

Rancang Bangun Antena Rotasi Dengan Kalibrasi Berbasis Program Kalman Filter

Imam Arief Rahman
Teknik Elektro
Universitas Islam nusantara
Bandung, Indonesia
iariefrahman@gmail.com

Syahban Rangkuti
Teknik Elektro
Universitas Islam nusantara
Bandung, Indonesia
syahban3477@gmail.com

Agil Abdul Ghani Alghifari K.
Teknik Elektro
Universitas Islam nusantara
Bandung, Indonesia
agilabdul28@gmail.com

Abstract—The Internet of Things (IoT) has changed how we interact with our environment. Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) such as LoRa play an important role in the IoT ecosystem due to their low power consumption, long-distance communication, and cost-effectiveness. However, detecting the azimuth and elevation angles of the transmitter is a challenge in LoRa communication. This paper proposes a rotary antenna system with an Inertial Measurement Unit (IMU) to precisely track azimuth and elevation angles at LoRa. The research carried out is to test the tool by comparing the algorithm without the Kalman Filter and the one with the Kalman Filter, where the test's success with the lowest error is up to 0.75% and 0%, respectively.

Keywords—Antenna, Azimuth, Elevation, IMU, Kalman, Filter

I. PENDAHULUAN

Internet of Things (IoT) telah merevolusi interaksi kita dengan lingkungan dengan memungkinkan komunikasi tanpa batas antara perangkat dan Internet. *Low-Power Wide-Area Networks* (LPWAN), seperti *Long Range* (LoRa), telah menjadi bagian integral dari ekosistem IoT karena komunikasi jarak jauh, konsumsi daya rendah, dan hemat biaya. Namun, mendeteksi secara akurat sudut azimuth dan elevasi pemancar LoRa menimbulkan tantangan bagi sistem antena. Makalah ini menyajikan desain sistem antena putar yang terintegrasi dengan Inertial Measurement Unit (IMU) untuk mengatasi tantangan ini.

Sistem yang diusulkan menggunakan IMU untuk memantau posisi pemancar dan menyesuaikan orientasi antena untuk melacak sudut azimuth dan elevasi secara akurat. Ini meningkatkan komunikasi antara perangkat LoRa, terutama di lingkungan dengan garis pandang yang terhalang. Desain sistem antena putar didasarkan pada berbagai prinsip teoretis, termasuk pemantauan orientasi berbasis IMU, pola radiasi antena, dan prinsip komunikasi LoRa.

Dalam beberapa tahun terakhir, ada minat yang signifikan dalam mengembangkan *Inertial Measurement Units* (IMUs) di berbagai bidang penelitian, termasuk navigasi pesawat ruang angkasa, dinamika UAV, dinamika robot, *probe* bawah air, dan sistem navigasi quadrotor [1, 2, 3]. Salah satu aspek penting dalam memanfaatkan IMU adalah estimasi sudut atau sikap rotasi, yang menemukan aplikasi dalam navigasi pejalan kaki, sinematografi profesional, dan bidang lainnya [4, 5].

IMU adalah modul elektronik dengan akselerometer, giroskop, dan sensor lainnya. Sensor giroskop mengukur kecepatan sudut di sekitar sumbu tertentu, sedangkan akselerometer mengukur gaya tertentu, percepatan total relatif terhadap gravitasi. Biasanya, IMU menampilkan tiga sumbu ortogonal giroskop yang mengukur kecepatan sudut sepanjang sumbu x, y, dan z [6]. IMU yang menggunakan teknologi *Micro Electro Mechanical System* (MEMS) bersifat kompak, ringan, dan mengkonsumsi daya rendah [2]. Namun, data yang diperoleh dari sensor ini seringkali mengandung *noise*, yang menyebabkan berkurangnya akurasi pengukuran.

Algoritma estimasi yang efektif diperlukan untuk mengatasi *noise* dan meningkatkan akurasi pengukuran. Filter Kalman adalah algoritma yang banyak digunakan untuk memperkirakan keadaan sistem berbasis waktu. Algoritma rekursif memperkirakan

keadaan sistem berdasarkan pengukuran sebelumnya. Filter Kalman meminimalkan kesalahan estimasi kuadrat rata-rata (MSE) dan dianggap sebagai filter yang optimal [7].

Studi sebelumnya telah menggunakan filter Kalman di IMU. Sebagai contoh, salah satu penelitian memanfaatkan filter Kalman dengan inklinometer berbasis inersia untuk memperkirakan kemiringan objek menggunakan sensor akselerometer triaksial [8]. Studi lain menggabungkan filter Kalman dengan sensor IMU untuk memperkirakan jarak terjemahan [9]. Selain filter Kalman, metode varian seperti *Unscented Kalman Filter* (UKF) [2, 10], *Extended Kalman Filter* (EKF) [1], dan metode filter Pelengkap [4] telah digunakan untuk pemrosesan data IMU.

Beberapa penelitian berfokus pada estimasi sikap objek menggunakan IMU dengan sensor akselerometer. Trimpe dan D'Andrea mengembangkan metode untuk memperkirakan sudut pitch dan roll benda tegar menggunakan beberapa sensor akselerometer [11]. Metode estimasi ini dapat diterapkan baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Dalam penelitian lain, Maarif et al. menggunakan sensor akselerometer untuk mengukur perubahan sudut pada robot penyeimbang saat bergerak, dan filter Kalman digunakan untuk mengurangi kebisingan sensor [12].

Namun, pemanfaatan akselerometer tiga sumbu untuk estimasi sudut sikap memiliki keterbatasan, seperti kepekaan terhadap medan gravitasi bumi dan percepatan eksternal akibat pergerakan objek [8]. Akibatnya, penelitian terbaru telah berkonsentrasi pada pengembangan algoritma estimasi sikap yang mengurangi interferensi magnetik pada sensor IMU, yang sering dijumpai di lingkungan gedung [4]. Selain itu, ada penelitian yang memanfaatkan magnetometer untuk memperkirakan sudut orientasi benda tegar [13].

Dalam konteks penelitian ini, tujuan utamanya adalah mengembangkan metode untuk memperkirakan sudut rotasi benda tegar berdasarkan sensor IMU-giroskop menggunakan filter Kalman. Estimasi meliputi rotasi terhadap sumbu x (*roll*), sumbu y (*pitch*), dan sumbu z (*yaw*). Sensor MPU6050 digunakan untuk penyelidikan ini. Model estimasi dirancang berdasarkan dinamika gerak sederhana dalam model ruang keadaan, sedangkan filter Kalman diterapkan untuk mengurangi noise data sensor dan meningkatkan akurasi pengukuran. Simulasi dijalankan menggunakan perangkat lunak Arduino IDE untuk mengevaluasi kinerja dari teknik estimasi yang dibuat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada kemajuan model estimasi sudut dalam ruang keadaan dan penerapan filter Kalman diskrit berdasarkan sensor IMU untuk memperkirakan sudut rotasi benda tegar.

Beberapa penulis telah menyelidiki penggunaan IMU untuk pelacakan orientasi dalam sistem antena [14,15] dan telah mengeksplorasi penerapan IMU untuk pemantauan orientasi yang tepat. Penelitian ekstensif tentang pola radiasi antena telah dilakukan [16,17]. Selain itu, prinsip komunikasi LoRa telah dipelajari [18,19]

Dalam konteks ini, sistem antena putar yang diusulkan dengan IMU untuk azimuth dan elevasi pada LoRa menawarkan solusi yang menjanjikan untuk komunikasi yang akurat dan efisien antar perangkat LoRa. Sistem dibangun di atas konsep teoretis dan penelitian yang dilakukan oleh berbagai penulis. Bagian selanjutnya dari makalah ini akan memberikan penjelasan yang komprehensif tentang desain dan implementasi sistem.

Sistem yang diusulkan menggunakan akselerometer tiga sumbu dan IMU berbasis giroskop untuk pemantauan orientasi yang tepat menggunakan algoritme Kalman Filter, IMU menentukan orientasi antena berdasarkan pengukuran kecepatan sudut dan akselerasi. Penyesuaian orientasi antena secara real-time ini memastikan keselarasan yang tepat dengan pemancar LoRa.

Selanjutnya, sistem yang diusulkan mempertimbangkan pola radiasi antena selain pemantauan orientasi. Pola radiasi menentukan energi yang dipancarkan oleh antena dalam arah yang berbeda. Sistem menggabungkan antena *dipole* dengan beamwidth terbatas untuk mengurangi interferensi dari sumber lain dan meningkatkan rasio *signal-*

to-noise (SNR) dari sinyal yang diterima. Antena directional juga membantu meminimalkan gangguan yang disebabkan oleh pantulan dari objek terdekat.

Terakhir, sistem mempertimbangkan prinsip-prinsip komunikasi LoRa, yang didasarkan pada modulasi spektrum penyebaran *chirp*. LoRa beroperasi pada saluran frekuensi Industri, Ilmiah, dan Medis (ISM) tanpa izin, menawarkan solusi komunikasi berbiaya rendah dan jarak jauh. Sistem yang diusulkan mengadopsi protokol LoRaWAN, yang memastikan transmisi data yang aman dan andal antar perangkat LoRa. LoRaWAN menggunakan teknik kecepatan data adaptif (ADR) untuk mengoptimalkan kecepatan data dan konsumsi daya perangkat LoRa.

Sistem antena putar yang diusulkan dengan IMU untuk azimuth dan elevasi pada LoRa menghadirkan solusi yang menjanjikan untuk komunikasi yang tepat dan efektif antara perangkat LoRa. Sistem ini mengintegrasikan IMU untuk pemantauan orientasi, antena pengarah untuk kontrol pola radiasi, dan prinsip komunikasi LoRa untuk transmisi data yang aman dan andal. Bagian selanjutnya dari makalah ini akan memberikan penjelasan rinci tentang desain dan implementasi sistem.

II. METODE PENELITIAN

Untuk perencanaan sistem antena putar yang dilakukan menggunakan komponen sederhana menyesuaikan kebutuhan pada lapangan sebelum membuat pengimplementasiannya pada Sistem antena putar yang lebih besar dan kompleks untuk peningkatan alat dengan komponen yang lebih baik. Adapun yang harus dipersiapkan untuk rancang bangun sistem antena putar sebagai berikut.

A. Alat dan Perlengkapan

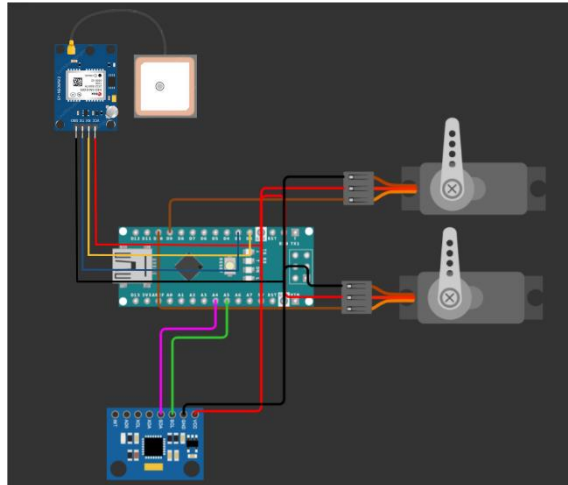
Adapun penjelasan fungsi komponen yang digunakan pada penelitian sistem antena putar ini sebagai berikut.

KOMPONEN	FUNGSI
Modul akselerometer dan giroskop MPU6050	Mengukur akselerasi dan kecepatan sudut (giro) pada tiga sumbu (X, Y, Z) untuk mendeteksi gerakan dan orientasi.
Arduino Uno	Mikrokontroler open-source yang berfungsi sebagai otak sistem, mengontrol dan mengkoordinasikan kerja komponen elektronik lainnya.
Modul GPS Neo 6M V2	Menerima sinyal GPS dan memberikan informasi lokasi, kecepatan, waktu, dan data terkait navigasi lainnya.
Motor Servo 9G (azimuth dan elevasi)	Digunakan untuk menggerakkan turret atau mekanisme lainnya dengan kontrol presisi. Dalam konteks ini, digunakan untuk menggerakkan turret pada sumbu azimuth dan elevasi.
Kabel jumper	Digunakan untuk menghubungkan komponen elektronik dengan mudah dan fleksibel pada breadboard atau rangkaian lainnya.
Breadboard	Platform prototyping yang digunakan untuk menghubungkan komponen elektronik secara sementara dan melakukan percobaan rangkaian.

Gambar 1. Fungsi Komponen Sistem Antena Putar
(Sumber: Dokumen pribadi)

B. Perangkat Keras

Hubungkan komponen yang diperlukan ke Arduino Uno, termasuk MPU6050, aktuator servo, dan modul GPS. Pastikan semua koneksi dibuat dengan benar sesuai pengkabelan berikut.



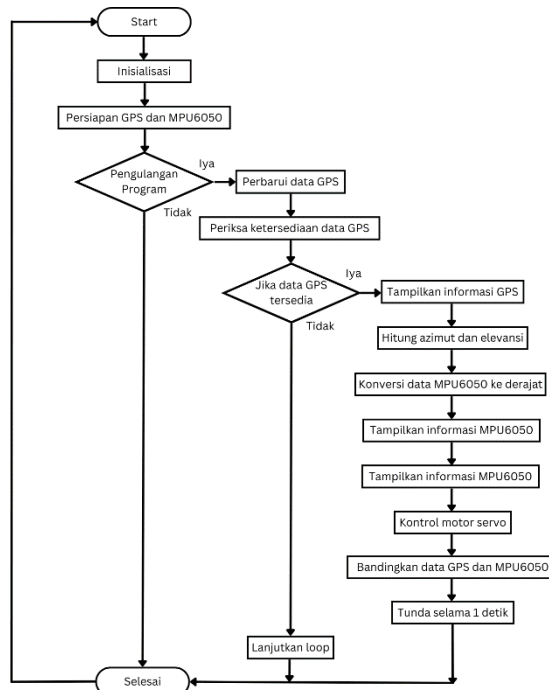
Gambar 2. Sistem Pengkabelan Sistem Antena Putar (Sumber: Dokumen pribadi)

C. Perangkat Lunak

Persiapkan perangkat lunak Arduino IDE dan pastikan pustaka yang diperlukan, termasuk *Wire*, *MPU6050*, *Servo*, dan *TinyGPS++*, telah diinstal. Rekatkan kode pemrograman yang disediakan ke Arduino IDE. Kompilasi program dan unggah ke Arduino Uno.

D. Struktur Alur Kerja

Program ini menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler dan beberapa komponen tambahan untuk menerima data dari MPU6050, GPS, dan aktuator servo kontrol. Algoritma program mengintegrasikan data MPU6050 dan GPS untuk menghitung azimuth dan ketinggian. Posisi sebenarnya ditentukan menggunakan data GPS, sedangkan sudut akselerasi sepanjang sumbu X dan Y diukur menggunakan data MPU6050. Untuk diagram aktivitas dan alur kerja program sistem antena putar secara



besar sebagai berikut.

Gambar 3. Diagram Aktivitas Dan Alur Kerja Program Sistem Antena Putar

(Sumber: Dokumen pribadi)

Kami mengendalikan motor servo berdasarkan sudut akselerasi yang diukur dengan MPU6050. Pembaruan loop utama dan proses data GPS menangkap dan mengubah data MPU6050 ke sudut, dan mengontrol motor servo. Selain itu, data GPS dan data MPU6050 dibandingkan untuk menentukan persentase kesalahan.

E. Uji Coba Perbandingan

Lakukan sample run dengan mengeksekusi program pada Arduino Uno dengan semua komponen terhubung. Pastikan semua koneksi dan perangkat beroperasi. Amati hasil program yang ditampilkan, yang meliputi data GPS, data MPU6050, sudut motor servo, dan persentase kesalahan. Bandingkan hasilnya dengan algoritme sebelumnya, yang tidak menggunakan filter Kalman. Menganalisis dan menganalisa perbedaan akurasi dan efikasi antara kedua algoritma tersebut.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan sistem pengkabelan yang sudah dibuat untuk sistem antena putar yang akan digunakan dengan algoritma program dengan *Kalman Filter* dan algoritma program tanpa *Kalman Filter*. Untuk penampakan alat sistem antena putar sebagai berikut.



Gambar 4. Alat Demo Sistem Antena Putar (Sumber: Dokumen pribadi)

Pada penelitian ini, kami membandingkan program/algoritma tanpa Kalman Filter dan program/algoritma yang menggunakan Kalman Filter sebagai berikut.

```

CEMS
10:37:40.374 -> Elevansi: 179.97
10:37:40.474 ->
10:37:40.514 -> Accelerometer (degrees): x=43, y=158, z=42
10:37:40.529 -> Gyroscope: 50=501, 50=218, 50=205
10:37:40.558 -> Temperature: 32.11 °C
10:37:40.629 ->
10:37:40.658 -> MPU Acceleration: 652.50 m/s^2, MPU Acceleration: 189.32 m/s^2, Error Percentage: 0.45 %
10:37:40.722 ->
10:37:40.742 -> Latitude: -6.961513
10:37:40.758 -> Longitude: 107.195192
10:37:40.800 -> Altitude: 685.80
10:37:40.820 -> Date: DTMOD Date: 02/27/21:00
10:37:40.840 -> Date: 50:50
10:37:40.880 -> Elevansi: 179.97
10:37:40.900 ->
10:37:40.920 -> Latitude: -6.961513
10:37:40.935 -> Longitude: 107.195192
10:37:40.950 -> Altitude: 685.80
10:37:40.965 -> Date: DTMOD Date: 02/27/21:00
10:37:40.980 -> Date: 50:50
10:37:41.000 -> Elevansi: 179.97
10:37:41.015 ->
10:37:41.030 -> Accelerometer (degrees): X=43, Y=158, Z=42
10:37:41.045 -> Gyroscope: 50=501, 50=218, 50=205
10:37:41.060 -> Temperature: 32.20 °C
10:37:41.075 ->
10:37:41.090 -> MPU Acceleration: 652.50 m/s^2, MPU Acceleration: nan m/s^2, Error Percentage: nan %
10:37:41.105 ->
10:37:41.120 -> Accelerometer (degrees): X=43, Y=158, Z=42
10:37:41.135 -> Gyroscope: 50=501, 50=218, 50=205
10:37:41.150 -> Temperature: 32.20 °C
10:37:41.165 ->
10:37:41.180 -> MPU Acceleration: 652.50 m/s^2, MPU Acceleration: 189.32 m/s^2, Error Percentage: 0.45 %
10:37:41.195 ->
10:37:41.210 -> Latitude: -6.961513
10:37:41.225 -> Longitude: 107.195192
10:37:41.240 -> Altitude: 685.80
10:37:41.255 -> Date: DTMOD Date: 02/27/21:00
10:37:41.270 -> Date: 50:50
10:37:41.285 -> Elevansi: 179.97
10:37:41.300 ->
10:37:41.315 -> Accelerometer (degrees): X=43, Y=158, Z=42
10:37:41.330 -> Gyroscope: 50=501, 50=218, 50=205
10:37:41.345 -> Temperature: 32.20 °C
10:37:41.360 ->
10:37:41.375 -> MPU Acceleration: 652.50 m/s^2, MPU Acceleration: 189.32 m/s^2, Error Percentage: 0.45 %
10:37:41.390 ->
    
```

Gambar 5. Hasil Program/Algoritma tanpa Filter Kalman

Pada hasil data tersebut terlihat bahwa nilai galat memiliki kondisi NaN atau bukan angka karena kegagalan pembacaan pada salah satu komponen data yaitu akselerasi MPU 6050 yang menyebabkan nilai galat tidak dapat ditentukan. Pada kondisi tersebut dengan intensitas yang cukup banyak membuat pembacaan kesimpulan data keliru karena menganggap kondisi NaN pada nilai galat sebesar 0%.

NO	AZIMUTH (°)	ELEVANSI (°)	AKSELERASI (MG)	PERCEPATAN KALMAN (M/S ²)	ERROR ALAT/GALAT (%)
1	-92.20	-0.01	X = -7492, Y = 14228, Z = -4152	9.77	1.62
2	-92.20	-0.01	X = -7284, Y = 14036, Z = -3756	9.77	0.47
3	-92.20	-0.01	X = -7372, Y = 14004, Z = -4036	9.77	0.01
4	-92.20	-0.01	X = -7444, Y = 13968, Z = -3932	9.77	0.12
5	-92.20	-0.01	X = -7416, Y = 13996, Z = -4088	9.77	0.17
6	-92.20	-0.01	X = -7372, Y = 13980, Z = -4036	9.77	0.11
7	-92.20	-0.01	X = -7436, Y = 13996, Z = -3940	9.77	0.01
8	-92.20	-0.01	X = -7280, Y = 13896, Z = -3980	9.76	0.81

Gambar 8. Tabel Hasil Program/Algoritma dengan Filter Kalman

Pada hasil data tersebut terlihat bahwa tidak adanya nilai galat memiliki kondisi NaN atau bukan angka karena kegagalan pembacaan pada salah satu komponen data sehingga data yang dihasilkan lebih akurat dan sesuai dengan nilai hasil pembacaan.

Dari hasil pengujian di atas, kita dapat mengamati beberapa kelebihan dan kekurangan dari kedua pengujian tersebut. Tabel berikut menunjukkan perbandingan kelebihan dan kekurangan keduanya.

PERIHAL	PROGRAM/ALGORITMA TANPA KALMAN FILTER	PROGRAM/ALGORITMA DENGAN KALMAN FILTER
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilitas nilai hasil yang tinggi • Performa yang konsisten • Tidak memerlukan perhitungan yang rumit 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengurangan error/alat yang signifikan • Dapat mengatasi ketidakpastian dan noise
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> • Rentan terhadap noise dan ketidakpastian • Tidak mampu menangani perubahan dinamis secara efektif 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan perhitungan yang lebih kompleks • Keterbatasan dalam sumber daya komputasi

Gambar 9. Tabel Perbandingan Program/Algoritma Perangkat Lunak

Pada program/algoritma tanpa Kalman Filter, keunggulannya meliputi stabilitas nilai hasil yang tinggi dan kinerja yang konsisten. Namun, kelemahannya adalah rentan terhadap kebisingan dan ketidakpastian dan tidak dapat menangani perubahan dinamis secara efektif.

Sementara itu, program/algoritma dengan Filter Kalman memiliki beberapa keunggulan yang signifikan. Kehadiran Filter Kalman mengurangi kesalahan/alat yang signifikan, memungkinkan penanganan ketidakpastian dan kebisingan yang lebih baik, dan dapat mengatasi perubahan dinamis secara lebih efektif. Namun, kekurangannya termasuk kebutuhan untuk perhitungan yang lebih kompleks dan keterbatasan sumber daya komputasi.

Penggunaan Filter Kalman dalam program/algoritma menunjukkan peningkatan signifikan dalam pengurangan kesalahan/alat dan kemampuan penanganan ketidakpastian

dan kebisingan. Namun, keterbatasan komputasi dan sumber daya harus dipertimbangkan saat memilih pendekatan yang tepat.

Adapun untuk melihat detail dan gambaran alat lebih lengkap bisa melalui platform youtube dengan link berikut, <https://youtu.be/4pc483IRReY>.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil parsing data turret yang telah disediakan, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil. Pertama, terdapat ketidaktepatan dalam mendeteksi waktu dan tanggal pada data GPS. Hal ini terlihat dari kolom "Date" yang menunjukkan "INVALID" pada setiap baris data, tetapi ini tidak berpengaruh besar karena waktu dan tanggal yang digunakan berdasarkan pengaturan monitor serial pada arduino IDE atau *dashboard* untuk Lora nantinya. Kedua, terdapat masalah dengan akselerometer dan giroskop yang menghasilkan nilai yang bervariasi. Perbedaan nilai pada masing-masing sumbu (X, Y, Z) menunjukkan adanya perubahan yang signifikan dalam gerakan turret. Selain itu, terdapat juga nilai yang hilang (NaN) pada kolom *accelerometer* dan *gyroscope*, yang mengindikasikan adanya kegagalan dalam pengukuran.

Berdasarkan temuan di atas, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya. Pertama, perlu dilakukan perbaikan atau pembaruan pada perangkat GPS yang digunakan untuk memastikan akurasi waktu dan tanggal yang lebih baik. Dengan demikian, data yang dihasilkan dapat lebih dapat diandalkan. Kedua, perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap masalah pada akselerometer dan giroskop. Diperlukan investigasi untuk menentukan penyebab variasi nilai yang signifikan dan kegagalan pengukuran. Selain itu, pemilihan perangkat yang lebih baik atau kalibrasi ulang dapat menjadi solusi untuk memperbaiki akurasi pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Atanasov, J. Le Ny, and V. Kumar, "Inertial, vision, and encoder-based localization for visually impaired people," *J. Field Robot.*, vol. 30, no. 3, pp. 399-419, May-Jun. 2013.
- [2] M. Caruso, A. Maravall, M. Jurado, and F. R. Rubio, "Attitude estimation using Unscented Kalman Filter for low-cost MEMS IMU," *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 16874-16897, Dec. 2012.
- [3] A. Thien, R. M. K. H. Wong, A. O. Tay, and D. Zhu, "Inertial navigation systems for unmanned aerial vehicles," *Measurement*, vol. 45, no. 2, pp. 265-273, Feb. 2012.
- [4] H. Yu and H. Ahn, "Roll and pitch angle estimation for mobile robot using an improved complementary filter algorithm," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 67, no. 3-4, pp. 325-338, Nov. 2012.
- [5] K. Zhou and K. L. Chan, "Optimal design of a triaxial MEMS accelerometer for roll/pitch measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 11, pp. 2485-2494, Nov. 2008.
- [6] A. Kos, M. Mihelj, and B. Murovec, "Position and orientation estimation using inertial sensors," *Sensors*, vol. 11, no. 9, pp. 9154-9178, Sep. 2011.
- [7] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in *Proc. AeroSense: Int. Soc. Opt. Eng.*, Apr. 1997, pp. 182-193.
- [8] R. L. Jansson and T. Gustafsson, "Inclinometer with a Kalman filter for slope estimation of arbitrary objects," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 3, pp. 886-893, Jun. 2006.
- [9] T. Ristic, B.-T. Vo, and B.-N. Vo, "An adaptive multi-target tracking algorithm using random matrices," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 32-53, Jan. 2010.
- [10] J. Crassidis and F. L. Markley, "Unscented filtering for spacecraft attitude estimation," *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 30, no. 2, pp. 496-503, Mar.-Apr. 2007.

- [11] S. Trimpe and R. D'Andrea, "Inertial sensing in fast and accurate state estimation for legged robots," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 133, no. 2, p. 021002, Mar. 2011.
- [12] F. Maarif, A. Fauzi, and S. Aris, "Implementation of Kalman filter to reduce noise in accelerometer sensor for measuring the angle of balancing robot," in *Proc. Int. Conf. Intell. Technol. Its Appl.*, Dec. 2017, pp. 238-243.
- [13] J. Lee and C. C. Chung, "A hybrid IMU and magnetometer sensor fusion algorithm using Kalman filter," in *Proc. IEEE Int. Conf. Adv. Robot. (ICAR)*, Jun. 2011, pp. 330-335.
- [14] Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons.
- [15] Chen, C., Lin, C., & Su, J. (2017). *High-accuracy antenna orientation tracking system using low-cost IMU sensors*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4816-4825.
- [16] Collin, R. E. (2013). *Antennas and Radiowave Propagation*. McGraw Hill.
- [17] Croce, D., & Rinner, B. (2019). *Low Power Wide Area Networks for Internet of Things: A Review*. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1), 1-1.
- [18] Ge, Z., Chua, K. C., & Chin, F. Y. (2018). *Low-cost, high-precision antenna orientation tracking using inertial sensors*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), 3835-3845.
- [19] Moynihan, R., Breen, M., Walsh, D., & O'Hare, G. M. (2018). *LoRa WAN and LoRaWAN: A review of emerging low-power wireless communication systems for industrial IoT*. *IEEE Access*, 6, 883-892.