

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

Fariz Achmad Faizal¹, Muh Anshar², A. Ejah Umraeni Salam³, Muhammad Aiman Syawal⁴

^{1,2,3,4} Universitas Hasanuddin; Jln. Poros Malino Km.6, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92119

Keywords:

Automation, SLAM, Kinect, ROS, Robotics

Correspondent Email:

syawalma21d@student.unh.ac.id

Abstrak. Kemampuan dasar yang harus dimiliki oleh robot bergerak adalah kemampuan untuk berpindah dengan aman antar lokasi saat menjalankan tugas yang diberikan. Robot perlu dapat mengenali lingkungan sekitarnya dan mengetahui posisinya relatif terhadap lingkungan tersebut. Sensor Microsoft Kinect digunakan untuk pengenalan lingkungan dan pembuatan peta 2D, sementara metode particle filter digunakan untuk estimasi posisi relatif robot. Algoritma visual Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Real Time Appearance Based Mapping (RTABmap) berbasis Robot Operating System (ROS) diterapkan pada witness robot yang telah dirancang. Implementasi pemetaan dan lokalisasi secara bersamaan memanfaatkan algoritma tersebut. Hasilnya adalah peta probabilistik 2D occupancy grid map yang membantu robot bergerak dengan aman dan efisien dalam menjalankan tugasnya. Dengan adanya teknologi ini, robot dapat menavigasi dengan akurat dan menghindari rintangan yang mungkin ada di sekitarnya, meningkatkan kinerja dan keamanan operasinya secara keseluruhan. Integrasi teknologi ini memberikan fondasi yang kuat bagi mobilitas robot dalam berbagai lingkungan dan skenario tugas yang kompleks.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. *The basic ability that a moving robot should have is the ability to move safely between locations while performing assigned tasks. Robots need to be able to recognize their surroundings and know their position relative to them. Microsoft Kinect sensors are used for environment identification and 2D mapping, while the particle filter method is used for estimating the robot's relative position. Real-Time Appearance-Based Mapping (RTABmap) based on the Robot Operating System (ROS) visual algorithm is applied to the designed robot witness. Simultaneous mapping and localization implementation utilize these algorithms. The result is a 2D probabilistic occupancy grid map that helps robots move safely and efficiently in carrying out their tasks. With this technology, the robot can navigate accurately and avoid any obstacles that may exist around it, improving its overall operational performance and security. The integration of this technology provides a strong foundation for robotic mobility in a variety of complex environments and task scenarios.*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robot telah membawa dampak signifikan pada berbagai sektor industri, dengan industri manufaktur sebagai salah satu yang paling mencolok. Robot digunakan dalam berbagai tugas di industri ini, seperti pemindahan barang dan perakitan komponen [1]. Tujuan utama adalah meningkatkan efisiensi produksi, efektivitas, dan pengurangan biaya. Selain industri manufaktur, robot juga telah diterapkan di berbagai sektor lain, termasuk kesehatan, pertanian, dan pertambangan. Di sektor kesehatan, robot membantu dalam operasi dan terapi fisik [2]. Di bidang pertanian, robot mendukung petani dalam proses panen dan pemantauan tanaman [2], sementara di pertambangan, robot digunakan dalam eksplorasi dan pengambilan sampel di area yang sulit dijangkau oleh manusia [3].

Kemajuan ini memunculkan tuntutan terhadap kemampuan robot untuk beroperasi dalam lingkungan yang semakin kompleks. Dalam rangka menghadapi tantangan ini, diperlukan kemampuan robot untuk memahami lingkungan sekitarnya dengan baik, yang tidak mungkin dicapai dengan metode konvensional. Kinect depth sensor, salah satu jenis sensor yang digunakan, memberikan informasi 3D tentang lingkungan robot, memungkinkan pembuatan peta digital dan perencanaan jalur yang lebih efisien.

Dalam konteks ini, pengembangan sistem pemetaan dan lokalisasi pada robot dengan menggunakan algoritma SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) menjadi sangat penting. Penelitian ini akan berfokus pada pemanfaatan Kinect depth sensor dan algoritma SLAM untuk mencapai tujuan ini. Penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi signifikan dalam perkembangan teknologi robotika dan dapat diterapkan dalam berbagai sektor seperti surveilans, eksplorasi, dan transportasi. Mobile robot, yang digunakan di berbagai lingkungan, akan menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Sistem pemetaan dan lokalisasi (SLAM) telah menjadi landasan penting bagi navigasi otonom robot mobile di lingkungan indoor dan outdoor yang tidak terstruktur. Penerapan

SLAM memungkinkan robot membangun peta lingkungan sambil memperkirakan posisi dirinya secara konsisten, sehingga operasional seperti perencanaan rute, navigasi antarmuka manusia-robot, dan eksplorasi dapat dilakukan secara mandiri [4][5].

Dalam konteks ini, penelitian ini akan merancang dan mengimplementasikan sistem pemetaan dan lokalisasi berbasis Kinect depth sensor dengan menggunakan algoritma SLAM. Selain itu, penelitian ini akan mencari solusi untuk meningkatkan akurasi melalui model odometry berdasarkan sensor fusion dengan EKF (Extended Kalman Filter). Kinerja sistem juga akan diuji dalam berbagai kondisi lingkungan yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang penerapan teknologi Kinect dalam pemetaan dan lokalisasi robot, yang berpotensi memberikan dampak signifikan di berbagai sektor industri.

Dalam pengembangan sistem pemetaan dan lokalisasi pada robot, penelitian terkait menjadi komponen penting dalam memahami kemajuan dan kontribusi sebelumnya dalam bidang ini. Beberapa penelitian terkait yang relevan dengan topik penelitian ini akan kami bahas di sini.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam pengembangan sistem pemetaan dan lokalisasi pada robot, penelitian terkait menjadi komponen penting dalam memahami kemajuan dan kontribusi sebelumnya dalam bidang ini. Beberapa penelitian terkait yang relevan dengan topik penelitian ini akan kami bahas di sini.

1) Ali Uroidhi pada tahun 2017, fokus pada penggunaan sensor Kinect untuk mengembangkan sistem kontrol robot mobile dengan kemampuan pemetaan jalan. Penelitian ini menunjukkan bahwa sensor Kinect dapat digunakan untuk membuat robot mobile yang mampu melakukan pemetaan jalan, yang memiliki potensi aplikasi dalam proses evakuasi kebakaran gedung [6].

2) Achmad Akmal Fikri dan Lilik Anifah pada tahun 2021 memanfaatkan teknologi LiDAR untuk mengusulkan sistem mapping dan lokalisasi pada mobile robot. Mereka

berhasil mengembangkan sistem yang mampu membuat peta lingkungan sekitar robot dan mengenali kondisi lingkungan meskipun ada gangguan pada peta. Hasil penelitian ini membawa kemajuan dalam penggunaan teknologi pemetaan berbasis LiDAR dalam robotika [7].

3) P. Anggraeni, Ridwan, dan M.T.A. Asshydiqi pada tahun 2020 menghadirkan sistem pemetaan lingkungan multi-robot dengan menggunakan algoritma ORB SLAM-2.

Penelitian ini memunculkan konsep desentralisasi di mana algoritma dijalankan pada masing-masing robot, yang kemudian menggabungkan pemetaan lingkungannya dan mengirimkannya ke komputer untuk visualisasi. Konsep ini memberikan perspektif penting terkait pemetaan lingkungan multi-robot yang memiliki potensi dalam pengembangan sistem robotika [8].

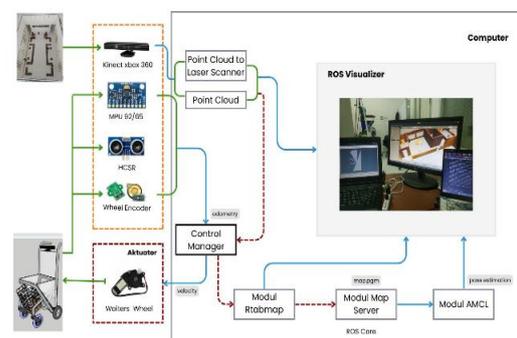
4) Gyan Singh Yadav, Saksham Jain, dan Urvashi Agrawal pada tahun 2021 memperkenalkan teknik baru berbasis visi komputer untuk SLAM menggunakan *Extended Kalman Filter*. Mereka menggunakan sensor Kinect untuk menciptakan peta lingkungan dan navigasi yang efisien. Penelitian ini menghasilkan algoritma yang efektif dalam menghasilkan jalur terpendek yang bebas tabrakan, sementara sensor Kinect digunakan sebagai solusi yang ekonomis dan dapat diandalkan dalam pengambilan data [9].

5) Muhammad Takbir Machmud pada tahun 2019 mengkaji penggunaan sensor Kinect dalam navigasi prototipe robot kursi roda yang dapat melakukan *skeleton tracking* dalam sistem pandu arahnya. Penelitian ini memberikan wawasan tentang potensi sensor Kinect dalam dunia robotika, khususnya dalam konteks penyandang disabilitas [10].

3. METODE PENELITIAN

Sistem ini dirancang menjadi tiga bagian yaitu masukan, proses dan keluaran. Bagian masukan terdiri dari sensor-sensor berupa sensor Kinect, sensor PING, sensor IMU dan odometer. Untuk sensor odometer menggunakan parallax quadrature encoder yang di couple ke motor dengan menggunakan disk

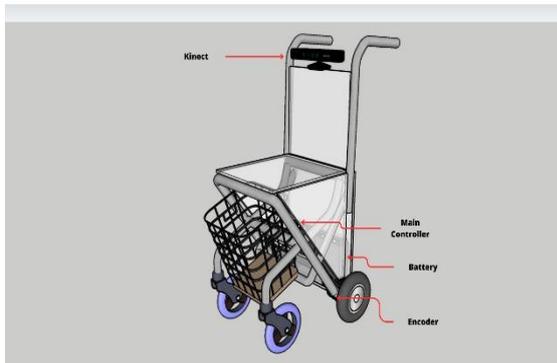
yang terhubung pada as motor. Sensor Kinect bertindak sebagai persepsi robot, yang dapat memindai area di depan robot sehingga dapat dilakukan pemetaan dan navigasi. Sedangkan sensor IMU dan odometer digunakan untuk lokalisasi agar pergerakan robot dapat selalu dipantau dan membantu melakukan pemetaan dan navigasi. Bagian proses terdapat komputer yang memproses seluruh data yang didapatkan melalui sensor yang ada. Selain komputer juga terdapat mikrokontroler Arduino mega yang bertugas untuk berinteraksi langsung dengan hardware pada bagian *low level* seperti mengendalikan putaran motor dan meneruskan data odometer menuju komputer utama. Bagian keluaran terdapat motor DC *power window* sebagai perangkat penggerak utama robot. Motor DC digerakkan oleh mikrokontroler melalui modul motor controller parallax HB-25 atas perintah dari komputer utama. Gambaran umum sistem digambarkan dalam bentuk diagram blok pada gambar 1.



Gambar 1. Gambaran Umum Sistem

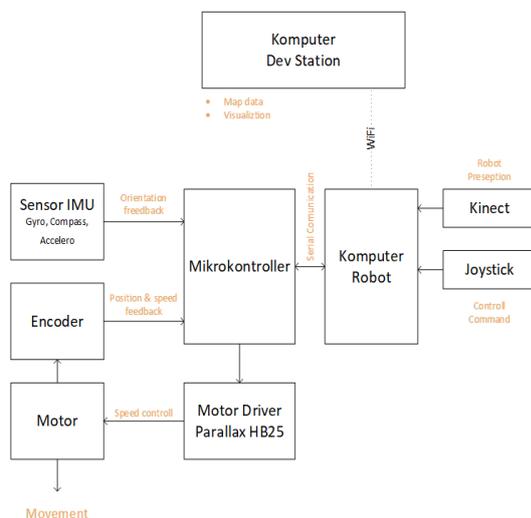
Dalam perancangan perangkat keras, terbagi atas beberapa tahapan perancangan sebagai berikut.

Dalam mekanisasi robot dimulai dengan merancang *chasis* atau badan robot agar komponen sensor dan daya dapat diletakkan bagian control board. *Chasis* yang digunakan pada penelitian ini merupakan modifikasi dari penelitian Muhammad Takbir (2019) [10] yang di modifikasi dengan menempatkan sensor, kontroler, aktuatro serta komponen pendukung lainnya untuk menunjang fungsi robot dalam melakukan pemetaan lingkungan yang dapat kita lihat pada gambar 2



Gambar 2. Desain Robot

dilakukan dengan mempertimbangkan penambahan sensor dan modul kontroler sesuai dengan kebutuhan robot dalam pemenuhan misi, yaitu untuk melakukan pemetaan. Selain itu, bagian daya juga harus dirancang untuk memenuhi kebutuhan seluruh komponen elektronik agar dapat beroperasi. Pada robot, kebanyakan komponen membutuhkan sumber catu daya 5v termasuk kontroler dan sensor, sedangkan motor membutuhkan supply 12v sehingga robot ini menggunakan dua buah aki 12v yang dihubungkan dengan buck converter 5v. hubungan antara komponen dapat dilihat pada blok diagram dibawah.



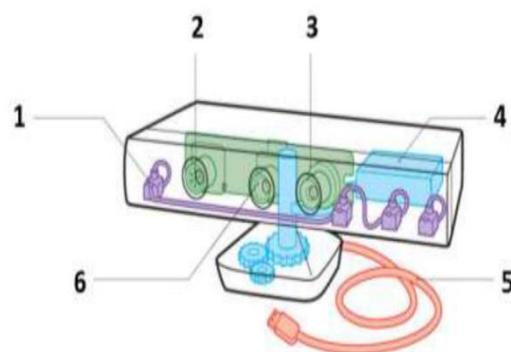
Gambar 3. Blok Diagram Hardware

Kinect adalah "controller-free gaming" oleh Microsoft dan Xbox 360 video game platform. Sensor Kinect adalah batang horizontal yang terhubung dengan alas kecil yang memiliki poros yang dapat berputar. Perangkat ini memiliki kamera RGB, sensor kedalaman, dan

mikrofon, yang menyediakan kemampuan untuk menangkap gerak secara 3D, mengenali wajah, dan mengenali suara

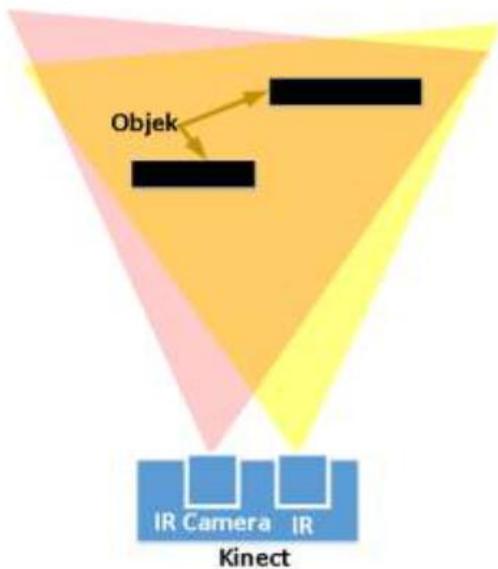
Sensor kedalaman Kinect terdiri dari proyektor laser infrared yang digabungkan dengan sensor CMOS monokromatik. Ini memungkinkan perangkat untuk merekam data video 3D dalam berbagai kondisi pencahayaan. Data video RGB dikirimkan dengan resolusi VGA (640 x 480 piksel) dengan kedalaman warna 8-bit menggunakan filter warna Bayer, sementara data video monokromatik untuk deteksi kedalaman dikirimkan dengan resolusi VGA dan kedalaman warna 11-bit [11].

Sensor Kinect memiliki jangkauan penggunaan sekitar 1.2 hingga 35 meter (3.9 hingga 11 kaki) dengan lebar pandangan sekitar 57 derajat secara horizontal dan 43 derajat secara vertikal. Perangkat ini memiliki poros yang dapat digerakkan oleh motor hingga 27 derajat ke atas dan ke bawah. Pada jarak minimum sekitar 0.8 meter (2.6 kaki), bidang horizontal sensor Kinect memiliki lebar sekitar 87 cm (34 inci) dan bidang vertikal sekitar 63 cm (25 inci), yang menghasilkan resolusi sekitar 1.3 mm (0.051 inci) per pikselnya. Kinect juga dilengkapi dengan fitur mikrofon yang memiliki empat mikrofon kapsul, masing-masing dengan kedalaman suara 16-bit pada kecepatan cuplik 16 kHz [12].



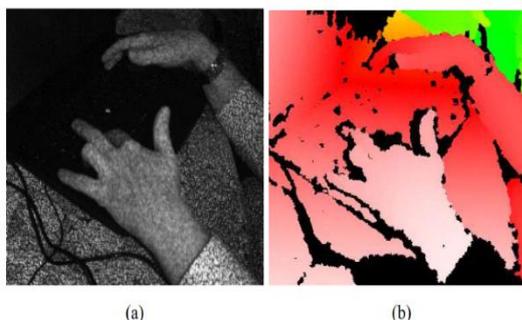
Gambar 4. Komponen-Komponen Sensor Kinect

Gambar 3 menunjukkan isi dari komponen yang ada pada sensor kinect, kompoen tersebut adalah [9] microphone array, IR emitter, depth camera / IR camera, tilt motor, USB cable, dan color camera.



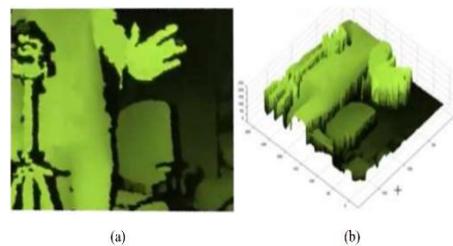
Gambar 5. Komponen-Komponen Sensor Kinect

Data depth kinect di dapatkan dari paduan IR Emitter dan IR Camera, prinsip kerjadari kedua perangkat tersebut di ilustrasikan pada gambar 4, IR Emitter dengan IR Camera memiliki jarak yang konstan. Perbedaan jarak pada kedua perangkat mengakibatkan perbedaan penangkapan objek, sehingga terdapat beberapa titik yang terkena IR Emitter tetapi tidak terbaca oleh kamera, begitu juga sebaliknya. Cahaya yang di pancarkan IR Emitter memiliki pola-pola titik. Ketika jarak benda semakin jauh maka pola-pola titik akan semakin berjauhan dan semakin kecil. Ketika jarak benda semain dekat maka pola-pola titik akan semakin berdekatan dan semakin besar. Berdasarkan pola-pola tersebut IR Camera akan membaca intensitasdari cahaya IR yang di pancarkan. Pancaran sinar IR dan data Depth di tunjukkan pada gambar 5



Gambar 6. Data Depth Kinect, (a) IR Kinect, (b) Depth Map Kinect

Berdasarkan prinsip di atas data depth kinect mempresentasikan jarak yang di dapat dari intensitas cahaya yang di tangkap oleh IR Camera. Semakin jauh suatu benda itensitas cahaya akan semakin kecil, kecilnya intensitas juga di pengaruhi dari jauhnya pola-pola titik IR pada benda tersebut. Hasil jarak di presentasikan dalam 2D array, nilai dari 2d array dapat mewakili semua jarak, hasil 2d array beserta plot diagram 3d di tunjukkan pada Gambar 22. berdasarkan gambar 6, dapat terlihat perbedaan jarak antara orang dengan kursi, dengan dinding, dan dengan tripod kamera melalui plot 3d

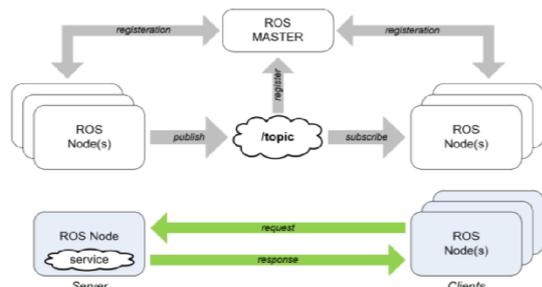


Gambar 7. Data Depth Kinect (a) Bentuk 2D Array, (b) Dalam Plot 3D

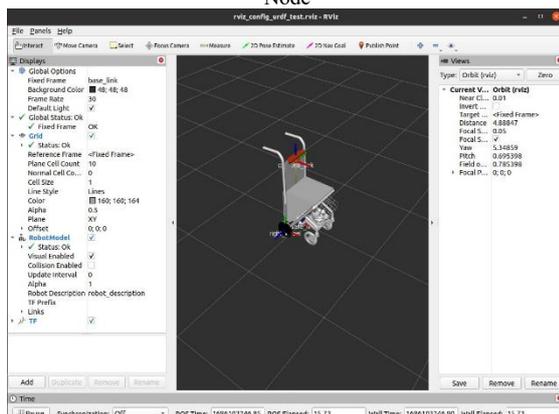
Pada penelitian ini rancangan perangkat lunak merupakan bagian utama dari sistem pemetaan dan lokalisasi yang di rancang. Bagian ini dibagi menjadi beberapa tahapan proses mulai dari akuisisi data sensor oleh mikrokontroler low level, proses komunikasi dengan komputer utama, integrasi dengan ROS, filterisasi data sensor, pemodelan odometry serta hubungan antar link dan join, hingga pemrosesan peta dan lokalisasi.

Sensor Kinect Xbox 360. Robot Operating System (ROS) adalah framework opensource yang dirancang untuk membuat program robot yang fleksibel dan mudah digunakan. ROS menyediakan beragam alat, perpustakaan, driver, dan konvensi yang bertujuan untuk menyederhanakan pembuatan program yang handal pada berbagai platform robot, memungkinkan para programmer menggunakan gaya yang sama. ROS adalah meta-operating system yang menyediakan layanan seperti abstraksi perangkat keras, kontrol perangkat keras, implementasi fungsi umum, dan komunikasi antar proses [13]. Dengan dukungan multi-node, ROS

memungkinkan pengendalian yang efisien untuk robot yang memiliki tugas kompleks, dan mempercepat pengembangan perangkat lunak robot melalui kolaborasi tim. Meskipun utamanya diperuntukkan untuk sistem UNIX dengan dukungan penuh untuk Ubuntu Linux, ROS juga tersedia secara eksperimental untuk Fedora Linux, macOS, dan Windows.



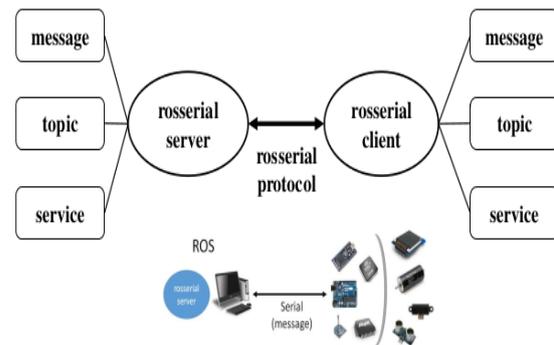
Gambar 8. Prinsip Kerja Kerangka Perangkat Lunak Berbasis ROS untuk Mengontrol Operasi Semua Sistem Robot Multi-Node



Gambar 9. Visualisasi Model Robot dengan Rviz

Pemodelan robot dalam URDF (Unified Robot Description Format) pada ROS (Robot Operating System) melibatkan beberapa tahapan penting, termasuk penulisan deskripsi robot, integrasi file mesh untuk visualisasi, dan penggunaan URDF dalam sistem kontrol robot otonom. Tahap pertama melibatkan penulisan deskripsi robot yang mencakup informasi link dan joint untuk merepresentasikan struktur dan geometri robot. Kemudian, file mesh dimasukkan ke dalam URDF untuk visualisasi yang realistis. Ini penting untuk simulasi dan visualisasi yang akurat. URDF memungkinkan sistem kontrol robot untuk mengakses informasi geometri, batasan pergerakan sendi, dan hubungan antar-komponen, memungkinkan perencanaan dan eksekusi gerakan robot yang

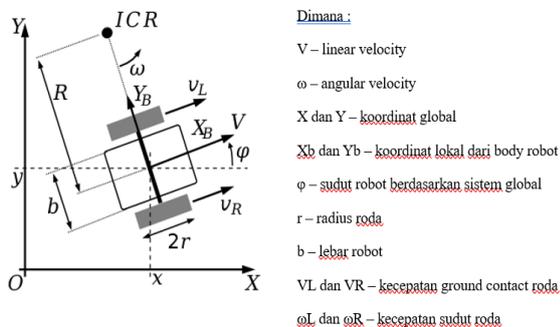
presisi. Selain itu, URDF digunakan dalam pembuatan peta dan lokalisasi, menyediakan informasi geometri yang diperlukan untuk pengukuran jarak dan integrasi data sensor untuk membangun peta lingkungan yang akurat dan menentukan posisi serta orientasi robot dalam ruang [14].



Gambar 10. Visualisasi Model Robot dengan Rviz

Penggunaan ROS Serial memungkinkan komunikasi antara Arduino dan Komputer dalam sistem ini. Ini adalah protokol komunikasi efektif yang memfasilitasi pertukaran data dan pesan dalam lingkungan ROS, memungkinkan koordinasi dan integrasi yang lancar. Arduino mengontrol perangkat keras, seperti motor driver, encoder, MPU9265, dan HCSR, serta mengirimkan data melalui ROS Serial ke Komputer. Sebaliknya, Komputer menerima data ini untuk pengolahan lebih lanjut, seperti pengendalian motor dan perintah dari pengguna. Instruksi dan data bergerak dua arah, memungkinkan kerjasama yang efisien antara keduanya dalam sistem ini. Penggunaan ROS Serial memungkinkan komunikasi antara Arduino dan Komputer dalam sistem ini. Ini adalah protokol komunikasi efektif yang memfasilitasi pertukaran data dan pesan dalam lingkungan ROS, memungkinkan koordinasi dan integrasi yang lancar. Arduino mengontrol perangkat keras, seperti motor driver, encoder, MPU9265, dan HCSR, serta mengirimkan data melalui ROS Serial ke Komputer. Sebaliknya, Komputer menerima data ini untuk pengolahan lebih lanjut, seperti pengendalian motor dan perintah dari pengguna. Instruksi dan data bergerak dua arah, memungkinkan kerjasama yang efisien antara keduanya dalam sistem ini.

Ros Controller package - Differential Drive. Pada perancangan ini, kendali diferensial digunakan untuk mengatur gerakan dan posisi roda robot, memungkinkan pengendalian yang akurat terhadap kecepatan dan arah putaran berdasarkan jarak dan diameter roda. Kendali ini diimplementasikan melalui node ROS yang menerima perintah dari pengguna atau sistem kendali robot, menghitung gerakan yang diperlukan berdasarkan parameter seperti jarak antar roda dan diameter roda, dan mengirimkan instruksi ke robot untuk menggerakkan roda sesuai dengan perintah yang diberikan.

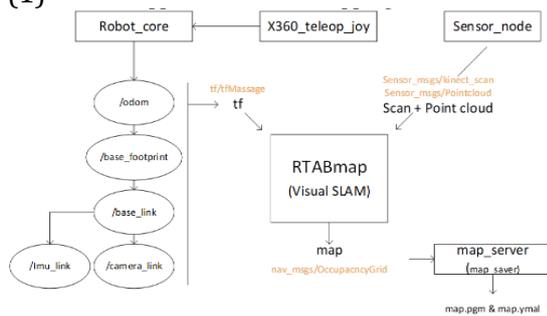


Gambar 11. Model Matematika Differential Drive

yang dapat dirumuskan dengan persamaan matematis berikut [15] :

$$\omega_r = \frac{V + \omega \cdot \frac{b}{2}}{r} \text{ dan } \omega_l = \frac{V - \omega \cdot \frac{b}{2}}{r}$$

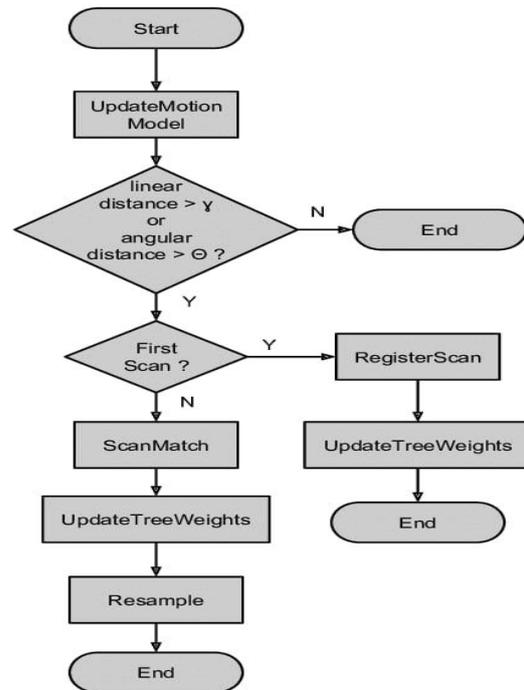
(1)



Gambar 12. Hubungan antar node pada RTABMap

RTAB-Map merupakan algoritme pemetaan berbasis visual yang menggabungkan pemetaan simultan (SLAM) dan pemetaan berbasis penampilan. Algoritme ini menggunakan sensor visual, seperti kamera Kinect Xbox 360, untuk mengumpulkan data citra dan informasi kedalaman dari lingkungan sekitar robot. Dengan memanfaatkan informasi visual ini, RTAB-Map dapat membangun peta lingkungan

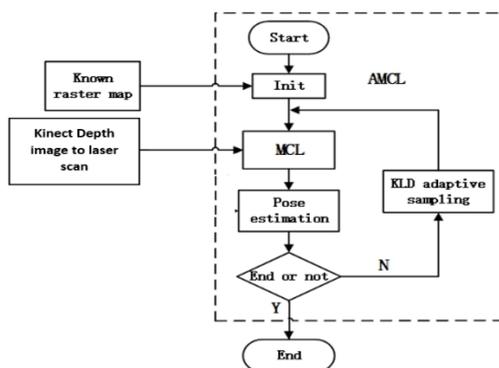
secara real-time dan melakukan lokalisasi dalam lingkungan yang tidak diketahui.



Gambar 13. Flowchart Sistem Pemetaan

Proses pemetaan dengan RTAB-Map melibatkan beberapa tahap. Pertama, lingkungan disiapkan dan sensor Kinect Xbox 360 terhubung ke robot. Kemudian, robot mengumpulkan data citra dan informasi kedalaman saat bergerak di sekitar lingkungan. Data ini dianalisis untuk mengekstraksi fitur-fitur penting. Selanjutnya, RTAB-Map membandingkan fitur-fitur ini dengan peta yang sedang dibangun dan mengidentifikasi lokasi objek baru dalam peta. Ketika robot kembali ke area yang sudah dilewati sebelumnya, RTAB-Map mendeteksi loop closure untuk meningkatkan akurasi peta. Peta diperbarui dan dioptimasi, termasuk pembuatan occupancy grid map yang menggambarkan okupansi sel-sel di lingkungan.

Proses lokalisasi dengan AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) menggunakan grid map yang dihasilkan oleh RTAB-Map melibatkan beberapa tahapan. Grid map digunakan sebagai peta referensi, sementara AMCL memerlukan estimasi awal posisi robot.

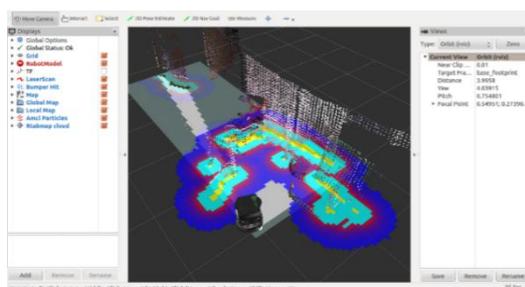


3

Gambar 14. Visualisasi Lokalisasi RVIZ

Selama proses lokalisasi, AMCL mengamati data sensor, seperti lidar, dan menggunakan pendekatan Monte Carlo untuk menghasilkan sejumlah partikel yang mewakili estimasi posisi robot. Partikel-partikel ini diperbarui berdasarkan data sensor dan odometri, kemudian dievaluasi dengan membandingkan dengan grid map. Partikel dengan kesesuaian terbaik memiliki bobot lebih tinggi. Melalui resampling, distribusi partikel disesuaikan untuk fokus pada estimasi yang akurat, dan posisi robot diambil dari partikel dengan bobot tertinggi. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan untuk memperbarui estimasi posisi robot secara real-time, memungkinkan robot untuk navigasi yang akurat dalam lingkungan yang telah dipetakan.

Pada penelitian ini rancangan perangkat lunak merupakan bagian utama dari sistem pemetaan dan lokalisasi yang di rancang. Bagian ini dibagi menjadi beberapa tahapan proses mulai dari akusisi data sensor oleh mikrokontroler low level, proses komunikasi dengan komputer utama, integrasi dengan ros, filterisasi data sensor, pemodelan odometry serta hubungan antar link dan join, hingga pemrosesan peta dan lokalisasi.



Gambar 15. Visualisasi Lokalisasi RVIZ

Rancangan Pengujian Data Pengamatan Sensor, data pengamatan sensor digunakan dalam proses lokalisasi dan pembaruan posisi. Data ini meliputi pengamatan visual dari sensor Kinect, yang dapat berupa deteksi fitur atau poin kunci pada gambar, serta pengamatan lain seperti data IMU (Inertial Measurement Unit) dan data encoder untuk informasi orientasi atau percepatan.

Rancangan Pengujian Odometry, data odometri digunakan untuk memperbaiki estimasi posisi robot. Kita dapat mengambil data odometri dengan menggunakan encoder yang terpasang pada motor robot untuk mengukur putaran roda atau menggunakan data visual odometry dari sensor Kinect yang mengestimasi pergerakan robot berdasarkan perubahan gambar yang diterima.

Rancangan Pengujian Ground Truth untuk menguji keakuratan hasil pemetaan dan lokalisasi, Kita perlu memiliki data ground truth yang merupakan informasi posisi dan bentuk lingkungan yang sebenarnya. Data ground truth ini dapat diperoleh dengan menggunakan metode pengukuran langsung seperti pemetaan manual menggunakan perangkat ukur atau menggunakan sistem pemetaan yang diketahui keakuratannya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Odometry Dengan Position Tracking. Pada pengujian pembacaan odometri dan position tracking bertujuan untuk membandingkan estimasi pergerakan robot berdasarkan sensor seperti encoder, IMU, dan visual odometry dari Kinect dengan lintasan sebenarnya yang telah disiapkan. Data odometri ini digunakan untuk mengukur pergerakan translasi dan perubahan orientasi robot. Implementasi pengujian melibatkan instruksi robot untuk menjalani lintasan yang mencakup pergerakan translasi dan rotasi, dengan data odometri dari sensor direkam. Hasil perbandingan dengan ground truth lintasan sebenarnya memberikan wawasan tentang akurasi dan keandalan estimasi pergerakan robot.

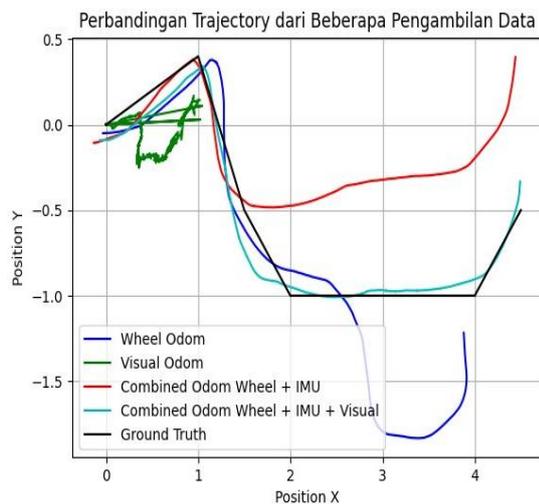
Hasil pengujian pembacaan odometri dengan position tracking akan memberikan pemahaman tentang performa sensor-sensor

yang digunakan dalam mengukur pergerakan robot. Data odometri yang berasal dari berbagai sensor dapat dibandingkan untuk mengidentifikasi sensor mana yang memberikan estimasi yang lebih akurat dan stabil dalam berbagai situasi pergerakan

$$\text{Max Deviation} = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$\text{Average Deviation} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Dimana x_i dan y_i adalah koordinat dari garis penanda hasil kalkulasi trajectory, dan N adalah jumlah grid.



Gambar 16. Perbandingan trajectory odometry berbeda terhadap ground truth

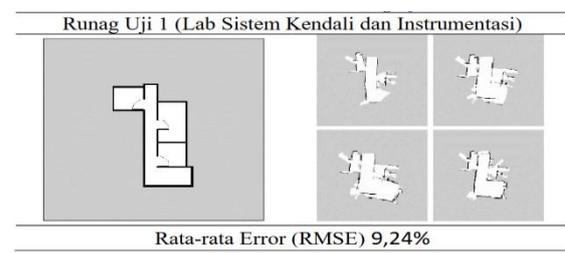
Tabel 1. Simpangan odometry terhadap ground truth.

No	Sumber Odometry	Simpangan rata-rata	Simpangan maksimal
1	Wheel	0.37071054754957544	0.8190219777270937
2	Visual	1.7723274719631417	2.9472869049347743
3	Wheel + IMU	0.6365240992350174	0.9856089488230106
4	Wheel + IMU + Visual	+0.016235338306387802	0.09144397191723462

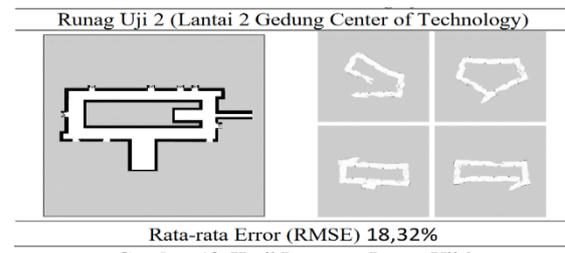
Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa penggabungan data dari berbagai sumber odometri secara bersamaan, seperti "Wheel," "IMU," dan "Visual," menghasilkan hasil yang paling akurat dengan simpangan rata-rata sebesar 0.016 dan simpangan maksimal sebesar 0.091. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan beberapa sumber odometri dapat meningkatkan akurasi estimasi pergerakan robot dalam penelitian ini.

Pada tahap pengujian hasil pemetaan, akan

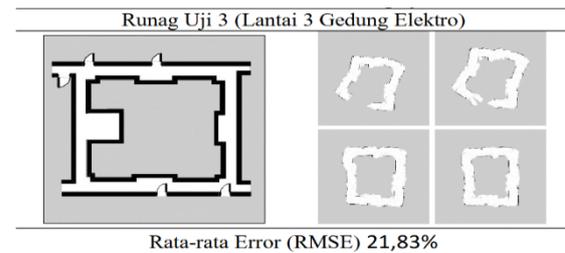
membahas pengujian hasil pemetaan yang dihasilkan oleh sistem Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) dengan memanfaatkan sensor Kinect. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi akurasi dan kualitas peta yang dihasilkan oleh sistem pemetaan dalam berbagai skenario lingkungan dan kondisi. Peta yang dihasilkan akan dibandingkan dengan peta sesungguhnya dari ruangan uji, yang akan dijadikan ground truth dan dilakukan pengujian pada ruang uji berbeda.



Gambar 17. Hasil Pemetaan Ruang Uji 1

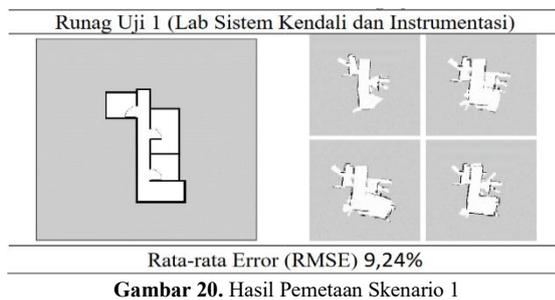


Gambar 18. Hasil Pemetaan Ruang Uji 2

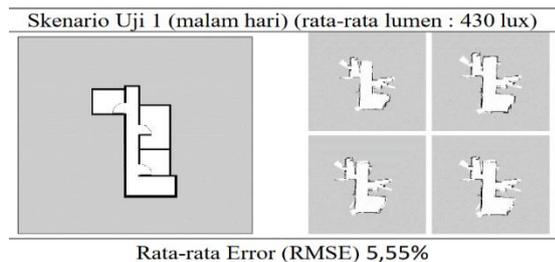


Gambar 19. Hasil Pemetaan Ruang Uji 3

Dari ketiga percobaan diatas menunjukkan bahwa akurasi sistem pemetaan akan menurun seiring dengan meningkatnya luas area pemetaan dimana ruang uji 1 dengan luas terkecil memiliki error paling kecil. Lalu dilakukan lagi pengujian pada kondisi pencahayaan berbeda.



Gambar 20. Hasil Pemetaan Skenario 1



Gambar 21. Hasil Pemetaan Skenario 2

Dari Percobaan didapatkan bahwa pengaruh lux yang tidak merata serta adanya sinar matahari dapat mengganggu kinerja pemetaan

Pengujian ATE dan RPE. Absolute Trajectory Error (ATE) adalah metrik yang digunakan dalam sistem Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) untuk mengukur sejauh mana estimasi posisi sebenarnya dari robot berbeda dengan estimasi posisinya yang diberikan oleh SLAM. Persamaan ATE biasanya dihitung dengan mengukur perbedaan antara posisi sebenarnya dan posisi yang diestimasi oleh SLAM pada waktu-waktu tertentu, kemudian menghitung rata-rata dari perbedaan ini.

$$ATE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{ground\ truth} - T_{estimated}| \quad (4)$$

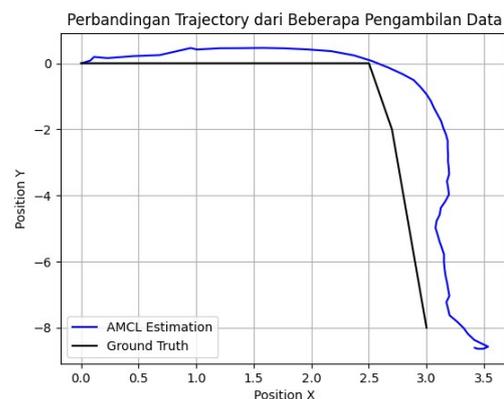
Relative Pose Error (RPE) adalah metrik yang digunakan untuk mengukur sejauh mana pergerakan relatif antara dua bingkai (frame) dalam SLAM cocok dengan pergerakan sebenarnya. Persamaan RPE dapat dihitung dengan mengukur perbedaan antara pergerakan relatif sebenarnya dan pergerakan relatif yang diestimasi oleh SLAM dalam berbagai interval waktu.

$$RPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\log(T_{ground\ truth}^{-1} \cdot T_{estimated})\| \quad (5)$$

Maka dilakukan percobaan dengan melakukan sampling prediksi posisi robot dari sistem lokalisasi pada timestamp tertentu untuk di bandingkan dengan groundtruth

Tabel 2. Perhitungan ATE dan RPE

Timestamp	Xgt	Ygt	YAWgt	Xest	Yest	YAWest	ATE	RPE
1693290063	0	0	0	0.0089	0.0027	0.0045	0.0093	0.0104
1693290222	2.6	-1	-1	3.196	-3.357	-1.552	2.432	2.494
1693290227	2.7	-2	-1	3.493	-8.637	-1.805875409	6.684	6.732
1693290232	2.8	-4	-1.5	3.442	-8.6369	-2.08262312	4.681	4.717
1693290357	3	-8	-2	3.41831	-8.6066	-2.275683922	0.7368	0.786
Rata-rata							2.28072	2.3880



Gambar 22. Grafik Trajectory Lokalisasi Robot

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem SLAM ini memiliki tingkat akurasi yang memadai, dengan nilai ATE (Absolute Translation Error) sebesar 2.28 dan RPE (Relative Pose Error) sebesar 2.39. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mendekati posisi dan orientasi sebenarnya dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah.

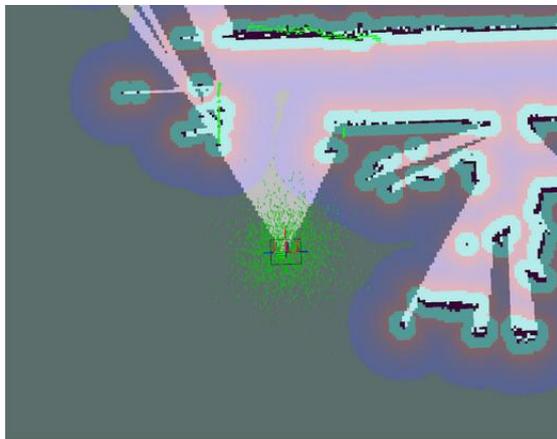
Pengujian penentuan posisi dengan partikel filter. Pada pengujian ini dilakukan dengan mengujicobakan beberapa partikel dengan jumlah yang berbeda-beda yaitu 500, 800, 1000, 2000 dan 3000 partikel. Untuk sensing model digunakan sistem persepsi yang telah drianjang. Berikut ini hasil pengujian dengan menggunakan jumlah partikel yang berbeda.

Tabel 3. Perbandingan Jumlah Partikel dan Waktu Mencapai Konvergensi

Robot Position			500 Particles			800 Particles			1000 Particles			2000 Particles			3000 Particles		
x	y	θ	x	y	θ	x	y	θ	x	y	θ	x	y	θ	x	y	θ
1	1	1.605	1,2	0,3	0,45	1,3	0,4	0,45	1,3	0,4	0,45	1,3	0,4	0,45	1,3	0,4	0,45
			5,8	4,4	1,6	5,8	4,4	1,6	5,8	4,4	1,6	5,8	4,4	1,6	5,8	4,4	1,6
			75			34	9		33	10		94	11		4	47	

$\frac{\text{Error}}{x} \cdot 100\%$	8,60	,510	,40	,720	3,70
Waktu (detik)	00:13.34	00:20.67	00:23.33	00:24.84	00:27.45

Dari data diatas dapat dianalisa bahwa semakin banyak jumlah partikel maka waktu yang dibutuhkan semakin lama tapi jumlah sumber daya untuk mencapai konvergen partikel lebih sedikit. Dan sebaliknya jika digunakan partikel dalam jumlah kecil maka waktu yang diperlukan lebih singkat tapi dibutuhkan jumlah sumber daya yang lebih banyak.



Gambar 23. Visualisasi Lokalisasi Pada RVIZ

5. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, disimpulkan bahwa penggabungan sumber odometri beragam dengan ekstended Kalman filter (EKF) menghasilkan estimasi pergerakan robot yang sangat akurat. Ruang uji dengan luas area yang lebih kecil cenderung menghasilkan peta yang lebih akurat daripada ruang uji yang lebih besar. Tingkat pencahayaan juga mempengaruhi hasil pemetaan, dengan tingkat pencahayaan rata-rata sekitar 430 lux menghasilkan akurasi terbaik. Sistem SLAM yang dievaluasi menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dengan nilai ATE sebesar 2.28 dan RPE sebesar 2.39. Selain itu, eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan jumlah partikel dalam AMCL meningkatkan akurasi estimasi posisi robot, walaupun dengan peningkatan waktu komputasi yang sesuai. Oleh karena itu, penggunaan sumber odometri yang beragam dengan EKF dan penyesuaian jumlah partikel

dapat menjadi pendekatan yang baik untuk aplikasi yang memerlukan estimasi pergerakan robot yang akurat.

Untuk pengembangan lebih lanjut, beberapa langkah dapat diambil untuk meningkatkan akurasi dan keandalan penelitian ini. Pertama, perbaikan algoritma filter untuk sensor fusion dan penggunaan sensor yang lebih bervariasi, seperti GPS, dapat diterapkan untuk meningkatkan akurasi pembacaan odometry. Kedua, untuk menghindari odometry lost akibat kurangnya fitur pada area sensor, pertimbangan untuk menambahkan sensor persepsi dengan sudut pandang yang lebih luas atau jarak pembacaan yang lebih jauh, seperti Lidar 360o, akan sangat berguna. Terakhir, untuk meningkatkan hasil pemetaan secara keseluruhan, penerapan pendekatan atau metode SLAM yang lebih mutakhir dan canggih bisa menjadi pilihan yang menjanjikan. Dengan langkah-langkah ini, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi penelitian mendatang yang lebih canggih dan presisi dalam bidang pemetaan dan lokalisasi robot.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada berbagai pihak yang telah memberikan doa, bimbingan, dan dukungan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan 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, atas segala bimbingan, saran, dan dukungan yang diberikan 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, atas kritik dan saran yang membangun 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 senantiasa memberikan doa dan dukungan selama penyelesaian skripsi.
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 Staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuan selama proses perkuliahan.
 8. Seluruh teman-teman di Lab Riset IASCR, terkhususnya Salam, Hasbih, dan Arya yang selalu menemani dalam proses penyelesaian skripsi.
 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.
 11. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas bantuan dan dukungannya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna dan dengan terbuka menerima kritik serta saran yang membangun. Semoga kebaikan semua pihak mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Shobirin, "Sistem Kendali Nirkabel Robot Bulutangkis Berbasis Mikrokontroler," 2016.
- [2] B. Pranoto and A.R. Firdaus, "Rancang Bangun Lengan Robot dengan Sistem Kontrol Otomatis dan Human Machine Interface untuk Mesin Operasional Industri Manufaktur," *Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur (JETM)*, 2021.
- [3] A. Riyanti, N.D. Pratiwi, N.Y. Nainggolan, N.R. Sardi, and A.B. Satrya, "Globalisasi Dan Transfer Teknologi: Penopang Industri Manufaktur Pada Perkembangan Marketplace Di Regional Asean," 2021.
- [4] Li, M., Lin, R., Wang, H., & Xu, H. (2013). An efficient slam system only using rgb-d sensors. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1653-1658. <https://doi.org/10.1109/robio.2013.6739704>
- [5] Dai, J., Lei, Y., Zhao, J., & Mei, Y. (2024). Review of multi-sensor fusion slam for mobile robot. Eleventh International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 54. <https://doi.org/10.1117/12.3032586>
- [6] Ali Uroidhi, "Sistem Pemetaan Menggunakan Fitur Depth Sensor Kinect pada Mobile Robot untuk Proses Evakuasi Kebakaran Gedung," 2017.
- [7] Achmad Akmal Fikri and Lilik Anifah, "Mapping dan Lokalisasi System pada Mobile Robot Menggunakan Metode SLAM Berbasis LiDAR," 2021.
- [8] P. Anggraeni, Ridwan, and M.T.A. Asshydiqi, "Pemetaan Lingkungan Multi Robot dengan Algoritma ORB SLAM-2," 2020.
- [9] Gyan Singh Yadav, Saksham Jain, and Urvashi Agrawal, "Simultaneous Localization and Mapping for Autonomous Robot Navigation," 2021.
- [10] Muhammad Takbir Machmud, "Sistem Navigasi Pada Prototipe Robot Kursi Beroda Untuk Penyandang Disabilitas," Universitas Hasanuddin Makassar, 2019.
- [11] N. Zainuddin, Y. Mustafah, Y. Shawgi, and N.M. Rashid, "Autonomous Navigation of Mobile Robot Using Kinect Sensor," dalam *International Conference on Computer & Communication Engineering*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
- [12] "Kinect (Sumber: https://www.wired.com/2011/06/mf_kinect/)."
- [13] I. Wicaksono, "Navigasi Mobile Robot Darat Menggunakan Odometri Visual Berbasis Citra Stereo," Tesis Tugas Akhir, EE 184801, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2019.
- [14] M. Labbé and F. Michaud, "Long-term online multi-session graph-based SLAM with memory management," *Autonomous Robots*, vol. 42, pp. 1133-1150, 2018.
- [15] A. Sucipto, R.S. Dewanto, and D. Pramadihanto, "Gerak Robot Berkaki Dua menggunakan ROS dan RViz sebagai Visualisasi Interaktif," *ELKOMIKA: Jurnal*

Teknik Energi Elektrik, Teknik
Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, vol.
9, no. 1, pp. 43-57, Januari 2021.