

SIMULASI SISTEM LOKALISASI BERBASIS EXTENDED KALMAN FILTER PADA ROBOT CLEARPATH HUSKY

*Abang M. Rayhan M. Saputra¹, M. Munadi², Joga Dharma Setiawan²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: ryanengineering02@outlook.com

Abstrak

Lokalisasi yang akurat sangat penting untuk pengoperasian robot otonom, terutama dalam lingkungan dinamis dan kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem lokalisasi berbasis *Extended Kalman Filter* (EKF) pada robot Clearpath Husky. Sistem ini mengintegrasikan data dari sensor GPS, IMU, dan odometri untuk meningkatkan akurasi dan keandalan lokalisasi. Metode penelitian melibatkan simulasi menggunakan ROS (*Robot Operating System*) dan pengujian di lingkungan Gazebo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor GPS, IMU, dan odometri menghasilkan deviasi posisi yang lebih kecil dibandingkan dengan penggunaan odometri saja. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan akurasi lokalisasi robot otonom dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk lingkungan perkotaan dan dalam ruangan.

Kata Kunci: *extended kalman filter*; gazebo; lokalisasi; ros

Abstract

Accurate localization is crucial for the operation of autonomous robots, especially in dynamic and complex environments. This research aims to design and analyze a localization system based on the Extended Kalman Filter (EKF) for the Clearpath Husky robot. The system integrates data from GPS, IMU, and odometry sensors to improve localization accuracy and reliability. The research method involves simulation using ROS (Robot Operating System) and testing in the Gazebo environment. The results show that the integration of GPS, IMU, and odometry sensors produces smaller position deviations compared to using odometry alone. This system is designed to enhance the localization accuracy of autonomous robots in various environmental conditions, including urban and indoor environments.

Keywords: *extended kalman filter*; gazebo; lokalisasi; ros

1. Pendahuluan

Lokalisasi yang akurat merupakan komponen kritis dalam pengoperasian robot otonom, terutama dalam lingkungan yang dinamis dan kompleks. Kemampuan robot untuk menentukan posisi dan orientasinya secara tepat sangat penting untuk navigasi yang aman dan efisien. Namun, metode lokalisasi tradisional seperti GPS memiliki keterbatasan, terutama di lingkungan perkotaan atau dalam ruangan di mana sinyal GPS dapat terhalang atau terganggu. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih canggih, seperti integrasi sensor dan algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF), untuk meningkatkan akurasi dan keandalan sistem lokalisasi [1][2][3].

Extended Kalman Filter (EKF) adalah algoritma estimasi keadaan yang paling umum digunakan untuk sistem non-linear, seperti robot otonom. EKF menggabungkan data dari berbagai sumber sensor melalui teknologi fusi informasi multi-sensor efektif untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif, akurat, dan dapat diandalkan. Teknologi ini menemukan aplikasi penting dalam pelokalan multi-target, yang mengarah pada peningkatan akurasi lokalisasi [4][5][6]. Integrasi sensor ini memungkinkan sistem untuk mengatasi keterbatasan sensor individu, seperti drift pada IMU atau gangguan sinyal pada GPS. Dengan menggunakan EKF, sistem dapat mengurangi kesalahan estimasi dan meningkatkan akurasi lokalisasi, bahkan dalam kondisi lingkungan yang menantang. Dalam penelitian ini, GPS, IMU, dan Odometri digunakan untuk mendapatkan posisi absolut dari GPS dan sekaligus *heading* dari robot yang dihasilkan oleh IMU [7].

Untuk mengatasi tantangan ini, digunakan Robot Operating Software (ROS), yang menawarkan lapisan abstraksi antara perangkat keras dan lapisan aplikasi, menyediakan primitif manipulasi perangkat keras yang menyembunyikan heterogenitas perangkat keras yang mendasarinya, serta membantu meningkatkan komunikasi antar robot. Pendekatan ini telah terbukti efektif dalam mempercepat pengembangan perangkat lunak robotik, dan dengan lebih dari 140 robot (humanoid, drone, mobil, dll.) dalam daftar yang didukung secara resmi, ROS dianggap sebagai standar de facto untuk pemrograman robot. Sebagai proyek sumber terbuka, ROS bergantung pada kontribusi dari para pengembang di seluruh dunia. Aplikasi ROS berkomunikasi menggunakan arsitektur *publish-subscribe*, di mana tujuannya adalah untuk memungkinkan non-ahli membangun perangkat lunak dengan cepat yang mencakup fungsionalitas canggih seperti perencanaan jalur, pengenalan objek, dan dalam kasus makalah ini, pelokalan. ROS juga menyediakan sistem manajemen paket untuk menyederhanakan penggunaan ulang kode, sehingga pengembang dapat menyumbangkan aplikasi mereka kembali ke ROS dalam bentuk paket [8]. Selain itu, Gazebo diciptakan oleh Open Source Robotics Foundation, yang juga menciptakan ROS. Gazebo sudah terinstal dengan instalasi ROS lengkap dan dengan demikian telah memiliki banyak pengikut. Gazebo mendukung beberapa engine physics termasuk ODE, Bullet, DART, dan Simbody. Salah satu fitur utama dari Gazebo dilengkapi dengan contoh-

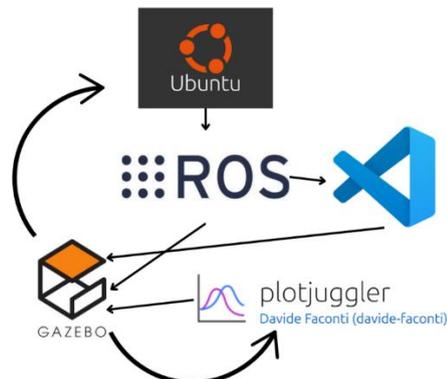
contoh model robot dan dunia lingkungan yang sudah disiapkan. Komunitas Gazebo aktif dalam menciptakan model robot dan dunia lingkungan baru. Dunia pertanian luar ruangan, inspeksi industri, dan lingkungan konstruksi dalam ruangan adalah beberapa contoh yang dirilis oleh Clearpath Robotics [9]. Data yang dihasilkan dari simulasi ini kemudian akan divisualisasikan menggunakan software *Plotjuggler* dan *Rviz* di mana topik yang di-*publish* oleh robot akan di-*subscribe* oleh *Plotjuggler* secara *real-time* [10].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem lokalisasi berbasis *Extended Kalman Filter* yang menggunakan ROS sebagai *middleware* untuk menjembatani komunikasi antara software dan hardware. Untuk mendukung simulasi ini, *Gazebo* digunakan untuk menghasilkan data simulasi. Untuk mengevaluasi kinerja model, *Plotjuggler* digunakan untuk mengekstrak data yang dihasilkan dari simulasi agar dapat dilihat data yang dihasilkan secara *real-time*.

2. Metode Penelitian

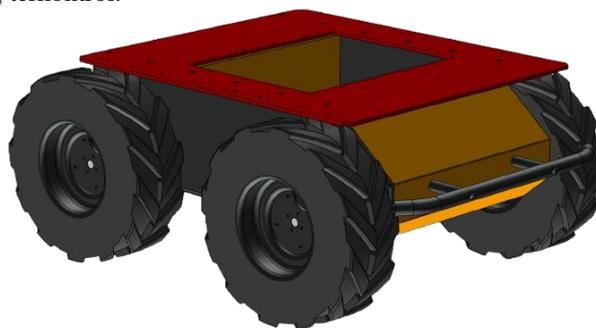
Penelitian ini mengikuti tahapan sistematis dalam mengembangkan sistem lokalisasi berbasis EKF untuk robot Clearpath Husky. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan sistem, simulasi, dan pengujian. Berikut adalah penjelasan detail dari setiap tahapan:

Dapat terlihat pada Gambar 1, studi literatur melibatkan penelusuran literatur terkait sistem lokalisasi, *Extended Kalman Filter*, dan integrasi sensor. Studi literatur bertujuan untuk memahami landasan teori dan metode yang relevan untuk merancang sistem lokalisasi yang efektif. Perancangan Sistem dilakukan dengan mengintegrasikan data dari sensor GPS, IMU, dan odometri menggunakan algoritma EKF di mana semua ini dilakukan dengan Linux Ubuntu sebagai *operating system*. Tahap ini mencakup pemodelan dinamika robot dan pengukuran sensor, serta implementasi algoritma EKF dalam ROS (Robot Operating System). Simulasi dilakukan menggunakan ROS dan *Gazebo* untuk menguji kinerja sistem lokalisasi dalam berbagai skenario lingkungan, termasuk lingkungan perkotaan dan dalam ruangan. Simulasi ini memungkinkan peneliti untuk memvalidasi kinerja sistem sebelum pengujian aktual. *Software* yang digunakan pada penelitian ini adalah *ROS Noetic*, *Gazebo*, dan *Rviz* untuk simulasi dan visualisasi.

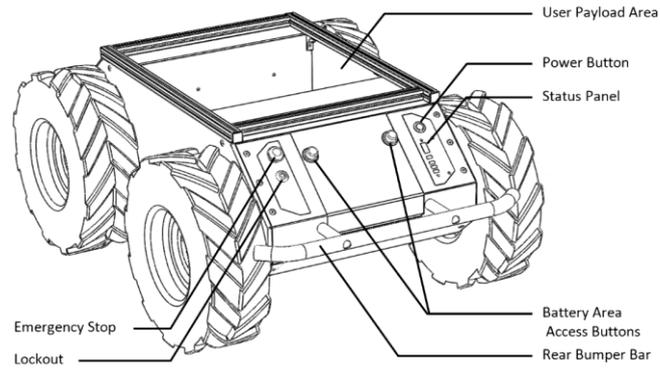


Gambar 1 Metode penelitian

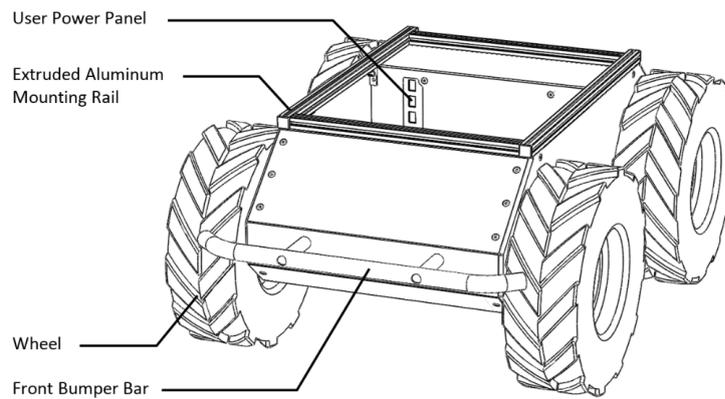
Selain itu, model 3D robot Husky pada Gambar 2 Gambar 3 Gambar 4 didapatkan dari github resmi dari Clearpath untuk digunakan pada simulasi yang menunjukkan desain fisik robot dari tampak depan, belakang sekaligus dengan fitur yang dimiliki oleh Husky A200. Model ini kemudian akan di-*import* ke dalam *Gazebo* dan *Rviz* juga lengkap dengan sensor IMU dan GPS seperti pada Gambar 6 Model Husky di *Rviz* untuk mereplikasi kondisi nyata, memungkinkan pengujian algoritma EKF dalam lingkungan virtual yang terkontrol.



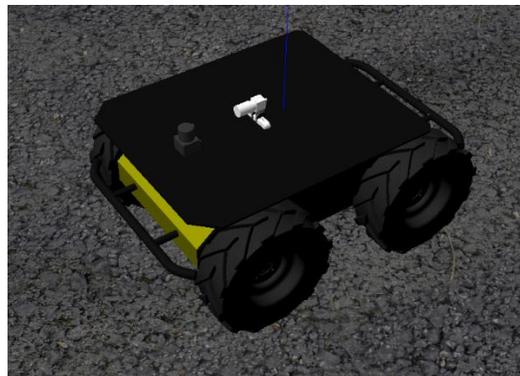
Gambar 2 Desain model Husky A200



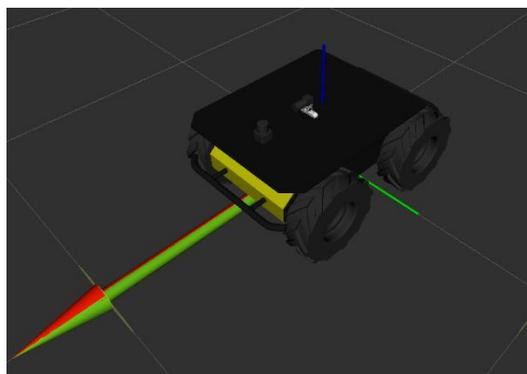
Gambar 3 Tampak depan eksterior Husky



Gambar 4 Tampak belakang eksterior Husky



Gambar 5 Model Husky di Gazebo



Gambar 6 Model Husky di Rviz

visualisasi model EKF di Rviz, pengembangan kode di *Visual Studio Code*, dan evaluasi hasil pengujian. Proses *filtering* melibatkan parameter kovarian yaitu matriks kebisingan atau *noise* di mana kovarian yang rendah ataupun tidak ada kovarian mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat kepercayaan data dari sensor, dibandingkan dengan kovarian yang tinggi di mana ini mengindikasikan bahwa model EKF memiliki kepercayaan rendah dengan sensor atau memiliki kepercayaan yang lebih tinggi pada sistem EKF tersebut.

Validasi dilakukan dengan mengevaluasi akurasi dan keandalan sistem lokalisasi. Hasil lokalisasi diberikan dengan plotting 2 dimensi axis x dan y dari *pose* robot dan perbandingan posisi akhir asli dari robot dengan model EKF.

3. Hasil dan Pembahasan

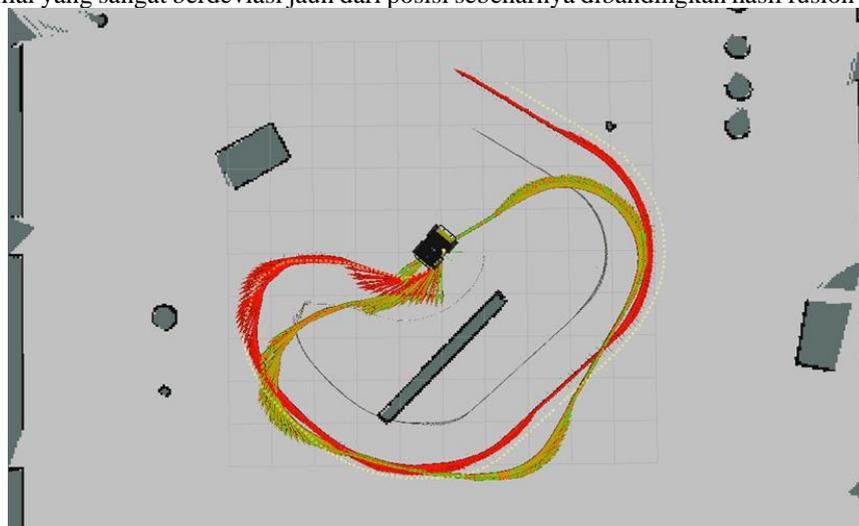
3.1 Hasil Filtering

Berdasarkan simulasi yang dilakukan di Gazebo, sistem lokalisasi berbasis *Extended Kalman Filter* (EKF) diuji dengan tiga konfigurasi sensor yang berbeda: (1) hanya odometri, (2) odometri dan IMU, serta (3) odometri, IMU, dan GPS. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi sensor GPS, IMU, dan odometri menghasilkan deviasi posisi yang lebih kecil dibandingkan dengan penggunaan odometri saja. Konfigurasi sensor ini dapat dilihat pada Tabel 1 yang menunjukkan bahwa odometri hanya mengukur pergerakan roda (x' , y' , z'), sementara IMU menyediakan data orientasi (Φ , θ , Ψ). GPS memberikan posisi absolut (x , y , z). Integrasi ketiga sensor-sensor ini memungkinkan sistem EKF menggabungkan keunggulan masing-masing: odometri untuk gerakan jangka pendek, IMU untuk stabilisasi orientasi, dan GPS untuk koreksi posisi absolut.

Tabel 1 Konfigurasi sensor

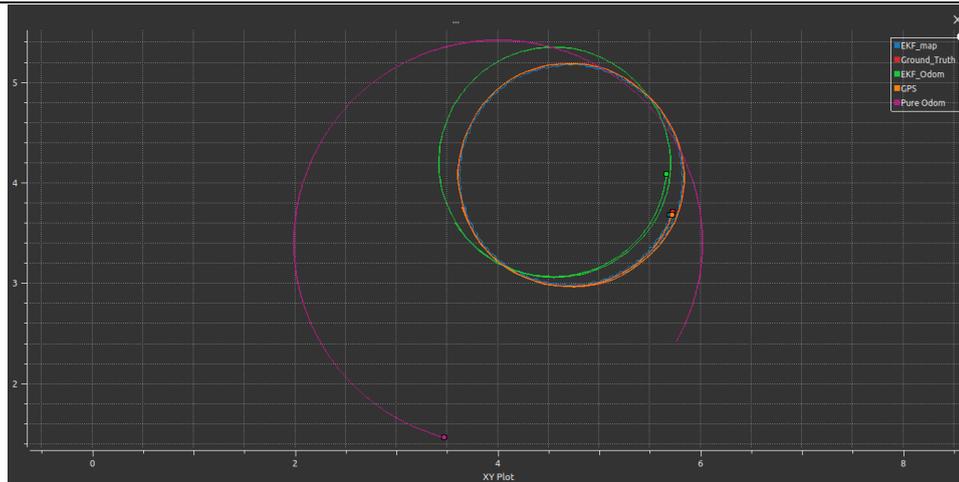
Sensor	Vektor Konfigurasi; 0 = <i>false</i> , 1 = <i>true</i>											
	x	y	z	Φ	θ	Ψ	x'	y'	z'	Φ'	θ'	Ψ'
Odometri	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
IMU	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
GPS	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hasil dari model EKF dapat divisualisasikan dari berbagai setting sensor di mana *pose* berwarna merah mengindikasikan murni odometri, oranye mengindikasikan Odometri dengan IMU, dan hijau mengindikasikan Odometri, IMU dan juga GPS. Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa dari semua setting sensor yang telah dicoba bahwa murni odometri memiliki hasil atau nilai yang sangat berdeviasi jauh dari posisi sebenarnya dibandingkan hasil fusion dengan IMU dan GPS.



Gambar 6 visualisasi dari Extended Kalman Filter menggunakan Rviz

Plot posisi 2D pada Gambar 7 yang dihasilkan menggunakan *Plotjuggler* menunjukkan fluktuasi posisi robot selama simulasi. Pada konfigurasi odometri, kurva posisi (pink) mengalami drift eksponensial seiring waktu. Integrasi IMU (hijau) mengurangi drift tetapi masih menunjukkan fluktuasi periodik. Sementara itu, kurva GPS+IMU+odometri (biru) memiliki hasil yang paling mendekati dengan *ground truth* (biru), membuktikan bahwa koreksi GPS (oranye) secara berkala menghilangkan akumulasi kesalahan.



Gambar 7 plotting 2 dimensi pose robot husky

3.2 Hasil Validasi

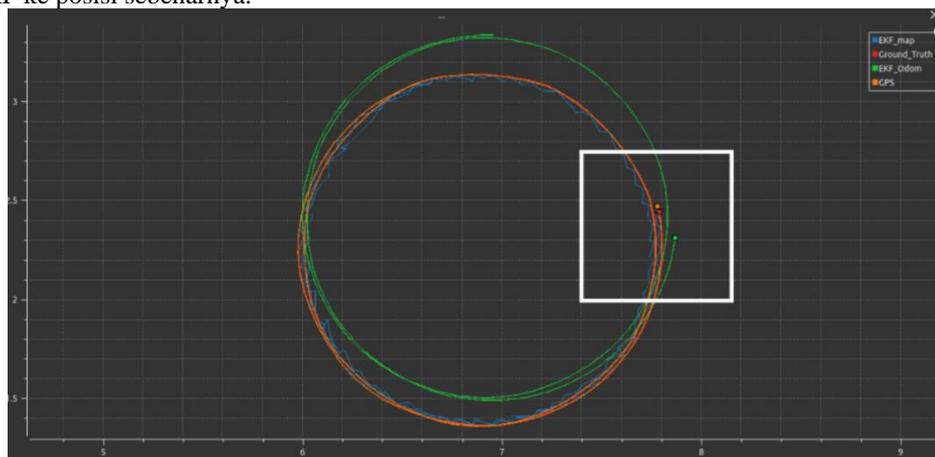
Hasil yang didapatkan dari fusion sensor ini dapat dilihat pada Tabel 2 Deviasi dari tiga setting sensor yang berbedayang menunjukkan bahwa penggunaan odometri saja menghasilkan deviasi posisi yang sangat besar, yaitu 329.20 m (sumbu x) dan 688.84 m (sumbu y), karena akumulasi kesalahan dari selip roda dan medan tidak rata. Penambahan IMU mengurangi deviasi menjadi 12.50 m (x) dan 15.29 m (y), karena IMU memberikan koreksi orientasi yang stabil. Namun, deviasi terkecil dicapai dengan integrasi GPS, di mana deviasi turun menjadi 0.06 m (x) dan 0.20 m (y).

Tabel 2 Deviasi dari tiga setting sensor yang berbeda

Setting sensor	Estimasi Error Rata-rata x, y (m)	Estimasi Deviasi x, y (m)
Odometri	329.31, 689.65	329.20, 688.84
Odometri + IMU	12.61, 14.52	12.50, 15.29
Odometri + IMU + GPS	0.044, 0.105	0.06, 0.20

3.3 GPS Update

Dalam penelitian ini kita mengetahui bahwa GPS memiliki frekuensi atau update rate yang lebih rendah dibandingkan dengan odometri ataupun IMU, hal ini menyebabkan untuk hasil dari EKF yang telah fused dengan GPS untuk memiliki data yang tidak *continuous* di mana tiap beberapa detik ada GPS update yang mengarahkan kalman filter ke jalur GPS seperti pada Gambar 8 dan dapat dilihat secara detail pada Gambar 9 yang menunjukkan bahwa pembaruan GPS tetap efektif dalam mengarahkan EKF ke posisi sebenarnya.



Gambar 8 Plot data 2 dimensi untuk semua Setting



Gambar 9 Output Extended Kalman Filter di mana GPS mengoreksi EKF ke posisi sebenarnya

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa sistem lokalisasi berbasis *Extended Kalman Filter* (EKF) berhasil dikembangkan untuk robot Clearpath Husky. Dengan melihat dataset yang dihasilkan oleh simulasi *Gazebo*, integrasi sensor GPS, IMU, dan odometri menghasilkan deviasi posisi yang lebih kecil dibandingkan dengan penggunaan odometri saja di mana perbedaan deviasi yang dihasilkan dari fusi sensor adalah 0.60 m dan 0.20 m dalam axis x dan y dibandingkan dengan odometri saja yaitu 329.20 m dan 688.84 m. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan akurasi lokalisasi robot otonom dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk lingkungan perkotaan dan dalam ruangan. Implementasi sistem ini dapat membantu pengembangan robot otonom yang lebih andal dan efisien.

5. Daftar Pustaka

- [1] Q. Li and H. Zhu, "Performance evaluation of 2D LiDAR SLAM algorithms in simulated orchard environments," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 221, no. November 2023, p. 108994, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.108994.
- [2] M. Kheirandish, E. A. Yazdi, H. Mohammadi, and M. Mohammadi, "A fault-tolerant sensor fusion in mobile robots using multiple model Kalman filters," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 161, p. 104343, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.robot.2022.104343.
- [3] O. V. Altınpınar and V. Sezer, "A novel indoor localization algorithm based on a modified EKF using virtual dynamic point landmarks for 2D grid maps," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 170, no. August, p. 104546, 2023, doi: 10.1016/j.robot.2023.104546.
- [4] A. Kaczmarek, W. Rohm, L. Klingbeil, and J. Tchórzewski, "Experimental 2D extended Kalman filter sensor fusion for low-cost GNSS/IMU/Odometers precise positioning system," *Measurement*, vol. 193, no. March, p. 110963, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.110963.
- [5] Q. Luo, S. Li, X. Yan, C. Wang, Z. Zhou, and G. Jia, "An improved two-phase robust distributed Kalman filter," *Signal Processing*, vol. 220, no. February, p. 109438, 2024, doi: 10.1016/j.sigpro.2024.109438.
- [6] Q. Li, H. He, X. Chen, and J. Gao, "Learning-Based Vehicle State Estimation Using Gaussian Process Regression Combined with Extended Kalman Filter," *J. Franklin Inst.*, vol. 361, no. 9, p. 106907, 2024, doi: 10.1016/j.jfranklin.2024.106907.
- [7] Q. Li, Y. Zhuang, and J. Huai, "Multi-sensor fusion for robust localization with moving object segmentation in complex dynamic 3D scenes," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 124, no. October, p. 103507, 2023, doi: 10.1016/j.jag.2023.103507.
- [8] P. Estefo, J. Simmonds, R. Robbes, and J. Fabry, "The Robot Operating System: Package reuse and community dynamics," *J. Syst. Softw.*, vol. 151, pp. 226–242, 2019, doi: 10.1016/j.jss.2019.02.024.
- [9] A. Farley, J. Wang, and J. A. Marshall, "How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 120, no. April, p. 102629, 2022, doi: 10.1016/j.simpat.2022.102629.
- [10] A. Mitchell et al., "Results in Engineering A proposed methodology to develop digital twin framework for plasma processing," *Results Eng.*, vol. 24, no. November, p. 103462, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103462.