



Implementasi Sensor *Inertial Measurement Unit* untuk Sistem Odometri Kendaraan Otonom

Muhammad Agung Nursyeha^{1*}, Fazri Rahmadi Irwansyah², Riza Hadi Saputra³, Happy Aprillia⁴
¹²³⁴Teknik Elektro, Jurusan Teknologi Industri dan Proses, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

*Corresponding author: agung.nursyeha@lecturer.itk.ac.id

Received: 2/December/2022

Accepted: 30/August/2023

Revised: 17/May/2023

Published: 31/August/2023

To cite this article:

Nursyeha, M. A., Irwansyah, F. R., Saputra, R. H & Aprillia, H (2023). Implementasi Sensor Inertial Measurement Unit untuk Sistem Odometri Kendaraan Otonom. *SPECTA Journal of Technology*, 7(2), 556 - 565. [10.35718/specta.v7i2.784](https://doi.org/10.35718/specta.v7i2.784)

Abstract

Odometry enables a moving object to be estimated its position. Odometry is the determination of the movement of a vehicle based on sensor data taken periodically. Positioning is needed in decision making in autonomous vehicles. Accurate positioning can result in making the right decisions in autonomous vehicles, resulting in safe operations on the traffic. Odometry on vehicles generally uses wheels that are connected to an encoder. Through this system, errors in determining position are accumulated due to loss of traction between the wheels and the road. An odometric system that does not require contact with the road is required to reduce mechanical losses due to slip. In this study, an odometric system is proposed that measures vehicle displacement based on the vehicle acceleration measured periodically. To measure vehicle acceleration, the odometry system is equipped with an IMU sensor. ARM-based microcontroller is used to acquire acceleration data and perform displacement calculations. Vehicle displacements are estimated using Kalman Filter. This research discusses the performance of using the IMU sensor for the odometry system through experiments. Based on the tests that have been carried out, the resulting accuracy of the proposed odometry system reaches 63.7%.

Keywords: IMU, Odometry, Autonomous Vehicles, Kalman Filter

Abstrak

Melalui odometri, suatu objek yang bergerak dapat diestimasi posisinya. Odometri merupakan penentuan perpindahan suatu kendaraan berdasarkan data sensor yang diambil secara periodik. Penentuan posisi diperlukan dalam pengambilan keputusan pada kendaraan otonom. Penentuan posisi yang akurat dapat menghasilkan pengambilan keputusan yang tepat pada kendaraan otonom, sehingga menghasilkan operasional yang aman di jalan raya. Odometri pada kendaraan umumnya menggunakan roda yang terhubung dengan encoder. Melalui sistem tersebut, kesalahan dalam menentukan posisi yang terakumulasi dapat terjadi akibat hilangnya traksi antara roda dengan jalan. Sistem odometri yang tidak memerlukan kontak dengan jalan diperlukan untuk mengurangi rugi mekanis akibat selip. Pada penelitian ini, diajukan sistem odometri yang mengukur perpindahan kendaraan berdasarkan besar percepatan kendaraan yang diukur secara periodik. Untuk mengukur percepatan kendaraan, sistem odometri dilengkapi dengan sensor IMU. Mikrokontroler berbasis ARM digunakan untuk mengakuisisi data percepatan dan melakukan perhitungan perpindahan. Perpindahan kendaraan diestimasi menggunakan Kalman filter. Pada penelitian ini dibahas performa penggunaan sensor IMU untuk sistem odometri melalui eksperimen. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, akurasi yang dihasilkan dari sistem odometri yang diusulkan mencapai 63.7 %.

Kata Kunci: IMU, Odometri, Kendaraan Otonom, Kalman Filter

1. Pendahuluan

Teknologi yang digunakan pada kendaraan telah berkembang pesat. Penggunaan komputer dalam sistem kendaraan memberikan kesempatan dalam pengembangan otomatisasi kendaraan, sehingga menjadi topik penelitian yang secara aktif dikembangkan oleh berbagai kalangan dalam satu dekade terakhir (Sabiha et al., 2022). Saat ini, teknologi otomasi pada kendaraan telah dapat menggantikan peran manusia sebagai pengemudi. Peran otomatisasi dalam kendaraan menawarkan keamanan operasional di jalan raya, solusi kemacetan lalu lintas, penggunaan bahan bakar yang efisien, mobilitas yang baik bagi penyandang disabilitas dan lansia (Fagnant dan Kockelman, 2015).

Kendaraan otonom merupakan sistem kompleks yang bergerak. Dalam kendaraan otonom terkandung sistem navigasi, sistem penggerak kendaraan, sistem manajemen energi, yang memiliki peran spesifik. Sistem navigasi memiliki peranan utama pada kendaraan otonom. Melalui navigasi yang baik, kendaraan otonom dapat mencapai tujuan dengan aman (Xiao et al., 2023). Navigasi pada kendaraan otonom membahas manuver kendaraan secara otomatis (Ndjeng Ndjeng et al., 2011). Berbagai input kondisi lingkungan diolah sebagai parameter dalam pengambilan keputusan untuk melakukan manuver. Adapun parameter kendali manuver meliputi posisi kendaraan, halangan sekitar, rambu lalu lintas, dan marka jalan (Fényes et al., 2019). Penentuan posisi kendaraan menjadi penting dilakukan karena mempengaruhi navigasi.

Penentuan posisi kendaraan dapat dilakukan dengan odometri, *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), dan *Global Positioning System* (GPS) (Kumar et al., 2021; Ligocki dan Jelínek, 2019; Saracoglu dan Sanli, 2021). Penggunaan SLAM dalam menentukan posisi memiliki akurasi tinggi, tetapi penggunaan SLAM dalam menentukan posisi bergantung pada cuaca. Penggunaan GPS dalam penentuan posisi menghasilkan pengukuran yang presisi, namun GPS tergantung kepada jangkauan sinyal satelit. Odometri menggunakan sensor gerak yang terdapat pada kendaraan untuk estimasi posisi (Youssef et al., 2021). Penggunaan odometri sebagai penentu posisi kendaraan menghasilkan pengukuran yang bebas dari gangguan eksternal dan akurat.

Sensor gerak yang digunakan untuk odometri kendaraan menggunakan *rotary encoder* (Nemec et al., 2019). *Rotary encoder* adalah perangkat yang menghasilkan pulsa apabila porosnya berputar. Jumlah pulsa yang dihasilkan berbanding lurus dengan perpindahan kendaraan. Pada pengukuran tanpa slip, sistem odometri menggunakan *rotary encoder* dapat menghasilkan pengukuran yang akurat dan presisi. Namun sistem odometri menggunakan *rotary encoder* menghasilkan kesalahan pengukuran apabila dilakukan pada kondisi slip akibat adanya rugi mekanis (Sadovnychiy dan Lopez, 2005).

Rugi mekanis dapat dihindari dengan menggunakan sensor yang tidak bersentuhan dengan bidang rambat kendaraan. Sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) merupakan sensor yang dapat mengukur percepatan kendaraan. Selain percepatan, sensor IMU dapat mengukur kecepatan sudut dan medan magnet (Leal-Junior et al., 2018). Melalui pengukuran percepatan, kelajuan dan perpindahan dapat diestimasi.

Penelitian penggunaan sensor IMU untuk estimasi posisi kendaraan telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Arun Faisal et al., 2019; Cen et al., 2022; Ligocki dan Jelínek, 2019; Ndjeng Ndjeng et al., 2011; Wang et al., 2019; Xu et al., 2018; Youssef et al., 2021). Beberapa penelitian menggabungkan sensor IMU dengan informasi visual agar menghasilkan sistem odometri yang akurat (Cen et al., 2022; Ligocki dan Jelínek, 2019). Penggabungan antara sensor IMU dan informasi visual membutuhkan sumber daya komputasi yang besar, dikarenakan informasi visual merupakan matriks multidimensi yang perlu diekstraksi fiturnya. Dari eksperimen yang dilakukan, visual odometri mampu mengukur perpindahan dengan selisih 5 meter (Cen et al., 2022). Adapun penelitian sistem odometri berbasis akselerometer (Youssef et al., 2021). Akselerometer satu aksis diletakkan pada roda yang berputar, sehingga sensor IMU mengukur percepatan dari gaya sentrifugal. Sensor IMU juga dapat digabungkan dengan GPS untuk menghasilkan estimasi posisi (Ndjeng Ndjeng et al., 2011). Gabungan sensor digunakan untuk lokalisasi robot *differential steering*.

Dalam penelitian ini dibahas penggunaan sensor IMU untuk estimasi perpindahan posisi kendaraan. *Kalman Filter* digunakan untuk melakukan perhitungan estimasi perpindahan dari percepatan yang diperoleh secara periodik. *Kalman Filter* diimplementasikan dalam sebuah mikrokontroler. Hasil penelitian merupakan tingkat akurasi perpindahan posisi kendaraan yang dapat dijadikan evaluasi sistem odometri berbasis sensor IMU.

2. Metode yang Diajukan

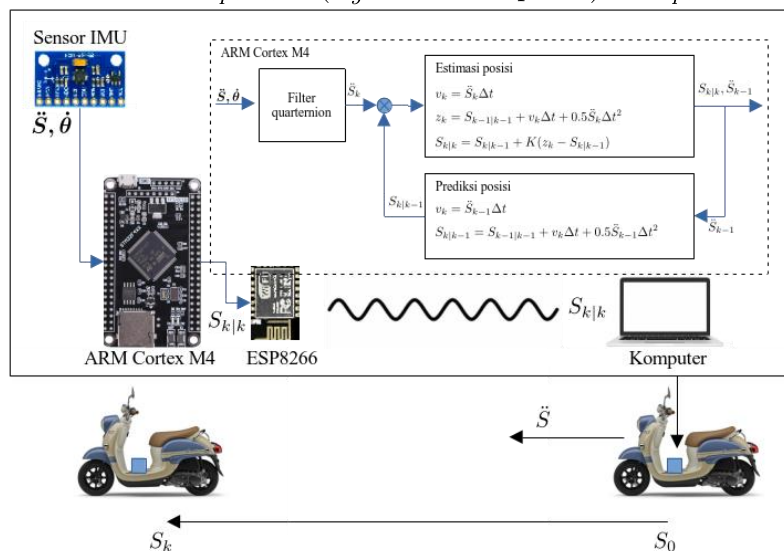
2.1. Deskripsi Keseluruhan Sistem

Sistem odometri yang diajukan merupakan sistem odometri non-kontak, sehingga sensor yang berfungsi mengukur perpindahan kendaraan tidak bersentuhan dengan media rambat. Ilustrasi keseluruhan sistem odometri yang diajukan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan melalui Gambar 1. Sistem odometri berbasis sensor IMU diletakkan pada rantai motor. Sensor IMU mengukur percepatan dan kecepatan sudut dalam 3 axis ($\ddot{S}_x, \ddot{S}_y, \ddot{S}_z, \dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y, \dot{\theta}_z$). Filter quaternion digunakan untuk mencari sudut *pitch* (α_{pitch}), sehingga didapatkan percepatan yang searah dengan arah gerak motor (\ddot{S}_k). Perhitungan perpindahan dilakukan dengan *Kalman Filter*, menghasilkan prediksi perpindahan ($\hat{S}_{k|k-1}$) dan estimasi perpindahan ($\hat{S}_{k|k}$). *Kalman filter* diimplementasikan pada mikrokontroler berbasis ARM Cortex M4. Penggunaan *Kalman filter* telah banyak digunakan untuk estimasi posisi (Arun Faisal et al., 2019; Cen et al., 2022; Ligocki dan Jelínek, 2019; Ndjeng Ndjeng et al., 2011; Youssef et al., 2021). Hasil dari estimasi perpindahan dikirimkan menuju komputer sebagai *data logging* menggunakan protokol TCP/IP. Gambar 2 menunjukkan urutan proses dalam estimasi perpindahan.

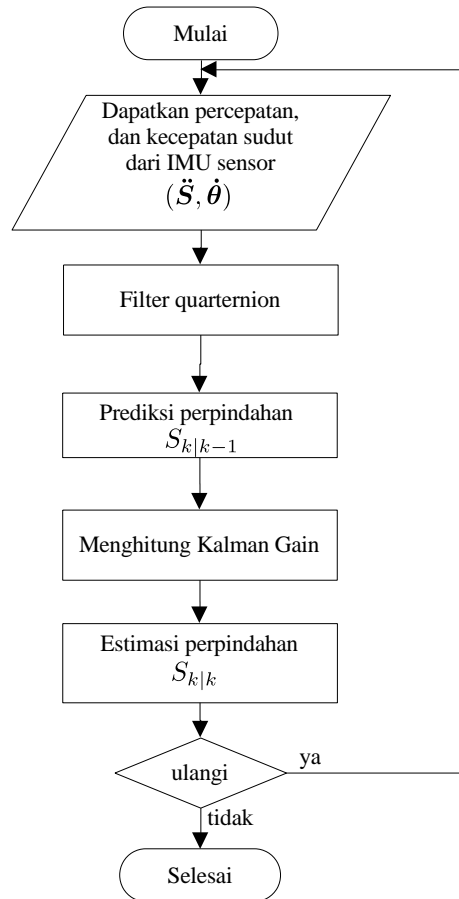
2.2. Quaternion Filter

Sensor IMU yang digunakan merupakan sensor MPU9250 yang memiliki 9 axis sensor yang terdiri atas *akselerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer*. Pencuplikan data sensor dilakukan oleh sebuah mikrokontroler melalui antarmuka *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Frekuensi pencuplikan data dari sensor IMU dilakukan dengan frekuensi sampling 1000Hz. Data sensor diolah menggunakan filter *quaternion* sehingga menghasilkan sudut Euler. Sudut Euler terdiri atas *pitch* (α_{pitch}), *roll* (α_{roll}), dan *yaw* (α_{yaw}) yang merepresentasikan orientasi dari benda dalam kerangka koordinat kartesian tiga dimensi. Percepatan yang searah dengan gerak motor didapatkan melalui persamaan 1.

$$\ddot{S}_k = \ddot{S}_x \cos \alpha_{pitch} + (\ddot{S}_y - 9.8 \cos \alpha_{pitch}) \sin \alpha_{pitch} \quad (1)$$



Gambar 1: Diagram Blok Sistem Odometri berbasis Sensor IMU



Gambar 2: Diagram Alir Sistem Odometri menggunakan Sensor IMU

2.3. Kalman Filter

Kalman filter merupakan metode yang digunakan untuk estimasi perpindahan motor. Dalam penelitian ini, Kalman filter digunakan untuk mengestimasi perpindahan posisi dalam satu sumbu berdasarkan nilai percepatan translasi dari benda yang bergerak. Secara umum, perpindahan motor (ΔS) dalam selang waktu (t) meliputi kelajuan mula-mula (V_0) dan percepatan gerak motor (a) yang dapat dinotasikan melalui persamaan 2. Persamaan 2 merupakan pendekatan untuk perpindahan pada Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) (Kanginan, M., 2013).

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (2)$$

Perpindahan kendaraan tidak dapat dinyatakan dalam GLBB dalam selang waktu t yang lama, sehingga persamaan GLBB digunakan dalam selang waktu yang kecil sesuai dengan frekuensi sampling mikrokontroler terhadap sensor IMU. Besar prediksi perpindahan ($S_{k|k-1}$) dihitung dengan menganggap besar percepatan konstan (\ddot{S}_{k-1}), yang persamaannya dapat dinyatakan dalam persamaan 3 dan 4.

$$v_k = v_{k-1} + \ddot{S}_{k-1} \Delta t \quad (3)$$

$$S_{k|k-1} = S_{k-1|k-1} + v_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{S}_{k-1} \Delta t^2 \quad (4)$$

Setelah perhitungan prediksi perpindahan dilakukan, estimasi perpindahan dilakukan. Pengukuran besar percepatan dalam melakukan estimasi diperlukan untuk mendapatkan perpindahan aktual, sehingga besar percepatan yang digunakan merupakan percepatan yang telah diperbarui (\ddot{S}_k). Persamaan

pengukuran besar perpindahan motor dinyatakan melalui persamaan 5. Estimasi perpindahan ($\hat{S}_{k|k}$) dilakukan menggunakan persamaan 6. Besar *Kalman Gain* (K) ditentukan dalam persamaan 6 yang merupakan perbandingan antara *variance* estimasi perpindahan ($p_{k,k-1}$) dan *variance* pengukuran perpindahan (r_k).

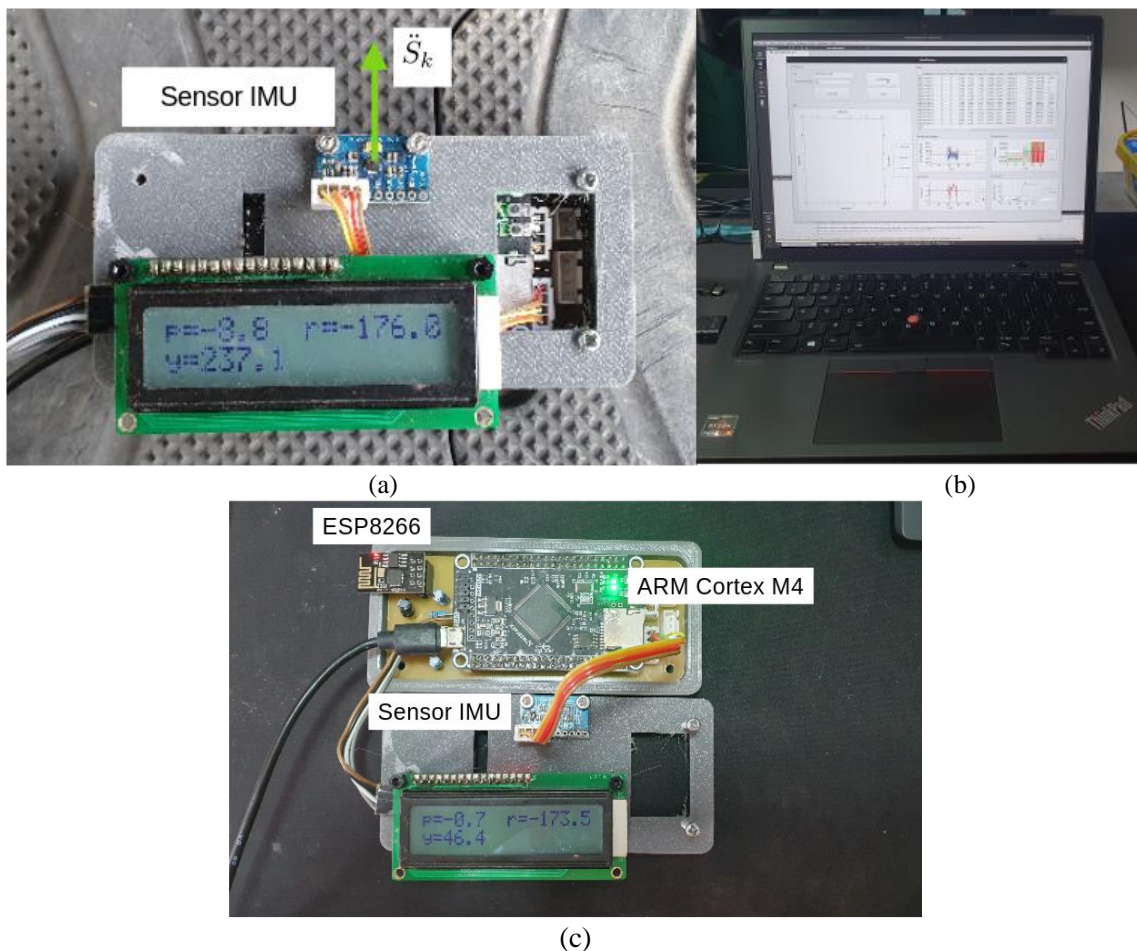
$$z_k = S_{k-1|k-1} + v_k \Delta t + 0.5 \ddot{S}_k \Delta t^2 \quad (5)$$

$$S_{k|k} = S_{k|k-1} + K(z_k - S_{k|k-1}) \quad (6)$$

$$K = \frac{p_{k,k-1}}{p_{k,k-1} + r_k} \quad (7)$$

3. Hasil dan Pembahasan

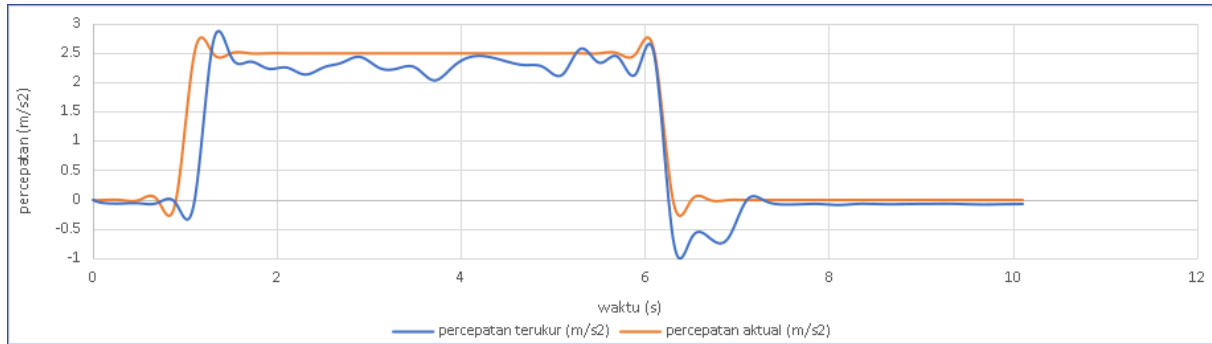
Rancangan sistem odometri berbasis sensor IMU dapat ditunjukkan melalui Gambar 3. Pengujian sistem odometri berbasis sensor IMU dilakukan dengan meletakkan sistem pada lantai motor, sehingga sistem odometri tidak bergantung pada gerak roda dengan bidang rambat kendaraan yang dapat terjadi selip. Sebuah komputer menjalankan program *Graphical User Interface* (GUI) yang berfungsi mengumpulkan variabel-variabel yang diamati selama pengujian dilakukan. Pengujian sistem odometri dilakukan dengan beberapa variasi. Pengujian yang dilakukan adalah evaluasi akurasi sensor IMU dalam mengukur besaran percepatan. Kemudian pengujian pengukuran akurasi kelajuan yang terukur oleh sistem odometri dan kelajuan sebenarnya. Untuk mengevaluasi akurasi pengukuran perpindahan, dilakukan perbandingan antara pengukuran perpindahan sistem odometri berbasis sensor IMU dan perpindahan sebenarnya.



Gambar 3: Sistem Odometri Berbasis Akselerometer, (a) Saat Diletakkan Pada Lantai Motor, (b) GUI dari *data logger*, dan (c) Komponen-Komponen Penyusun

Tabel 1: Akurasi Pengukuran Percepatan

v_0 (m/s)	v_t (m/s)	Δt (s)	a (m/s ²)	\ddot{S}_k (m/s ²)	A (%)
0	5	2.5	2	1.89	94.5
0	10	3.5	2.85	2.61	91.5
0	15	4.3	3.48	3.28	94.2
-	-	-	9.8	9.42	96.1



Gambar 4: Grafik Percepatan Terukur oleh Sistem Odometri

3.1. Pengukuran Percepatan

Pengujian pengukuran percepatan pada sistem odometri berbasis sensor IMU dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sistem odometri dalam mengukur besar percepatan. Pengujian dilakukan dengan meletakkan sistem odometri pada rantai motor yang bergerak dengan percepatan konstan. Untuk mendapatkan percepatan konstan, kendaraan bergerak dari kondisi diam (v_0) menuju kelajuan akhir (v_t) 5m/s, 10m/s, 15m/s dengan mempertahankan posisi *throttle*. Untuk mendapatkan besar percepatan, selang waktu (Δt) yang dibutuhkan untuk mencapai v_t dicatat. Besar percepatan diperoleh menggunakan persamaan 7 (Kanginan, M., 2013). Percepatan yang terukur oleh sistem odometri berbasis IMU dicatat dan dibandingkan dengan percepatan yang diperoleh dari persamaan 7. Akurasi pengukuran dihitung melalui persamaan 8.

$$a = \frac{v_t - v_0}{\Delta t} \quad (8)$$

$$A = \left(1 - \frac{|a - \ddot{S}_k|}{a}\right) 100\% \quad (9)$$

Akurasi pengukuran percepatan dapat ditunjukkan melalui Tabel 1. Berdasarkan percobaan yang dilakukan dengan memberikan percepatan yang bervariasi menghasilkan akurasi pengukuran percepatan rata-rata 94.15%. Besar percepatan selama kendaraan direkam dan dapat ditunjukkan melalui Gambar 4. Grafik percepatan terukur memiliki *ripple*, sehingga menghasilkan *variance* pengukuran sebesar 0.3.

3.2. Pengukuran Kelajuan

Pengujian pengukuran kelajuan pada sistem odometri berbasis sensor IMU dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sistem odometri dalam mengukur kelajuan. Pengukuran kelajuan sistem odometri berbasis sensor IMU dilakukan dengan meletakkan sistem odometri berbasis sensor IMU pada bagian rantai motor yang dapat ditunjukkan melalui Gambar 3(a). Mula-mula motor pada kondisi statis, kemudian motor dijalankan menuju kelajuan tertentu. Adapun kelajuan motor yang diukur oleh sistem antara lain 5 m/s, 7 m/s, 10 m/s, 12 m/s, dan 15 m/s. Untuk masing-masing kelajuan pengujian dilakukan sebanyak 5 kali. Kemudian diambil nilai rata-rata pengukuran kelajuan. Akurasi pengukuran kelajuan dihitung menggunakan persamaan 8.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, didapatkan nilai akurasi pengukuran kelajuan yang dapat ditunjukkan melalui Tabel 2. nilai akurasi rata-rata mencapai 80.4%. Pengukuran kelajuan memiliki selisih yang lebih besar dikarenakan adanya selisih pengukuran percepatan dengan *variance* pengukuran

sebesar 0.3. Penggunaan persamaan 3 menyebabkan kesalahan pengukuran akselerasi terakumulasi. Grafik akumulasi kesalahan pengukuran percepatan yang menyebabkan kesalahan dalam mengukur kelajuan dapat ditunjukkan melalui Gambar 5. Ketika kelajuan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu, selisih kelajuan yang terukur dengan kelajuan sebenarnya semakin besar.

3.3. Estimasi Perpindahan

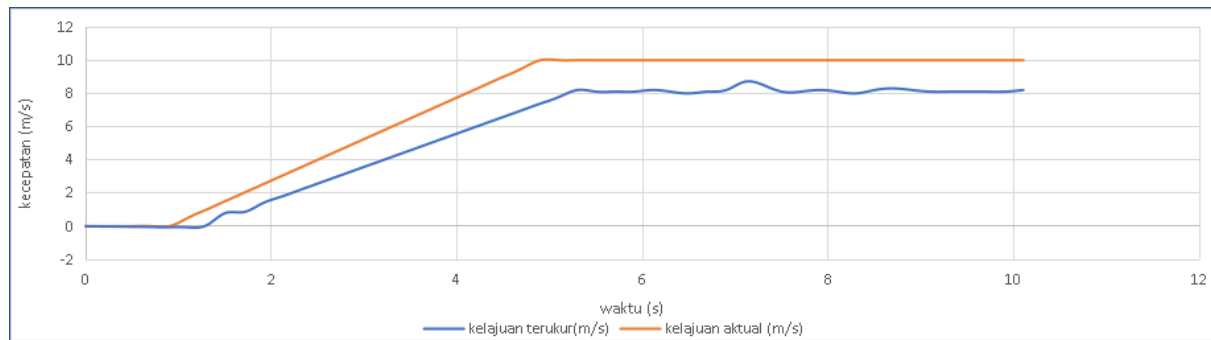
Pengujian estimasi perpindahan pada sistem odometri berbasis sensor IMU dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi estimasi perpindahan dari *Kalman filter*. Pengujian dilakukan dengan memindahkan posisi motor sejauh 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, dan 12m. Pengujian diulangi sebanyak 5 kali untuk masing-masing perpindahan. Nilai rata-rata diambil dari setiap perpindahan yang kemudian dihitung besar akurasi dari estimasi perpindahan melalui persamaan 9.

Akurasi estimasi perpindahan dapat ditunjukkan melalui Tabel 3. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, didapatkan akurasi estimasi perpindahan dengan nilai rata-rata 63.7%. Akurasi estimasi perpindahan semakin rendah akibat penggunaan persamaan 4 dan 5. Kesalahan pengukuran akselerasi dan kelajuan terakumulasi ketika melakukan prediksi perpindahan dan estimasi perpindahan.

Besar *Kalman gain* menentukan hasil estimasi perpindahan. Semakin rendah nilai *Kalman gain*, maka nilai estimasi perpindahan didekati dengan nilai prediksi perpindahan. Perubahan besar *Kalman gain* selama pengukuran perpindahan dapat ditunjukkan melalui Gambar 7. Pada kondisi *steady Kalman gain* stabil atau menurun, sedangkan pada saat berpindah *Kalman gain* meningkat.

Tabel 2: Akurasi Pengukuran Kelajuan

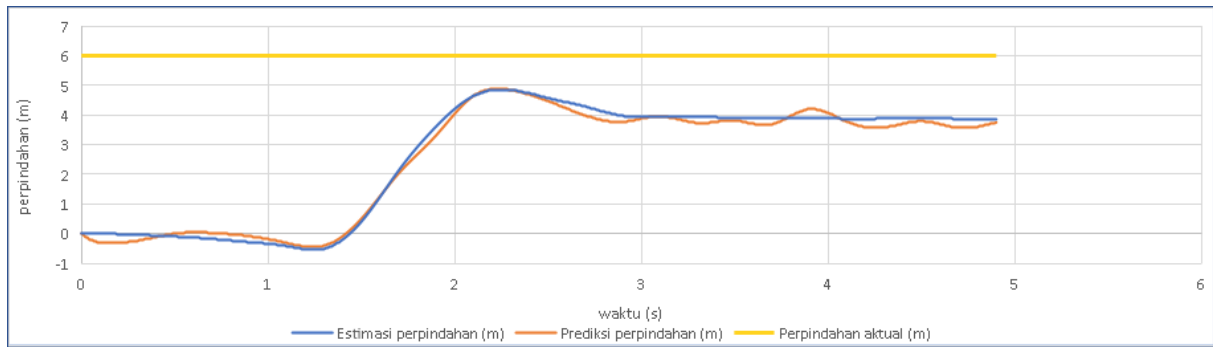
kelajuan (m/s)	Pengukuran (m/s)						Akurasi (%)
	1	2	3	4	5	\bar{x}	
5	4.2	3.6	3.8	3.4	3.9	3.8	75.6
7	5.6	6.1	5.9	5.8	4.0	5.4	78.3
10	8.1	8.7	8.3	7.5	8.5	8.2	82.2
12	9.5	10.5	9.7	10.1	10.0	10.0	83.0
15	13.0	12.8	12.0	12.5	11.8	12.4	82.8



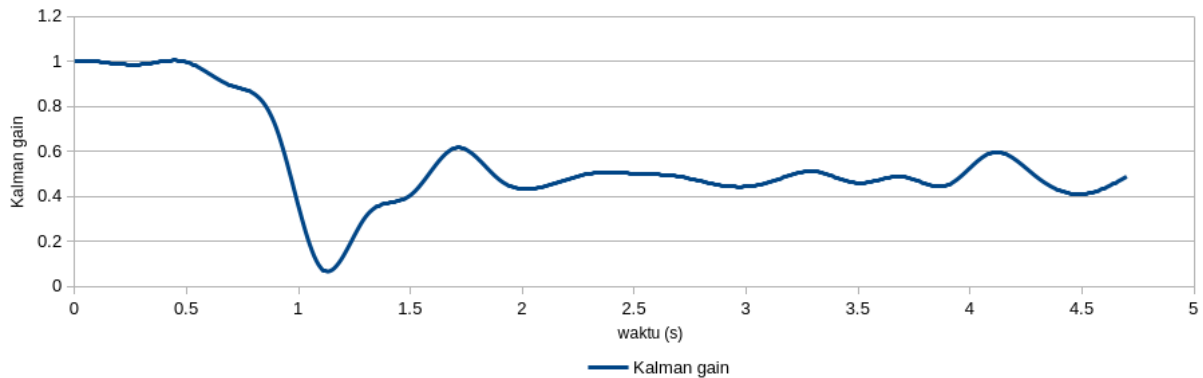
Gambar 5: Grafik Kelajuan Terukur oleh Sistem Odometri

Tabel 3: Akurasi Estimasi Perpindahan

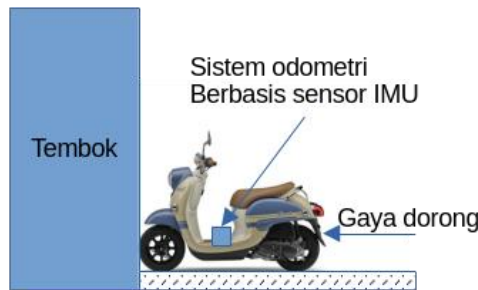
Perpindahan (m)	Pengukuran (m/s)						Akurasi (%)
	1	2	3	4	5	\bar{x}	
2	1.2	1.3	1.5	1.1	1.0	1.2	61.0
4	2.5	2.3	3.4	2.7	2.2	2.6	65.5
6	4.1	3.8	4.1	4.0	3.5	3.9	65.0
8	5.6	4.7	4.8	5.1	4.9	5.0	62.8
10	6.2	6.8	7.0	6.1	5.9	6.4	64.0
12	7.8	8.0	7.7	8.2	6.8	7.7	64.2



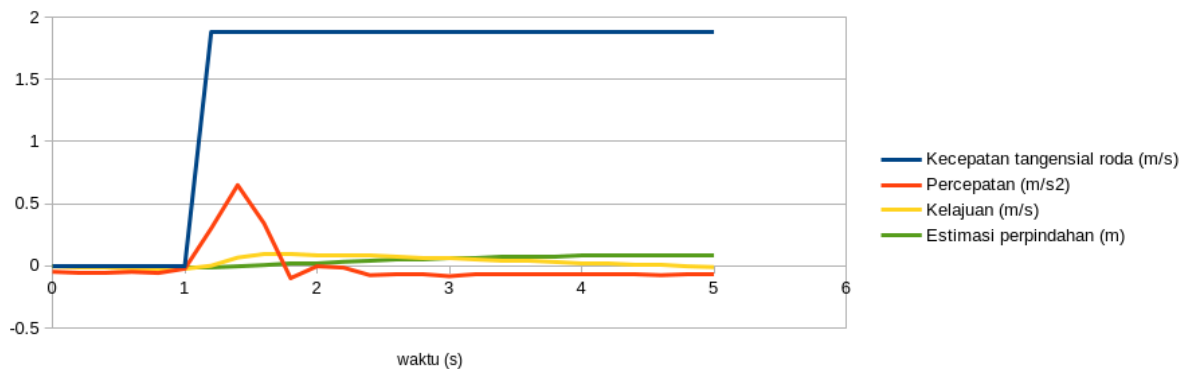
Gambar 6: Grafik Estimasi dan Prediksi Perpindahan oleh Sistem Odometri



Gambar 7: Grafik Kalman Gain Selama Estimasi Perpindahan



Gambar 8: Ilustrasi Pengujian Sistem Odometri Terhadap Selip



Gambar 9: Grafik Percepatan, Kelajuan, dan Estimasi Perpindahan terhadap Kecepatan Tangensial Roda

3.4. Sistem Odometri Terhadap Selip

Pengujian sistem odometri berbasis IMU terhadap selip dilakukan untuk mengevaluasi pengukuran percepatan, kecepatan, dan estimasi perpindahan pada kondisi selip. Selip terjadi akibat hilangnya traksi antara roda motor dengan rantai. Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan sistem odometri yang

dirancang pada rantai motor. Bagian depan motor ditahan oleh tembok, kemudian *throttle* dibuka hingga roda belakang motor yang memiliki diameter 35cm berputar. Kecepatan sudut roda motor diamati menggunakan *tachometer*. Besar percepatan, kelajuan, dan perpindahan posisi diamati. Ilustrasi pengujian dapat ditunjukkan melalui Gambar 8.

Besar percepatan, kelajuan, dan estimasi perpindahan yang terekam selama pengujian dapat ditunjukkan melalui Gambar 9. Kecepatan tangensial roda yang didapat pada putaran roda 103 rpm adalah 1.88 m/s. Pada awal roda motor digerakkan, kerangka motor sedikit bergerak kedepan dan menghasilkan percepatan sesaat. Kemudian rangka motor diam dan roda motor bagian belakang tetap berputar. Kelajuan yang terbaca oleh sistem odometri 0.03m/s dan estimasi perpindahan adalah 0.08m. Perbedaan antara kelajuan tangensial roda pada kondisi selip dan kelajuan yang terbaca oleh sistem odometri berbasis sensor IMU mengindikasikan bahwa sistem odometri yang dirancang mampu mengatasi rugi mekanis akibat selip.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini telah dibuat sistem odometri berbasis sensor IMU. Besar perpindahan ditentukan oleh percepatan yang diukur oleh sensor IMU. Data akselerasi dicuplik secara periodik dan perpindahan diestimasi menggunakan *Kalman filter*. Sensor IMU dapat mengukur perpindahan dengan resolusi hingga 0.1 meter. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, sensor IMU mampu mengukur percepatan dengan tingkat akurasi 95% dan menghasilkan *variance* pengukuran sebesar 0.3. Pengujian pengukuran kelajuan menghasilkan akurasi pengukuran sebesar 80.4%. Pengujian pengukuran perpindahan menghasilkan akurasi pengukuran 63.7%.

Penghargaan

Penelitian ini dilakukan dengan dukungan finansial dari Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Kalimantan (LPPM ITK).

Referensi

- Arun Faisal, I., Waluyo Purboyo, T., Siswo Raharjo Ansori, A., 2019. A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture. *J. Eng. Appl. Sci.* 15, 826–829. <https://doi.org/10.36478/jeasci.2020.826.829>
- Cen, R., Jiang, T., Tan, Y., Su, X., Xue, F., 2022. A low-cost visual inertial odometry for mobile vehicle based on double stage Kalman filter. *Signal Processing* 197, 108537. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108537>
- Fagnant, D.J., Kockelman, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- Fényes, D., Németh, B., Gáspár, P., 2019. A predictive control for autonomous vehicles using big data analysis. *IFAC-PapersOnLine* 52, 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.031>
- Kanginan, M., 2013. Fisika untuk SMA/MA Kelas X / Marthen Kanginan ; editor, Syarifuddin (Ed. 1 Cet. 2.). Jakarta: Erlangga.
- Kumar, P., Srivastava, P.K., Tiwari, P., Mall, R.K., 2021. Chapter 20 - Application of GPS and GNSS technology in geosciences, in: Petropoulos, G. p, Srivastava, P.K. (Eds.), *GPS and GNSS Technology in Geosciences*. Elsevier, pp. 415–427. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818617-6.00018-4>
- Leal-Junior, A.G., Vargas-Valencia, L., Dos Santos, W.M., Schneider, F.B.A., Siqueira, A.A.G., Pontes, M.J., Frizera, A., 2018. POF-IMU sensor system: A fusion between inertial measurement units and POF sensors for low-cost and highly reliable systems. *Optical Fiber Technology* 43, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.04.012>
- Ligocki, A., Jelínek, A., 2019. Fusing the RGBD SLAM with Wheel Odometry. *IFAC-PapersOnLine* 52, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.724>

- Ndjeng Ndjeng, A., Gruyer, D., Glaser, S., Lambert, A., 2011. Low cost IMU–Odometer–GPS ego localization for unusual maneuvers. *Information Fusion* 12, 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2010.06.006>
- Nemec, D., Šimák, V., Janota, A., Hruboš, M., Bubeníková, E., 2019. Precise localization of the mobile wheeled robot using sensor fusion of odometry, visual artificial landmarks and inertial sensors. *Robotics and Autonomous Systems* 112, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.019>
- Sabiha, A.D., Kamel, M.A., Said, E., Hussein, W.M., 2022. ROS-based trajectory tracking control for autonomous tracked vehicle using optimized backstepping and sliding mode control. *Robotics and Autonomous Systems* 152, 104058. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104058>
- Sadovnychiy, S., Lopez, J., 2005. Improvement of Pipeline Odometer System Accuracy. Presented at the Canadian International Petroleum Conference, p. PETSOC-2005-013. <https://doi.org/10.2118/2005-013>
- Saracoglu, A., Sanli, D.U., 2021. Accuracy of GPS positioning concerning Köppen-Geiger climate classification. *Measurement* 181, 109629. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109629>
- Wang, Yandong, Zhang, T., Wang, Yuanchao, Ma, J., Li, Y., Han, J., 2019. Compass aided visual-inertial odometry. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 60, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2018.12.029>
- Xiao, W., Yuan, L., Ran, T., He, L., Zhang, J., Cui, J., 2023. Multimodal fusion for autonomous navigation via deep reinforcement learning with sparse rewards and hindsight experience replay. *Displays* 78, 102440. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102440>
- Xu, W., Choi, D., Wang, G., 2018. Direct visual-inertial odometry with semi-dense mapping. *Computers & Electrical Engineering* 67, 761–775. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.02.002>
- Youssef, A.A., Al-Subaie, N., El-Sheimy, N., Elhabiby, M., 2021. Accelerometer-Based Wheel Odometer for Kinematics Determination. *Sensors* 21, 1327. <https://doi.org/10.3390/s21041327>