

Lokalisasi Kendaraan Otonom Berbasis Extended Kalman Filter di Lingkungan ROS

Afrias Sarotama^{1,2}, Estiko Rijanto², Mimin Muhaimin¹

¹Fakultas Teknologi Industri Pertanian
Universitas Padjadjaran
afrias.sarotama@gmail.com

²Pusat Riset Mekatronika Cerdas
Badan Riset Inovasi Nasional

Abstrak

Makalah ini menunjukkan bagaimana menentukan lokalisasi kendaraan otonom. Lokalisasi merupakan proses penentuan tempat dan arah kendaraan otonom saat ini di lingkungannya. Berdasarkan pengetahuan tempat dan arah saat ini, kendaraan otonom dapat mengendalikan diri menuju tujuannya. Penentuan tempat dan arah kendaraan didapatkan dari sensor-sensor seperti Global Positioning System (GPS), Inertial Measurement Unit (IMU), odometry dan kamera Real-Time Appearance-Based (RTAB). Masalah muncul saat semua data yang diterima dari sensor-sensor ini mempunyai kesalahan dengan standar deviasi sendiri-sendiri. Selain itu ketersediaan data dari setiap sensor mempunyai waktu dan periode sendiri. Diperoleh metoda ilmiah melalui sebuah penelitian *library research* berupa penggunaan extended Kalman filter untuk mendapatkan lokasi dan orientasi kendaraan otonom. Lokalisasi dicoba di lingkungan Robotic Operatic System (ROS) Humble.

Kata kunci: lokalisasi, kendaraan otonom, extended kalman filter

I. Pendahuluan

Dalam makalah ini, digunakan metoda berdasarkan Extended Kalman Filter (EKF) untuk mendapatkan lokalisasi kendaraan otonom. Digunakan data dari gabungan odometri, gyro dan laser radar sebagai masukan, sehingga didapatkan posisi relatif dan arah absolut[1]. Dengan perkembangan teknologi, kendaraan otonom mengalami perkembangan pesat. Sekalipun demikian, konsumen mengajukan permintaan yang lebih tinggi terhadap kendaraan otonom baik untuk fungsi maupun kinerja karena semakin kompleksnya lingkungan dan tugas. Data dari sensor seringkali mengandung penyimpangan/deviasi yang dinyatakan dalam standar deviasi dan ketersediaan data dari sensor berbeda dalam periode. Lokalisasi kendaraan berarti mengetahui di mana dan ke arah mana kendaraan saat ini, sehingga dapat direalisasikan sisi otonom kendaraan yaitu kendaraan dapat bergerak dengan sendirinya dari asal ke tujuan.

Lokalisasi kendaraan dengan tingkat akurasi tinggi didapatkan dengan menggunakan extended kalman filter. Pokok permasalahan dalam penentuan/lokalisasi kendaraan otonom adalah mendapatkan letak dan arah tertentu dari pengolahan/perhitungan data yang diperoleh dari sensor-sensor yang mempunyai standar deviasi dan periode tersendiri. Hasil perhitungan (fusi) yang melibatkan semua data dari sensor-sensor akan berupa letak dan arah yang mempunyai fitur standar deviasi terkecil. Secara ontologi diperoleh pengertian untuk menjaga komunikasi antar subsistem agar terjadi pertukaran data dan pengolahan data secepat dan se-efektif mungkin. Secara epistemologi penelitsn dilakukan dengan deduktif, dengan berfikir secara rasional dan bersifat konsisten dengan pengetahuan yang dikumpulkan sebelumnya. Secara konsisten dan koheren memberikan penjelasan yang rasional kepada objek yang berada fokus pada penelaahan. Secara aksiologi, dipertimbangkan manfaat dari lokalisasi untuk peningkatan akurasi kendaraan otonom yang pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi penggunaan kendaraan otonom.

Pertanian sangat membutuhkan perombakan revolusioner, karena lahan yang tersedia untuk bercocok tanam tidak lagi cukup untuk memenuhi kebutuhan pangan populasi global yang terus bertambah. Sebuah laporan menunjukkan bahwa permintaan akan makanan dan serat diproyeksikan akan melonjak hingga 60% pada tahun 2050. Mengingat hal ini, pertanian presisi muncul sebagai solusi potensial dan revolusi pertanian berikutnya, yang didorong oleh kemajuan teknologi sensor [2].

Telah dikembangkan sebuah kendaraan darat tanpa awak untuk penyemprotan pertanian. Agar kendaraan ini dapat mendeteksi gulma dan melakukan penyemprotan, ia dilengkapi dengan kamera stereo. Kamera tersebut digunakan untuk membangun lingkungan pemetaan dua dimensi di atas gambar yang diambil. Dengan menggunakan sistem ini, operasi seperti menampilkan lokasi kendaraan, tanaman yang terdeteksi, keberadaan rintangan, dan rute potensial yang akan diambil dilakukan. Metode pemetaan ini dirancang khusus [3].

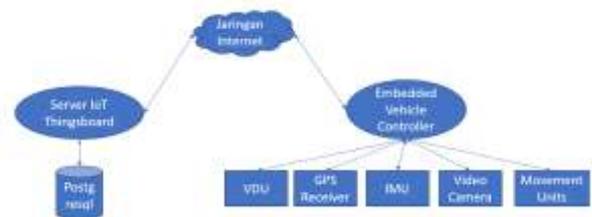
O. Barrero dan kawan-kawan mengembangkan sistem pelacakan lintasan untuk *unmanned ground vehicle* (UGV) tipe skid-steering menggunakan *model-based predictive controller* (MBPC). Bagian pertama makalah mereka menjelaskan platform UGV, kemudian metodologi pemodelan arah sudut UGV ditunjukkan, dan akhirnya disajikan desain dan penerapan strategi kontrol pelacakan lintasan[4].

Kombinasi *differential global positioning system* (DGPS) dan LiDAR juga banyak digunakan dalam berkendara secara otonom. Pendekatan praktis untuk melokalisasi kendaraan otonom di jalan lokal disediakan. Pemanfaatan data yang dihasilkan oleh DGPS dan LiDAR membantu kendaraan dilokalisasi. Uji coba eksperimental kendaraan menunjukkan bahwa penggabungan ini berhasil. Namun, solusi berbiaya rendah kami terdiri dari realisasi sistem DGPS untuk adopsi penggunaan potensial dalam konteks negara-negara berkembang[5],[6].

II. Metode Penelitian

Sistem otonom yang dilengkapi perangkat untuk mendapatkan lokalisasi mengandalkan jaringan Internet agar dapat dilakukan pemantauan kendaraan otonom dengan presisi tinggi. Lokasi saat ini bisa diperoleh dengan menggunakan sensor-sensor yaitu Global Positioning System (GPS), Inertial Measurement Unit (IMU), odometry dan kamera Real-Time Appearance-Based (RTAB).

Selanjutnya, setelah diketahui posisi saat ini, diperlukan dua jenis komputer yang terlibat di pengelolaan kendaraan otonom atau peralatan pengukur yaitu Server IoT Thingsboard dan Embedded Vehicle Controller. Server IoT Thingsboard diletakkan di pusat komputer menyimpan semua data terlibat dalam misi yang dilakukan perangkat IoT dalam sistem basisdata Postgres. Pertukaran data antara dua jenis komputer diperlihatkan di Gambar 1. Sensor-sensor yang diperlukan untuk mendapatkan berkaitan dengan letak kendaraan saat ini dibanding dengan satelit yang mengorbit bumi, arah kendaraan dibanding dengan magnet bumi, kecepatan linier kendaraan, kecepatan radial kendaraan, dan kamera yang dapat menentukan seberapa besar (berapa selisih jarak) kemungkinan gambar baru dibanding dengan gambar sebelumnya.



Gambar 1. Diagram Konteks

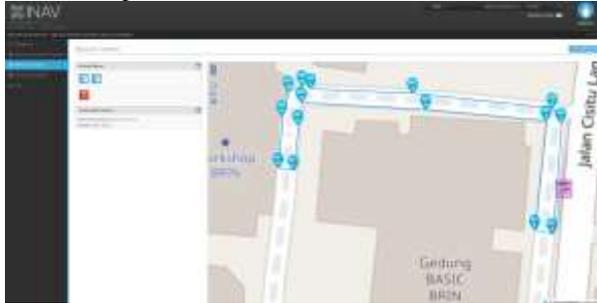
Embedded Vehicle Controller merupakan perangkat pintar yang dipasang pada kendaraan otonom untuk mengendalikan kendaraan menjalankan suatu misi, misalnya pengangkutan tandan kelapa sawit dari tempat pengumpulan ke pabrik. Misi yang harus dilakukan ditentukan oleh Server IoT Thingsboard atau dari masukan dari VDU kendaraan. Untuk mengetahui tempat keberadaan dan arah kendaraan diperlukan sensor GPS Receiver, odometry, IMU dan video camera, yang kemudian difusi dengan kalman filter diperluas sehingga memiliki presisi 4 cm. Agar kendaraan dapat bergerak dengan mudah di permukaan lintasan licin, diperlukan roda lumpur yang mempunyai profil kasar.

Tahapan yang harus dilakukan adalah menentukan lintasan, perhitungan lokasi dan orientasi kendaraan dan pelacakan lintasan kendaraan.

II.1 Menentukan Lintasan

Pertama-tama ditentukan lintasan yang terdiri titik titik lokasi dari kendaraan yang harus dilalui. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak yang menghasilkan lintasan. Salah satu perangkat lunak yang bisa digunakan adalah INAV yang menghasilkan himpunan titik-titik lintasan berupa koordinat lintang, bujur dan

ketinggian. Gambar 3. Memperlihatkan proses pembuatan lintasan menggunakan aplikasi INAV. Akan dihasilkan file misi dalam format xml yang mana setiap titik yang akan dilewati merupakan elemen WAYPOINT yang memiliki koordinat lintang (latitude), bujur (longitude) dan ketinggian (altitude). Contoh isi dari berkas xml yang dihasilkan diperlihatkan Gambar 3.



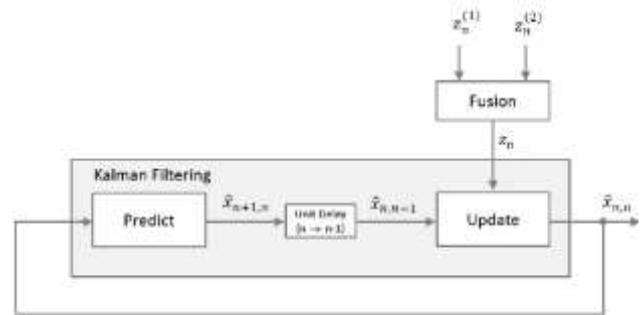
Gambar 2. Penentuan lintasan yang harus dilalui kendaraan

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<mission>
  <version value="2.3-pedal"/>
  <wp src="107.6114403" src="-6.8814676" home-x="0" home-y="0" zoom="21"/>
  <missionitem no="1" action="WAYPOINT" lat="-6.8812678" lon="107.6112389" alt="50"/>
  <missionitem no="2" action="WAYPOINT" lat="-6.8812771" lon="107.6114561" alt="50"/>
  <missionitem no="3" action="WAYPOINT" lat="-6.881309" lon="107.6117525" alt="50"/>
  <missionitem no="4" action="WAYPOINT" lat="-6.881341" lon="107.6117713" alt="50"/>
  <missionitem no="5" action="WAYPOINT" lat="-6.8815753" lon="107.6117525" alt="50"/>
  <missionitem no="6" action="WAYPOINT" lat="-6.8815673" lon="107.611715" alt="50"/>
  <missionitem no="7" action="WAYPOINT" lat="-6.8813357" lon="107.6117391" alt="50"/>
  <missionitem no="8" action="WAYPOINT" lat="-6.8813117" lon="107.6114843" alt="50"/>
  <missionitem no="9" action="WAYPOINT" lat="-6.881297" lon="107.6112201" alt="50"/>
  <missionitem no="10" action="WAYPOINT" lat="-6.881345" lon="107.6112121" alt="50"/>
  <missionitem no="11" action="WAYPOINT" lat="-6.8814408" lon="107.6112027" alt="50"/>
  <missionitem no="12" action="WAYPOINT" lat="-6.8814355" lon="107.611705" alt="50"/>
  <missionitem no="13" action="WAYPOINT" lat="-6.881325" lon="107.611785" alt="50"/>
  <missionitem no="14" action="WAYPOINT" lat="-6.8812731" lon="107.611926" alt="50"/>
  <missionitem no="15" action="WAYPOINT" lat="-6.8812618" lon="107.6112211" alt="50"/>
</mission>
```

Gambar 3. Berkas xml yang dihasilkan

II.2 PERHITUNGAN LOKALISASI DAN ORIENTASI KENDARAAN

Teknik filter Kalman diperluas dimanfaatkan untuk menggabungkan data GPS, odometri roda dan IMU, memfasilitasi pelacakan variabel penting seperti orientasi, posisi, kecepatan maju, kecepatan sudut dan bias sensor. Penggabungan data IMU dan GPS untuk keperluan navigasi kendaraan pertanian di lapangan berupa lokasi dan orientasi kendaraan diilustrasikan pada Gambar 4.[7]



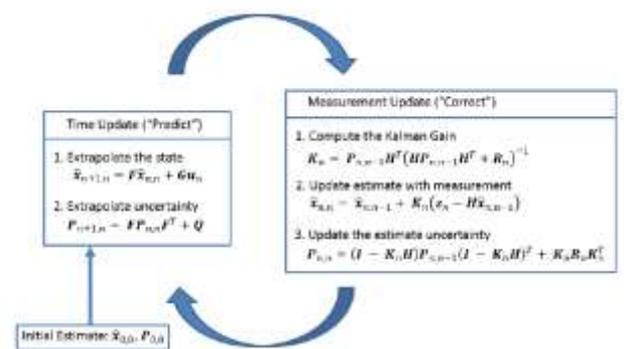
Gambar 4. Penggabungan data IMU, odometri roda, dan GPS

Dua atau lebih sensor menghasilkan pengukuran $z_n^{(1)}, z_n^{(2)}, \dots, z_n^{(k)}$ dengan kovarian pengukuran $R_n^{(1)}, R_n^{(2)}, \dots, R_n^{(k)}$. Dengan menganggap bahwa pengukuran merupakan distribusi normal, maka:

$$R_n^{-1} = \sum_{i=1}^k R_i^{-1}$$

$$z_n = R_n \sum_{i=1}^k (R_n^{(i)})^{-1} z_n^{(i)}$$

Data yang berasal dari sumber IMU dan GPS disediakan sebagai masukan pada persamaan filter Kalman diperluas. Masukan ini bertujuan untuk memperkirakan posisi dan orientasi perangkat. Algoritma persamaan model filter Kalman diperluas diperlihatkan Gambar 5.



Gambar 5. Algoritma filter Kalman diperluas

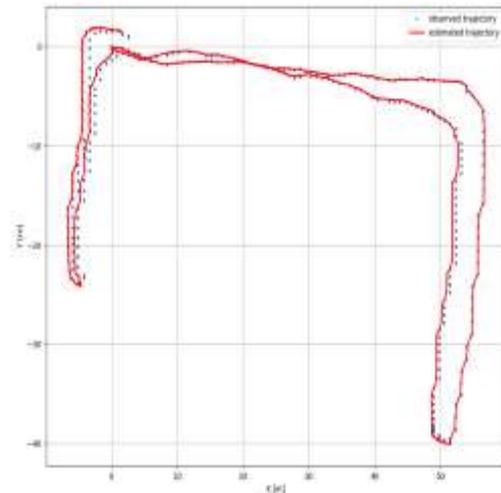
Persamaan dasar model filter Kalman diperluas diperlihatkan pada Gambar 7.

	Persamaan	Nama
Predict	$\hat{x}_{n+1,n}$ $= F \hat{x}_{n,n}$ $+ G u_n$	State Extrapolation

	$P_{n+1,n} = FP_{n,n}F^T + Q$	Covariance Extrapolation
Update	$\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n \times (z_n - H\hat{x}_{n,n-1})$	State Update
	$P_{n,n} = (I - K_nH)P_{n,n-1} \times (I - K_nH)^T + K_nR_nK_n^T$	Covariance Update
	$K_n = P_{n,n-1}H^T \times (HP_{n,n-1}H^T + R_n)^{-1}$	Kalman Gain
Auxiliary	$z_n = Hx_n$	Measurement Equation
	$R^n = E(v_n v_n^T)$	Measurement Covariance
	$Q_n = E(\omega_n \omega_n^T)$	Process Noise Covariance
	$P_{n,n} = E(e_n e_n^T) = E \left(\begin{pmatrix} x_n - \hat{x}_{n,n} \\ x_n - \hat{x}_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n - \hat{x}_{n,n} \\ x_n - \hat{x}_{n,n} \end{pmatrix}^T \right)$	Estimation Covariance

Gambar 7. Persamaan model filter Kalman yang diperluas

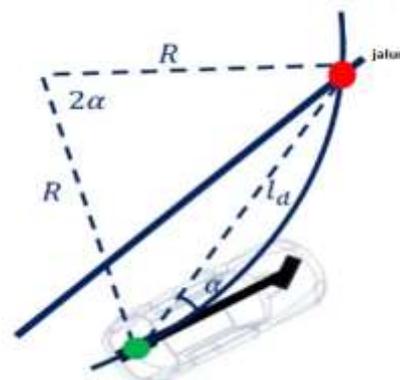
Di sini, variabel ω dan v masing-masing mewakili gangguan proses dan gangguan observasi. Galat ini dianggap mengikuti distribusi Gaussian multivariat rata-rata nol, dengan kovarian masing-masing Q dan R . Vektor kendali dilambangkan dengan u_n . Filter Kalman diperluas, pada dasarnya, menandakan kondisi nonlinier dari metodologi filter Kalman. Contoh penggabungan data GPS dan IMU diperlihatkan Gambar 8 yang menggambarkan lintasan yang dibuat di daerah Cisu Kota Bandung. Titik-titik biru merupakan hasil pengukuran menggunakan GPS dan lintasan merah merupakan hasil fusi GPS dan IMU.



Gambar 8. Contoh penggabungan data GPS dan IMU

II.3 Pelacakan Lintasan Kendaraan

Setelah lintasan yang harus dilewati ditentukan dan posisi kendaraan saat ini diketahui dengan fusi data sensor, langkah selanjutnya adalah menentukan sudut setir sehingga kendaraan dapat diarahkan untuk selalu mengikuti lintasan yang telah ditentukan sebelumnya. Pada tahap awal algoritma yang digunakan untuk penentuan sudut setir adalah algoritma Pure Pursuit[8]. Algoritma Pure Pursuit adalah algoritma pengendalian pelacakan jalur yang menghitung kelengkungan yang diinginkan yang harus dibuat kendaraan, untuk mencapai titik tujuan. Algoritme ini menghubungkan bagian tengah poros belakang ke posisi tujuan pada jarak tertentu, yang dikenal sebagai jarak pandang ke depan, di depan kendaraan. Gambar 9. Memperlihatkan jarak l_d dari poros tengah belakang ke titik tujuan di jalur lintasan yang ditentukan sebelumnya.



Gambar 9. Penentuan sudut untuk mengarahkan kendaraan ke jarak ke depan

Sudut α didapatkan dengan menggunakan formula:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x_{tujuan} - x_{sekarang}}{y_{tujuan} - y_{sekarang}} \right)$$

Lintasan yang dilalui K, didapatkan dengan penurunan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{l_d}{\sin 2\alpha} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}$$

$$\frac{l_d}{2 \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{R}{\cos \alpha}$$

$$\frac{l_d}{\sin \alpha} = 2R$$

$$\text{Kurva Lintasan} = K = \frac{1}{R} = \frac{2 \sin \alpha}{l_d}$$

Sehingga dapat ditentukan sudut setir δ sebagai:

$$K = \frac{2 \sin \alpha}{l_d} \quad \delta = \tan^{-1} KL$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{2 \sin \alpha}{l_d} \times L \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \alpha}{l_d} \right)$$

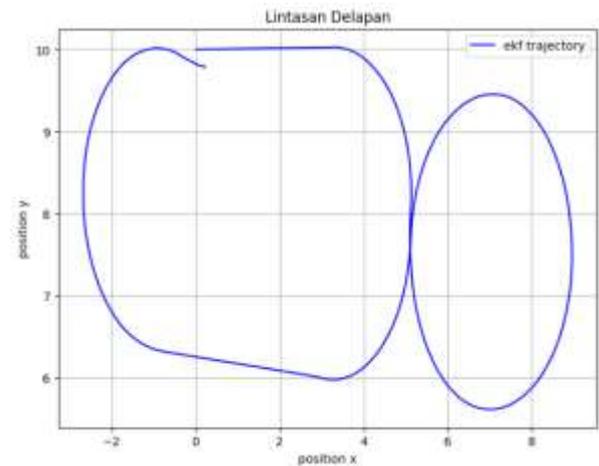
III. Hasil dan Pembahasan

Sistem lokalisasi akan diimplementasikan pada kendaraan otonom seperti terlihat pada gambar 10.

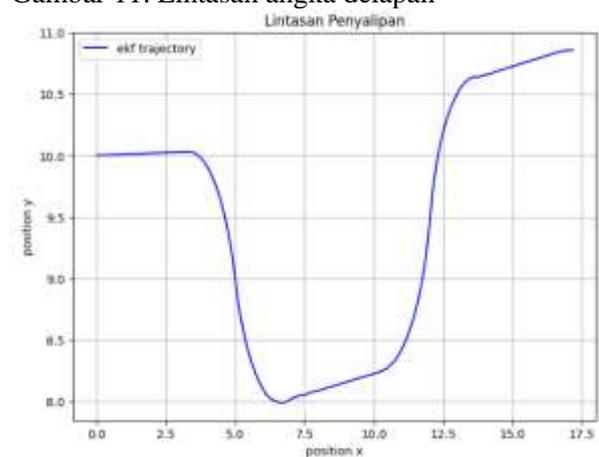


Gambar 10. Kendaraan otonom untuk implementasi lokalisasi

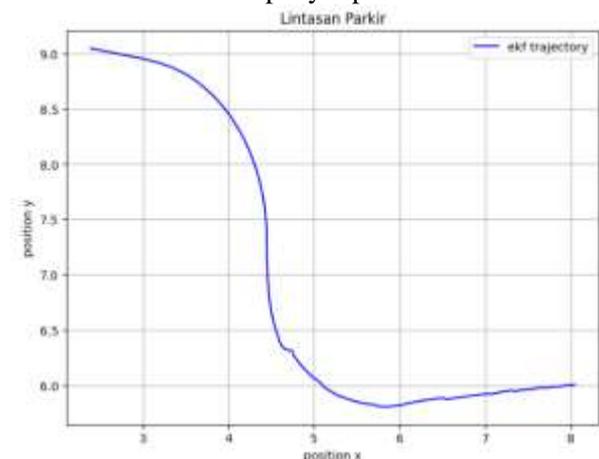
Sebelum diuji lapangan, dilakukan pengujian di lingkungan Robotic Operating System (ROS) Humble untuk membuat lintasan angka delapan, lintasan penyalipan dan lintasan parkir. Lintasan-lintasan ini diperlihatkan di Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 11. Lintasan angka delapan

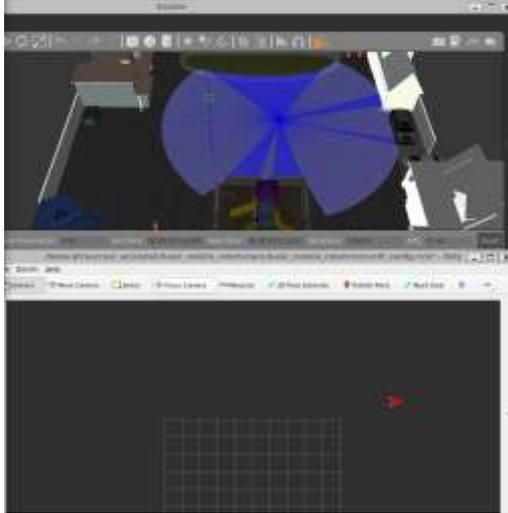


Gambar 12. Lintasan penyalipan



Gambar 14. Lintasan Parkir

Lingkungan grafis ROS untuk menguji lintasan parkir diperlihatkan Gambar 15.



Gambar 15 Lingkungan ROS menguji lintasan parkir

IV. Kesimpulan

Saat lokalisasi diterapkan dalam lingkungan simulasi di ROS, didapatkan hasil dengan tingkat presisi dan kepercayaan yang baik untuk lokalisasi kendaraan otonom. Diuji dengan membuat lintasan angka delapan, lintasan penyalipan dan lintasan parkir.

REFERENSI

- [1] G. Li, D. Qin, and H. Ju, "Localization of Wheeled Mobile Robot Based on Extended Kalman Filtering," *MATEC Web Conf.*, vol. 22, pp. 1–5, 2015, doi: 10.1051/mateconf/20152201061.
- [2] M. K. Verma and M. Yadav, "Navigating the Agricultural Fields : Affordable GNSS And IMU-based System and Data Fusion for Automatic Agricultural Vehicle ' s Navigation Navigating the Agricultural Fields : Affordable GNSS And IMU-based System and Data Fusion for Automatic Agricultura," no. January, 2024.
- [3] F. N. Ortatas, H. Ulutas, M. E. Sahin, and F. Ciftci, "Autonomous Mapping and Spraying in Precision Agriculture using Unmanned Ground Vehicles," *2023 Innov. Intell. Syst. Appl. Conf. ASYU 2023*, pp. 0–4, 2023, doi: 10.1109/ASYU58738.2023.10296767.
- [4] O. Barrero and J. C. Tique, "MBPC controller for UGV Trajectory Tracking," *Proc. 2021 IEEE 5th Colomb. Conf. Autom. Control. CCAC 2021*, pp. 314–319, 2021, doi: 10.1109/CCAC51819.2021.9633291.
- [5] E. F. Abdelhafid, Y. M. Abdelkader, M.

- Ahmed, E. H. Doha, E. K. Oumayma, and E. A. Abdellah, "Localization based on DGPS for Autonomous Robots in Precision Agriculture," *2022 2nd Int. Conf. Innov. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. IRASET 2022*, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/IRASET52964.2022.9737758.
- [6] N. Khalid, H. Elkhiri, E. Oumaima, N. Elfahsi, Z. F. Zahra, and K. Abdellatif, "Revolutionizing Weed Detection in Agriculture through the Integration of IoT, Big Data, and Deep Learning with Robotic Technology," *Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Mechatronics Eng. ICECCME 2023*, no. July, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/ICECCME57830.2023.10252598.
- [7] A. Becker, *Kalman filter from the ground up*. 2023.
- [8] N. A. Shneydor, "Pure Pursuit," *Missile Guid. Purs.*, no. January, pp. 47–76, 1998, doi: 10.1533/9781782420590.47.