



SKRIPSI

PERANCANGAN SISTEM PEMETAAN DAN LOKALISASI BERBASIS ALGORITMA SLAM MENGGUNAKAN *DEPTH* *SENSOR KINECT PADA MOBILE ROBOT*

Disusun dan diajukan oleh:

FARIZ ACHMAD FAIZAL

D041191091



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

RANCANG BANGUN SISTEM PEMETAAN DAN LOKALISASI BERBASIS ALGORITMA SLAM MENGGUNAKAN DEPTH SENSOR KINECT PADA MOBILE ROBOT

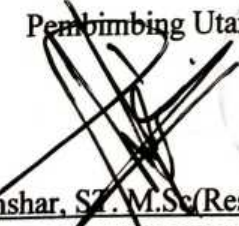
Disusun dan diajukan oleh

Fariz Achmad Faizal
D041191091

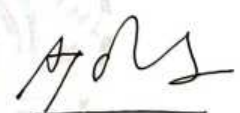
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 13 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,


Muh Anshar, S.T., M.Sc (Research), Ph. D
NIP. 197708172005011003

Pembimbing Pendamping,


Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T.
NIP. 197209081997022001

Ketua Program Studi,




Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM
NIP. 1969102619941220



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bersignature dibawah ini:

Nama : Fariz Achmad Faizal

NIM : D041191091

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**PERANCANGAN SISTEM PEMETAAN DAN LOKALISASI BERBASIS
ALGORITMA SLAM MENGGUNAKAN DEPTH SENSOR KINECT
PADA MOBILE ROBOT**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 11 September 2023

Yang Menyatakan

Fariz Achmad Faizal





ABSTRAK

FARIZ ACHMAD FAIZAL. *Rancang Bangun Sistem Pemetaan Dan Lokalisasi Berbasis Algoritma Slam Menggunakan Depth Sensor Kinect Pada Mobile Robot (dibimbing oleh Muh Anshar dan Ejah Umraeni Salam)*

Kemampuan pokok yang diperlukan oleh sebuah robot yang bergerak adalah kemampuan untuk bergerak dari satu lokasi ke lokasi lain dengan aman saat menjalankan tugas yang ditugaskan. Untuk memenuhi kebutuhan ini, robot harus mampu mengenali lingkungan sekitarnya dan menentukan posisinya terhadap lingkungan tersebut. Pengenalan lingkungan dilakukan dengan menggunakan sensor Microsoft Kinect untuk menghasilkan peta dua dimensi (2D). Sementara untuk menentukan posisi relatif robot dalam peta (lokalisasi), metode particle filter digunakan. Untuk menerapkan pemetaan dan lokalisasi secara bersamaan, algoritma visual Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) RTABmap, yang berbasis Robot Operating System (ROS), digunakan pada robot yang telah dirancang. Hasil yang diperoleh adalah peta probabilitas 2D occupancy grid map. Berdasarkan penelitian ini, akurasi odometri, yang melibatkan penggabungan data dari encoder, inertial measurement unit (IMU), dan Kinect, mampu mengestimasi pose dan posisi robot dengan deviasi sekitar 0.016 meter. Sementara pengujian hasil pemetaan menunjukkan hasil terbaik ketika memetakan ruangan berukuran kecil tanpa adanya pengaruh sinar matahari, dengan kesalahan Root Mean Square Error (RMSE) sekitar 4.90% terhadap peta asli.

Kata Kunci : Automation, SLAM, Kinect, RTABMAP, AMCL, ROS, Robotics, Odometry



ABSTRACT

FARIZ ACHMAD FAIZAL. *Design of Slam-Based Mapping and Localization System Using Kinect Depth Sensor on Mobile Robot* (supervised by Muh Anshar and Ejah Umraeni Salam)

The fundamental capability required by a mobile robot is the ability to move safely from one location to another while performing assigned tasks. To fulfill this need, a robot must be capable of recognizing its surrounding environment and determining its relative position within that environment. Environment recognition is achieved using the Microsoft Kinect sensor to generate a two-dimensional (2D) map. Meanwhile, for estimating the robot's relative position within the map (localization), the particle filter method is employed. To implement mapping and localization simultaneously, the visual Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithm RTABmap, based on the Robot Operating System (ROS), is utilized on the designed robot. The obtained result is a 2D probabilistic occupancy grid map. From the conducted research, it was found that the odometry accuracy, involving the fusion of data from encoders, inertial measurement unit (IMU), and Kinect, was able to estimate the robot's pose and position with a deviation of approximately 0.016 meters. In the mapping experiments, the best results were obtained when mapping small-sized rooms without the influence of sunlight, with a Root Mean Square Error (RMSE) of around 4.90% compared to the original map.

Keywords: Automation, SLAM, Kinect, RTABMAP, AMCL, ROS, Robotics, Odometry



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait	5
2.2 Robot.....	7
2.3 <i>Mobile Robot</i>	8
2.4 <i>Robot Operating System</i>	10
2.4.1 <i>ROS Node</i>	11
2.4.2 <i>ROS Topic</i>	12
2.4.3 <i>ROS Package</i>	12
2.5 <i>Telerobotic</i>	12
2.6 Robot Preseption	14
2.7 Odometry.....	15
2.10 SLAM	16
2.11 Real-Time Appearance-Based Mapping.....	16
2.11.1 Node Odometry RTAB-Map	18
2.11.2 Graph creation and data storage	19
2.11.4 Deteksi Loop Closure	21
2.11.5 Optimization	22
2.12 Adaptive Monte Carlo Localization.....	22
BAB III METODE PENELITIAN	24



3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	24
3.2 Rancangan Umum Penelitian	24
3.3 Rancangan Perangkat Keras	28
3.3.1 Mekanisasi Robot	28
3.3.2 Desain Elektronika	30
3.4 Rancangan Perangkat Lunak	43
3.4.1 Instalasi ROS	44
3.4.2 Pemodelan Robot dengan URDF	46
3.4.3 Pembuatan node program pada ROS	47
3.5 Rancangan Pengujian	55
3.5.1 Evaluasi Hasil Pemetaan dengan Metode RMSE	56
3.5.2 Absolute trajectory error(ATE)	57
3.5.3 Relative pose error (RPE)	59
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Pengujian odometry dengan position tracking	60
4.2 pengujian hasil pemetaan	62
4.2.1 Pemetaan pada ruang uji berbeda	62
4.2.2 Pemetaan dengan tingkat <i>Luminansi berbeda</i>	66
4.3 pengujian kemampuan lokalisasi posisi robot dalam peta	68
4.3.1 Hasil Pengujian ATE dan RPE	68
4.3.3 Pengujian Penentuan posisi dengan partikel filter	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Mobile Robot Menggunakan Caterpillar Track	8
Gambar 2 Mobile Robot Berkaki	8
Gambar 3 Mobile Robot Beroda	9
Gambar 4 Prinsip Kerja Kerangka Perangkat Lunak Berbasis ROS untuk Mengontrol Operasi Semua Sistem Robot Multi-Node	11
Gambar 5 <i>Man-Machine Interface</i>	14
Gambar 6 Blok Diagram RTAB-Map pada node ROS	17
Gambar 7 Alur Kerja AMCL	23
Gambar 8 Blok Diagram Arsitektur AMCL	23
Gambar 9 Diagram Alir Rancangan Penelitian	25
Gambar 10 Sistem Pemetaan dan Lokalisasi	26
Gambar 11 Diagram Blok Sistem	26
Gambar 12 Diagram Masukan	27
Gambar 13 Diagram proses	27
Gambar 14 Diagram keluaran	28
Gambar 15 Gambar Desain Robot	29
Gambar 16 Blok Diagram Umum hubungan antar komponen	31
Gambar 17 Subsistem Sensor Robot	31
Gambar 18 Gambar Data Kedalaman Sensor Kinect	32
Gambar 19 Komponen-Komponen Sensor Kinect	33
Gambar 20 Data Depth Kinect, (a) IR Kinect, (b) Depth Map Kinect	34
Gambar 21 Prinsip Kerja Kinect	34
Gambar 22 Data Depth Kinect (a) Bentuk 2D Array, (b) Dalam Plot 3D	35
Gambar 23 Kinect memberikan tiga output: Gambar IR, gambar RGB	35
Gambar 24 Invers Kinect pada fungsi kedalaman asli	36
Gambar 25 Blok diagram modul sensor IMU MPU-60X0	37
Gambar 26 Sistem kerja encoder	38
Gambar 27 Board Arduino Mega 2560	39
Gambar 28 Laptop HP Victus 15	40
Gambar 29 Prosesor Intel core i7	40
Gambar 30 GPU Nvidia RTX3050	40



Gambar 31 Motor DC <i>Power Window</i> 12 V	42
Gambar 32 skematik witres-bot	43
Gambar 33 Visualisasi Model Robot dengan Rviz	46
Gambar 34 Komunikasi Komputer-Arduino Ros Serial	47
Gambar 35 Kinematics of Differential Drive Robots	49
Gambar 36 Blok diagram pemetaan dan lokalisasi dengan RTABMAP	50
Gambar 37 Flowchart sistem pemetaan	51
Gambar 38 Flowchart lokalisasi dengan AMCL	53
Gambar 39 Visualisasi Lokalisasi dengan AMCL Menggunakan Rviz	55
Gambar 40 Pengujian Pembacaan Odometry	61
Gambar 41 Perbandingan trajectory dari sumber odometry berbeda terhadap ground truth.....	61
Gambar 42 Denah Lab Sistem kendali dan Instrumentasi	63
Gambar 43 Denah Gedung COT Lantai 2.....	64
Gambar 44 Denah Gedung Elektro Lantai 3.....	65
Gambar 45 Pengujian pada skenario 1	66
Gambar 46 Data lux pada skenario 1	66
Gambar 47 Pengujian pada skenario 2	67
Gambar 48 Data lux pada skenario 2	67
Gambar 49 Visualisasi Rviz Robot AMCL Estimasi Pose	69
Gambar 50 Perbandingan Trajectory Lokalisasi AMCL Terhadap Ground Truth Gambar	69



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jadwal kegiatan penelitian	24
Tabel 2 Komponen utama rancang bangun robot otonom Waiter-Bot	29
Tabel 3 Spesifikasi Arduino Mega 2560.....	39
Tabel 4 Spesifikasi Komputer yang Digunakan	41
Tabel 5 Simpangan odometry terhadap ground truth.....	62
Tabel 6 Hasil pemetaan ruang uji 1.....	63
Tabel 7 Hasil pemetaan ruang uji 2.....	64
Tabel 8 Hasil pemetaan ruang uji 3.....	65
Tabel 9 Hasil pemetaan pada kondisi lux skenario 1	67
Tabel 10 Hasil pemetaan pada kondisi lux skenario 3	68
Tabel 11 Analisis ATE dan RPE terhadap hasil estimasi lokalisasi	70
Tabel 12 visualisasi lokalisasi dengan jumlah partikel berbeda	71
Tabel 13 Perbandingan waktu untuk mencapai konvergensi pada jumlah partikel berbeda	72



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Pelaksanaan Penelitaian.....	79
Lampiran 2 Kode Pemrograman Low Level	83
Lampiran 3 Pemodelan Robot dengan URDF.....	99
Lampiran 4 Kode Pemrograman ROS.....	104
Lampiran 5 Launch File SLAM.....	116
Lampiran 6 Data Hasil Pemetaan Ruang Uji 1 (Laboratorium Sistem Kendali dan instrumentasi)	119
Lampiran 7 Data Hasil Pemetaan Ruang Uji 2 (Gedung Center Of Technology Lantai 2)	126
Lampiran 8 Data Hasil Pemetaan Ruang Uji 3 (Gedung Elektro Lantai 3)	133
Lampiran 9 Data Hasil Pemetaan pada kondisi luminensi skenario 1	140
Lampiran 10 Data Hasil Pemetaan pada kondisi luminensi skenario 2	147



KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada Penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang berjudul “PERANCANGAN SISTEM PEMETAAN DAN LOKALISASI BERBASIS ALGORITMA SLAM MENGGUNAKAN DEPTH SENSOR KINECT PADA MOBILE ROBOT”. Serta selawat dan salam penulis sampaikan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari alam jahiliyah menuju alam kemajuan seperti sekarang ini. Penyelesaian skripsi ini merupakan salah satu upaya Penulis untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa untuk menyelesaikan skripsi serta penelitian ini tidaklah mudah, banyak hambatan dan masalah yang penulis hadapi hingga sampai ke penyelesaian skripsi dan penelitian ini. Namun berkat doa dan dukungan dari berbagai pihak akhirnya skripsi dan penelitian ini Alhamdulillah Penulis telah berhasil menyelesaikannya. Oleh sebab itu pada kesempatan kali ini perkenankan Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

- 1) Bapak Muh Anshar, ST. M.Sc(Research), Ph. D. selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, saran dan dukungan kepada penulis dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU., ACPE. selaku Dosen Penguji I dan Ibu Ida Rachmaniar Sahali, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II, yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyusunan skripsi ini.
- 3) Kedua orang tua dan saudara penulis, Bapak Faizal Muis, Ibu Firna Sofianti Thamrin, Adik Fadli Fathurrahman Faizal, dan Adik Fildzah Muthiah Faizal yang telah memberikan do’a dan dukungan selama penyelesaian skripsi ini.
- 4) Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 5) Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.



- 6) Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
- 7) Bapak/Ibu Dosen dan Staff Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan ilmu dan bantuan selama menempuh proses perkuliahan.
- 8) Seluruh teman – teman Lab Riset IASCR terkhususnya Salam, Hasbih dan Arya yang selalu menemani d alam proses penyelesaian skripsi ini.
- 9) Saudari Nur Iqrima Fitrah Qalby yang telah memberikan dukungan dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
- 10) Seluruh teman – teman Bani TR19GER yang turut memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
- 11) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu dalam membantu dan mendukung penyelesaian skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu Penulis menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini ke depannya.

Gowa, 11 September 2023

Penulis



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi robot di berbagai bidang industri telah memberikan dampak yang signifikan pada kemajuan industri tersebut. Salah satu bidang industri yang telah menggunakan teknologi robot adalah industri manufaktur. Dalam industri manufaktur, robot digunakan untuk memindahkan objek atau barang dari satu tempat ke tempat yang lain, serta untuk perakitan antar komponen (Shobirin, 2016). Penggunaan robot dalam industri manufaktur ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas produksi, serta untuk mengurangi biaya produksi.

Selain di industri manufaktur, penggunaan robot juga telah diterapkan di berbagai bidang industri lainnya, seperti di bidang kesehatan, pertanian, dan pertambangan. Di bidang kesehatan, robot digunakan untuk membantu dokter dalam melakukan operasi, serta untuk membantu pasien dalam melakukan terapi fisik[5]. Di bidang pertanian, robot digunakan untuk membantu petani dalam melakukan panen, serta untuk memantau kondisi tanaman (Pranoto dkk, 2021). Di bidang pertambangan, robot digunakan untuk melakukan eksplorasi dan pengambilan sampel di area tambang yang sulit dijangkau oleh manusia (Riyanti dkk, 2021).

Semakin banyaknya aplikasi robot yang digunakan di berbagai bidang industri menuntut kemampuan robot untuk dapat bekerja secara efektif di lingkungan yang semakin kompleks. Hal ini membutuhkan kemampuan robot untuk dapat memahami lingkungan sekitarnya secara menyeluruh yang tidak bisa dicapai dengan cara konvensional. Oleh karena itu, teknik pemetaan dan lokalisasi pada robot menjadi semakin penting. Salah satu sensor yang digunakan untuk memperoleh informasi tentang lingkungan sekitar robot adalah Kinect depth sensor (Zamisyak dkk, 2016). Kinect depth sensor memberikan informasi 3D tentang lingkungan sekitar robot, yang dapat digunakan untuk membangun peta digital dan membantu robot dalam melakukan path planning.



Untuk membangun sistem mapping dan localization pada robot, digunakanlah algoritma SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Algoritma ini merupakan pendekatan yang populer dalam navigasi dan pemetaan robot mobile (Zamisyak dkk, 2016). Dalam penggunaannya, algoritma SLAM menggunakan informasi dari sensor untuk memperkirakan posisi dan orientasi robot dalam peta, serta memperbarui peta saat robot bergerak.

Penelitian mengenai sistem mapping dan localization pada robot menggunakan Kinect depth sensor dan algoritma SLAM sangat penting untuk mengembangkan robot yang dapat bergerak secara otonom dan menghindari rintangan di lapangan. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan manfaat dalam berbagai aplikasi, seperti di bidang surveilans, eksplorasi, dan transportasi.

Mobile robot adalah salah satu jenis robot yang membutuhkan kemampuan pemetaan dan lokalisasi yang baik. Mobile robot digunakan untuk bergerak di lingkungan yang berbeda-beda, seperti di dalam ruangan, di luar ruangan, atau di lingkungan yang tidak teratur. Oleh karena itu, mobile robot membutuhkan kemampuan untuk menavigasi lingkungan sekitarnya dengan akurat dan efisien. Teknik pemetaan dan lokalisasi pada mobile robot dapat dilakukan dengan menggunakan sensor signal processing atau image analysis, seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Dalam penelitian mengenai sistem mapping dan localization pada robot menggunakan Kinect depth sensor dan algoritma SLAM, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan robot yang dapat bergerak secara otonom dan menghindari rintangan di lapangan. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan manfaat dalam berbagai aplikasi, seperti di bidang surveilans, eksplorasi, dan transportasi. Dengan semakin berkembangnya teknologi robot, diharapkan teknik pemetaan dan lokalisasi pada robot dapat terus ditingkatkan untuk mendukung penggunaan robot di berbagai bidang industri.



I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah penelitian ini sebagai berikut:

- Bagaimana perancangan sistem pemetaan dan lokalisasi berbasis algoritma SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) menggunakan depth sensor Kinect?
- Bagaimana perancangan model odometry robot dengan metode sensor fusion berbasis EKF (*Extended Kalman Filter*) dalam menunjang sistem pemetaan dan lokalisasi?
- Bagaimana performa sistem pemetaan yang dibangun dengan metode sensor fusion dan AMCL (*Adaptive Monte Carlo Localization*) dapat dipengaruhi dengan parameter lingkungan yang berbeda?

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut:

- Merancang sistem pemetaan dan lokalisasi robot berbasis SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) menggunakan depth sensor Kinect
- Melakukan perancangan model odometry robot dengan metode sensor fusion berbasis EKF (*Extended Kalman Filter*) dalam menunjang sistem pemetaan dan lokalisasi
- Mengetahui performa sistem pemetaan dan lokalisasi robot yang telah dirancang dalam menghadapi parameter lingkungan yang berbeda

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini, diharapkan dapat memperoleh manfaat sebagai berikut:

- Kontribusi pada Pengembangan Teknologi Robotika:** Penelitian ini dapat menjadi kontribusi penting dalam pengembangan teknologi robotika dengan fokus pada pemetaan dan lokalisasi berbasis algoritma SLAM. Ini dapat menjadi fondasi untuk perkembangan lebih lanjut dalam bidang robotika dan otomasi.
- Penggunaan ROS (Robot Operating System):** Penelitian ini akan menunjukkan cara menggunakan ROS sebagai platform pengembangan



untuk robot otonomus. Hal ini akan memberikan panduan bagi peneliti dan pengembang lainnya yang tertarik untuk menggunakan ROS

3. **Penerapan Algoritma SLAM:** Dengan mendemonstrasikan implementasi algoritma SLAM dalam konteks pemetaan dan lokalisasi, penelitian ini dapat membantu mengedukasi komunitas robotika tentang kegunaan dan aplikasi algoritma ini dalam situasi nyata.
4. **Penerapan di Berbagai Sektor Otomasi Industri:** Hasil penelitian ini dapat diadopsi dalam berbagai sektor otomasi industri.
5. **Peningkatan Pendidikan dan Pelatihan:** Penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber pembelajaran untuk mahasiswa dan para profesional yang tertarik dalam bidang robotika, ROS, dan SLAM.
6. **Efisiensi dalam Berbagai Aplikasi:** Penggunaan sistem pemetaan dan lokalisasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat meningkatkan efisiensi dalam berbagai aplikasi seperti logistik, survei, pemantauan, dan banyak lagi.
7. **Kemajuan dalam Riset Kontrol dan Robotika Modern:** Penelitian ini dapat menjadi tonggak penting dalam kemajuan riset kontrol dan robotika modern.

1.5 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini lebih terarah dan terukur, maka difokuskan dalam ruang lingkup sebagai berikut:

- a. Perancangan sistem pemetaan dan lokalisasi untuk aplikasi indoor pada mobile robot dengan objek yang akan dipetakan adalah objek yang dapat memantulkan sinar inframerah dari sensor.
- b. Pengujian performa sistem SLAM dalam melakukan pemetaan didasarkan pada perbedaan faktor luminensi dan luas area untuk setiap lingkungan uji.
- c. Perancangan model odometry robot menggunakan 3 source odometry yaitu wheel odometry, IMU dan visual odometry.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

1. Sistem Pemetaan Menggunakan Fitur Depth Sensor Kinect pada Mobile Robot untuk Proses Evakuasi Kebakaran Gedung

Nama Penulis :	Penelitian ini bertujuan untuk membuat sebuah sistem kontrol robot mobile menggunakan Kinect, dengan sistem pemetaan jalan sekaligus. Hasil dari penelitian ini adalah sistem kontrol robot mobile yang dapat melakukan pemetaan jalan dan dapat digunakan untuk proses evakuasi kebakaran gedung.
ALI UROIDHI	
Tahun Terbit :	
2017	

2. Mapping dan Lokalisasi System pada Mobile Robot Menggunakan Metode SLAM Berbasis LiDAR

Nama Penulis :	Penelitian ini mengusulkan sistem mapping dan lokalisasi untuk mengenali lingkungan sekitar dengan membuat peta lingkungan menggunakan algoritma SLAM berbasis LiDAR. Hasil dari penelitian ini adalah sistem mapping dan lokalisasi yang mampu mengenali kondisi lingkungan sekitar robot meskipun masih terdapat gangguan pada peta.
Achmad Akmal Fikri	
Lilik Anifah	
Tahun Terbit :	
2021	



3. Pemetaan Lingkungan Multi Robot dengan Algoritma ORB SLAM-2

Nama Penulis :	Penelitian ini bertujuan untuk membuat
P. Anggraeni	rancangan sistem pemetaan lingkungan
Ridwan	multi-robot dengan menggunakan algoritma
M.T.A. Asshydiqi	ORB SLAM-2. Hasil dari penelitian ini
	adalah sistem desentralisasi sehingga
Tahun Terbit :	algoritma dijalankan pada kedua robot.
2020	Kemudian setiap robot melakukan pemetaan
	lingkungannya dan mengirimkannya ke
	komputer agar dapat divisualisasi.

4. Simultaneous Localization and Mapping for Autonomous Robot Navigation

Nama Penulis :	Penelitian ini memperkenalkan teknik baru
Gyan Singh Yadav	berbasis visi komputer untuk SLAM
Saksham Jain	(Simultaneous Localization and Mapping)
Urvashi Agrawal	menggunakan Extended Kalman Filter untuk
	menghasilkan peta lingkungan dan navigasi
Tahun Terbit :	secara efisien dalam lingkungan secara
2021	otonom. Algoritma yang diusulkan dalam
	artikel ini secara efektif menghasilkan jalur
	terpendek yang bebas tabrakan untuk
	mencapai tujuan. Sensor yang digunakan
	dalam proyek ini adalah sensor Kinect, yang
	merupakan sensor yang ekonomis dan
	dilengkapi dengan kamera dan sensor
	kedalaman yang menggunakan sinar
	inframerah. Kinerja navigasi otonom juga
	disajikan dalam hal akurasi mengikuti jalur
	dan menghindari rintangan.



5. Sistem Navigasi Pada Prototipe Robot Kursi Beroda Untuk Penyandang Disabilitas

Nama Penulis :	Penelitian ini bertujuan untuk membuat
Muhammad Takbir Machmud	prototipe sebuah robot kursi roda yang mampu melakukan navigasi dengan
Tahun Terbit :	memanfaatkan depth kamera Kinect untuk
2019	melakukan skeleton tracking dalam sistem
	pandu arahnya. Hasil dari penelitian ini
	menunjukkan kemampuan sensor Kinect
	untuk di terapkan dalam dunia robotika

2.2 Robot

Istilah robot berasal dari bahasa Cekoslowakia, “Robota” yang berarti “Kerja Cepat”. Istilah ini muncul pada tahun 1920 oleh seorang pengarang sandiwara bernama Karel Capek (Indrawan, 2008). Robot merupakan suatu sistem atau alat yang dapat berperilaku atau meniru perilaku manusia dengan tujuan untuk menggantikan dan mempermudah kerja/aktivitas manusia.

Untuk dapat diklasifikasikan sebagai robot, maka robot harus memiliki dua macam kemampuan, yaitu: (1) Bisa mendapatkan informasi dari sekelilingnya; dan (2) Bisa melakukan sesuatu secara fisik, seperti bergerak atau memanipulasi objek. Supriyanto juga menambahkan bahwa sebuah robot dapat saja dibuat untuk berbagai macam aktivitas, namun sebuah robot harus dibuat dengan tujuan untuk kebaikan manusia. Ada beberapa fungsi robot, sehingga manusia memerlukan kehadirannya yaitu: (1) Meningkatkan produksi, akurasi, dan daya tahan. Robot banyak digunakan di industri; (2) Untuk tugas-tugas yang berbahaya, kotor, dan beresiko. Robot digunakan ketika manusia tidak mampu masuk ke daerah yang beresiko, seperti robot untuk menjelajah planet, robot untuk mendeteksi limbah nuklir, robot militer, dll; (3) Untuk pendidikan. Banyak robot yang digunakan untuk menarik pelajar agar tertarik mempelajari teknologi. Seperti pengenalan dunia teknologi di bidang robotika, misal mengajar anak dalam pembuatan robot lego, dll; (4) Untuk membantu manusia, khususnya dalam



aktivitas sehari-hari. Robot yang berperan dalam hal ini biasanya dikenal sebagai Robot Sosial (Social Robot). Seperti robot pelayan (Service Robot) yang banyak dikembangkan utamanya di rumah sakit (Supriyanto dkk, 2010).

Berdasarkan dari penjelasan di atas, maka sudah jelas persoalan mengapa manusia memerlukan kehadiran dari robot. Karena keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh manusia sehingga kehadiran robot sangat dibutuhkan dunia saat ini.

2.3 Mobile Robot

Mobile Robot adalah jenis robot yang memiliki kemampuan untuk berpindah tempat dari satu tempat ke tempat yang lain. Menurut Anshar (2010, h.2) jika ditinjau dari jenis aktuatornya, robot dibagi atas dua jenis, yaitu robot berkaki dan robot beroda.



Gambar 1 Mobile Robot Menggunakan Caterpillar Track



Gambar 2 Mobile Robot Berkaki



Gambar 3 Mobile Robot Beroda

Pada robot beroda memungkinkan semua aktuator menyentuh permukaan tanah, hal ini memberikan keunggulan pada robot beroda dalam menjaga keseimbangan agar tidak terjatuh pada saat melakukan pergerakan. Berbeda dengan robot berkaki yang mengharuskan aktuatornya mampu mendukung beban dari robot agar tetap berada dalam kondisi yang seimbang, hal ini dikarenakan pada saat melakukan pergerakan, salah satu aktuator (kaki) dari robot harus bertumpu pada permukaan, sehingga dalam desain mekaniknya diperlukan kecermatan dan perhitungan yang lebih untuk menghasilkan pergerakan robot yang seimbang, berbeda dengan robot beroda yang cukup mudah dalam menentukan titik keseimbangannya (Anshar, 2010).

Dalam klasifikasinya, konfigurasi tipe roda pada mobile robot dibedakan oleh beberapa jenis, hal ini tergantung dari pemilihan jenis, model, dan fungsi dari robot itu sendiri, ditinjau dari tiga hal yakni: (1) Kemampuan manuver dari robot; (2) Kemampuan dari robot dalam mengontrol pergerakannya, dan (3) Kemampuan robot dalam menjaga kestabilannya (Goris dkk, 2005)

Untuk dapat membuat sebuah robot mobile minimal diperlukan pengetahuan tentang mikrokontroler dan sensor-sensor elektronik. Sensor digunakan untuk mengenali lingkungan pada robot sehingga robot dapat menghindari halangan yang ada di sekitar. Untuk robot bersensor biasanya berperan sebagai AMR atau autonomous mobile robot, selain itu juga ada robot menggunakan sensor tapi tanpa perlu kontrol cerdas untuk menentukan jalur jalannya yaitu AGV atau autonomous guided vehicle dimana robot ini menggunakan sensor untuk mengikuti jalur yang telah ditentukan berupa garis terang gelap (line follower robot), dinding



(wallfollower robot), ataupun cahaya. Ada juga robot yang tanpa menggunakan sensor, namun digerakkan menggunakan kontroller yang dijalankan oleh manusia, robot ini sekarang sudah banyak dijual dipasarkan berupa mainan menggunakan remot kontrol.

Sensor yang digunakan pada robot juga ada banyak macam, baik laser, sonar, kamera, dan juga gps. Pada robot-robot canggih juga terdapat sensor kemiringan tanah agar tidak terjatuh dalam melewati jalur-jalur tertentu.

2.4 Robot Operating System

ROS adalah framework untuk membuat program robot yang fleksibel dan mudah digunakan. ROS berisi beragam peralatan (tool), library, driver, dan konvensi yang bertujuan untuk memudahkan pembuatan program yang kompleks dan handal pada berbagai platform robot. Sederhananya, dengan adanya ROS, setiap programmer menggunakan style yang sama dalam membuat sebuah program untuk robot jenis apapun.

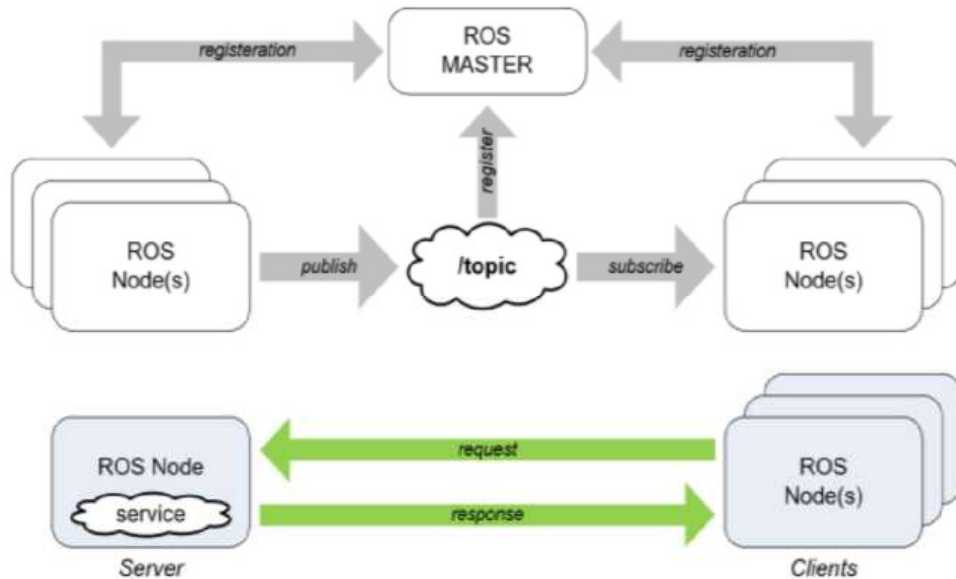
Robot Operating System sebenarnya adalah meta-operating system atau framework yang bersifat opensource yang dapat digunakan untuk robot. ROS mempunyai sebuah service seperti halnya sebuah sistem operasi pada umumnya, termasuk abstraksi perangkat keras, kendali perangkat tingkat bawah, implementasi dari fungsi-fungsi yang biasa digunakan, penyampaian pesan/data di antara proses serta management package. ROS juga menyediakan alat dan library yang memungkinkan kita untuk dapat membangun, memprogram hingga menjalankan program melalui banyak computer.

Software pada ROS dapat dibagi menjadi tiga grup: tools untuk mendistribusikan perangkat lunak berbasis ROS, implementasi ROS client library seperti roscpp, rospy, roslisp, dan yang terakhir package yang berisi kode yang berhubungan dengan aplikasi fungsional robot (Wicaksono, 2019).

Client libraries ROS utamanya diperuntukkan untuk sistem UNIX. Untuk hal ini Ubuntu Linux terdaftar sebagai “supported” sedangkan varian lain seperti Fedora Linux, macOS, serta Windows terdaftar sebagai “experimental”.



Kemampuan ROS multi-node dapat mengontrol banyak fungsi operasional robot. Robot yang memiliki tugas besar menjalankan banyak fungsi dan canggih, penerapan cara tradisional akan menyita waktu dan energi para peneliti. Dengan multi-node, properti ROS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 akan memberikan kontrol aliran robot yang efisien. Selanjutnya, proses membangun perangkat lunak robot tidak butuh waktu lama karena dapat dilakukan secara tim.



Gambar 4 Prinsip Kerja Kerangka Perangkat Lunak Berbasis ROS untuk Mengontrol Operasi Semua Sistem Robot Multi-Node

(Sumber : Nurdin & Hendriyawan 2019)

2.4.1 ROS Node

Sebuah node dalam ROS adalah sebuah proses yang melakukan suatu komputasi. berbagai node ini terkombinasi bersama menjadi suatu graph dan berkomunikasi dari satu node ke node lain menggunakan aliran topics, services, dan parameter server. Node ini diperuntukkan untuk beroperasi pada level yang sangat sempit. Sebagai contoh sebuah sistem kendali robot biasanya terdiri dari banyak node: satu node mengendalikan laser range finder, satu node mengendalikan motor, satu node lokalisasi, satu node untuk perencanaan jalur (path planning), satu node untuk monitoring, dan seterusnya.

Penggunaan node ini memberi manfaat antara lain: toleransi kegagalan yang terisolasi pada satu fungsionalitas tertentu pada individu node, kompleksitas dari



kode berkurang dibanding sebuah sistem monolithic, reusability serta maintainability tinggi dengan penyederhanaan berdasarkan fungsionalitas-fungsionalitas tersebut.

Selain itu sebuah node dapat dikembangkan menjadi sebuah nodelet, yaitu sebuah node yang dapat dipanggil dari dalam kode program lainnya menggunakan modul nodelet manager.

2.4.2 ROS Topic

Topic adalah komponen yang berfungsi sebagai media pertukaran pesan (disebut message dalam sistem ROS) antar node yang dinamai sesuai isi dari pesan tersebut. Sistemnya menggunakan anonymous publish/subscribe semantics. Nodes yang membutuhkan informasi dari suatu topic akan melakukan subscribe dan node yang menyediakan informasi akan melakukan publish. Jumlah node yang melakukan subscribe ataupun publish pada suatu topic tidak terbatas jumlahnya.

Setiap topic memiliki tipe datanya masing-masing sesuai tipe ROS message yang di bawanya. Kita dapat membuat tipe message sendiri sesuai kebutuhan kita, atau menggunakan tipe message yang disediakan oleh ROS client library. ROS topic juga mendukung komunikasi via TCP/IP atau UDP.

2.4.3 ROS Package

Perangkat lunak pada ROS terorganisir di dalam packages. Didalam packages tersebut dapat berisi ROS Node, library independen, dataset, file konfigurasi, dan hal lain yang mendukung modul tersebut. Tujuan dari packages adalah untuk menyediakan fungsionalitas yang berguna ini dalam sifat yang “mudah-dikonsumsi” dengan tujuan menjadikan perangkat lunak yang dapat dengan mudah digunakan kembali (reuse) oleh komunitas pengguna ROS.

2.5 Telerobotic

Bruno Siciliano dan Oussama Khatib dalam buku yang berjudul *Springer Handbook Of Robotic*, 2008 menuliskan Guenter Niemeyer dkk (2008), menyatakan. Telerobotika (tele-robotics) adalah cabang dari robotika yang melibatkan pengendalian atau manipulasi robot dari jarak jauh, sering kali menggunakan teknologi telekomunikasi, seperti jaringan komputer atau koneksi



internet. Ini berbeda dengan sistem robot biasa yang biasanya beroperasi dalam jarak dekat atau bahkan dalam satu lokasi fisik dengan operatornya, tiga kategori utama, yaitu :

- *Direct Control*
- *Shared Control*
- *Supervisory Control*

a. *Direct control*

Kontrol langsung adalah mode operasi telerobotika di mana seorang operator manusia secara langsung mengendalikan robot dengan menggunakan perangkat input seperti joystick, pengendali jarak jauh, atau perangkat lainnya. Dalam mode ini, setiap gerakan yang dilakukan oleh operator manusia segera direplikasi oleh robot. Kontrol langsung berguna dalam situasi di mana operator membutuhkan tingkat kontrol yang tinggi, seperti dalam operasi bedah telerobotik atau dalam situasi berbahaya yang memerlukan reaksi instan.

b. *Shared Control*

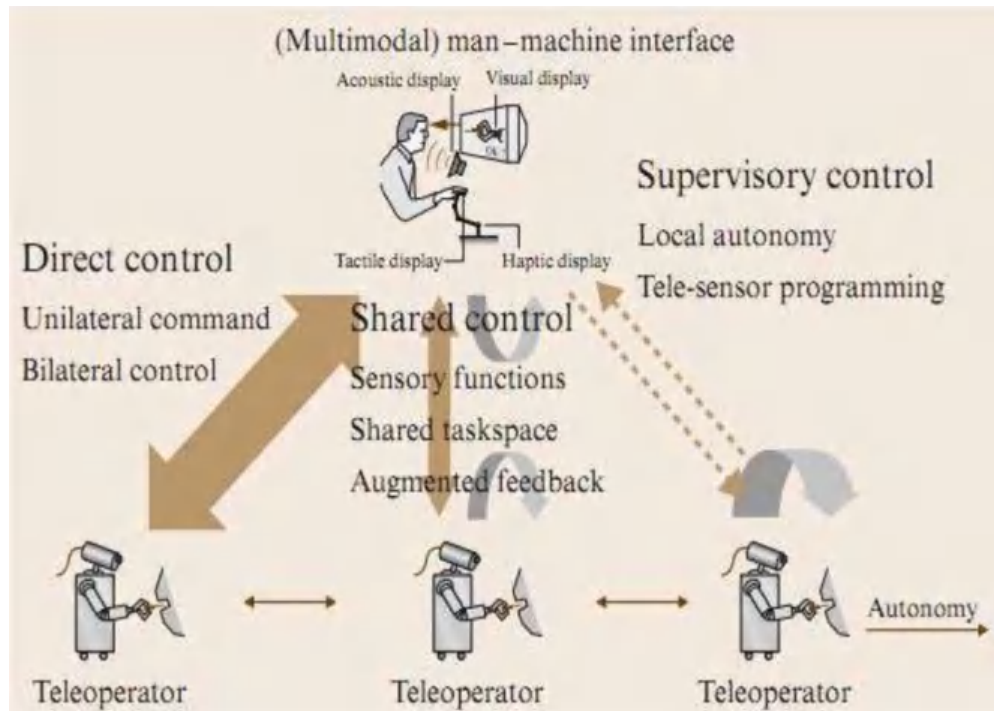
Dalam mode kontrol bersama, kontrol robot dibagi antara operator manusia dan sistem otomatis. Operator manusia memberikan arahan dan input, tetapi sistem otomatis juga memainkan peran dalam mengarahkan robot. Tujuannya adalah mencapai keseimbangan antara kontrol manusia dan otomatis untuk mengoptimalkan kinerja robot. Kontrol bersama sangat berguna dalam situasi di mana operator manusia mungkin tidak memiliki pengetahuan atau keahlian teknis yang cukup untuk mengendalikan robot sepenuhnya, atau di mana tugasnya sangat kompleks.

c. *Supervisory Control*

Mode kontrol pengawasan adalah mode di mana operator manusia bertindak sebagai pengawas atau supervisor atas tugas yang dilakukan oleh robot. Operator mengendalikan robot secara lebih tinggi, memberikan instruksi tingkat tinggi atau tujuan, sementara sebagian besar kontrol tugas harian diberikan kepada sistem otomatis. Kontrol pengawasan sering digunakan dalam aplikasi industri dan militer di mana robot harus bekerja secara mandiri dengan



sedikit intervensi manusia, tetapi manusia tetap bertanggung jawab atas pengawasan umum dan pengambilan keputusan.



Gambar 5 Man-Machine Interface

(Sumber : Springer Handbook of Robotics, 2008)

2.6 Robot Preseption

Persepsi robot adalah kemampuan robot untuk mengambil informasi dari lingkungan sekitarnya melalui sensor atau kamera dan mengolah informasi tersebut untuk mengambil keputusan atau melakukan tindakan tertentu. Persepsi robot dapat berupa sistem persepsi yang berfungsi untuk mendeteksi objek tertentu pada lingkungan sekitarnya, seperti bola pada lapangan sepak bola (Mahandi, 2021), atau sensor yang mendukung pergerakan robot, seperti Ultrasonic PING sensor yang digunakan sebagai Wall Following pada mobile robot (Prasetyo dkk, 2021). Selain itu, persepsi robot juga dapat berupa perilaku hewani yang menanggapi cahaya, suhu, suara, sentuhan dan postur, seperti pada robot terapi bagi lanjut usia yang mengalami demensia (Firmansyah, 2015). Dalam pengembangannya, sistem persepsi robot dapat menggunakan berbagai teknologi, seperti metode filtering, metode Fuzzy, atau algoritma greedy.



Sistem persepsi robot dapat memberikan informasi tentang lingkungan sekitarnya, seperti posisi objek atau landmark tertentu, yang dapat digunakan sebagai input untuk algoritma SLAM (Utomo, 2015). Dalam penelitian yang menggunakan HBE Robocar, robot menggunakan landmark berupa bola untuk menentukan posisi dan diproses menggunakan algoritma particle filter dengan variasi jumlah partikel.

Algoritma SLAM dapat digunakan untuk membuat peta lingkungan: Algoritma SLAM dapat digunakan untuk membuat peta lingkungan yang akurat dan detail. Dalam penelitian yang menggunakan mobile robot dengan sensor LiDAR, algoritma SLAM digunakan untuk membuat peta lingkungan menggunakan metode google cartographer yang dikombinasikan dengan metode eulderometry. Peta lingkungan ini dapat digunakan sebagai referensi untuk navigasi robot.

Sistem persepsi robot dan algoritma SLAM dapat digunakan untuk navigasi robot, seperti pada mobile robot dengan penggerak mekanum yang menggunakan Ultrasonic PING sensor sebagai Wall Following. Dalam penggunaannya, Ultrasonic PING sensor dapat digunakan dengan metode Fuzzy untuk mendapatkan jarak sesuai dengan setpoint yang ditentukan dan meminimalkan kesalahan. Algoritma SLAM juga dapat digunakan untuk perencanaan rute gerak robot dari titik awal menuju titik akhir.

2.7 Odometry

Odometry terdiri dari kata Yunani yaitu odos yang berarti rute dan metron yang berarti ukuran. Odometry adalah penggunaan data dari sensor gerak yang digunakan untuk memperkirakan perubahan posisi dari waktu ke waktu. Sistem ini digunakan pada beberapa robot berkaki maupun beroda untuk memperkirakan posisi mereka yang relative terhadap posisi awal. Metode ini sangat peka terhadap kesalahan karena terintegrasi terhadap variabel kecepatan dari waktu ke waktu untuk memberikan perkiraan posisi. Hasil analisis menghasilkan persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} X_{New\ Robot} \\ Y_{New\ Robot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{Previous\ Robot} \\ Y_{Previous\ Robot} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_{robot} & -\sin \theta_{robot} \\ \sin \theta_{robot} & \cos \theta_{robot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \dots (1)$$



Odometry membutuhkan sistem elektronik penunjang, bagian penting dari sistem elektronik penunjang odometry adalah sensor pergerakan. Sensor pergerakan yang bisa digunakan untuk sistem odometry antara lain kamera, sensor inersia, maupun rotary encoder.

Odometry dapat dikatakan sebagai suatu sistem pengukuran yang menggunakan data-data dari aktuator untuk memperkirakan pergerakan dari robot (Dudek, 2008). Pada robot dalam penelitian ini, odometry gerakan translasi robot dapat dilakukan menggunakan putaran dari roda yang posisinya sudah diketahui secara pasti. Sedangkan untuk odometry rotasi robot dapat dilakukan menggunakan sensor gyroscope yang posisi awalnya sudah diketahui.

2.10 SLAM

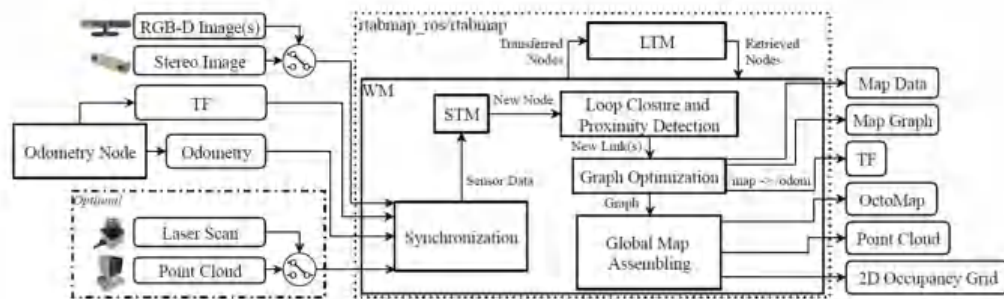
SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) adalah suatu metode yang digunakan sebuah robot untuk membuat suatu peta sekaligus bisa melokalisasi dirinya di peta yang dibuatnya. Metode ini memungkinkan robot untuk mengerjakan dua tugas secara bersamaan. yaitu memetakan lokasi serta mengetahui posisinya di dalam peta yang dibuatnya (Prayoga et al., 2010). Metode SLAM ini banyak sekali digunakan pada pengembangan mobile robot dengan kasus pembacaan suatu tempat yang memiliki bidang yang rata. Agar dapat membaca dengan baik, robot harus dilengkapi dengan bermacam sensor pendeteksi sebagai indra pembacanya. Bisa memakai LIDAR maupun SONAR (Sidharta, 2019). Terdapat berbagai cara yang bisa digunakan untuk mengaplikasikan algoritma SLAM secara 2D, yaitu Hector SLAM, GMapping, Karto SLAM, Core SLAM, dan Lago SLAM. Algoritma SLAM dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian, yang pertama berdasarkan sensor yang digunakan untuk mengukur jarak, bisa menggunakan laser, ultrasound atau odometry, kedua berdasarkan metode perhitungan, bisa menggunakan algoritma kalman filter atau partikel filter, dan yang ketiga berdasarkan strukturnya (Utomo, 2015). Algoritma SLAM ini semuanya terdapat pada package Robot Operating System (Rahman, 2020).

2.11 Real-Time Appearance-Based Mapping

RTAB-Map adalah pendekatan SLAM berbasis grafik yang populer yang mengimplementasikan deteksi *loop closure* visual menggunakan BoW (Bag of



Words) inkremental. Algoritma ini dapat mengambil data LiDAR, RGB-D, dan kamera stereo sebagai input, memungkinkan berbagai mode operasi seperti pemetaan 6 Dof dan 3 Dof. Salah satu kontribusi utama dari RTAB-Map adalah implementasi sistem pengelolaan memori yang memungkinkan operasi pada lingkungan skala besar sambil mempertahankan pemetaan jangka panjang. RTAB-Map juga kompatibel dengan ROS (Robot Operating System) dan mendapat dukungan besar dari komunitas ilmiah dalam satu dekade terakhir ini.



Gambar 6 Blok Diagram RTAB-Map pada node ROS

(Sumber : Labbé and Michaud, 2019)

Pada Gambar diatas blok fungsional berbeda dari RTAB-Map dapat diamati, seperti yang disajikan dalam (Labbé & Michaud, 2019). Di sini jelas bahwa algoritma ini memerlukan setidaknya sumber odometri dan input gambar RGB-D atau stereo. Input sensor Laser berfungsi sebagai input data jarak opsional yang dapat berupa laser scanner 2D atau pointclouds 3D dan dapat digunakan untuk membentuk grid okupansi 2D atau 3D sesuai kebutuhan. RTAB-Map juga mencakup node odometri jika tidak ada odometri eksternal yang disediakan. Blok utama RTAB-Map berisi sistem pengelolaan memori dan blok deteksi loop closure, future detection, optimisasi grafik, dan modul perakitan peta global. RTAB-Map mampu menghasilkan beberapa output secara *realtime*: peta yang dihasilkan dalam berbagai format (OctoMap, grid okupansi, dan pointclouds 3D), koreksi odometri dalam bentuk tf (format ROS untuk transformasi), serta grafik yang dihasilkan dengan atau tanpa informasi sensor.



2.11.1 Node Odometry RTAB-Map

RTAB-Map mengimplementasikan sebuah node odometri yang mampu menghitung odometri visual (VO) atau odometri LiDAR (LO) jika tidak ada sumber eksternal odometri, seperti odometri roda atau sumber VO atau LO lainnya. Node ini menghitung odometri berdasarkan metodologi yang disajikan dalam Scaramuzza dan Fraundorfer (2011), menghitung F2F dan F2M dalam kasus VO, serta S2S dan S2M dalam kasus LO.

A. Odometry Visual

Untuk pendekatan odometri visual, diperlukan transformasi antara kerangka koordinat kamera dan kerangka robot serta sumber gambar stereo atau RGB-D. Gambar input digunakan untuk mendapatkan fitur visual. Kemudian, fitur-fitur ini akan melalui langkah pencocokan fitur yang membandingkan fitur yang diperoleh dalam bingkai gambar saat ini dengan bingkai kunci sebelumnya atau peta fitur yang tersimpan, yaitu F2F dan F2M secara berturut-turut. Setelah fitur-fitur dipasang, dilakukan perhitungan prediksi gerakan menggunakan PnP RANSAC, yang kemudian dioptimalkan dengan penyesuaian bundel lokal. Akhirnya, posisi yang telah dioptimalkan beserta ketidakpastiannya diberikan sebagai output dari node odometri. Jika posisi baru cukup signifikan (ditentukan oleh ambang batas pada jumlah inlier dalam estimasi gerakan), fitur-fitur yang diekstrak ditambahkan ke peta fitur untuk pencocokan fitur selanjutnya. Perlu diperhatikan bahwa peta fitur memiliki jumlah maksimum fitur yang tersimpan setelah itu fitur-fitur yang lebih lama akan dibuang, jadi ini bukanlah algoritma pemetaan jangka panjang.

B. Odometry LiDAR

Odometri LiDAR sangat mirip dengan yang disajikan dalam odometri visual. Dalam kasus ini, data sensor laser harus diberikan sebagai input bersama dengan transformasi antara kerangka koordinat LiDAR dan kerangka dasar robot. Selain itu, odometri eksternal seperti odometri roda dapat ditambahkan untuk meningkatkan prediksi gerakan, karena odometri LiDAR dapat kehilangan jejaknya jika tidak cukup fitur terdeteksi. Langkah pertama adalah menyaring data awan titik, setelah itu melanjutkan dengan



registrasi ICP (Iterative Closest Point) dari awan titik saat ini dalam bingkai kunci sebelumnya atau dalam peta, yaitu S2S atau S2M secara berturut-turut. Dalam hal ini, peta adalah awan titik yang terbentuk dari semua pemindaian yang terdaftar dari setiap bingkai kunci. Setelah registrasi ICP, posisi odometri berikutnya diperoleh dan diberikan sebagai output dalam bentuk transformasi yang diperbarui dan posisi dengan ketidakpastian. Sama seperti pendekatan odometri visual, jika rasio korespondensi bingkai saat ini berada di bawah ambang batas yang telah ditentukan, bingkai baru dianggap sebagai bingkai kunci.

2.11.2 Graph creation and data storage

Seperti yang disebutkan di atas, RTAB-Map adalah sistem SLAM berbasis grafik. Ini berarti bahwa sistem ini membuat ulang *environment* menggunakan node dan *link*.

Node dan Link dalam RTAB-Map

Node adalah titik tertentu dalam waktu di mana data sensor diterima. Frekuensi sensor yang dipasang pada robot menentukan frekuensi pembuatan node baru. Dalam RTAB-Map, semua data masukan disinkronkan dan disimpan dalam node yang sama, yang sekarang akan disebut sebagai (signatures). Menurut Labbé dan Michaud (2018), setiap signature dapat menyimpan (tergantung pada data sensor yang tersedia):

- ID : Unique timestamp
- Weight : tingkatan signature
- BoW : bag of words, penanda visual yang digunakan untuk deteksi loop closure dan pembaruan weight, yang dikenal dengan istilah image signature
- Occupancy Grid
- Sensor data :
 - Pose : input dari odometry
 - Gambar RGB : digunakan untuk menangkap fitur lingkungan
 - Gambar Depth : digunakan untuk menangkap posisi 3D



- laser scanner : Digunakan untuk transformasi loop closure dan perbaikan odometri, serta oleh modul Deteksi Proksimitas

Semua signature saling terhubung oleh yang disebut "link," yang menggambarkan transformasi antara signature dan ketidakpastian pengukuran sebagai matriks informasi. *Link-link* ini dapat disimpan dalam 3 Derajat Kebebasan (x, y, θ) atau 6 Derajat Kebebasan ($x, y, z, \text{pitch}, \text{yaw}, \text{roll}$), tergantung apakah ruangnya digambarkan dalam 2D atau 3D, menggunakan koordinat Euklides. Semua *link* mengandung informasi yang sama, tetapi RTAB-Map memiliki konvensi penamaan tergantung pada modul yang menyediakan link-link ini.

- *Link* tetangga (Neighbour link): Dibuat antara Signature baru dan yang sebelumnya.
- *Link* kedekatan (Proximity link): Ditambahkan ketika dua signature yang dekat diselaraskan bersama menggunakan data LiDAR dan penyelarasan pemindaian.
- *Link* loop closure (Loop closure link): Ditambahkan ketika loop closure terdeteksi antara signature baru dan satu dalam peta.
- Kendala landmark (Landmark constraint): *Link* ini tidak didefinisikan secara eksplisit dalam dokumentasi resmi RTAB-Map, tetapi hadir dalam fitur baru algoritma ini. Ini mungkin bukan link dalam definisi formal yang kita miliki, tetapi merupakan constrain yang menghubungkan sebuah signature dengan landmark yang dapat diidentifikasi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan penanda Aruco atau tag April, yang deteksinya dimungkinkan dalam versi terbaru RTAB-Map sejak tahun 2019.

Memory Management

Sistem pengelolaan memori dirun di atas core RTAB-Map. Sistem ini bertanggung jawab atas pengelolaan cara penyimpanan posisi dan data sensor serta pemilihan yang mana yang digunakan untuk melakukan deteksi kedekatan dan loop closure. Sistem pengelolaan memori dibagi menjadi tiga memori utama: Memori Jangka Pendek (STM), Memori Kerja (WM), dan Memori Jangka Panjang (LTM). Seperti yang dijelaskan di Mark te Brake (2021), dua tujuan utama dari perbedaan



ini adalah: untuk memisahkan data yang baru saja diperoleh dari yang digunakan dalam deteksi loop closure dan untuk menjaga jumlah signature yang rendah selama deteksi loop closure agar tetap sesuai dengan batasan *realtime*.

- STM (Memori Jangka Pendek): Ini dapat dianggap sebagai buffer berukuran tetap yang memproses dan menyimpan signature yang paling baru sehingga mereka tidak memengaruhi deteksi *loop closure*. Menurut Labbé dan Michaud (2019), di sini lah grid okupansi dihitung dan semua informasi signature dirangkum. Menurut Labbé dan Michaud (2013), ada memori sebelumnya yang disebut Memori Sensorik (SM) di mana ekstraksi fitur dan reduksi fitur dilakukan sebelum masuk ke STM. Fitur-fitur yang diekstraksi diubah menjadi kata-kata visual menggunakan metode BoW inkremental (BoW).
- WM (Memori Kerja): Memori ini berisi semua signature yang merupakan kandidat untuk *loop closure*. Memori ini biasanya disimpan di dalam RAM, sehingga hanya signature yang bukan kandidat untuk transfer yang tetap ada di dalam WM untuk mengurangi penggunaan memori dan waktu pemrosesan.
- LTM (Memori Jangka Panjang): Memori ini menyimpan semua signature yang bukan signature baru maupun kandidat untuk *loop closure*. Menurut Labbé dan Michaud (2013), signature disimpan dalam database yang berisi *link*, ID signature, dan signature itu sendiri.

2.11.4 Deteksi Loop Closure

Deteksi *loop closure* dalam RTAB-Map didasarkan pada pendekatan yang umumnya dikenal sebagai Bag of Visual Words (BoVW). Dalam metodologi ini, fitur dari setiap bingkai kunci yang terdeteksi digabungkan menjadi BoW, dan setiap bingkai kunci diubah menjadi representasi menggunakan kata-kata visual yang dihasilkan. Filter Bayesian diskrit digunakan untuk melacak *loop closure* dengan mengestimasi probabilitas bahwa lokasi saat ini berkaitan dengan *signature* yang tersedia di WM. Jika probabilitasnya lebih tinggi dari ambang batas tertentu, hipotesis ini dianggap sebagai kandidat *loop closure* dan grafik posisi diperbarui sebagai konsekuensinya.



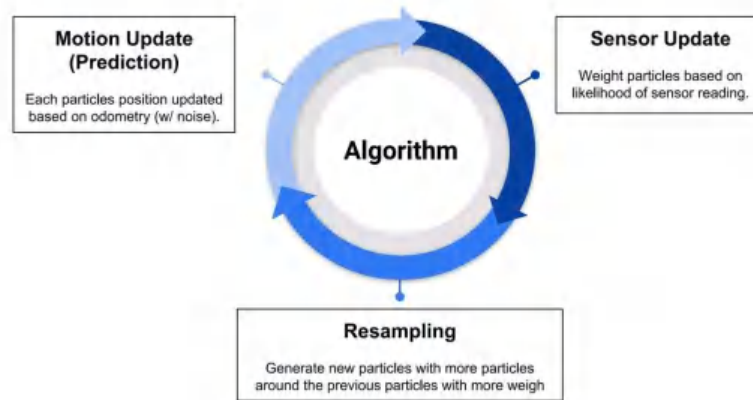
2.11.5 Optimization

Dalam RTAB-Map, model word di dalam Memori Kerja (WM) dioptimalkan untuk secara akurat merepresentasikan lintasan yang dilakukan oleh robot. Untuk melakukan optimasi, informasi posisi diekstraksi dari *signature* dan dimasukkan ke dalam pemoptimizer nonlinear. Saat ini, RTAB-Map mengimplementasikan beberapa optimizer yang paling populer seperti g2o, gtsam, dan TORO.

2.12 Adaptive Monte Carlo Localization

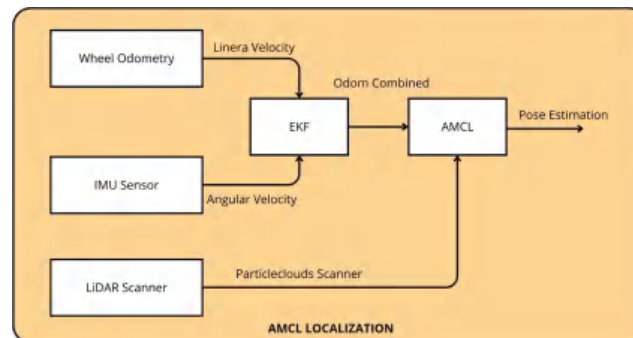
Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) adalah sistem lokalisasi probabilistik untuk robot yang bergerak di bidang 2D (Thrun dkk, 2005). AMCL merupakan varian dari Monte Carlo Localization (MCL) yang menggunakan filter partikel untuk memperkirakan lokasi dan orientasi robot. Algoritma AMCL dimulai dengan keyakinan awal distribusi probabilitas pose robot, yang direpresentasikan oleh partikel yang didistribusikan sesuai dengan keyakinan tersebut. Algoritma kemudian menggunakan langkah-langkah berikut untuk memperkirakan pose robot:

- Gerakan: Robot bergerak dan memperbarui perkiraan pose berdasarkan data odometer.
- Sensor: Robot merasakan lingkungannya menggunakan sensor seperti pemindai laser dan memperbarui perkiraan pose berdasarkan kemungkinan data sensor.
- Resampling: Partikel diresampling berdasarkan bobot mereka untuk menghasilkan set partikel baru untuk iterasi berikutnya.
- Filter partikel: Partikel diberi bobot berdasarkan kemungkinan data sensor dan data odometer, dan perkiraan pose diperbarui berdasarkan partikel yang diberi bobot.



Gambar 7 Alur Kerja AMCL

AMCL digunakan dalam ROS untuk lokalisasi dalam SLAM[1][5]. AMCL adalah bagian dari tumpukan navigasi ROS dan digunakan untuk memperkirakan pose robot dalam peta yang diketahui dari lingkungan. Algoritma AMCL menyesuaikan jumlah partikel berdasarkan jarak KL untuk memastikan bahwa distribusi partikel konvergen ke distribusi yang benar dari keadaan robot berdasarkan semua pengukuran sensor dan gerakan masa lalu dengan probabilitas tinggi.



Gambar 8 Blok Diagram Arsitektur AMCL