

Mapping and Localization System pada Mobile Robot Menggunakan Metode SLAM Berbasis LiDAR

Achmad Akmal Fikri¹, Lilik Anifah²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

¹achmad.17050874044@mhs.unesa.ac.id

²lilikanifah@unesa.ac.id

Abstrak— Permasalahan utama dari autonomous robot atau robot otonom untuk bernavigasi adalah bagaimana robot dapat mengenali lingkungan sekitar. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem mapping dan lokalisasi menggunakan metode Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) yang diimplementasikan pada mobile robot jenis omnidirectional atau holonomic menggunakan sensor LiDAR. Penelitian ini mengusulkan sistem mapping dan lokalisasi untuk mengenali lingkungan sekitar dengan membuat peta lingkungan menggunakan algoritma google cartographer yang dikombinasikan dengan metode eulerometry yaitu kombinasi antara odometry dengan data euler orientation dari sensor IMU. Pengujian dilakukan dengan menguji setiap sensor seperti IMU dan LiDAR, dan menguji integrasi sistem termasuk metode eulerometry dan sistem mapping dan lokalisasi dengan algoritma google cartographer yang dikombinasikan dengan metode eulerometry. Hasil pengujian dari sistem mapping dan lokalisasi menunjukkan hasil yang optimal dan mampu mengenali kondisi lingkungan sekitar robot meskipun masih terdapat noise pada peta yang sudah dibuat.

Kata Kunci— Autonomous Robot, Sistem Mapping dan Lokalisasi, SLAM, Eulerometry, Google Cartographer.

I. PENDAHULUAN

Permasalahan utama yang dihadapi dari autonomous robot atau robot otonom adalah bagaimana robot dapat bergerak otomatis menuju tempat tujuan tanpa merusak lingkungan yang dilalui robot. Seperti halnya manusia yang berada di ruangan berbentuk labirin, manusia membutuhkan peta labirin tersebut untuk bergerak hingga bisa keluar dari ruangan tersebut, dan juga manusia perlu mengetahui posisinya pada peta sehingga manusia bisa menentukan jalur untuk bisa bergerak keluar dari ruangan tersebut. Robot autonomous juga seperti itu, tantangan terbesar berada pada bagaimana caranya robot bisa mengetahui peta lingkungan yang di lalui saat beroperasi dan juga bisa mengetahui posisinya sendiri pada peta. Robot otonom memiliki sebuah sistem yang dapat mendeteksi dan berkomputasi secara cepat, bergerak secara otomatis dan juga dapat berkomunikasi antar robot atau dengan operator. Kemampuan berkomputasi dan menggabungkan informasi inilah yang menjadi tantangan untuk robot dimana robot harus mendeteksi lingkungan sekitar dan menghitung langkah dari robot secara simultan untuk bisa membentuk sebuah peta yang biasa disebut dengan metode Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) [1].

Dengan permasalahan dasar tersebut autonomous robot atau robot otonom membutuhkan metode atau sistem yang dapat membuat sebuah peta dari lingkungan robot dan juga bisa menentukan posisinya sendiri pada peta yang sudah dibuat. Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) adalah sebuah teknik atau metode yang diterapkan pada mobile robot untuk mengeksplorasi keadaan di berbagai lingkungan [14]. SLAM digunakan untuk membangun dan

menghasilkan peta dari lingkungan yang dijelajahi (pemetaan). Peta yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menentukan lokasi robot dan landmark sekitarnya dan juga digunakan untuk membuat perencanaan jalur yang sesuai untuk robot (lokalisasi). Proses pemetaan dan pelokalan di SLAM dilakukan secara bersamaan dimana mobile robot secara relatif membuat peta. Dimana peta yang telah dibuat digunakan untuk menghitung dan memperkirakan posisi landmark dan lintasan mobile robot [14].

Metode SLAM terdapat banyak sekali variannya bergantung pada penggunaan ruang dimensi dari sensor yang digunakan. Pada ruang dua dimensi (2D) terdapat beberapa metode diantaranya Gmapping, HectorSLAM, TinySLAM, Karto, Google Cartographer, dan lain sebagainya. Sedangkan pada ruang tiga dimensi (3D) terdapat beberapa varian juga diantaranya ORB-SLAM, LSD-SLAM, RTAB-MAP, dan lain sebagainya [15-19]. Sensor yang digunakan pun bermacam macam, penggunaan sensor LiDAR pun salah satu diantaranya. Light Detecting And Ranging (LiDAR) adalah sebuah teknologi penginderaan jarak jauh yang dapat memperoleh data referensi geografis kepadatan tinggi dan akurasi tinggi tentang bentuk lingkungannya. LiDAR beroperasi dengan memindai bidang pandang dengan satu atau beberapa sinar laser. Sinar laser dihasilkan untuk memindai daerah yang diukur, ketika ada dinding atau benda yang terkena sinar laser maka sinar laser akan memantul dan kembali mengarah ke sensor dan perangkat sensor akan menghitung jarak yang dideteksi dengan mengukur perbedaan waktu antara pengiriman sinyal dengan penerimaan sinyal. Karena karakteristik tersebut LiDAR sangat cocok dalam pengaplikasian autonomous vehicle dan sejenisnya, tentunya juga cocok digunakan sebagai masukan pada metode SLAM [3-5].

Pada saat ini metode google cartographer sangat populer kalangan peneliti pada bidang autonomous robot. Metode google cartographer menggunakan algoritma berdasarkan pada pendekatan graph optimization bukan dengan pendekatan partikel filter [20-22]. Pada hasil benchmark yang sudah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya, pemetaan pada ruang 2D menunjukkan bahwa penggunaan metode google cartographer memiliki skor tertinggi dan memiliki kesalahan terkecil daripada hasil metode yang lainnya [15-18]. Goggle Cartographer juga dapat bekerja dengan kombinasi dari data IMU atau metode odometry untuk membantu sistem lokalisasi dari algoritma google cartographer [20-22]. Metode odometry termasuk dalam kategori posisi relatif atau Dead-reckoning dimana posisi ini tidak menghasilkan data yang akurat, sehingga banyak peneliti atau pengembang robotika mengombinasikannya dengan kategori pengukuran posisi absolut atau Referenced-based System untuk mengoptimalkan data yang dihasilkan [2]. Data yang dihasilkan oleh metode odometry ini berdasarkan pembacaan sensor yang dikomputasikan dengan rumus kinematika robot dari jenis robot yang digunakan. Robot omnidirectional atau holonomic merupakan jenis mobile robot yang bisa bergerak ke segala arah tanpa merubah orientasi dari robot, berbeda dengan jenis mobile robot yang umum dimana roda yang digunakan berbeda, dimana roda yang digunakan yaitu roda omni. Sehingga perhitungan odometry mengacu pada

kinematika robot omnidirectional bergantung dengan jumlah roda dan jenis roda omni yang digunakan pada robot [9-13]. Dalam implementasinya untuk mengetahui data dari orientasi robot didapat dari sensor IMU [7-8], dimana pengukuran sensor IMU termasuk dalam kategori pengukuran posisi absolut atau Referenced-based System [2].

Pada penelitian ini perhitungan data odometry robot dikombinasikan dengan data euler orientation Inertial Measurement Unit (IMU) BNO055, dimana metode ini bisa kita sebut dengan metode eulerodometry. Sistem mapping dan lokalisasi menggunakan algoritma google cartographer yang dikombinasikan dengan eulerodometry. Dan metode tersebut diimplementasikan pada mobile robot jenis omnidirectional atau holonomic.

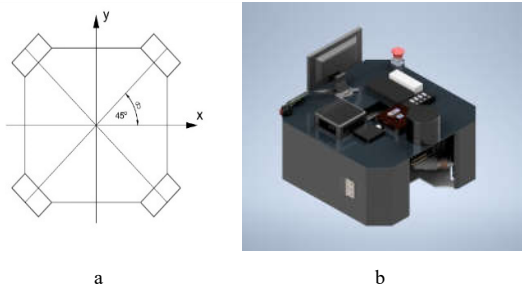
Tujuan dari penelitian ini adalah robot dapat membuat peta kondisi lingkungan sekitar sehingga robot dapat bernavigasi secara autonomous berdasarkan data dari sistem mapping dan lokalisasi robot.

Penelitian ini termasuk bagian dalam proyek *paramedic assistant robot* untuk tenaga medis dalam penanganan pasien covid. Kontribusi penelitian ini nanti akan diaplikasikan pada *paramedic assistant robot* untuk membantu kerja tenaga medis dalam merawat pasien, dengan kelebihan robot bisa bergerak atau bernavigasi secara autonomous tanpa kendali manusia, sehingga bisa meringankan beban kerja dari para tenaga medis saat merawat pasien.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Desain Mekanik Robot

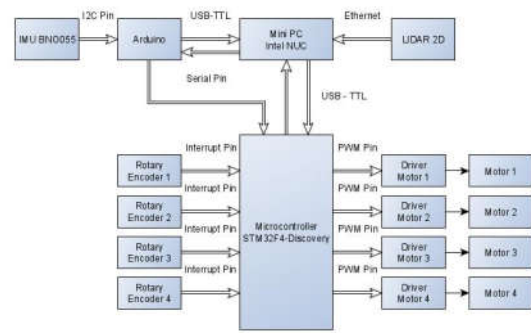
Robot yang digunakan adalah robot holonomic atau omnidirectional yang bisa bergerak di segala arah tanpa merubah arah hadap robot. Desain mekanik robot yang digunakan mempunyai konfigurasi 4 motor penggerak DC dengan membentuk sudut 45 derajat dengan sumbu X maupun sumbu Y yang bisa dilihat pada gambar 1.a, dengan roda yang digunakan adalah jenis roda omni. Untuk Design 3D Robot bisa dilihat pada gambar 2.b.



Gbr. 1 a. Sketsa Konfigurasi Motor, b. Design 3D

B. Desain Elektrik Robot

Desain Elektrik yang akan digunakan dapat dilihat pada diagram blok sebagai berikut:



Gbr. 2 Diagram Blok Elektrik

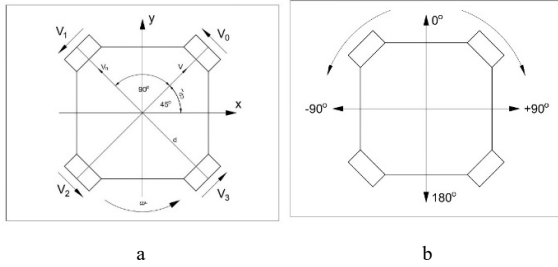
Robot menggunakan beberapa komponen yaitu dua mikrokontroler dan satu minimum PC atau mini PC. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Nano dengan IC berbasis ATmega dan STM32F4-Discovery dengan IC berbasis ARM Cortex M4, sedangkan mini PC yang digunakan yaitu Intel NUC dengan processor Intel Core I7 generasi ke-10 dari intel. Untuk sensor yang digunakan yaitu rotary encoder dimana rotary encoder tersebut menjadi satu paket atau satu bagian dengan motor DC, sensor IMU BNO055 untuk mengetahui orientasi arah hadap robot, dan sensor LiDAR dua dimensi (2D) dengan range pengukuran jarak +30m dengan frekuensi 20Hz. Sedangkan untuk kontrol penggerak menggunakan 4 buah Driver Motor DC berbasis H-Bridge untuk menggerakkan 4 motor DC.

STM32F4-Discovery sebagai master atau pusat kontrol pada robot dimana MCU tersebut mengatur antara masukan dari sensor dan instruksi mini PC dengan aktuator robot. Rotary Encoder diakses oleh STM32F4-Discovery melalui pin interrupt yang nantinya akan dikombinasikan dengan data IMU menjadi sistem eulerodometry. Sedangkan sensor IMU BNO055 diakses oleh Arduino Nano melalui komunikasi I2C dan data tersebut diteruskan ke STM32F4-Discovery dan mini PC melalui komunikasi serial. Untuk komunikasi antara STM32F4-Discovery dengan mini PC melalui komunikasi serial sehingga mini PC dapat mengetahui informasi data robot yang nantinya akan dikombinasikan dengan sensor LiDAR yang langsung terhubung dengan mini PC melalui komunikasi ethernet untuk diproses untuk membentuk sistem Mapping dan sistem positioning.

C. Metode Eulerodometry

Metode eulerodometer adalah kombinasi antara metode odometry dengan data euler orientation dari sensor IMU. Metode odometry merupakan metode untuk memperkirakan perubahan koordinat posisi relatif dari waktu ke waktu dari penggunaan dari pergerakan aktuator. Pada robot beroda, sensor yang digunakan untuk masukan metode odometry adalah rotary encoder sebagai pendeteksi jumlah putaran roda.

Metode odometry ini didasari oleh kinematika robot, dimana kinematika robot berfungsi mendefinisikan arah dan kecepatan robot. Robot yang digunakan termasuk pada robot holonomic sehingga robot dapat bergerak ke segala arah tanpa mengubah orientasi robot.



Gbr. 3 a. Ilustrasi Kinematika Robot, b. Orientasi Robot

$$(x, y, \theta) \Rightarrow V_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}, V_y(t) = \frac{dy(t)}{dt}, \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_x(t) \\ V_y(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta'(t)) & \sin(\theta'(t)) & 0 \\ -\sin(\theta'(t)) & \cos(\theta'(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) \\ Vn(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_x(t) &= V(t) \cos(\theta'(t)) + Vn(t) \sin(\theta'(t)) \\ V_y(t) &= -V(t) \sin(\theta'(t)) + Vn(t) \cos(\theta'(t)) \\ \omega(t) &= \omega(t) \end{aligned} \quad (3)$$

dimana,

(x, y, θ) = Posisi lokal robot

$(V_x(t), V_y(t), \omega(t))$ = Kecepatan linier pada sumbu static

$(V(t), Vn(t), \omega(t))$ = Kecepatan linier pada sumbu robot

Pada persamaan (1) posisi lokal robot (x, y, θ) didapat dari integral kecepatan linier pada sumbu statik, dimana kecepatan sumbu statik didapat dari kecepatan linier pada sumbu robot yang dikonversi dengan rumus trigonometri sesuai dengan persamaan (2) dimana nilai θ' adalah sudut antara posisi motor dengan sumbu x sesuai dengan gambar 3.a. Untuk nilai Orientasi robot atau arah hadap robot (θ) diilustrasikan pada gambar 3.b dimana arah hadap robot memiliki rentang nilai dari -179,99 derajat hingga 180 derajat.

Dalam kinematika dikenal istilah forward kinematika dan invers kinematika, dimana forward kinematika adalah metode untuk menentukan orientasi atau jarak robot berdasarkan kecepatan roda, sedangkan invers kinematika kebalikan dari forward kinematika yaitu metode untuk menentukan nilai kecepatan setiap roda dari referensi jarak dan orientasi yang akan dituju. Persamaannya dapat dilihat dibawah,

$$\begin{bmatrix} V_0(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & d \\ -1 & 0 & d \\ 0 & -1 & d \\ 1 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) \\ Vn(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{1}{2} (V_3 - V_1) \\ Vn(t) &= \frac{1}{2} (V_0 - V_2) \\ \omega(t) &= (V_0 + V_1 + V_2 + V_3)/(4d) \end{aligned} \quad (5)$$

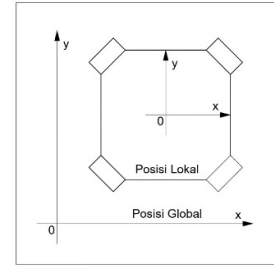
dimana,

(V_0, V_1, V_2, V_3) = Kecepatan roda

d = Jarak antara titik pusat robot dengan roda

Pada persamaan diatas posisi robot yang didapat masih mengacu pada posisi lokal robot sehingga perlu dikonversi dari

posisi lokal robot ke posisi global. Berikut ilustrasi dan persamaannya,



Gbr. 4 Referensi Posisi Robot

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

dimana,

(x_g, y_g, ω) = Posisi Global Robot

(x_l, y_l, θ) = Posisi Lokal Robot

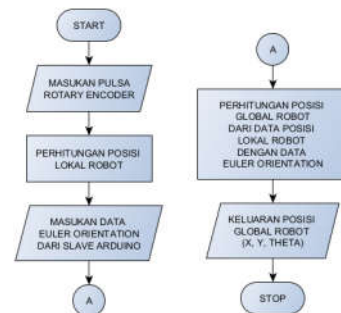
Perbedaan dari posisi lokal dan posisi global terletak pada titik referensi originnya (0,0), pada posisi lokal titik originnya terletak pada titik tengah dari robot pada awal mula perhitungan dimulai, sedangkan titik origin dari posisi global terletak pada lokasi dari tempat robot beroperasi ketika awal mula robot bekerja. Akan tetapi nilai arah hadap pada posisi global dan lokal bernilai sama, oleh karenanya untuk mengetahui posisi global robot posisi lokal akan dikonversi ke posisi global dengan rumus trigonometri sesuai pada persamaan (6).

Untuk mendapatkan nilai jarak robot yang sesungguhnya, nilai dari pulsa rotary encoder perlu dikonversi menggunakan persamaan berikut,

$$\text{Keliling roda} = \text{diameter roda} \times \pi \quad (7)$$

$$\text{Jarak} = \frac{\text{pulsa encoder}}{\text{resolusi encoder per rotasi}} \times \text{keliling roda} \quad (8)$$

Pada metode eulerdometry data orientasi robot berasal dari pembacaan euler orientation sensor IMU. Sehingga metode odometry ini hanya berfokus terhadap jarak pada sumbu x dan sumbu y, dan juga data orientasi yang digunakan untuk mengubah dari posisi lokal robot ke posisi global dengan data euler orientation sensor IMU. Alur algoritma dari metode eulerdometry diilustrasikan dengan gambar 5.



Gbr. 5 Flowchart Eulerdometry

D. Metode Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)

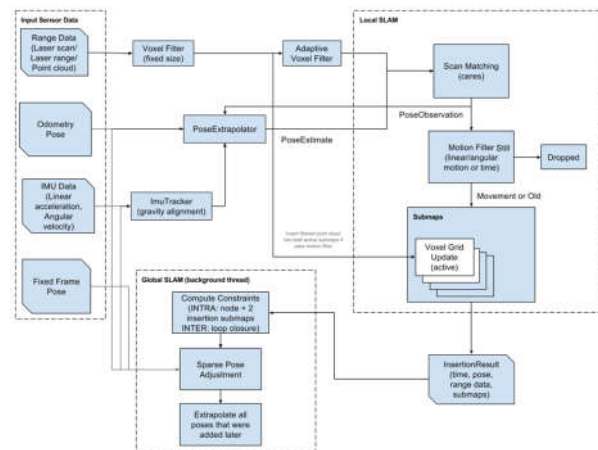
Algoritma yang digunakan pada metode Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) adalah algoritma google cartographer yang dikombinasikan dengan metode eulerdometry. Google cartographer merupakan metode yang berbasis pada pendekatan graph optimization dengan melakukan pencocokan pemindaian lingkungan sekitar yang didapatkan oleh sensor ke submap pada estimasi posisi terbaiknya dan pencocokan pemindaian yang hanya terkait pada submap saat itu. Setelah submap berhasil terbentuk, penutupan loop secara parsial akan dilakukan menggunakan posisi cabang dan grid yang telah dihitung sebelumnya. Dan setelah semua submap selesai maka penyusunan peta global akan dilakukan.

Sistem cartographer terdiri dari dua bagian yaitu optimalisasi lokal dan optimalisasi global, dimana optimalisasi lokal menjalankan bagian pencocokan frame pemindaian LiDAR dan submapnya setelah itu submap tersebut dioptimalkan. Sedangkan optimalisasi global melakukan optimasi peta global sesuai dengan hubungan posisi antar pemindaian frame setelah menemukan pemindaian frame loop tertutup.

Optimalisasi lokal adalah proses mencocokkan pemindaian frame LiDAR dengan submap, dan secara iteratif menyelaraskan pemindaian frame LiDAR dan referensi frame submap untuk membuat submap. Beberapa iterasi pemindaian frame membuat submap yang berbentuk grid probabilitas dengan resolusi r , dengan setiap titik gridnya, sistem menentukan piksel yang sesuai. Setiap kali pemindaian baru dimasukkan kedalam grid probabilitas, satu set titik grid yang terkena (hit) atau hilang (miss) akan dihitung. Sebelum memasukkan pemindaian peta ke submap, posisi pemindaian frame dioptimalkan dengan aplikasi ceres pada submap saat ini, dan pemetaan titik pemindaian ditumpangkan oleh optimasi kuadrat terkecil nonlinier, dan total nilai pemindaian tersebut mencapai nilai hit. Setelah mengubah posisi dan memasang dengan nilai probabilitas di submap, setiap tempat yang sesuai dengan tampilannya harus memiliki probabilitas yang lebih besar untuk ditindih. Karena masalah kuadrat terkecil adalah masalah optimalisasi lokal maka nilai awal yang baik akan memiliki pengaruh yang besar terhadap solusinya. Oleh karena itu, penggunaan IMU atau odometry dapat digunakan untuk menyediakan variabel rotasi ataupun posisi yang cocok dengan pemindaian untuk nilai awal inisialisasi.

Optimalisasi global dapat dicapai melalui deteksi loop tertutup (closed loop). Karena setiap pemindaian frame LiDAR hanya cocok dengan submap yang berisi beberapa pemindaian frame terbaru, membuat kesalahan terakumulasi secara perlahan. Untuk menghilangkan kesalahan yang terakumulasi, metode Sparse Pose Adjustment (SPA) digunakan untuk mengoptimalkan semua posisi dari pemindaian dan submap. Posisi pemindaian frame LiDAR yang dimasukkan ke dalam submap disimpan di memori. Saat submap dibuat, pemindaian frame dan submap yang sesuai diperhitungkan untuk deteksi loop tertutup. Semua pemindaian yang cocok dilakukan di bagian belakang (back-end), dan setelah pencocokan loop tertutup yang baik ditemukan, itu akan ditambahkan ke

optimalisasi global. Alur algoritma dari metode SLAM google cartographer diilustrasikan pada gambar 6.



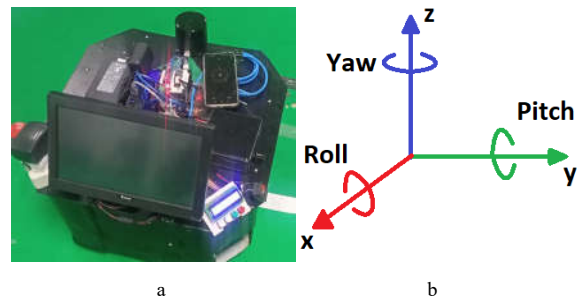
Gbr. 6 Flowchart Google Cartographer [17]

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian IMU BNO055

Pengujian IMU BNO055 dilakukan untuk mengetahui arah hadap dari robot yang nantinya data tersebut akan dimanfaatkan oleh metode eulerdometry. Untuk pengujiannya seperti yang ditunjukkan gambar 7.a,

Pada pengujian ini yang digunakan sebagai acuan data adalah menggunakan sensor orientasi yang terdapat pada smartphone yang pada mula-mula arahnya disesuaikan dengan arah hadap robot. Data yang diuji pada robot ini adalah data yaw dari euler orientation sensor IMU BNO055 yaitu data orientasi yang mengacu pada sumbu z yang diilustrasikan pada gambar 7.b,



Gbr. 7 a. Pengujian IMU BNO055, b. Referensi Orientasi

Pengujian dilakukan dengan memutar robot pada sudut tertentu kemudian mengamati dan mencatat nilai yang keluaran dari sensor. Hasil pengujian data yaw dari euler orientation IMU BNO055 disajikan pada tabel dibawah. Dari data yang diperoleh saat pengujian, nilai Root Mean Square Error (RMSE) pada pengujian tersebut sebesar $1,19^\circ$. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa data yang diperoleh sudah optimal dan sesuai dengan spesifikasi sensor IMU BNO055. Sehingga sensor tersebut dapat digunakan pada proses selanjutnya.

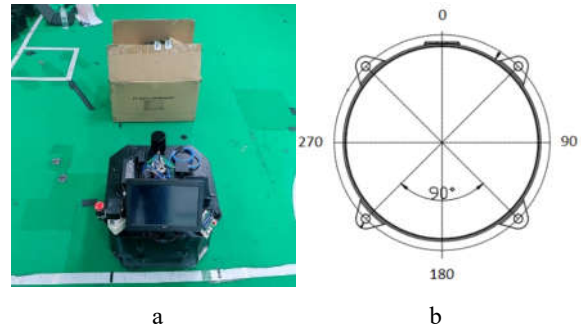
TABEL I
PENGUJIAN EULER ORIENTATION YAW IMU BNO055

Sudut (Degree)	Euler Orientation IMU BNO055 (Degree)	Error (Degree)
0	359,94	0,06
19	19,12	0,12
36	36,44	0,44
54	54,19	0,19
72	71,75	0,25
90	89,25	0,75
108	107,3	0,69
126	124,81	1,19
144	143,12	0,88
162	160,81	1,19
180	178,81	1,19
198	197,06	0,94
216	214,12	1,88
234	232,81	1,19
252	250,94	1,06
270	268,62	1,38
288	287,00	1,00
306	304,25	1,75
324	322,06	1,94
342	339,69	2,31
RMSE (Degree)		1,19

B. Pengujian LiDAR

Pengujian LiDAR dilakukan untuk mengetahui data hasil pengukuran jarak dari titik pusat sensor LiDAR. Untuk pengujiannya seperti yang ditunjukkan gambar 8.a,

Pada pengujian ini ditempatkan sebuah halangan dengan jarak dan sudut tertentu sesuai dengan referensi pembacaan LiDAR. Untuk pembacaan sudut LiDAR ditunjukkan pada gambar 8.b,



Gbr. 8 a. Pengujian LiDAR, b. Referensi LiDAR

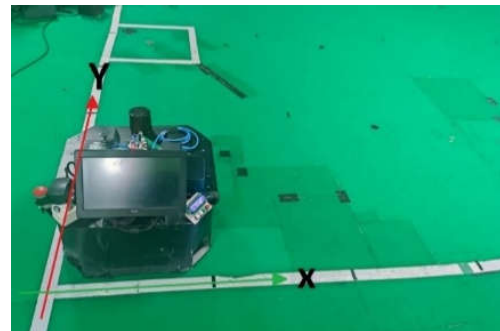
Dikarenakan pada robot sudut LiDAR yang digunakan 270°, maka untuk sudut yang digunakan untuk pengujian yaitu sudut 0°, 45°, 90°, 270°, dan 315°. Hasil pengujian data jarak LiDAR disajikan pada tabel dibawah. Dari data yang diperoleh saat pengujian, nilai RMSE pada pengujian tersebut sebesar 23,14 mm. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa data yang diperoleh sudah optimal dan sesuai dengan spesifikasi sensor LiDAR. Sehingga sensor tersebut dapat digunakan pada proses selanjutnya.

TABEL III
PENGUJIAN LiDAR

Sudut (Degree)	Real			LiDAR				Error		
	Jarak (mm)			Sudut (Degree)	Jarak (mm)			Jarak (mm)		
0	500	1000	1500	0.00	548	1016	1516	48	16	16
45	707	1414	2121	45.00	680	1396	2144	27	18	23
90	500	1000	1500	90.00	504	980	1484	4	20	16
270	500	1000	1500	270.00	524	988	1476	24	12	24
315	707	1414	2121	315.00	672	1396	2132	35	18	11
RMSE (mm)										23,14

C. Pengujian Eulerdometry

Pengujian eulerdometry dilakukan dengan mengubah posisi robot dari titik origin (0,0) menuju ke titik tertentu, dan dilanjutkan ke titik-titik lain. Untuk referensi titik origin dan definisi inisial sumbu x dan y bisa dilihat pada gambar 9,



Gbr. 9 Pengujian Eulerdometry

Pada pengujian ini arah hadap robot diatur pada nilai 0° , sehingga nilai yang diuji hanya nilai posisi pada sumbu x dan y. Hasil pengujian data eulerometry disajikan pada tabel dibawah. Dari data yang diperoleh saat pengujian, nilai RMSE pada pengujian tersebut pada sumbu x sebesar 48,37 mm dan sumbu y sebesar 66,68 mm. Data tersebut menunjukkan bahwa metode eulerometry menghasilkan data yang optimal meskipun masih memiliki nilai RMSE yang cukup besar. Pada tabel tersebut dapat disimpulkan juga bahwa semakin jauh robot bergerak maka error yang dihasilkan juga semakin besar.

TABEL IIIII
PENGUJIAN EULEROMETRY

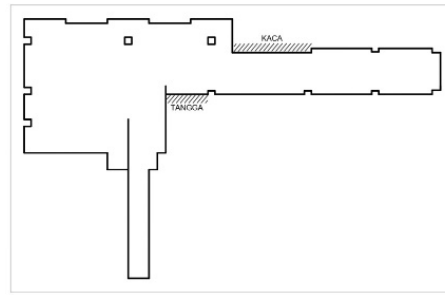
Real (mm)		Odometry Robot (mm)		Error	
X	Y	X	Y	X	Y
500	0	490	-10	10	10
1000	0	970	0	30	0
1500	0	1450	0	50	0
2000	0	1990	0	10	0
3000	0	3010	-10	10	10
0	500	0	470	10	30
0	1000	0	940	10	60
0	1500	0	1430	0	70
0	2000	0	1940	0	60
0	3000	10	2880	10	120
1000	1000	940	1010	60	10
1000	2000	910	2070	90	70
2000	2000	1920	1990	80	10
3000	2000	2930	1860	70	140
3000	3000	2910	2880	90	120
RMSE (mm)				48,37	66,68

D. Pengujian Metode SLAM

Pengujian Metode SLAM dilakukan untuk menguji hasil dari algoritma google cartographer yang dikombinasikan dengan metode eulerometry. Pengujian dilakukan di lantai tiga Gedung Laboratory Technology and Entrepreneurship, Universitas Negeri Surabaya. Kondisi lingkungan dan denah tempat pengujian dapat dilihat pada gambar 10 dan gambar 11,

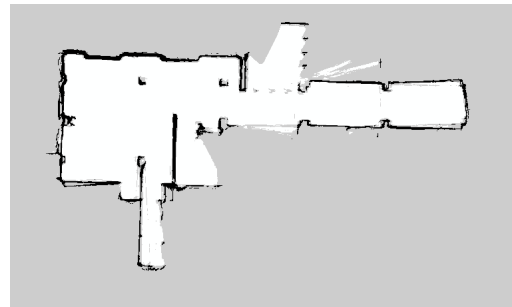


Gbr. 10 Lokasi Pengujian Sistem Mapping Dari Segala Sisi



Gbr. 11 Denah Sistem Mapping

Pengujian dilakukan dengan memberikan instruksi keyboard untuk menggerakkan motor agar berjalan mengelilingi ruangan. Pada pengujian terdapat sedikit ketidakcocokan dengan denah dimana ketika robot melintasi daerah tangga dan dinding kaca, sehingga pada saat memasuki lorong setelahnya terdapat noise pada peta. Dikarenakan terdapat dua tangga yaitu tangga naik dan turun sehingga pembatas dari tangga turun tidak terdeteksi yang malah mendeteksi dinding bagian luar dari tangga, sedangkan pada dinding kaca tidak dapat terdeteksi karena kaca dapat membiaskan laser dari LiDAR sehingga cahaya laser dapat menembus kaca dan mendeteksi dinding atau objek diluar dinding kaca. Noise juga terdapat pada lorong paling ujung dikarenakan pembacaan perbandingan data dari LiDAR dengan informasi orientasi dari eulerometry memiliki frekuensi berbeda, sehingga ketika robot bergerak berputar dengan cepat data yang diperoleh terdapat kesalahan pencocokan pemindaian pada saat membentuk submapnya. Berikut hasil peta yang dibuat pada saat pengujian,



Gbr. 12 Hasil Peta Pengujian

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil dan analisis pengujian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut. Penelitian ini menyajikan penggabungan beberapa sistem untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam mengenali lingkungan sekitar robot. Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diperoleh nilai RMSE pada pembacaan data yaw euler orientation IMU BNO055 sebesar $1,19^\circ$, nilai RMSE pada pengujian LiDAR sebesar 23,14 mm, nilai RMSE pada pengujian eulerometry sebesar 48,37 mm pada sumbu x dan 66,68 pada sumbu y. Dari hasil pengujian tersebut menjadi acuan pada pengujian sistem mapping dan localization atau SLAM, dimana peta yang dihasilkan oleh

sistem sudah optimal dalam mengenali lingkungan sekitar, tetapi masih memiliki sedikit noise karena kondisi lingkungan diuji terdapat dinding kaca yang dapat membiaskan cahaya laser dari sensor LiDAR sehingga dapat menjadi data noise yang dapat mempengaruhi dalam pembuatan peta global, dan juga perbedaan frekuensi antara data LiDAR dengan data arah hadap robot dari metode eulerdometry dapat menjadikan perbedaan pencocokan pemindaian ketika robot bergerak berputar dengan cepat. Dari data hasil pengujian yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa sistem yang dirancang dapat digunakan untuk mengenali lingkungan sekitar dengan membuat peta lingkungan robot secara optimal serta dapat menjadi acuan robot dalam melakukan navigasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia khususnya Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan pihak terkait atas kesempatan dan fasilitas yang diberikan untuk melaksanakan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Correll, N., 2016. Introduction to *Autonomous Robots*. Creative Commons.
<http://uilis.unsyiah.ac.id/oer/files/original/f8bdc5ed4ad9d6c70b7923b1a7e19a7e.pdf>
- [2] Borenstein, J., H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe. 1997. Mobile Robot Positioning - Sensors and Techniques. Invited Paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots, Vol.14, No.4, pp. 231-249.
DOI:10.1002/(SICI)1097-4563(199704)14:4%3C231::AID-ROB2%3E3.0.CO;2-R
- [3] Wang, X., H. Pan, K. Guo, X. Yang, and S. Luo. 2020. The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 502 012008.
DOI: 10.1088/1755-1315/502/1/012008
- [4] Li, Y. and J. Ibanez-Guzman. 2020. Lidar for Autonomous Driving. IEEE Signal Processing Magazine Vol.37, Issue 4, pp. 50-61.
DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615
- [5] Yang, J., Y. Li, L. Cao, Y. Jiang, L. Sun, and Q. Xie. 2019. A Survey of SLAM Research based on LiDAR Sensors. International Journal of Sensors 2019; 1(1): 1003.
<http://www.remedypublications.com/open-access/a-survey-of-slam-research-based-on-lidar-sensors-4870.pdf>
- [6] Bosch Sensortec. 2016. BNO055, Intelligent 9-Axis Absolute Orientation Sensor. Datasheet BST-BNO055-DS000-14.
https://www.bosch-sensortec.com/pdfdocs/BST_BNO055_DS000_14.pdf
- [7] Aji, W. S. 2019. Kendali Berputar pada Robot Kontes Robot Abu Indonesia dengan kendali PID dan IMUBNO055. Buletin Ilmiah Sarjana, Teknik Elektro Vol.2, No.1, April 2020, pp.14-23.
<http://journal2.uad.ac.id/index.php/biste/article/view/987/pdf>
- [8] Langley, R. 2016. Development of a Self-Balancing Robot utilizing FPGA. Engineering Honors Thesis, School of Engineering and Information Technology, Murdoch University, Perth, Western Australia.
<http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/38687>
- [9] Taufiqurrohman, M. and N. F. Sari. 2018. Odometry Method and Rotary Encoder for Wheeled Soccer Robot. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 407 (2018) 012103.
DOI: 10.1088/1757-899X/407/1/012103
- [10] Phunopas, A. and S. Inoue. 2018. Motion Improvement of Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots for Indoor Terrain. Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol.4, No.4, March 2018 275-282.
DOI:10.2991/jmal.2018.4.4.4
- [11] Sofwan, A., H. R. Mulyana, H. Afrisal, and A. Goni. 2019. Development of Omni-Wheeled Mobile Robot Based-on Inverse Kinematics and Odometry. 2019 6th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), 26-27 Sept. 2019, Semarang, Indonesia.
DOI: 10.1109/ICITACEE.2019.8904418
- [12] Rijalussalam, D. U. and I. Iswanto. 2021. Implementation Kinematics Modeling and Odometry of Four Wheel Mobile Robot on The Trajectory Planning and Motion Control Based Microcontroller. Journal of Robotics and Control (JRC), Vol.2, Issue 5, Sept. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.18196/jrc.25121>
- [13] Fahmizal, D. U. Rijalussalam, M. Budiyo, and A. Mayub. 2019. Trajectory Tracking pada Robot Omni dengan Metode Odometry. Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI), Vol.8, No.1, Feb. 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.22146/jnteti.v8i1.488>
- [14] Khairuddin, A. R., M. S. Talib, and H. Haron. 2015. Review on Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). 2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 27-29 Nov. 2015, Penang, Malaysia.
DOI: 10.1109/ICCSC.2015.7482163
- [15] Aerts, P. and E. Demeester. 2017. Benchmarking of 2D-SLAM Algorithms. ACRO Research Group, KU Leuven, Departement of Mechanical Engineering, Campus Diepenbeek.
http://www.acro.be/downloadvrij/Benchmark_2D_SLAM.pdf
- [16] Filipenko, M. and I. Afanasyev. 2018. Comparison of Various SLAM Systems for Mobile Robot in an Indoor Environment. 9th IEEE International Conference on Intelligent Systems 2018. 25-27 Sept. 2018, Medeira, Portugal.
DOI: 10.1109/IS.2018.8710464
- [17] Vanelli, B. 2019. Comparison and Benchmarking for SLAM in Mobile Robots. Automation and Control Engineering of the Universidade Federal de Santa Catarina.
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/196836>
- [18] Yagfarov, R., M. Ivanou, and I. Afanasyev. 2018. Map Comparison of Lidar-based 2D SLAM Algorithms Using Precise Ground Truth. 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV) 18-21 Nov. 2018, Singapore.
DOI: 10.1109/ICARCV.2018.8581131
- [19] Huang, B., J. Zhao, and J. Liu. 2020. A Survey of Simultaneous Localization and Mapping with an Envision in 6G Wireless Network. arXiv:1909.05214.
<https://arxiv.org/pdf/1909.05214>
- [20] Hess, W., D. Kohler, H. Rapp, and D. Andor. 2016. Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 16-21 May 2016 Stockholm, Sweden.
DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487258
- [21] Zhi, C. and S. Xiumin. 2019. Research on Cartographer Algorithm based on Low Cost Lidar. International Journal of engineering Research and Technology (IJERT), Vol.8 Issue 10, Oct. 2019.
DOI: 10.17577/IJERTV8IS100060
- [22] Nuchter, A., M. Bleier, J. Schauer, and P. Janotta. 2017. Improving Google's Cartographer 3D Mapping By Continuous-Time SLAM. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3, 2017.
DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-543-2017