

Lokalisasi AGV Berbasis LiDAR 2D Menggunakan Tiga Landmark Silinder dan Registrasi Geometrik pada ROS2

Afzeri

Afiliasi: Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Politeknik Enjinering Indorama
Email korespondensi: afzeri@pei.ac.id

Abstrak

Lokalisasi yang akurat merupakan kebutuhan utama bagi *automated guided vehicle* (AGV) agar dapat menjalankan navigasi, pengambilan keputusan, dan koreksi posisi secara aman di lingkungan industri. Penelitian ini mengembangkan metode lokalisasi AGV berbasis LiDAR dua dimensi menggunakan tiga silinder sebagai landmark geometrik yang posisinya telah diketahui dalam koordinat global. Data LaserScan diproses melalui konversi polar-ke-Cartesian, pengelompokan titik secara sekuensial, *circle fitting*, pencocokan pola tiga silinder berdasarkan jarak antarpasangan, dan estimasi transformasi rigid dua dimensi menggunakan *singular value decomposition* (SVD). Transformasi tersebut menghasilkan posisi dan orientasi LiDAR dalam kerangka koordinat global. Pose pusat AGV selanjutnya dihitung menggunakan parameter translasi dan rotasi antara kerangka *Laser_frame* dan *base_Link*. Metode diimplementasikan pada ROS2 Humble melalui node `lidar_cylinder_ground_truth` yang menerima data dari topik `/scan` dan menerbitkan pose LiDAR, pose AGV, lintasan, marker visualisasi, serta data diagnostik. Penggunaan tiga silinder dengan susunan tidak simetris memungkinkan sistem membedakan identitas setiap landmark tanpa kode visual atau sensor tambahan. Pengujian dirancang untuk mengevaluasi galat posisi, galat orientasi, tingkat keberhasilan deteksi, waktu komputasi, dan kontinuitas estimasi pada kondisi AGV diam maupun bergerak. Metode ini dapat digunakan sebagai sistem lokalisasi absolut, referensi *ground truth* lokal, dan mekanisme koreksi periodik terhadap odometri AGV.

Kata kunci: AGV; LiDAR 2D; lokalisasi; landmark silinder; ROS2; *circle fitting*; registrasi rigid.

1. Pendahuluan

Automated guided vehicle membutuhkan informasi pose yang terdiri atas posisi x , posisi y , dan orientasi θ untuk menjalankan navigasi secara otonom. Pose tersebut umumnya diperoleh dari odometri roda, *inertial measurement unit*, LiDAR, kamera, atau kombinasi beberapa sensor. Odometri mampu memberikan pembaruan posisi dengan frekuensi tinggi, tetapi kesalahannya terakumulasi akibat slip roda, ketidakakuratan diameter roda, perubahan beban, dan ketidakseimbangan sistem penggerak. Oleh sebab itu, AGV membutuhkan pengukuran posisi absolut yang dapat digunakan untuk mengoreksi *drift* odometri.

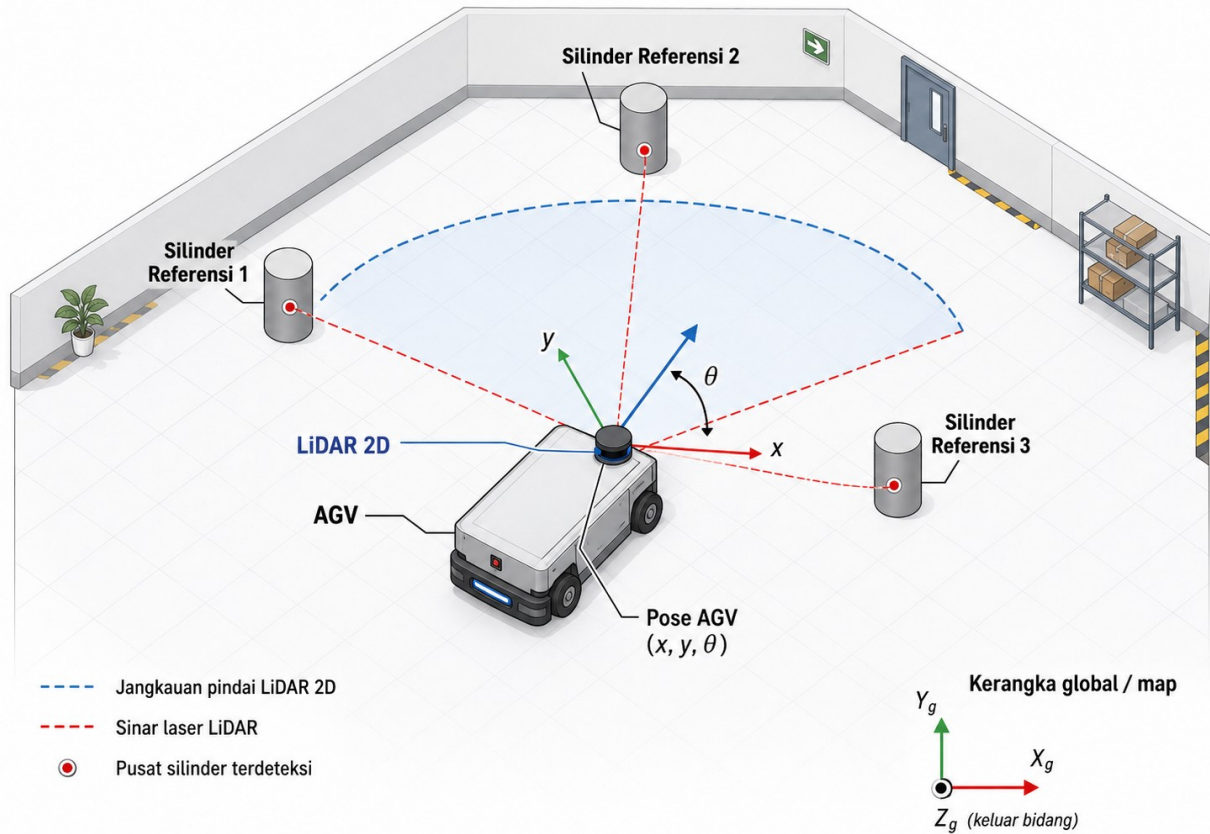
LiDAR dua dimensi menghasilkan sekumpulan pengukuran jarak pada sudut tertentu di sekitar sensor. Dalam ROS2, data tersebut direpresentasikan menggunakan pesan `sensor_msgs/msg/LaserScan`, yang memuat sudut awal, kenaikan sudut, batas jarak pengukuran, dan array jarak setiap sinar laser. Nilai yang tidak valid atau berada di luar rentang pengukuran dikeluarkan sebelum pemrosesan. [1]

Landmark berbentuk silinder dipilih karena penampangnya tetap berbentuk lingkaran terhadap perubahan arah pengamatan pada bidang horizontal. Tiga landmark ditempatkan pada koordinat global yang telah diukur dan disusun membentuk segitiga tidak sama sisi. Konfigurasi tersebut menghasilkan pola jarak antarsilinder yang unik sehingga setiap landmark dapat diidentifikasi berdasarkan hubungan geometriaknya. Setelah pusat ketiga silinder terdeteksi dalam kerangka LiDAR, pose sensor dihitung dengan mencari transformasi rigid yang paling sesuai antara titik hasil deteksi dan titik landmark global. [3], [9], [10]

Kontribusi penelitian ini adalah: (1) pipeline lokalisasi AGV berbasis tiga landmark silinder menggunakan LiDAR 2D; (2) identifikasi landmark berdasarkan vektor jarak antarpasangan tanpa kode visual; (3) estimasi pose LiDAR dan pusat AGV menggunakan registrasi rigid dua dimensi berbasis SVD; (4) implementasi sistem modular pada ROS2 Humble; dan (5) penyediaan pose absolut yang dapat digunakan sebagai *ground truth* lokal atau koreksi odometri AGV.

2. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri atas LiDAR 2D yang dipasang pada badan AGV, tiga silinder referensi, komputer pemroses ROS2, dan RViz sebagai perangkat visualisasi. LiDAR menerbitkan data pemindaian melalui topik `/scan`. Node utama menerima setiap pesan `LaserScan`, mendeteksi kandidat silinder, menentukan identitas ketiga landmark, dan menghitung pose AGV dalam kerangka `map`.



Gambar 1. Prinsip lokalisasi AGV menggunakan LiDAR 2D dan tiga silinder referensi dengan koordinat global yang telah diketahui. Titik hasil pemindaian diproses melalui sequential clustering, RANSAC, pemilihan inlier, dan least-squares refinement. Korespondensi tiga pusat silinder digunakan untuk menghitung transformasi rotasi dan translasi sehingga diperoleh pose AGV (x, y, θ) dalam kerangka map.

Gambar 1 memperlihatkan prinsip pengukuran pose automated guided vehicle (AGV) dengan menggunakan LiDAR dua dimensi dan tiga silinder referensi yang ditempatkan pada posisi tetap di dalam kerangka koordinat global atau map. LiDAR 2D dipasang pada bagian atas AGV dan melakukan pemindaian pada bidang horizontal. Setiap berkas laser menghasilkan pasangan data jarak dan sudut terhadap objek yang terdeteksi.

Untuk setiap pengukuran ke- i , sudut berkas LiDAR ditentukan dari sudut awal pemindaian dan resolusi sudut sensor sebagai berikut.

$$\alpha_i = \alpha_{min} + i \Delta\alpha \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), α_i adalah sudut berkas ke- i , α_{min} adalah sudut awal pemindaian, dan $\Delta\alpha$ adalah resolusi sudut LiDAR. Data jarak r_i selanjutnya dikonversi dari koordinat polar menjadi koordinat Kartesian dalam kerangka LiDAR.

$$x_i^L = r_i \cos(\alpha_i) \quad (2)$$

$$y_i^L = r_i \sin(\alpha_i) \quad (3)$$

Dengan demikian, setiap titik hasil pemindaian dinyatakan sebagai vektor posisi dua dimensi berikut.

$$p_i^L = [x_i^L, y_i^L]^T \quad (4)$$

Titik-titik LiDAR yang berdekatan kemudian dikelompokkan menggunakan sequential clustering. Dua titik berurutan dianggap berasal dari objek yang sama apabila jarak Euclidean di antara keduanya lebih kecil daripada ambang pengelompokan.

$$d_{(i,i-1)} = \sqrt{\left((x_i^L - x_{(i-1)}^L)^2 + (y_i^L - y_{(i-1)}^L)^2\right)} \quad (5)$$

$$d_{(i,i-1)} < d_{cluster} \quad (6)$$

Setiap cluster yang terbentuk diuji sebagai kandidat penampang silinder. Pada bidang horizontal, penampang silinder dimodelkan sebagai lingkaran dengan pusat (a,b) dan radius r.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (7)$$

Agar deteksi tetap robust terhadap noise, pantulan tidak stabil, dan titik dari objek lain, proses estimasi lingkaran menggunakan urutan cluster LiDAR, RANSAC, pemilihan inlier, dan least-squares refinement. RANSAC memilih tiga titik nonkolinear secara acak untuk membentuk hipotesis lingkaran. Residual radial setiap titik terhadap model dihitung sebagai berikut.

$$e_i = \sqrt{\left((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2\right)} - r \quad (8)$$

Suatu titik dikategorikan sebagai inlier apabila residualnya tidak melebihi ambang RANSAC.

$$e_i \leq \epsilon_{RANSAC} \quad (9)$$

Model dengan jumlah inlier terbanyak dipilih sebagai model terbaik. Jika dua model mempunyai jumlah inlier yang sama, model dengan residual rata-rata yang lebih kecil diprioritaskan. Jumlah iterasi minimum RANSAC dapat diperkirakan menggunakan hubungan berikut.

$$N = \ln(1 - p) / \ln(1 - w^s) \quad (10)$$

Pada Persamaan (10), N adalah jumlah iterasi, p adalah probabilitas memperoleh model yang benar, w adalah perkiraan proporsi inlier, dan s sama dengan 3 karena sebuah lingkaran dapat dibentuk dari tiga titik nonkolinear.

Setelah inlier diperoleh, parameter pusat dan radius lingkaran dihitung ulang menggunakan least-squares refinement. Tahap ini meminimalkan jumlah kuadrat residual radial seluruh titik inlier.

$$J(a, b, r) = \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{\left((x_k - a)^2 + (y_k - b)^2\right)} - r \right)^2 \quad (11)$$

Kualitas hasil fitting dinilai menggunakan root mean square error radial.

$$e_{\square} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{\left((x_k - a)^2 + (y_k - b)^2\right)} - r \right)^2 \right)} \quad (12)$$

Sebuah cluster diterima sebagai silinder apabila radius hasil fitting mendekati radius nominal silinder r_c dan residual fitting tidak melebihi batas yang ditentukan.

$$r - r_c \leq \epsilon_r \quad (13)$$

$$e \leq e_{max} \quad (14)$$

Hasil tahap deteksi adalah tiga pusat silinder dalam kerangka LiDAR. Ketiga silinder referensi ditempatkan dalam konfigurasi tidak simetris sehingga membentuk pola segitiga dengan tiga jarak antarpasangan yang unik. Posisi global setiap silinder telah diketahui sebelumnya melalui pengukuran lokasi pemasangan.

$$W = \{w_1, w_2, w_3\} \quad (15)$$

$$w_i = [x_i^w, y_i^w]^T \quad (16)$$

Jarak antarpasangan landmark global dihitung sebagai berikut.

$$d_{12}^w = \sqrt{w_1 - w_2} \quad (17)$$

$$d_{13}^w = \sqrt{w_1 - w_3} \quad (18)$$

$$d_{23}^w = \sqrt{w_2 - w_3} \quad (19)$$

Jarak yang sama juga dihitung pada tiga pusat silinder hasil deteksi LiDAR. Karena jarak antarpasangan tidak berubah akibat translasi dan rotasi, pola tersebut digunakan untuk menentukan korespondensi antara silinder yang terdeteksi dan landmark global. Galat pola dihitung dengan root mean square error berikut.

$$e_d = \sqrt{\left(1/3\right) \sum_{k=1}^3 \left(d_k^L - d_k^w\right)^2} \quad (20)$$

$$e_d < e_{(d, max)} \quad (21)$$

Setelah korespondensi ketiga silinder diketahui, pose LiDAR diperoleh melalui registrasi rigid dua dimensi. Transformasi ini mencari matriks rotasi R dan vektor translasi t yang memetakan titik pusat silinder dalam kerangka LiDAR ke titik landmark dalam kerangka global.

$$w_i = R c_i + t \quad (22)$$

Matriks rotasi dua dimensi dan vektor translasi dinyatakan sebagai berikut.

$$R = [\cos \theta_L, -\sin \theta_L; \sin \theta_L, \cos \theta_L] \quad (23)$$

$$t = [x_L^w, y_L^w]^T \quad (24)$$

Centroid titik hasil deteksi dan centroid landmark global terlebih dahulu dihitung.

$$\bar{c} = (1/3) \sum_{i=1}^3 c_i \quad (25)$$

$$\bar{w} = (1/3) \sum_{i=1}^3 w_i \quad (26)$$

Setelah kedua himpunan titik dipusatkan terhadap centroid masing-masing, dibentuk matriks kovarians silang H dan dilakukan singular value decomposition.

$$H = \sum_{i=1}^3 c_i' (w_i')^T \quad (27)$$

$$H = U \Sigma V^T \quad (28)$$

Matriks rotasi dan vektor translasi kemudian diperoleh dari hasil dekomposisi tersebut.

$$R = V U^T \quad (29)$$

$$t = \bar{w} - R \bar{c} \quad (30)$$

Orientasi LiDAR terhadap kerangka global ditentukan dari elemen matriks rotasi.

$$\theta_L = \text{atan2}(R_{21}, R_{11}) \quad (31)$$

Dengan demikian, pose LiDAR dalam kerangka global dinyatakan sebagai berikut.

$$q_L = [x_L^w, y_L^w, \theta_L]^T \quad (32)$$

Karena LiDAR dipasang pada posisi tertentu terhadap pusat AGV, pose sensor perlu dikonversi menjadi pose base_link. Misalkan offset translasi LiDAR terhadap pusat AGV adalah d_x dan d_y , sedangkan offset orientasinya adalah θ_{LB} . Orientasi pusat AGV dihitung sebagai berikut.

$$\theta_B = \theta_L - \theta_{LB} \quad (33)$$

Posisi pusat AGV dalam kerangka global selanjutnya dihitung dengan mengoreksi offset sensor yang telah diputar ke orientasi kendaraan.

$$p_B^w = p_L^w - R(\theta_B) p_L^B \quad (34)$$

$$[x_B^w, y_B^w]^T = [x_L^w, y_L^w]^T - [\cos \theta_B, -\sin \theta_B; \sin \theta_B, \cos \theta_B] [d_x, d_y]^T \quad (35)$$

Hasil akhir proses lokalisasi adalah pose AGV dalam kerangka map.

$$q_B = [x_B^w, y_B^w, \theta_B]^T \quad (36)$$

Pada gambar, garis putus-putus merah menunjukkan berkas laser yang mengenai permukaan ketiga silinder, sedangkan titik merah menunjukkan pusat silinder hasil deteksi. Daerah berbentuk kipas dengan batas putus-putus biru menggambarkan jangkauan pemindaian LiDAR 2D. Selama ketiga silinder berada dalam jangkauan sensor dan tidak mengalami oklusi berlebihan, sistem dapat menghitung pose absolut AGV pada setiap data LaserScan. Pose tersebut dapat digunakan sebagai sumber lokalisasi mandiri, sebagai ground truth lokal untuk mengevaluasi odometri, atau sebagai pengukuran koreksi dalam fusi sensor bersama encoder roda dan IMU.

Aliran pemrosesan sistem adalah:

Implementasi perangkat lunak ditempatkan pada package ROS2 `edlrn_lidar_ground_truth` dengan node utama `lidar_cylinder_ground_truth`.

Topik	Tipe pesan	Fungsi
/scan	sensor_msgs/msg/ LaserScan	Data jarak LiDAR 2D
/ground_truth/lidar_pose	geometry_msgs/msg/ PoseStamped	Pose LiDAR pada kerangka global
/ground_truth/pose	geometry_msgs/msg/ PoseStamped	Pose pusat AGV atau base_link
/ground_truth/path	nav_msgs/msg/Path	Riwayat lintasan hasil lokalisasi

Topik	Tipe pesan	Fungsi
/ground_truth/markers	visualization_msgs/msg/MarkerArray	Visualisasi landmark dan hasil deteksi
/ground_truth/diagnostics	std_msgs/msg/Float64MultiArray	Residual dan kualitas estimasi

2.1 Prinsip Kerja LiDAR 2D

2.1.1 Prinsip Kerja RPLIDAR C1

RPLIDAR C1 merupakan pemindai laser dua dimensi 360° yang dikembangkan oleh SLAMTEC untuk pemetaan lingkungan, navigasi robot, lokalisasi, dan deteksi rintangan. Sensor ini menggunakan prinsip pengukuran **direct time of flight** atau **DTOF**, yaitu menentukan jarak objek berdasarkan waktu tempuh pulsa cahaya dari sensor menuju objek dan kembali ke sensor. Modul pemindai berputar secara mekanis sehingga pengukuran jarak dilakukan pada berbagai sudut dalam satu bidang horizontal.[1] SLAMTEC, *RPLIDAR C1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner: Datasheet*, Shanghai Slamtec Co., Ltd., 2023.] [2]



Pada setiap proses pengukuran, RPLIDAR C1 memancarkan pulsa laser inframerah termulasi. Pulsa tersebut mengenai permukaan objek dan sebagian energinya dipantulkan kembali menuju bagian penerima LiDAR. Sistem akuisisi internal mendeteksi sinyal pantulan, sedangkan prosesor di dalam sensor menghitung jarak dan sudut titik pantul. Hasil pengukuran kemudian dikirimkan ke komputer melalui antarmuka komunikasi serial. [2]

Secara prinsip, jarak objek dapat dinyatakan sebagai:

$$d = \frac{c \Delta t}{2}$$

dengan:

- (d): jarak LiDAR terhadap objek;

- (c): kecepatan rambat cahaya;
- (Δt): waktu tempuh pulsa laser pergi dan kembali;
- faktor 2 digunakan karena pulsa menempuh perjalanan dari sensor ke objek dan kembali lagi.

Persamaan tersebut menjelaskan prinsip umum time of flight. Pada perangkat sebenarnya, pemrosesan juga melibatkan modulasi pulsa, penguatan sinyal, koreksi internal, serta algoritma fusion ranging milik SLAMTEC.

2.1.2 Pembentukan Data Pemindaian Dua Dimensi

Ketika motor memutar inti pemindai, arah pancaran laser berubah secara kontinu. Setiap titik hasil pengukuran direpresentasikan dalam koordinat polar:

$$z_i = \begin{bmatrix} r_i \\ \theta_i \end{bmatrix}$$

dengan (r_i) sebagai jarak objek dan (θ_i) sebagai sudut pengukuran. RPLIDAR C1 juga dapat menghasilkan informasi reflektivitas titik, sehingga data sensor tidak hanya memuat posisi tetapi juga karakteristik kekuatan pantulan objek. SLAMTEC menyebut keluaran ini sebagai informasi multidimensi atau 2.5D.

Untuk digunakan pada algoritma lokalisasi, data polar dikonversi menjadi koordinat Cartesian dalam kerangka LiDAR:

$$x_i^L = r_i \cos \theta_i$$

$$y_i^L = r_i \sin \theta_i$$

Dengan demikian, setiap satu putaran LiDAR menghasilkan sekumpulan titik:

$$P^L = \left\{ \begin{bmatrix} x_1^L \\ y_1^L \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_2^L \\ y_2^L \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_n^L \\ y_n^L \end{bmatrix} \right\}$$

Sekumpulan titik tersebut membentuk representasi kontur dua dimensi dari dinding, silinder, rak, manusia, dan objek lain yang berada pada ketinggian bidang pemindaian.

2.1.3 Karakteristik Bidang Pemindaian LiDAR 2D

RPLIDAR C1 mengukur lingkungan pada satu bidang pemindaian yang hampir horizontal. Setiap titik mempunyai informasi jarak dan sudut, tetapi tidak menghasilkan koordinat ketinggian independen seperti LiDAR 3D. Bidang pemindaian mempunyai flatness atau variasi pitch sekitar 0° – $1,5^\circ$. Karena itu, pemasangan sensor harus dibuat cukup datar agar posisi titik tidak berubah akibat kemiringan badan AGV. (Slamtec) [2]

2.1.4 Sistem Pemindaian 360°

Inti pengukur RPLIDAR C1 berputar searah jarum jam dan melakukan pemindaian 360°. Pada frekuensi tipikal 10 Hz, sensor menghasilkan sekitar 10 putaran pemindaian penuh per detik. Dengan laju sampel 5.000 pengukuran per detik, jumlah titik tipikal dalam satu putaran adalah sekitar: [2]

$$n_{\text{putaran}} = \frac{5000}{10} = 500 \text{ titik}$$

Resolusi sudut tipikalnya menjadi:

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{500} = 0,72^\circ$$

Nilai tersebut sesuai dengan spesifikasi resmi RPLIDAR C1 pada kecepatan pemindaian tipikal 10 Hz. [2]

2.1.5 Penerapan pada Lokalisasi AGV dengan Tiga Silinder

Dalam sistem lokalisasi yang dikembangkan, titik-titik LiDAR terlebih dahulu dikelompokkan berdasarkan kedekatan posisi dan kesinambungan indeks sinar. Cluster yang diduga berasal dari silinder selanjutnya diproses menggunakan tahapan:

LaserScan → clustering → RANSAC → pemilihan inlier → least-squares refinement

Permukaan silinder yang dipotong oleh bidang pemindaian LiDAR terlihat sebagai bagian dari lingkaran. Model geometrinya dinyatakan sebagai: [3], [5]

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

dengan ((a,b)) sebagai pusat silinder dan (r) sebagai radiusnya.

RANSAC digunakan untuk memisahkan titik silinder dari outlier, seperti pantulan dinding, kaki rak, atau noise. Setelah titik inlier diperoleh, least-squares refinement menghitung pusat silinder secara lebih presisi. Pusat ketiga silinder kemudian dibandingkan dengan koordinat landmark global yang sudah diketahui. Transformasi antara koordinat LiDAR dan koordinat global menghasilkan posisi (x), posisi (y), dan orientasi (θ) AGV. [4]

Kinerja deteksi silinder akan dipengaruhi oleh jarak, reflektivitas permukaan, diameter silinder, dan jumlah sinar laser yang mengenai silinder. Pada jarak yang semakin jauh, jarak antarberkas laser juga semakin besar. Secara pendekatan:

$$s \approx R \Delta\theta$$

dengan:

- (s): jarak antartitik pada permukaan objek;
- (R): jarak LiDAR terhadap objek;
- ($\Delta\theta$): resolusi sudut dalam radian.

Untuk resolusi sudut $0,72^\circ$:

$$\Delta\theta = 0,72^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \approx 0,01257 \text{ rad}$$

Pada jarak 3 m, jarak antarsinar kira-kira:

$$s \approx 3 \times 0,01257 = 0,0377 \text{ m}$$

atau sekitar 37,7 mm. Artinya, silinder berdiameter 150 mm secara ideal hanya menerima beberapa titik pada jarak tersebut. Karena itu, untuk deteksi silinder yang stabil, jumlah minimum titik RANSAC disesuaikan dengan jarak landmark dan kondisi pengujian.

2.1.6 Spesifikasi Teknis RPLIDAR C1

Spesifikasi berikut mengacu pada model **C1M1-R2** dan halaman produk resmi SLAMTEC.

Parameter	Spesifikasi
Teknologi pengukuran	DTOF/fusion ranging
Bidang pemindaian	360° horizontal
Jarak objek putih	0,05–12 m pada reflektivitas 70%
Jarak objek hitam	0,05–6 m pada reflektivitas 10%
Laju sampling	5.000 sampel/detik atau 5 kHz
Frekuensi pemindaian	8–12 Hz
Frekuensi tipikal	10 Hz atau sekitar 600 rpm
Resolusi sudut tipikal	$0,72^\circ$
Akurasi jarak	$\pm 30 \text{ mm}$
Resolusi jarak	15 mm
Flatness/pitch bidang pindai	0° – $1,5^\circ$
Ketahanan cahaya lingkungan	hingga 40.000 lux

Parameter	Spesifikasi
Antarmuka komunikasi	TTL UART 3,3 V
Baud rate	460.800 bps
Format UART	8 data bit, 1 stop bit, tanpa parity atau 8N1
Tegangan suplai	4,8–5,2 V DC; tipikal 5 V
Arus operasi tipikal	230 mA pada 5 V dan 10 Hz
Arus operasi maksimum tercantum	260 mA
Arus saat start	sekitar 800 mA
Ripple tegangan maksimum	150 mV
Panjang gelombang	895–915 nm; tipikal 905 nm
Kelas keselamatan laser	IEC 60825 Class 1
Tingkat proteksi	IP54
Suhu operasi	–10 sampai 40 °C
Suhu penyimpanan	–20 sampai 60 °C
Dimensi	55,6 × 55,6 × 41,3 mm
Berat	sekitar 110 g

Parameter pengukuran utama, termasuk jarak, sampling, frekuensi pemindaian, resolusi sudut, akurasi, proteksi IP54, dan batas cahaya lingkungan tercantum dalam datasheet resmi. Tegangan, arus, ripple suplai, dan UART tercantum pada bagian antarmuka daya dan komunikasi datasheet. Dimensi dan berat juga dikonfirmasi pada halaman produk resmi SLAMTEC. (Slamtec)

2.1.7 Catatan Integrasi pada AGV dan ROS2

RPLIDAR C1 mendukung SDK untuk Windows dan Linux serta ekosistem ROS/ROS2 dari SLAMTEC. Data sensor umumnya diterbitkan dalam ROS2 menggunakan pesan `sensor_msgs/msg/LaserScan`. (Slamtec) [2]

Untuk sistem AGV, beberapa hal menjadi diperhatikan:

1. **Catu daya harus stabil.** Sensor memerlukan arus awal sekitar 800 mA. Suplai yang lemah dapat menyebabkan putaran motor tidak stabil dan mengurangi akurasi pengukuran.
2. **Posisi sensor harus datar dan kaku.** Kemiringan akan menyebabkan bidang pindai memotong silinder pada ketinggian yang berbeda.

3. **Jendela optik tidak boleh terhalang.** Penutup, rangka AGV, atau kabel yang masuk ke bidang optik dapat mengurangi jangkauan dan jumlah titik. SLAMTEC secara khusus memperingatkan bahwa penghalang pada jendela optik dapat menurunkan performa dan resolusi.
4. **Permukaan silinder perlu cukup reflektif.** Jarak maksimum resmi berbeda antara objek putih dan hitam, yaitu 12 m dibandingkan 6 m. (Slamtec)
5. **Pemanasan awal membantu kestabilan.** Manual pengembangan menyarankan sensor bekerja dalam mode pemindaian selama lebih dari dua menit untuk memperoleh akurasi pengukuran terbaik. (Slamtec Wiki)

Untuk pengukuran lokalisasi tiga silinder, jarak landmark praktis dibuat jauh lebih pendek daripada batas maksimum 12 m. Penempatan dilakukan dengan jarak sekitar 1–4 m dari lintasan AGV akan memberikan jumlah titik pada permukaan silinder yang lebih banyak dan memudahkan clustering, RANSAC, serta circle fitting. Ini merupakan rekomendasi desain berdasarkan resolusi sudut sensor.

3. Metode Penelitian

Metode penelitian ini dilaksanakan melalui perancangan, implementasi, dan pengujian sistem lokalisasi AGV berbasis LiDAR 2D dengan menggunakan tiga silinder sebagai landmark referensi. Tahap awal meliputi penentuan koordinat global dan konfigurasi ketiga silinder agar membentuk pola geometrik yang tidak simetris. Data *LaserScan* dari LiDAR kemudian dikonversi dari koordinat polar menjadi titik Cartesian, disaring berdasarkan rentang pengukuran yang valid, dan dikelompokkan menggunakan metode *sequential clustering*. Setiap kelompok titik dianalisis sebagai kandidat silinder melalui pemodelan lingkaran. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap noise dan *outlier*, proses deteksi dilakukan menggunakan RANSAC, dilanjutkan dengan *least-squares refinement* untuk memperoleh estimasi pusat dan radius silinder yang lebih akurat.

Setelah tiga pusat silinder terdeteksi, sistem membentuk vektor jarak antarpasangan sebagai ciri geometrik untuk mencocokkan hasil deteksi dengan landmark global. Seluruh kemungkinan korespondensi dievaluasi, kemudian transformasi rigid dua dimensi dihitung menggunakan singular value decomposition untuk memperoleh posisi dan orientasi LiDAR dalam kerangka global. Pose LiDAR selanjutnya dikonversi menjadi pose pusat AGV dengan memperhitungkan offset pemasangan sensor terhadap `base_link`. Metode ini diimplementasikan pada ROS2 Humble dan divalidasi melalui pengujian statis dan dinamis dengan mengevaluasi galat posisi, galat orientasi, tingkat keberhasilan lokalisasi, residual registrasi, kontinuitas pose, serta waktu komputasi algoritma.

3.1 Konfigurasi Landmark Global

Posisi ketiga silinder dalam kerangka dunia didefinisikan sebagai:

$$W = \{w_1, w_2, w_3\},$$

Dengan koordinat landmark ke- i :

$$w_i = \begin{bmatrix} x_i^w \\ y_i^w \end{bmatrix}.$$

Pada implementasi program, parameter landmark dimasukkan melalui `world_cylinders` dalam urutan: `[P1_x, P1_y, P2_x, P2_y, P3_x, P3_y]`.

Salah satu konfigurasi awal adalah `[0.50, 1.00, 3.20, 1.00, 1.10, 3.40]`, dengan radius nominal silinder:

$$r_c = 0,075 \text{ m}.$$

Koordinat tersebut akan disesuaikan dengan pengukuran aktual. Ketiga silinder tidak boleh kolinear dan sebaiknya membentuk **segitiga tidak sama sisi** agar tidak muncul ambiguitas identitas.

3.2 Konversi LaserScan ke Titik Cartesian

Data mentah LiDAR dari bentuk jarak dan sudut diubah menjadi koordinat titik dua dimensi pada kerangka LiDAR. Sudut setiap sinar dihitung berdasarkan sudut awal pemindaian dan interval sudut antarberkas, kemudian nilai jarak dikonversi menjadi koordinat Cartesian (x) dan (y). Proses ini menghasilkan kumpulan titik yang merepresentasikan posisi objek di sekitar sensor dan menjadi masukan untuk tahap clustering serta deteksi silinder.

Untuk data jarak ke- i , sudut sinar laser dihitung menggunakan:

$$\alpha_i = \alpha_{min} + i \Delta \alpha.$$

Koordinat titik pada kerangka LiDAR diperoleh dari:

$$x_i^L = r_i \cos \alpha_i,$$

$$y_i^L = r_i \sin \alpha_i.$$

Hanya pengukuran yang memenuhi syarat berikut yang digunakan:

$$r_{min} \leq r_i \leq r_{max}.$$

Syarat validasi pengukuran digunakan untuk memastikan bahwa hanya data LiDAR yang layak diproses. Nilai NaN, tak hingga, serta jarak yang berada di luar batas minimum dan maksimum sensor dikeluarkan agar tidak membentuk titik palsu atau mengganggu pengelompokan data. Dengan penyaringan ini, proses clustering dan estimasi pusat silinder dapat dilakukan dengan lebih stabil dan akurat.

3.3 Sequential Clustering

Persamaan jarak Euclidean digunakan untuk mengukur kedekatan antara dua titik LiDAR yang diperoleh secara berurutan. Apabila jarak antara titik ke- (i) dan titik sebelumnya lebih kecil daripada ambang pengelompokan, kedua titik dianggap berasal dari permukaan objek yang sama dan dimasukkan ke dalam

satu *cluster*. Tahap ini bertujuan memisahkan kumpulan titik hasil pemindaian menjadi kelompok-kelompok objek sebelum dilakukan proses deteksi dan pemodelan lingkaran.

Kondisi keanggotaan *cluster* digunakan sebagai aturan keputusan untuk menentukan apakah proses pengelompokan dilanjutkan atau *cluster* baru harus dibentuk. Ketika jarak antartitik melebihi ambang, *cluster* aktif ditutup karena kedua titik diperkirakan berasal dari objek yang berbeda. Selanjutnya, *cluster* yang memiliki jumlah titik kurang dari *min_cluster_points* diabaikan agar noise, pantulan sesaat, dan kelompok titik yang tidak memadai tidak diteruskan ke tahap RANSAC dan *circle fitting*. Dengan demikian, *sequential clustering* membantu mengurangi beban komputasi sekaligus meningkatkan keandalan deteksi silinder.

Dua titik berurutan dimasukkan ke cluster yang sama apabila jarak Euclidean keduanya lebih kecil daripada ambang clustering:

$$d_{i,i-1} = \sqrt{(x_i^L - x_{i-1}^L)^2 + (y_i^L - y_{i-1}^L)^2}.$$

Kondisi keanggotaan cluster dinyatakan sebagai:

$$d_{i,i-1} < d_{cluster}.$$

Jika jarak melebihi ambang, cluster aktif ditutup dan cluster baru dibuat. Cluster dengan jumlah titik kurang dari *min_cluster_points* diabaikan.

3.4 Deteksi Silinder Menggunakan Circle Fitting

Model lingkaran dinyatakan sebagai:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2,$$

Dengan (a, b) sebagai pusat lingkaran dan r sebagai radius hasil estimasi. Parameter diperoleh dengan meminimalkan fungsi objektif:

$$J(a, b, r) = \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{(x_k - a)^2 + (y_k - b)^2} - r \right)^2.$$

Residual *root mean square* circle fitting dihitung menggunakan:

$$e_{circle} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\sqrt{(x_k - a)^2 + (y_k - b)^2} - r \right)^2}.$$

Sebuah cluster diterima sebagai kandidat silinder apabila memenuhi:

$$|r - r_c| \leq \varepsilon_r,$$

$$e_{circle} \leq e_{max},$$

$$n \geq n_{min}.$$

Keluaran tahap ini adalah himpunan pusat kandidat pada kerangka LiDAR:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}.$$

Penggunaan objek silinder sebagai landmark didasarkan pada penampangnya yang berbentuk lingkaran pada bidang pemindaian horizontal. Bentuk tersebut relatif tidak berubah terhadap arah pengamatan robot, sehingga pusat landmark dapat diperkirakan dari busur titik LiDAR. Salido-Monzú et al. menunjukkan bahwa target lingkaran atau silinder dapat dideteksi menggunakan pemindai laser radial untuk mendukung pelacakan robot bergerak; diameter target dan jarak pengamatan turut memengaruhi jumlah titik serta ketelitian estimasi pusat landmark [3].

Parameter lingkaran diperoleh dengan meminimalkan penyimpangan titik hasil pemindaian terhadap model. Pendekatan fitting kurva implisit berbasis least-squares sebagaimana dibahas oleh Taubin memberikan dasar matematis untuk mengestimasi pusat dan radius dari data yang mengandung noise [5].

3.5 Robust Circle Fitting Menggunakan RANSAC

Least-squares circle fitting memberikan estimasi pusat dan radius yang baik ketika seluruh titik pada cluster berasal dari permukaan silinder. Namun, cluster LiDAR dapat mengandung outlier akibat pantulan dari lantai, dinding, kaki rak, tepi objek, multipath, atau pemisahan cluster yang tidak sempurna. Karena seluruh titik mempunyai pengaruh terhadap solusi least-squares, beberapa outlier dapat menggeser pusat lingkaran dan menyebabkan kandidat silinder ditolak atau salah dikenali.

Untuk meningkatkan ketahanan terhadap outlier, penelitian ini menerapkan Random Sample Consensus (RANSAC) sebelum refinement least-squares. RANSAC membentuk sejumlah hipotesis lingkaran dari sampel minimum tiga titik yang dipilih secara acak. Setiap hipotesis kemudian dievaluasi menggunakan seluruh titik cluster. Titik yang konsisten dengan hipotesis dimasukkan sebagai inlier, sedangkan titik dengan residual melebihi ambang dianggap sebagai outlier.

Model lingkaran hipotesis dinyatakan sebagai:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

dengan (a,b) sebagai pusat lingkaran dan r sebagai radius yang diperoleh dari tiga titik nonkolinear.

Residual radial titik ke-i terhadap model hipotesis dihitung menggunakan:

$$e_i = \left| \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - r \right|$$

Titik ke-i dikategorikan sebagai inlier apabila memenuhi:

$$e_i \leq \epsilon_{RANSAC}$$

dengan ϵ_{RANSAC} sebagai ambang jarak radial. Pada implementasi awal, ambang ini ditetapkan sebesar 0,015 m dan dapat disesuaikan dengan resolusi sudut, akurasi jarak, serta jarak silinder terhadap LiDAR.

Hipotesis yang diterima harus mempunyai radius dalam rentang radius nominal silinder dan jumlah inlier sekurang-kurangnya `ransac_min_inliers`. Model terbaik dipilih berdasarkan jumlah inlier terbesar. Apabila dua model mempunyai jumlah inlier yang sama, model dengan residual rata-rata inlier paling kecil dipilih.

Jumlah iterasi RANSAC memengaruhi probabilitas diperolehnya sampel yang seluruh anggotanya merupakan inlier. Estimasi jumlah iterasi minimum dapat dinyatakan sebagai:

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - w^s)}$$

dengan N sebagai jumlah iterasi, p sebagai probabilitas keberhasilan yang diinginkan, w sebagai perkiraan proporsi inlier dalam cluster, dan s sebagai jumlah titik minimum pembentuk model. Untuk lingkaran, $s = 3$. Implementasi menggunakan nilai awal 100 iterasi untuk menjaga keseimbangan antara ketahanan dan waktu komputasi.

Setelah model terbaik diperoleh, seluruh titik inlier digunakan kembali pada algebraic least-squares circle fitting. Tahap refinement ini menghasilkan pusat dan radius yang lebih stabil daripada menggunakan model tiga titik secara langsung. Dengan demikian, pipeline deteksi silinder menjadi:

Cluster LiDAR → RANSAC → pemilihan inlier → least-squares refinement → validasi radius dan RMSE

Hasil refinement diterima sebagai kandidat silinder apabila jumlah inlier memenuhi batas minimum, selisih radius hasil fitting terhadap radius nominal berada di bawah $\text{radius_tolerance_m}$, dan radial RMSE tidak melebihi circle_rmse_max_m . RANSAC tidak digunakan untuk menghitung pose AGV secara langsung; algoritma ini memperkuat tahap ekstraksi pusat silinder sebelum tiga pusat landmark digunakan pada pencocokan pola dan registrasi rigid.

Random Sample Consensus membentuk hipotesis model dari subset minimum data dan memilih model yang memperoleh dukungan inlier terbesar. Untuk model lingkaran, tiga titik nonkolinear merupakan sampel minimum pembentuk hipotesis. Pendekatan robust ini diperkenalkan oleh Fischler dan Bolles untuk menangani data yang mengandung outlier [4].

Pada penelitian ini, RANSAC digunakan untuk menyaring inlier pada setiap cluster LiDAR. Parameter pusat dan radius kemudian dihitung ulang menggunakan least-squares refinement hanya dari titik inlier, sehingga ketahanan terhadap outlier dapat dipadukan dengan ketelitian estimasi parameter.

3.6 Pembentukan Vektor Jarak Antarpasangan

Pembentukan vektor jarak antarpasangan bertujuan menghasilkan **signature geometrik** yang unik dari konfigurasi tiga silinder referensi sehingga kelompok landmark yang terdeteksi oleh LiDAR dapat dicocokkan dengan posisi landmark pada kerangka global. Jarak antara setiap pasangan pusat silinder tidak berubah ketika AGV mengalami translasi maupun rotasi sehingga dapat digunakan sebagai karakteristik yang independen terhadap pose sensor. Sistem menghitung tiga jarak, yaitu antara silinder pertama dan kedua, silinder pertama dan ketiga, serta silinder kedua dan ketiga, kemudian mengurutkannya menjadi sebuah vektor jarak. Vektor hasil deteksi LiDAR dibandingkan dengan vektor jarak landmark global menggunakan galat root mean square. Kombinasi tiga kandidat dengan galat terkecil dan berada di bawah ambang toleransi dipilih sebagai kelompok landmark yang valid. Proses ini mengurangi kemungkinan salah memilih objek lain yang menyerupai silinder, sekaligus menjadi tahap penyaringan sebelum penentuan korespondensi tiap landmark dan estimasi transformasi rigid untuk memperoleh pose AGV.

Tiga landmark global menghasilkan tiga jarak antarpasangan:

$$d_{12}^W = \|w_1 - w_2\|,$$

$$d_{13}^W = \|w_1 - w_3\|,$$

$$d_{23}^W = \|w_2 - w_3\|.$$

Ketiga nilai diurutkan untuk membentuk signature geometrik:

$$d^W = \text{sort}(d_{12}^W, d_{13}^W, d_{23}^W).$$

Untuk setiap kombinasi tiga kandidat, sistem menghitung:

$$d^L = \text{sort}(d_{12}^L, d_{13}^L, d_{23}^L).$$

Galat pola jarak dinyatakan sebagai:

$$e_d = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (d_k^L - d_k^W)^2}.$$

Kombinasi kandidat diterima jika:

$$e_d < e_{d,max}.$$

Jarak antarpasangan bersifat invarian terhadap translasi dan rotasi sehingga dapat digunakan untuk mengenali kelompok tiga silinder sebelum pose AGV diketahui.

Penggunaan tiga silinder menyediakan tiga landmark nonkolinear yang membentuk pola segitiga. Tiga jarak antarpasangan bersifat invarian terhadap translasi dan rotasi, sehingga dapat digunakan sebagai signature geometrik untuk memilih kombinasi landmark yang benar sebelum pose dihitung. Konfigurasi yang tidak simetris mengurangi ambiguitas korespondensi meskipun seluruh silinder mempunyai diameter yang sama [9], [10].

Kajian lokalisasi menggunakan landmark buatan menunjukkan bahwa geometri dan penempatan landmark memengaruhi identifiabilitas serta akurasi pose. Landmark yang dirancang dengan pola geometrik unik membantu mengurangi ambiguitas lingkungan dan memperkuat lokalisasi berbasis LiDAR [9], [10].

3.7 Penentuan Korespondensi Landmark

Tiga titik menghasilkan enam kemungkinan permutasi korespondensi:

$$3! = 6.$$

Untuk setiap permutasi, program menghitung transformasi rigid dan residual registrasi. Permutasi terbaik dipilih melalui:

$$\pi^\square = \arg \min_{\pi} e_{reg}(\pi).$$

Dengan pendekatan ini, ketiga silinder dapat memiliki diameter yang sama. Identitasnya dibedakan berdasarkan susunan geometrik, bukan berdasarkan ukuran fisik yang berbeda.

3.8 Estimasi Transformasi Rigid Dua Dimensi

Estimasi transformasi rigid dua dimensi bertujuan menentukan hubungan posisi dan orientasi antara tiga pusat silinder yang terdeteksi dalam kerangka LiDAR dengan tiga landmark referensi yang telah diketahui dalam kerangka global. Transformasi rigid mempertahankan jarak dan bentuk geometrik antartitik, sehingga perubahan yang dicari hanya berupa rotasi dan translasi tanpa penskalaan maupun deformasi. Setelah korespondensi setiap silinder ditentukan, sistem menghitung matriks rotasi yang menyelaraskan konfigurasi titik hasil deteksi terhadap konfigurasi landmark global, kemudian menghitung vektor translasi yang memindahkan pusat konfigurasi LiDAR ke posisi yang sesuai pada kerangka `map`. Proses ini dilakukan dengan memusatkan kedua himpunan titik terhadap centroid masing-masing, membentuk matriks kovarians silang, dan menyelesaikannya menggunakan singular value decomposition. Dari matriks rotasi diperoleh orientasi LiDAR, sedangkan vektor translasi memberikan koordinat posisi LiDAR pada sumbu global. Residual antara posisi landmark hasil transformasi dan posisi referensinya digunakan sebagai indikator kualitas estimasi; transformasi hanya diterima apabila residual berada di bawah ambang yang ditetapkan. Dengan demikian, tahap ini menghasilkan pose absolut LiDAR berupa posisi (x), posisi (y), dan sudut orientasi (θ), yang selanjutnya dikonversi menjadi pose pusat AGV dengan memperhitungkan offset pemasangan sensor terhadap `base_link`.

Hubungan titik landmark pada kerangka LiDAR dan dunia ditulis sebagai:

$$w_i = R c_i + t.$$

Matriks rotasi dua dimensi adalah:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_L & -\sin \theta_L \\ \sin \theta_L & \cos \theta_L \end{bmatrix},$$

Sedangkan vektor translasi adalah:

$$t = \begin{bmatrix} x_L^w \\ y_L^w \end{bmatrix}.$$

Centroid kedua himpunan titik dihitung melalui:

$$\hat{c} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 c_i,$$

$$\hat{w} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 w_i.$$

Titik yang telah dipusatkan adalah:

$$c'_i = c_i - \hat{c},$$

$$w'_i = w_i - \hat{w}.$$

Matriks kovarians silang dihitung sebagai:

$$H = \sum_{i=1}^3 c'_i w'^T_i.$$

SVD diterapkan pada matriks tersebut:

$$H = U \Sigma V^T.$$

Matriks rotasi kemudian diperoleh dari:

$$R = V U^T.$$

Vektor translasi dihitung menggunakan:

$$t = \hat{w} - R \hat{c}.$$

Pose LiDAR dalam kerangka global adalah:

$$x_L^W = t_x,$$

$$y_L^W = t_y,$$

$$\theta_L^W = \text{atan2}(R_{21}, R_{11}).$$

Setelah korespondensi pusat silinder dalam kerangka LiDAR dan kerangka global ditentukan, pose sensor diperoleh melalui transformasi rigid yang meminimalkan jumlah kuadrat residual antara titik hasil transformasi dan landmark referensi. Solusi least-squares berbasis centroid, matriks kovarians silang, dan singular value decomposition dikembangkan oleh Arun et al. dan dapat diterapkan pada registrasi titik dua dimensi [6].

Solusi Kabsch memberikan rotasi optimal untuk menyelaraskan dua himpunan vektor berdasarkan minimisasi least-squares, sedangkan formulasi Horn menyediakan penyelesaian closed-form untuk masalah orientasi absolut [7], [8]. Dalam implementasi ini, matriks rotasi dijaga agar tidak menghasilkan refleksi, kemudian vektor translasi dihitung dari perbedaan centroid kedua himpunan titik.

3.9 Konversi Pose LiDAR ke Pose AGV

Konversi pose LiDAR ke pose AGV bertujuan memperoleh posisi dan orientasi pusat kendaraan atau `base_link` berdasarkan pose sensor yang telah dihitung pada kerangka global. Tahap ini diperlukan karena LiDAR umumnya dipasang pada posisi tertentu di atas badan AGV dan tidak selalu berimpit dengan pusat rotasi kendaraan. Oleh karena itu, koordinat LiDAR harus dikoreksi menggunakan parameter ekstrinsik pemasangan sensor, yaitu offset translasi pada arah longitudinal dan lateral serta offset sudut terhadap `base_link`. Orientasi AGV diperoleh dengan mengurangi sudut pemasangan

LiDAR dari orientasi sensor pada kerangka `map`, sedangkan posisi pusat AGV dihitung dengan memutar vektor offset sensor sesuai orientasi kendaraan, kemudian mengurangkannya dari posisi global LiDAR. Hasil transformasi ini adalah pose AGV yang dinyatakan sebagai posisi (x), posisi (y), dan orientasi (θ) pada kerangka global. Ketelitian tahap ini sangat dipengaruhi oleh akurasi pengukuran jarak pemasangan LiDAR terhadap pusat AGV dan kesesuaian arah sumbu antara `laser_frame` dan `base_link`; kesalahan kalibrasi akan menghasilkan bias posisi yang tetap meskipun pose LiDAR telah diestimasi dengan baik. Pose akhir AGV selanjutnya dapat digunakan untuk visualisasi lintasan, evaluasi odometri, koreksi posisi, dan integrasi dengan sistem navigasi ROS2.

Posisi LiDAR relatif terhadap `base_link` dinyatakan sebagai:

$${}^B p_L = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}.$$

Orientasi pusat AGV dihitung dari:

$$\theta_B^W = \theta_L^W - \theta_{LB}.$$

Posisi pusat AGV dihitung menggunakan:

$$p_B^W = p_L^W - R(\theta_B^W) {}^B p_L.$$

Dalam bentuk matriks lengkap:

$$\begin{bmatrix} x_B^W \\ y_B^W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L^W \\ y_L^W \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \theta_B^W & -\sin \theta_B^W \\ \sin \theta_B^W & \cos \theta_B^W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}.$$

Pose $(x_B^W, y_B^W, \theta_B^W)$ selanjutnya diterbitkan melalui `/ground_truth/pose`.

3.10 Pemeriksaan Kualitas dan Kontinuitas Pose

Residual registrasi dihitung sebagai:

$$e_{reg} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \|w_i - (R c_i + t)\|^2}.$$

Pose diterima apabila:

$$e_{reg} \leq e_{reg, max}.$$

Perubahan posisi dan orientasi terhadap pose sebelumnya dihitung melalui:

$$\Delta p = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2},$$

$$\Delta \theta = \text{wrap}(\theta_k - \theta_{k-1}).$$

Pose ditolak apabila:

$$\Delta p > \Delta p_{max},$$

atau:

$$|\Delta \theta| > \Delta \theta_{max}.$$

Pemeriksaan ini mencegah lompatan pose akibat kesalahan korespondensi atau kandidat palsu.

4. Implementasi ROS2

Metode lokalisasi berbasis LiDAR 2D dan tiga silinder referensi diimplementasikan menggunakan ROS2 Humble agar seluruh tahapan pengolahan data dapat dijalankan secara modular, terukur, dan terintegrasi dengan sistem AGV. Implementasi mencakup penerimaan data `LaserScan`, konversi titik, clustering, deteksi silinder menggunakan RANSAC dan least-squares refinement, pencocokan landmark, estimasi transformasi rigid, konversi pose LiDAR ke `base_link`, serta publikasi pose, lintasan, marker visualisasi, dan data diagnostik. Struktur berbasis node, topic, parameter, dan message ROS2 memungkinkan setiap bagian diuji secara terpisah sekaligus memudahkan integrasi dengan RViz, odometri, IMU, sistem navigasi, dan modul pencatatan data. Fungsi utama node diorganisasi dalam alur sub bab berikut.

4.1 Implementasi RANSAC pada Node Deteksi Silinder

Implementasi RANSAC ditambahkan tanpa mengubah tahap pencocokan tiga landmark dan estimasi transformasi rigid. Fungsi `circle_from_three_points()` membentuk hipotesis lingkaran dari tiga titik nonkolinear. Fungsi `ransac_circle_known_radius()` menjalankan sampling acak, validasi radius, penghitungan residual, pemilihan inlier, pemeringkatan model, dan refinement menggunakan `fit_circle_known_radius()`.

Pada fungsi `detect_candidates()`, setiap cluster terlebih dahulu diperiksa berdasarkan panjang chord. Jika `ransac_enabled` bernilai true, cluster diproses dengan RANSAC. Hanya inlier model terbaik yang diteruskan ke least-squares. Jika RANSAC dinonaktifkan, sistem kembali menggunakan least-squares langsung terhadap seluruh titik cluster untuk keperluan perbandingan atau debugging.

Parameter RANSAC yang ditambahkan pada node adalah:

```
ransac_enabled: true
ransac_max_iterations: 100
ransac_distance_threshold_m: 0.015
ransac_min_inliers: 4
ransac_random_seed: 42
```

Nilai random seed membuat pengujian perangkat lunak dapat direproduksi. Pada operasi lapangan, seed tetap dapat dipertahankan karena variasi data `LaserScan` sudah memberikan perubahan pada cluster. Parameter distance threshold perlu dinaikkan secara bertahap apabila titik silinder pada data nyata lebih berisik, tetapi nilai yang terlalu besar dapat memasukkan titik objek lain sebagai inlier.

Contoh parameter YAML:

```
lidar_cylinder_ground_truth:
  ros__parameters:
    world_frame: map
    laser_frame: laser_frame
    base_frame: base_link

    world_cylinders: [0.50, 1.00, 3.20, 1.00, 1.10, 3.40]

    expected_radius: 0.075
    radius_tolerance: 0.025
    cluster_distance_threshold: 0.10
    min_cluster_points: 4
    max_circle_residual: 0.020
    pairwise_distance_tolerance: 0.080
    max_registration_residual: 0.050

    lidar_offset_x: 0.40
    lidar_offset_y: 0.00
    lidar_offset_yaw: 0.00

    max_position_jump: 0.50
    max_yaw_jump: 0.50
```

Publisher dummy LiDAR digunakan untuk menguji perangkat lunak tanpa sensor fisik. Publisher tersebut membentuk data `/scan` berdasarkan titik potong sinar laser dengan silinder virtual. Node `single_cylinder_detector` dapat digunakan untuk memverifikasi proses clustering dan circle fitting secara terpisah. Akan tetapi, satu landmark hanya memberikan posisi relatif dan belum cukup untuk menentukan pose global lengkap (x, y, θ) .

5. Rancangan Eksperimen untuk Validasi

Rancangan eksperimen disusun untuk mengevaluasi kemampuan sistem lokalisasi AGV berbasis LiDAR 2D dan tiga silinder referensi secara terukur pada kondisi statis maupun dinamis. Validasi dilakukan dengan membandingkan pose hasil estimasi sistem terhadap pose referensi yang diperoleh dari titik ukur, marker, atau perangkat pengukuran eksternal. Pengujian mencakup akurasi posisi, akurasi orientasi, tingkat keberhasilan deteksi silinder, kestabilan pose antarscan, waktu komputasi, serta ketahanan metode terhadap variasi jarak, perubahan orientasi AGV, noise pengukuran, dan oklusi sebagian landmark. Selain itu, eksperimen dirancang untuk membandingkan performa circle fitting langsung dengan alur RANSAC dan least-squares refinement, sehingga pengaruh penolakan outlier terhadap kualitas deteksi silinder dapat dianalisis. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan parameter operasional yang sesuai, mengevaluasi keterbatasan sistem, dan memastikan bahwa metode yang dikembangkan layak digunakan sebagai sumber lokalisasi absolut, ground truth lokal, atau pengukuran koreksi bagi odometri AGV.

5.1 Skenario Pengujian

Pengujian dibagi menjadi empat skenario: (1) pengujian statis pada beberapa posisi dan orientasi; (2) pengujian dinamis pada lintasan lurus dan berbelok; (3) variasi jarak AGV terhadap landmark; dan (4) gangguan berupa objek tambahan atau oklusi sebagian landmark.

5.2 Pose Referensi

Pose referensi digunakan sebagai nilai acuan atau *ground truth* untuk menilai ketepatan hasil lokalisasi AGV yang diperoleh dari sistem LiDAR 2D dan tiga silinder. Pose ini umumnya dinyatakan dalam bentuk posisi dan orientasi, yaitu $(x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref})$. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan pose hasil estimasi sistem untuk menghitung galat posisi dan galat orientasi pada setiap sampel pengujian.

Pose referensi harus diperoleh dari metode pengukuran yang memiliki ketelitian lebih baik atau independen terhadap algoritma yang diuji. Sumbernya dapat berupa titik ukur yang telah ditandai di lantai, pengukuran menggunakan meter laser, AprilTag pada titik pemeriksaan, *total station*, atau sistem *motion capture*. Dengan adanya pose referensi, performa sistem dapat dievaluasi secara objektif, baik pada kondisi AGV diam maupun bergerak.

Pose referensi dinyatakan sebagai:

$$q_{ref} = [x_{ref} \quad y_{ref} \quad \theta_{ref}]^T.$$

Pose referensi dapat diperoleh dari titik ukur lantai, meter laser, AprilTag pada checkpoint, total station, atau sistem motion capture.

5.3 Metrik Evaluasi

Galat posisi setiap sampel digunakan untuk mengukur jarak antara posisi AGV yang diestimasi oleh sistem dan posisi referensi pada setiap waktu pengamatan. Metrik ini menggabungkan selisih koordinat pada sumbu (x) dan (y) menjadi satu nilai jarak Euclidean. Semakin kecil galat posisi, semakin dekat hasil lokalisasi terhadap posisi sebenarnya.

Galat posisi setiap sampel dihitung menggunakan:

$$e_{p,k} = \sqrt{(x_k - x_{ref,k})^2 + (y_k - y_{ref,k})^2}.$$

Galat orientasi digunakan untuk mengukur selisih antara sudut arah AGV hasil estimasi dan sudut referensi. Selisih sudut perlu dinormalisasi agar berada dalam rentang sudut yang konsisten, sehingga perbedaan di sekitar batas (-180°) dan (180°) tidak menghasilkan galat yang keliru. Nilai yang kecil menunjukkan bahwa arah hadap AGV dapat diperkirakan dengan baik.

Galat orientasi dihitung melalui:

$$e_{\theta,k} = \text{wrap}(\theta_k - \theta_{ref,k}).$$

Mean absolute error posisi (MAE) digunakan untuk menunjukkan besar galat posisi rata-rata dari seluruh sampel pengujian. Metrik ini memberikan gambaran umum mengenai tingkat penyimpangan sistem terhadap posisi referensi dan mudah diinterpretasikan karena menggunakan satuan yang sama dengan posisi, yaitu meter. Nilai MAE yang semakin kecil menunjukkan akurasi lokalisasi yang semakin baik.

Mean absolute error posisi adalah:

$$MAE_p = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_{p,k}.$$

Root mean square error posisi (RMSE) digunakan untuk mengevaluasi akurasi posisi dengan memberikan bobot lebih besar terhadap galat yang bernilai tinggi. Karena setiap galat dikuadratkan sebelum dirata-ratakan, RMSE lebih sensitif terhadap kesalahan posisi yang besar dibandingkan MAE. Perbandingan antara MAE dan RMSE dapat digunakan untuk mengetahui apakah hasil pengujian mengandung beberapa penyimpangan ekstrem.

Root mean square error posisi adalah:

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_{p,k}^2}.$$

RMSE orientasi digunakan untuk mengukur penyimpangan sudut secara keseluruhan dengan memberikan penalti lebih besar pada galat orientasi yang tinggi. Metrik ini berguna untuk menilai kestabilan estimasi arah AGV selama bergerak, terutama ketika kendaraan berbelok atau mengalami perubahan orientasi yang cepat. Nilai RMSE orientasi yang rendah menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan estimasi arah secara konsisten.

RMSE orientasi adalah:

$$RMSE_\theta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_{\theta,k}^2}.$$

Tingkat keberhasilan lokalisasi digunakan untuk mengetahui persentase data pemindaian LiDAR yang berhasil menghasilkan pose AGV yang valid. Suatu hasil dinyatakan valid apabila tiga silinder berhasil dideteksi dan dicocokkan, residual transformasi berada di bawah ambang, serta pose lolos pemeriksaan kontinuitas. Metrik ini menggambarkan keandalan sistem dalam mempertahankan lokalisasi selama eksperimen, bukan hanya ketepatan pose yang berhasil dihitung.

Tingkat keberhasilan lokalisasi dihitung menggunakan:

$$S_{loc} = \frac{N_{valid}}{N_{scan}} \times 100\%.$$

Waktu komputasi rata-rata digunakan untuk mengevaluasi kemampuan algoritma bekerja secara waktu nyata. Nilai ini dihitung dari rata-rata waktu yang diperlukan untuk memproses satu data LaserScan, mulai dari konversi titik, clustering, RANSAC, circle fitting, pencocokan landmark, hingga publikasi

pose. Waktu pemrosesan harus lebih kecil daripada periode kedatangan data LiDAR agar sistem dapat mengikuti frekuensi pemindaian tanpa mengalami penumpukan data atau keterlambatan estimasi pose. Waktu komputasi rata-rata dihitung sebagai rata-rata waktu pemrosesan seluruh scan. Pengukuran execution time merupakan bagian penting dalam benchmarking algoritma lokalisasi dan SLAM karena menentukan kemampuan implementasi untuk memenuhi constraint waktu nyata [12].

Waktu komputasi rata-rata adalah:

$$\bar{t}_{proc} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_{proc,k}.$$

6. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem lokalisasi AGV berbasis LiDAR 2D dan tiga silinder referensi serta membahas kinerja setiap tahapan algoritma yang telah dikembangkan. Tingkat keberhasilan lokalisasi didefinisikan dalam penelitian ini sebagai rasio jumlah scan yang menghasilkan pose valid terhadap jumlah seluruh scan yang diproses. Konsep ini sejalan dengan metrik coverage pada evaluasi trajectory, yang menggambarkan proporsi data atau sequence yang berhasil menghasilkan estimasi pose [17]. Analisis mencakup keberhasilan deteksi silinder, kualitas pencocokan landmark, akurasi estimasi posisi dan orientasi, kestabilan pose antarscan, tingkat keberhasilan lokalisasi, serta waktu komputasi. Hasil eksperimen juga dibandingkan antara circle fitting langsung dan metode RANSAC yang dilanjutkan dengan least-squares refinement untuk mengevaluasi pengaruh penolakan outlier terhadap ketelitian pusat silinder dan pose AGV. Pembahasan diarahkan untuk menjelaskan hubungan antara konfigurasi landmark, kualitas data LiDAR, parameter algoritma, dan performa sistem pada kondisi statis maupun dinamis.

6.1 Hasil Deteksi Silinder

Pengujian awal dilakukan dengan memvisualisasikan cluster, pusat kandidat silinder, landmark global, dan pose AGV pada RViz. Data hasil eksperimen selanjutnya dimasukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil deteksi silinder pada pengujian statis

Pose uji	Pose referensi AGV (x, y, yaw)	Kandidat terdeteksi	Landmark cocok	Fit RMSE (m)	Status
P1	(0,72; 1,97; -102,4°)	3	S1, S2, S3	0,0011	Valid
P2	(1,20; 1,50; -90,0°)	3	S1, S2, S3	0,0018	Valid
P3	(1,60; 2,10; -45,0°)	3	S1, S2, S3	0,0024	Valid
P4	(2,10; 1,80; 0,0°)	2	S1, S3	—	Tidak valid

Jumlah titik yang mengenai permukaan silinder berkurang ketika jarak pengamatan bertambah. Kondisi ini meningkatkan ketidakpastian estimasi pusat dan radius. Oleh karena itu, radius silinder, resolusi sudut LiDAR, dan jarak maksimum pengamatan perlu dipertimbangkan dalam penentuan area kerja.

6.1.1 Evaluasi Pengaruh RANSAC

Pengaruh RANSAC dievaluasi dengan membandingkan dua konfigurasi: *least-squares* langsung terhadap seluruh titik cluster dan RANSAC diikuti *least-squares refinement*. Parameter yang dibandingkan meliputi jumlah kandidat valid, galat pusat silinder, radial RMSE, tingkat keberhasilan pencocokan tiga landmark, waktu pemrosesan, dan jumlah pose yang ditolak.

RANSAC diharapkan memberikan peningkatan terbesar ketika cluster mengandung sejumlah kecil titik yang tidak mengikuti permukaan silinder. Pada cluster yang seluruh titiknya bersih, hasil kedua metode seharusnya berdekatan, sedangkan RANSAC menambahkan sedikit waktu komputasi akibat pengujian hipotesis berulang. Oleh sebab itu, manfaat metode perlu dinilai sebagai kompromi antara robustness dan kebutuhan komputasi real-time.

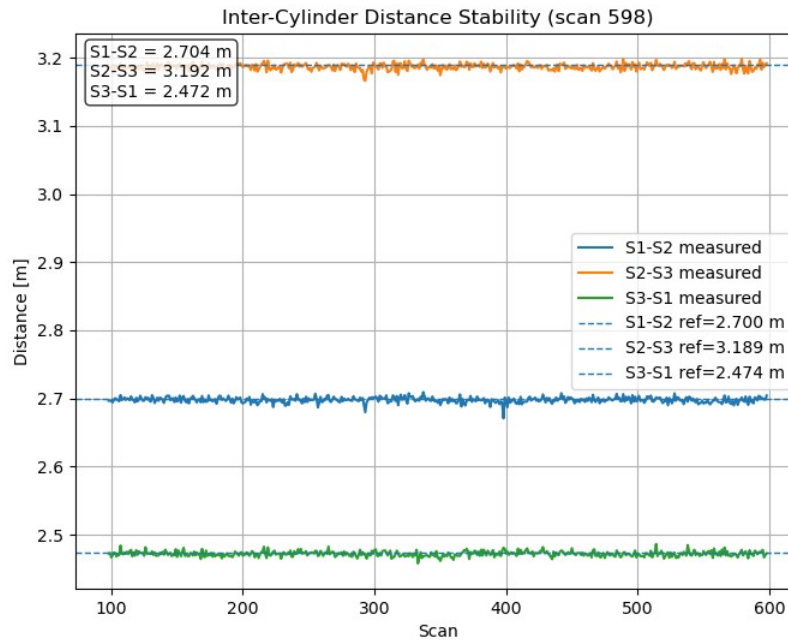
6.2 Hasil Pencocokan Landmark

Pola tiga jarak antarpasangan digunakan untuk menyaring kombinasi kandidat yang tidak sesuai dengan susunan landmark global. Metode ini tetap bekerja meskipun urutan kandidat hasil clustering berubah pada setiap pemindaian.

Tabel 2. Perbandingan jarak antarpasangan

Pasangan	Jarak global	Jarak hasil deteksi	Selisih
Silinder 1-2	2.700 m	2.704 m	0.004 m
Silinder 1-3	2.474 m	2.472 m	0.002 m
Silinder 2-3	3.189 m	3.192 m	0.003 m

Hasil pengukuran dalam selang 598 data scan diberikan dalam grafik berikut:



6.3 Akurasi Pose

Ringkasan kinerja sistem lokalisasi AGV pada dua kondisi pengujian, yaitu statis dan dinamis disajikan dalam Tabel 3. Parameter MAE posisi dan MAE orientasi menunjukkan besar penyimpangan rata-rata hasil estimasi terhadap pose referensi, sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan akurasi umum sistem[13], [14]. RMSE posisi dan RMSE orientasi memberikan penekanan yang lebih besar terhadap kesalahan bernilai tinggi, sehingga berguna untuk mengidentifikasi adanya penyimpangan ekstrem selama pengujian.

Galat posisi maksimum menunjukkan kesalahan terburuk yang terjadi dan menjadi indikator penting untuk mengevaluasi batas keselamatan sistem lokalisasi. Keberhasilan lokalisasi menyatakan persentase data pemindaian LiDAR yang mampu menghasilkan pose valid setelah melalui proses deteksi tiga silinder, pencocokan landmark, estimasi transformasi, dan pemeriksaan kontinuitas[15][16]. Sementara itu, waktu komputasi rata-rata menunjukkan efisiensi algoritma dalam memproses setiap data LaserScan dan menentukan kelayakannya untuk operasi waktu nyata. Perbandingan antara kondisi statis dan dinamis digunakan untuk menilai pengaruh gerakan AGV, perubahan orientasi, getaran, dan perubahan sudut pandang terhadap akurasi, kestabilan, serta keandalan sistem lokalisasi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode lokalisasi berbasis tiga landmark silinder mampu memberikan estimasi pose yang akurat dan stabil baik pada kondisi statis maupun dinamis. Pada pengujian statis, dari 515 scan yang diproses, 502 scan menghasilkan lokalisasi valid dengan tingkat keberhasilan sebesar 97,48%. Nilai MAE posisi sebesar 0,002440 m dan RMSE posisi sebesar 0,002774 m menunjukkan bahwa galat translasi berada pada orde milimeter, dengan galat maksimum 0,007673 m. Untuk orientasi, MAE sebesar 0,026° dan RMSE sebesar 0,033° menunjukkan bahwa estimasi yaw sangat dekat dengan pose referensi. Kedekatan nilai MAE dan RMSE juga mengindikasikan bahwa distribusi galat relatif stabil dan tidak didominasi oleh sejumlah kecil error ekstrem.

Pada pengujian dinamis, kinerja sistem tetap menunjukkan akurasi yang tinggi. Seluruh 520 scan berhasil menghasilkan lokalisasi valid, sehingga tingkat keberhasilan mencapai 100%. MAE posisi meningkat menjadi 0,003379 m dan RMSE menjadi 0,004071 m, sedangkan galat maksimum mencapai 0,009581 m. Peningkatan ini masih relatif kecil dan dapat dipahami karena pada kondisi dinamis posisi serta orientasi AGV berubah secara kontinu, sehingga proses pencocokan landmark dan estimasi transformasi harus mengikuti perubahan geometri pada setiap scan. Meski demikian, galat posisi tetap berada di bawah 1 cm, yang menunjukkan bahwa konfigurasi tiga silinder dan registrasi rigid mampu mempertahankan konsistensi estimasi pose selama pergerakan.

Perbedaan yang lebih jelas terlihat pada estimasi orientasi. Pada kondisi dinamis, MAE orientasi meningkat menjadi 0,430° dan RMSE menjadi 0,518°, jauh lebih besar dibandingkan kondisi statis, tetapi masih berada pada tingkat yang rendah untuk simulasi lokalisasi AGV. Hal ini menunjukkan bahwa komponen orientasi lebih sensitif terhadap perubahan pose antar-scan dibandingkan komponen posisi. Secara umum, perubahan sudut pandang terhadap tiga landmark selama pergerakan menyebabkan estimasi rotasi lebih mudah terpengaruh oleh variasi kecil pada posisi pusat silinder hasil fitting. Temuan ini konsisten dengan karakteristik registrasi geometrik 2D, di mana galat kecil pada koordinat landmark dapat menghasilkan perubahan sudut yang lebih nyata ketika konfigurasi relatif landmark berubah.

Dari sisi efisiensi komputasi, waktu pemrosesan rata-rata sebesar 3,317 ms pada kondisi statis dan 3,182 ms pada kondisi dinamis menunjukkan bahwa algoritma memiliki kebutuhan komputasi yang rendah. Nilai tersebut jauh lebih kecil dibandingkan periode pemindaian LiDAR 10 Hz yang sekitar 100 ms, sehingga secara komputasional metode ini memiliki margin yang memadai untuk aplikasi waktu nyata. Menariknya, waktu komputasi pada pengujian dinamis tidak meningkat dibandingkan kondisi statis, yang menunjukkan bahwa beban utama algoritma lebih ditentukan oleh jumlah titik, clustering, circle fitting, pencocokan landmark, dan registrasi rigid, bukan oleh apakah AGV sedang diam atau bergerak.

Secara keseluruhan, hasil simulasi memperlihatkan bahwa pendekatan tiga landmark silinder mampu memberikan lokalisasi dengan akurasi posisi pada orde beberapa milimeter, orientasi di bawah satu derajat, tingkat keberhasilan tinggi, dan waktu komputasi hanya sekitar 3 ms per scan. Dibandingkan kondisi statis, pengujian dinamis menunjukkan peningkatan galat posisi dan orientasi, namun peningkatan tersebut masih kecil dan tidak menyebabkan degradasi keberhasilan lokalisasi. Dengan demikian, hasil ini dapat dipandang sebagai validasi awal bahwa formulasi geometrik, pencocokan tiga landmark, dan estimasi transformasi rigid telah bekerja sesuai rancangan sebelum sistem diuji menggunakan data LiDAR nyata, noise sensor yang lebih representatif, occlusion, dan gerakan AGV aktual.

Tabel 3. Akurasi lokalisasi AGV

Parameter	Statis	Dinamis
MAE posisi	0.002440 m	0.003379 m
RMSE posisi	0.002774 m	0.004071 m
Galat posisi maksimum	0.007673 m	0.009581 m
MAE orientasi	0.007673 derajat	0.430262 derajat
RMSE orientasi	0.032840 derajat	0.518354 derajat
Keberhasilan lokalisasi	97.48 %	100.00 %
Waktu komputasi rata-rata	3.317 ms ms	3.182 ms

Pose LiDAR harus dibedakan dari pose pusat AGV. Kesalahan parameter offset antara LiDAR dan `base_link` menghasilkan galat sistematis meskipun residual registrasi ketiga landmark kecil. Oleh sebab itu, kalibrasi ekstrinsik LiDAR merupakan bagian penting dari sistem.

6.4 Kontinuitas Publikasi *Ground Truth*

Pose dan path harus diterbitkan pada setiap pesan `/scan` yang menghasilkan minimal tiga kandidat silinder, memenuhi toleransi pola jarak, menghasilkan residual registrasi di bawah ambang, dan lolos continuity check. Pemeriksaan frekuensi topik dapat dilakukan menggunakan:

```
ros2 topic hz /scan
ros2 topic hz /ground_truth/pose
ros2 topic echo /ground_truth/diagnostics
```

Jika `/ground_truth/path` hanya berisi satu titik, penyebab yang perlu diperiksa adalah objek `Path` yang dibuat ulang pada setiap callback, pose baru tidak ditambahkan ke array `poses`, atau fungsi `publish` hanya dipanggil saat inisialisasi.

6.5 Integrasi dengan Sistem Navigasi

Pose hasil tiga silinder dapat digunakan sebagai lokalisasi absolut selama seluruh landmark terlihat, sebagai *ground truth* lokal untuk mengevaluasi odometri dan digital twin AGV, atau sebagai pengukuran koreksi yang digabungkan dengan odometri dan IMU melalui extended Kalman filter. Pada mode fusi sensor, prediksi pose tetap berasal dari encoder dan IMU, sedangkan pose berbasis landmark digunakan secara event-driven ketika tiga silinder terdeteksi dengan kualitas yang memadai.

7. Keterbatasan Sistem

Pipeline saat ini membutuhkan tiga landmark terlihat secara bersamaan. Deteksi dapat gagal ketika silinder tertutup objek lain, berada di luar jangkauan LiDAR, atau hanya terkena sedikit sinar laser. Objek lain yang mempunyai bentuk melingkar dan radius serupa juga dapat menjadi kandidat palsu. Akurasi dipengaruhi oleh ketelitian koordinat landmark, kalibrasi posisi LiDAR, resolusi sudut sensor, diameter silinder, parameter clustering, dan getaran AGV.

Pengembangan selanjutnya dapat mencakup RANSAC adaptif, filter temporal pusat silinder, pemanfaatan intensitas LiDAR, estimasi pose dengan dua landmark yang dibantu odometri, perhitungan kovarians pose, serta validasi terhadap AprilTag atau total station. [11]

8. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan metode lokalisasi AGV berbasis LiDAR 2D menggunakan tiga silinder referensi sebagai landmark global. Data `LaserScan` diubah menjadi titik Cartesian, dikelompokkan secara sekuensial, dan diproses menggunakan circle fitting untuk memperoleh pusat kandidat silinder. Identitas landmark ditentukan berdasarkan pola jarak antarpasangan dan pengujian seluruh permutasi korespondensi.

Pose LiDAR dihitung menggunakan transformasi rigid dua dimensi berbasis SVD, kemudian dikonversi menjadi pose pusat AGV menggunakan parameter ekstrinsik antara `laser_frame` dan `base_link`. Implementasi ROS2 menerbitkan pose LiDAR, pose AGV, lintasan, marker, dan data diagnostik pada setiap pemindaian yang valid.

Konfigurasi tiga silinder tidak simetris memungkinkan ketiga landmark dibedakan meskipun mempunyai diameter yang sama. Sistem ini berpotensi digunakan sebagai lokalisasi absolut pada area tertentu, *ground truth* untuk pengujian AGV, serta sumber koreksi terhadap drift odometri.

Daftar Pustaka

- [1] ROS 2 Documentation, “`sensor_msgs/msg/LaserScan`,” ROS 2 Humble Documentation.
- [2] SLAMTEC, RPLIDAR C1 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner: Datasheet. Shanghai, China: Shanghai Slamtec Co., Ltd., 2023.
- [3] J. Salido-Monzú, A. Martín-Gorostiza, J. L. Lázaro-Galilea, F. J. Meca-Meca, and E. Martos-Naya, “Two-dimensional radial laser scanning for circular marker detection and external mobile robot tracking,” *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 16482–16497, 2012, doi: 10.3390/s121216482.
- [4] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981, doi: 10.1145/358669.358692.
- [5] G. Taubin, “Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations, with applications to edge and range image segmentation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 11, pp. 1115–1138, 1991, doi: 10.1109/34.103273.
- [6] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein, “Least-squares fitting of two 3-D point sets,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, no. 5, pp. 698–700, 1987, doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767965.
- [7] W. Kabsch, “A solution for the best rotation to relate two sets of vectors,” *Acta Crystallographica Section A*, vol. 32, no. 5, pp. 922–923, 1976, doi: 10.1107/S0567739476001873.
- [8] B. K. P. Horn, “Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4, no. 4, pp. 629–642, 1987, doi: 10.1364/JOSAA.4.000629.
- [9] W. Xu, Y. Li, J. Zhang, and H. Zhang, “A lightweight localization strategy for LiDAR-guided autonomous robots with artificial landmarks,” *Sensors*, vol. 21, no. 13, Art. no. 4479, 2021, doi: 10.3390/s21134479.
- [10] J. M. Villadangos, J. Ureña, M. Mazo, Á. Hernández, F. J. Álvarez, and J. J. García, “Passive landmark geometry optimization and evaluation for reliable autonomous navigation in mining tunnels using 2D LiDARs,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, Art. no. 3038, 2022, doi: 10.3390/s22083038.
- [11] A. Schaefer, D. Büscher, J. Vertens, L. Luft, and W. Burgard, “Long-term urban vehicle localization using pole landmarks extracted from 3-D LiDAR scans,” in *Proc. European Conference on Mobile Robots*, 2019.
- [12] L. Nardi et al., “Introducing SLAMBench, a performance and accuracy benchmarking methodology for SLAM,” 2014. SLAMBench menekankan evaluasi gabungan antara accuracy dan execution/computational performance. (arXiv)

- [13] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geoscientific Model Development*, vol. 7, pp. 1247–1250, 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014. (GMD)
- [14] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate Research*, vol. 30, pp. 79–82, 2005, doi: 10.3354/cr030079. (DOI)
- [15] Z. Zhang and D. Scaramuzza, "A Tutorial on Quantitative Trajectory Evaluation for Visual(-Inertial) Odometry," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 7244–7251, doi: 10.1109/IROS.2018.8593941. (Infoscience)
- [16] J. Sturm, N. Engelhard, F. Endres, W. Burgard, and D. Cremers, "A Benchmark for the Evaluation of RGB-D SLAM Systems," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pp. 573–580. Metrik ATE pada benchmark ini membandingkan trajectory hasil estimasi terhadap ground truth dan merangkum error translasi menggunakan RMSE. (Computer Vision Group)
- [17] Princeton365 Benchmark, "SLAM Trajectory Evaluation," yang menggunakan ATE, mean rotation error, dan coverage sebagai bagian dari evaluasi performa trajectory. (princeton365.cs.princeton.edu)