, 2021, doi: 10.1109/ICCRE51898.2021.9435662.
 - [31] S. Zhou *et al.*, “Research on Positioning Accuracy of Mobile Robot in Indoor Environment Based on Improved RTABMAP Algorithm,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, 2023, doi: 10.3390/s23239468.
 - [32] T. Thoa Mac, C.-Y. Lin, N. Gia Huan, L. Duc Nhat, P. Cong Hoang, and H. hong Hai, “Hybrid SLAM-based Exploration of a Mobile Robot for 3D Scenario Reconstruction and Autonomous Navigation,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 18, no. 5, pp. 2021–77, 2021.
 - [33] B. Zhang and C. Li, “The Optimization and Application Research of the RRT-APF-Based Path Planning Algorithm,” p. 14, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13244963>.
 - [34] P. Xin, X. Wang, X. Liu, Y. Wang, Z. Zhai, and X. Ma, “Improved Bidirectional RRT* Algorithm for Robot Path Planning,” *Sensors*, vol. 23, no. 2, 2023, doi: 10.3390/s23021041.
 - [35] J. Qu, Z. Zhang, H. Li, M. Li, X. Xi, and R. Zhang, “Design and Experiments of a Two-Stage Fuzzy Controller for the Off-Center Steer-by-Wire System of an Agricultural Mobile Robot,” *Machines*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/machines11020314.
 - [36] D. Portugal, A. Araújo, and M. S. Couceiro, *A Guide for 3D Mapping with Low-Cost Sensors Using ROS*, vol. 831. Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-20190-6_1.
 - [37] F. F. Rafief Priyova Muhammad, Sidik Ahmad Jaelani, “Red Green Blue Depth (RGBD) Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Robot using Kinect Camera for Mapping,” p. 21, 2024, [Online]. Available:

<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4903823>

- [38] S. Dwijayanti, B. Y. Suprpto, and I. A. Rizky, “Practical implementation of a type-2 fuzzy logic controller for steering a service robot,” *Results Control Optim.*, vol. 19, no. March, p. 100558, 2025, doi: 10.1016/j.rico.2025.100558.
- [39] A. Merzlyakov and S. MacEnski, “A Comparison of Modern General-Purpose Visual SLAM Approaches,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2, pp. 9190–9197, 2021, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9636615.
- [40] I. A. Rizky, J. T. Elektro, F. Teknik, and U. Sriwijaya, “Sistem Kendali Steering Pada Service Robot Menggunakan Metode Fuzzy Logic Controller Type-2,” 2024.