

Research Article

Kalibrasi dan Pemrosesan Sinyal Sensor MPU6050 untuk Meningkatkan Stabilitas Navigasi *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)

Calibration and Signal Processing of MPU6050 Sensor to Improve Navigation Stability of Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Permono Adi Putro^{1,*}, Kuntjoro Pinardi², Aditia Ramadhan¹, Aulia Sultan Rafael Zein¹, Yokeu Nurfalalah¹

¹ Program Studi Fisika, Fakultas Sains, Universitas Mandiri, Subang, Jawa Barat, Indonesia

² PT PAL Indonesia, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

*Corresponding Author: permonoadi29@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 February 2025

Revised: 28 February 2025

Accepted: 04 March 2025

Available Online 10 March 2025

Keywords:

AUV navigation

digital filter

Fast Fourier Transform

MPU6050

sensor calibration

ABSTRACT

A stable and accurate navigation system is crucial for the operation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), especially in underwater environments where GPS signals are unavailable. This study aims to enhance AUV navigation performance by optimizing the use of a low-cost inertial sensor, the MPU6050, through calibration and signal processing techniques. The methodology includes reading raw data from accelerometer and gyroscope sensors, performing static calibration to reduce bias and noise, applying Fast Fourier Transform (FFT) for signal analysis, and implementing digital filters such as low-pass and high-pass filters. The raw data reveal significant deviations due to gyroscope bias and accelerometer noise. Static calibration effectively reduces systematic errors, although residual biases remain. FFT analysis identifies dominant frequency components in each axis, while digital filtering helps eliminate irrelevant frequency noise. Precision testing demonstrates that the sensor produces relatively stable data post-calibration, with the Z-axis showing higher deviation compared to the X and Y axes. The combination of calibration and signal processing methods significantly improves the data quality and reliability of the MPU6050 sensor. This research contributes to the development of more efficient and low-cost AUV navigation systems and supports the broader application of simple IMU sensors in underwater exploration and maritime technologies.

ABSTRAK

Kata Kunci:

Fast Fourier Transform

filter digital

kalibrasi sensor

MPU6050;

navigasi AUV

Sistem navigasi yang stabil dan akurat menjadi aspek krusial dalam pengoperasian *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), khususnya di lingkungan bawah air yang tidak memungkinkan penggunaan GPS. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem navigasi AUV dengan memanfaatkan sensor inersial berbiaya rendah, MPU6050, melalui proses kalibrasi dan pemrosesan sinyal. Metode yang dilakukan meliputi pembacaan data mentah dari sensor akselerometer dan giroskop, kalibrasi untuk mengurangi bias dan noise, transformasi sinyal menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), serta penerapan filter digital *low-pass* dan *high-pass*. Data mentah menunjukkan adanya penyimpangan akibat bias pada giroskop dan noise pada akselerometer. Kalibrasi statis mampu menurunkan error sistematis, meskipun beberapa bias residual tetap ada. Analisis FFT berhasil mengidentifikasi frekuensi dominan pada tiap sumbu sensor, dan filter digital mampu mereduksi komponen frekuensi yang tidak relevan. Pengujian presisi menunjukkan bahwa sensor mampu menghasilkan data yang cukup stabil setelah dikalibrasi, meskipun sumbu Z menunjukkan penyimpangan lebih besar dibandingkan sumbu lainnya. Kombinasi teknik kalibrasi dan pemrosesan sinyal terbukti mampu meningkatkan kualitas data dan keandalan sensor. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem navigasi AUV yang lebih efisien dan adaptif dengan biaya

Pendahuluan

Sistem navigasi memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Sistem ini bertanggung jawab untuk memastikan AUV dapat menentukan posisi dan orientasinya secara tepat selama beroperasi di bawah air, khususnya dalam kondisi yang tidak memungkinkan penggunaan *Global Positioning System* (GPS) (Prasetyo et al., 2014). Dalam kondisi seperti ini, sensor inersial seperti akselerometer dan giroskop menjadi komponen utama untuk menjaga kestabilan dan keakuratan navigasi. Namun, sensor inersial dengan tingkat presisi tinggi umumnya memiliki harga yang mahal dan tidak selalu cocok untuk aplikasi yang menekankan efisiensi biaya. Sebagai alternatif, sensor inersial berbiaya rendah seperti MPU-6050 menjadi pilihan yang menarik karena ketersediaannya yang luas dan harga yang terjangkau. Walaupun demikian, sensor ini memiliki beberapa keterbatasan, terutama terkait dengan presisi, stabilitas jangka panjang, dan keandalan dalam kondisi dinamis (Liu et al., 2024).

Salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan sensor inersial murah adalah adanya bias pada giroskop dan noise pada akselerometer yang dapat menyebabkan kesalahan pengukuran. Pada sistem AUV, kesalahan-kesalahan kecil ini dapat terakumulasi seiring waktu dan mengakibatkan penyimpangan posisi yang signifikan, terutama dalam operasi jangka panjang (Han et al., 2020). Oleh karena itu, penting untuk melakukan studi kalibrasi dan pemrosesan sinyal terhadap sensor ini untuk meningkatkan performa sistem navigasi secara keseluruhan.

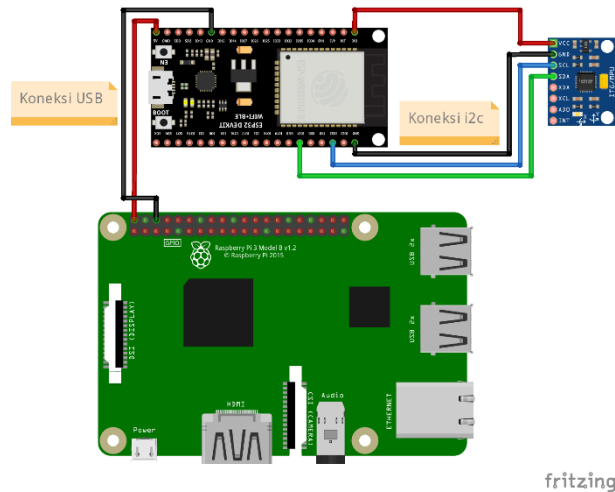
Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kalibrasi dan analisis pemrosesan sinyal dari sensor MPU-6050 dalam konteks sistem navigasi AUV. Fokus utama diberikan pada pembacaan data mentah sensor, proses kalibrasi, analisis sinyal menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), serta penerapan filter digital seperti low-pass dan high-pass filter untuk mereduksi noise dan memperbaiki kestabilan data orientasi. Evaluasi dilakukan terhadap beberapa parameter performa sensor seperti tingkat bias, noise, dan respons dinamis (Ma'arif et al., 2019). Dengan penerapan teknik kalibrasi dan pengolahan sinyal yang tepat, sensor berbiaya rendah ini dapat dioptimalkan untuk memenuhi kebutuhan navigasi di lingkungan bawah air. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem navigasi AUV yang lebih stabil dan efisien, serta mendorong pemanfaatan teknologi sensor IMU dalam eksplorasi laut, aplikasi maritim, dan penelitian lingkungan bawah air yang lebih luas.

Metodologi Penelitian

Pembacaan Data Mentah Sensor MPU6050

Proses awal dalam penelitian ini dimulai dengan pembacaan data mentah dari sensor MPU6050 yang berfungsi untuk mendeteksi gerakan dan orientasi berdasarkan akselerasi serta kecepatan sudut. Rangkaian perangkat keras (Gambar 1) yang digunakan terdiri dari sensor MPU6050, mikrokontroler ESP32S, dan Raspberry Pi yang berperan sebagai pusat pemrosesan data. Ketiga perangkat ini dikoneksikan secara serial, di mana sensor MPU6050 terhubung ke ESP32S melalui protokol I2C, sementara ESP32S dihubungkan ke Raspberry Pi melalui komunikasi USB serial. Setelah perangkat dihubungkan, program inisialisasi ditulis dan

diunggah menggunakan Arduino IDE untuk mengaktifkan sensor dan memulai pengambilan data. Data mentah berupa pembacaan akselerasi dan kecepatan sudut dari sumbu X, Y, dan Z kemudian dikirimkan dari sensor ke ESP32S. Selanjutnya, ESP32S meneruskan data ke Raspberry Pi untuk disimpan dalam format CSV. Data yang terekam kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik, guna memudahkan proses analisis dan interpretasi terhadap dinamika pergerakan.



Gambar 1. Rangkaian perangkat keras

Kalibrasi Sensor MPU6050

Setelah data mentah berhasil diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan kalibrasi sensor untuk mengurangi kesalahan pengukuran akibat offset yang mungkin muncul saat sensor dalam kondisi diam. Kalibrasi dimulai dengan meletakkan sensor pada permukaan datar dan stabil untuk memastikan tidak adanya gangguan eksternal selama proses pengambilan data. Data awal dari akselerometer dan giroskop dikumpulkan saat sensor dalam kondisi diam, lalu dihitung nilai rata-ratanya untuk masing-masing sumbu guna menentukan offset. Nilai offset ini kemudian digunakan untuk mengoreksi data mentah dengan cara mengurangi offset dari setiap pembacaan sensor. Implementasi kalibrasi dilakukan melalui modifikasi program pada Arduino IDE, yang memuat skrip untuk menghitung bias rata-rata dan menerapkannya secara langsung pada data yang dikirim ke Raspberry Pi. Jumlah sampel kalibrasi ditentukan sebelumnya dalam program untuk memastikan akurasi perhitungan offset. Data yang telah dikoreksi kemudian disimpan dan divisualisasikan kembali dalam bentuk grafik guna mengevaluasi efektivitas proses kalibrasi.

Penerapan Fast Fourier Transform pada Sensor MPU6050

Transformasi domain waktu ke domain frekuensi dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik spektral dari data gerakan yang diperoleh. Proses ini dimulai dengan pengambilan data sensor yang telah dikalibrasi, kemudian mengubah sinyal waktu menjadi sinyal frekuensi menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). Agar transformasi FFT dapat bekerja secara optimal, jumlah data yang digunakan harus mendekati bilangan pangkat dua. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan 500 sampel data, yang cukup mendekati batas efisiensi komputasi FFT. Data diambil dengan kecepatan sampling sebesar 10 Hz, yang berarti setiap detik diperoleh 10 titik data. Transformasi ini penting untuk mengidentifikasi

frekuensi dominan dalam sinyal, yang berguna dalam tahap analisis lanjutan seperti deteksi pola gerakan atau vibrasi.

Penerapan Filter Digital

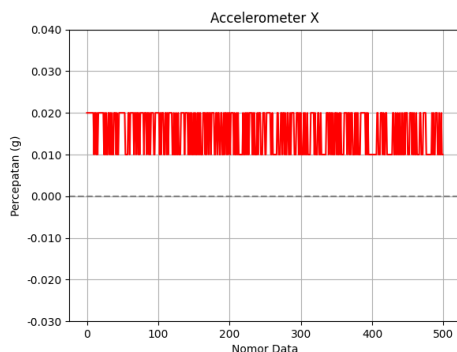
Untuk meningkatkan kualitas data sensor, diterapkan filter digital sebagai tahap pemrosesan sinyal lanjutan. Pemilihan jenis filter dan nilai *cutoff frequency* sangat dipengaruhi oleh karakteristik data yang diinginkan. Pada akselerometer, digunakan filter low-pass dengan dua rentang *cutoff frequency*, yaitu 460 Hz untuk menangkap respons akselerasi cepat seperti tumbukan atau getaran, serta 10–41 Hz untuk gerakan lambat seperti perubahan orientasi atau navigasi sistem inersial. Sebaliknya, pada data giroskop diterapkan filter high-pass untuk mengeliminasi noise atau pergeseran jangka panjang akibat akumulasi error. *Cutoff* yang digunakan bervariasi tergantung sumbu; misalnya, pada sumbu X digunakan 0,1 Hz untuk menyaring perubahan perlahan, sementara pada sumbu Y digunakan *cutoff* sebesar 1,75 Hz untuk menyaring lebih banyak komponen frekuensi rendah. Pada sumbu Z, *cutoff* diatur pada 0,5 Hz agar mampu menjaga komponen gerakan yang relevan. Implementasi filter digital dilakukan dalam lingkungan Python pada Raspberry Pi, dan hasilnya dianalisis dalam bentuk grafik spektral untuk menilai efektivitas penyaringan sinyal.

Uji Presisi Sensor MPU6050

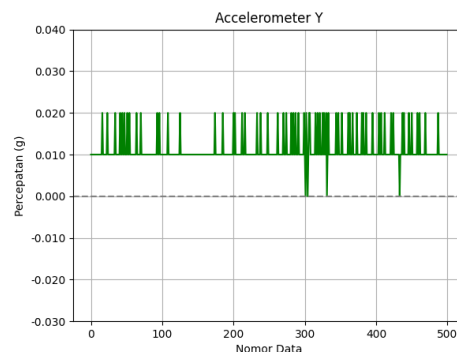
Sebagai tahap akhir dari metode ini, dilakukan pengujian presisi terhadap sensor giroskop dari MPU6050 dengan fokus pada ketiga sumbu gerak (X, Y, dan Z). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai keakuratan sensor dalam mengukur sudut rotasi (θ) dan membandingkannya dengan nilai sudut referensi yang diketahui. Dari hasil pengukuran ini, dihitung besarnya persentase penyimpangan ($\% \Delta \theta$) antara hasil pembacaan sensor dengan nilai yang seharusnya. Nilai penyimpangan ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat presisi sensor serta keandalan sistem dalam aplikasi pemantauan gerakan. Proses ini menjadi penting dalam validasi sensor sebelum diterapkan pada sistem yang lebih kompleks atau sistem nyata seperti kendali gerak robotik dan navigasi inersial.

Hasil dan Pembahasan

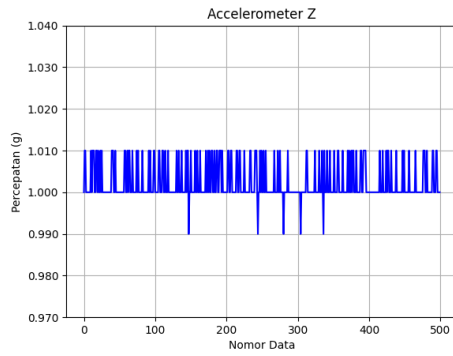
Pembacaan Data Mentah Sensor MPU6050



(a)



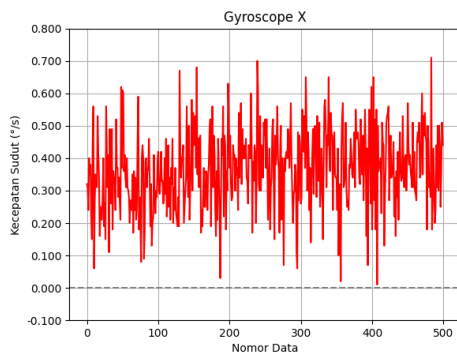
(b)



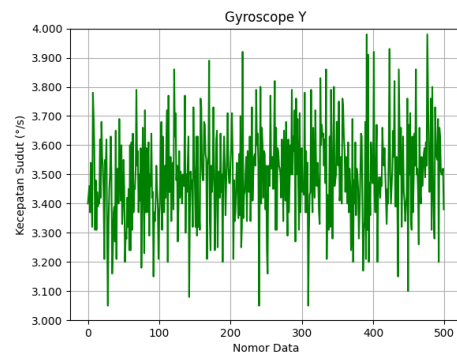
(c)

Gambar 2. Grafik akselerometer pada sumbu X, Y, Z

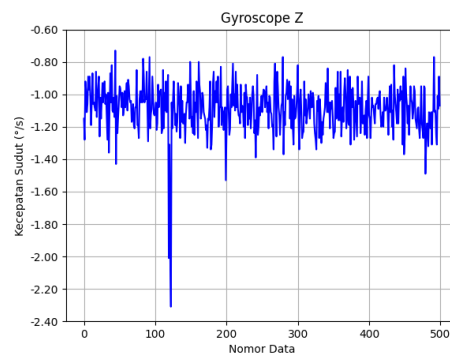
Hasil dari Gambar 2 menunjukkan hasil dari pembacaan data dari sumbu x, y, dan z pada parameter akselerometer. Data akselerometer pada sumbu x dan y menghasilkan nilai pada rentang 0,010-0,020 dan 0,000-0,020 yang artinya data ini menghasilkan pembacaan dimana nilai pada sumbu x dan y itu harusnya Ketika keadaan diam nilai yang dihasilkan adalah 0. Namun pada pembacaan data pada sumbu z menghasilkan nilai pembacaan pada rentang 0,990-1,010 yang dimana pada sumbu Z Jika sensor dalam posisi diam, nilai akselerasi pada sumbu Z seharusnya mendekati $+9.81 \text{ m/s}^2$ (di bawah gravitasi) atau -9.81 m/s^2 jika posisi sensor terbalik. Namun, karena sensor akselerometer sering kali memiliki bias dan noise, pembacaan data tidak selalu 100% akurat. Oleh karena itu, kalibrasi diperlukan untuk mengurangi error dan memastikan pembacaan mendekati nilai yang diharapkan.



(a)



(b)

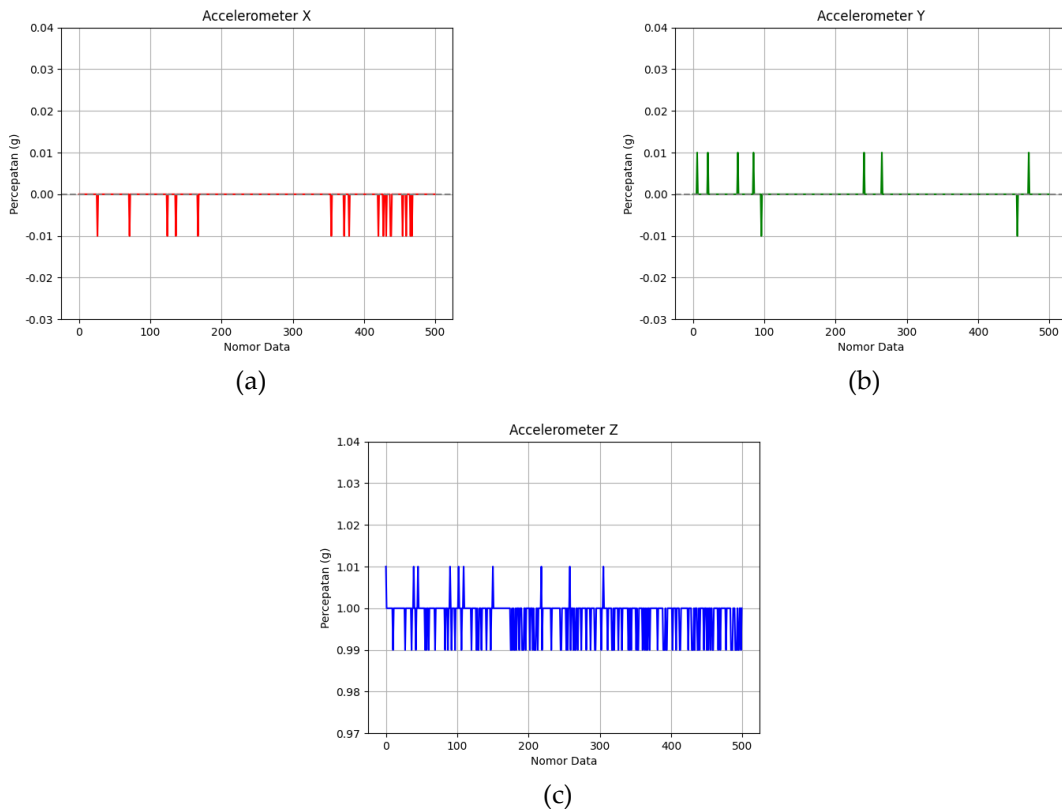


(c)

Gambar 3. Grafik giroskop pada sumbu X, Y, Z

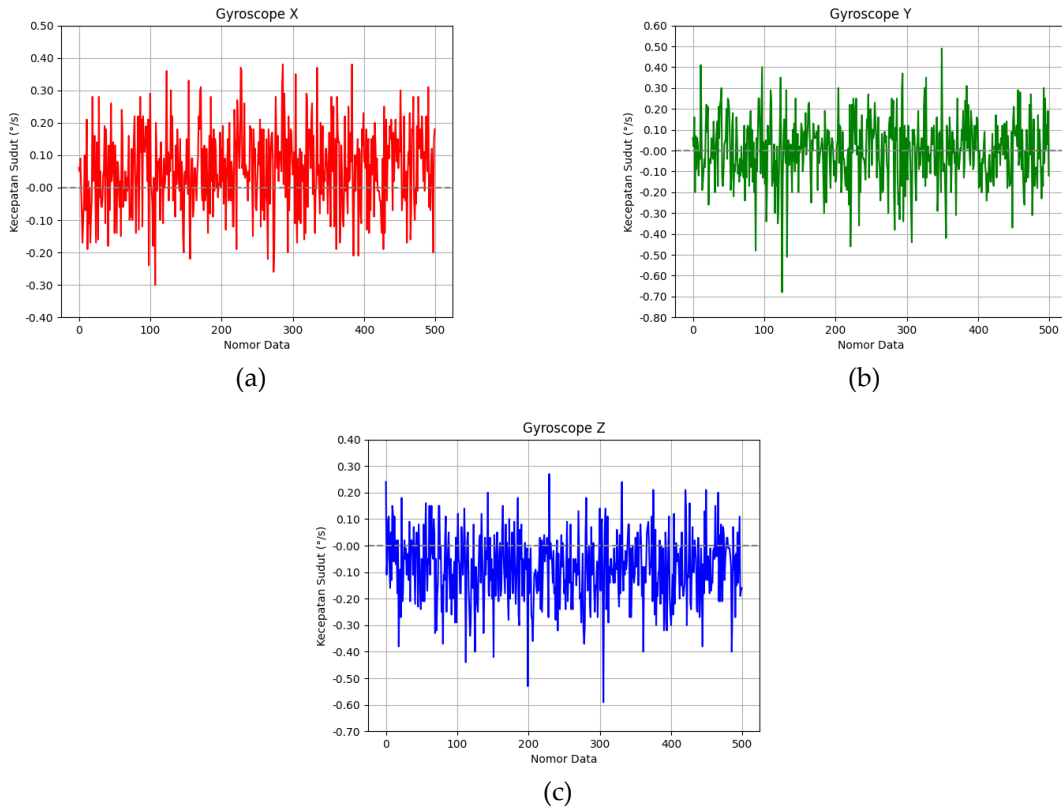
Hasil dari Gambar 3 menunjukkan pembacaan data pada parameter giroskop dimana pembacaan itu meliputi sumbu x, y, dan z. Nilai pembacaan yang dihasilkan itu Ketika sensor diam harus mendekati nilai $0^\circ/s$. Yang artinya pada parameter giroskop ini banyak terdapat kesalah pembacaan yang disebabkan oleh bias dan bias. Nilai kesalahan dari kedua sensor ini adalah bias yang disebabkan oleh bias pada sinyal acceleration (Wahyudi, 2022).

Kalibrasi Sensor MPU6050



Gambar 4. Grafik akselerometer pada sumbu X, Y, Z setelah dikalibrasi

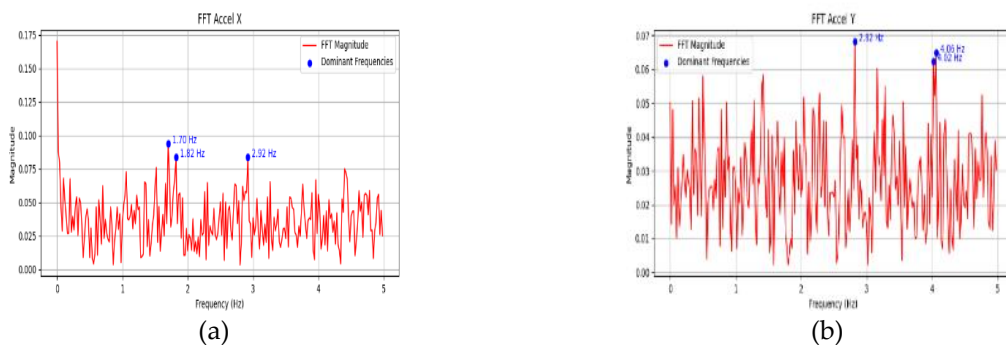
Pada Gambar 4 mengalami perubahan setelah dilakukannya kalibrasi dengan sebelum kalibrasi. Dimana nilai yang dihasilkan pada sumbu x dan y ada beberapa masalah pembacaan dimana masih adanya nilai bias atau offset. Namun grafk yang ditampilkan data yang dihasilkan sudah banyak berada pada nilai nol. Namun pada sumbu z nilai yang ditampilkan pada grafik masih banyak nilai yang jauh dari nilai sesungguhnya sumbu z yaitu 9,8. Tapi sudah adanya perubahan yang cukup dominan. Perlunya data yang telah dikalibrasi yang dikumpulkan menggunakan sensor statis di atas meja. Berdasarkan hasilnya, kalibrasi akselerometer telah mengurangi sejumlah bias offset dalam pengukuran mentah. Namun, masih terdapat beberapa bias residual yang tidak dapat diatasi oleh proses kalibrasi, dan jumlah ini harus diperkirakan (Tjhai, 2019).

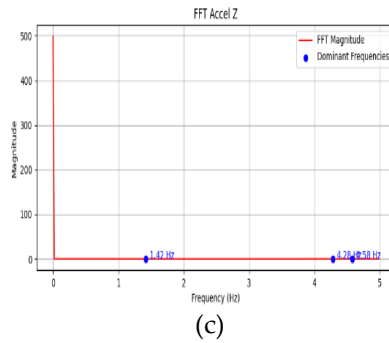


Gambar 5. Grafik giroskop pada sumbu X, Y, Z setelah dikalibrasi

Proses kalibrasi parameter giroskop metode yang dilakukan sama seperti akselerometer dimana sensor dalam keadaan statis. Hasil yang ditampilkan pada Gambar 5 berbeda dengan data keluaran sebelum sensor dikalibrasi. Nilai yang dihasilkan sudah mendekati angka $0^\circ/s$. Kesalahan sistematis pada giroskop terutama berasal dari offset bias. Oleh karena itu, kalibrasi giroskop dapat dilakukan tanpa menggunakan meja putar (*turntable*), yaitu dengan meletakkan giroskop dalam mode statis selama jangka waktu tertentu, kemudian menghitung rata-rata offset bias-nya. Namun, mengabaikan faktor skala (*scale factor*) masih dapat mengakibatkan penurunan kinerja (Tjhai, 2019).

Penerapan Fast Fourier Transform pada Sensor MPU6050

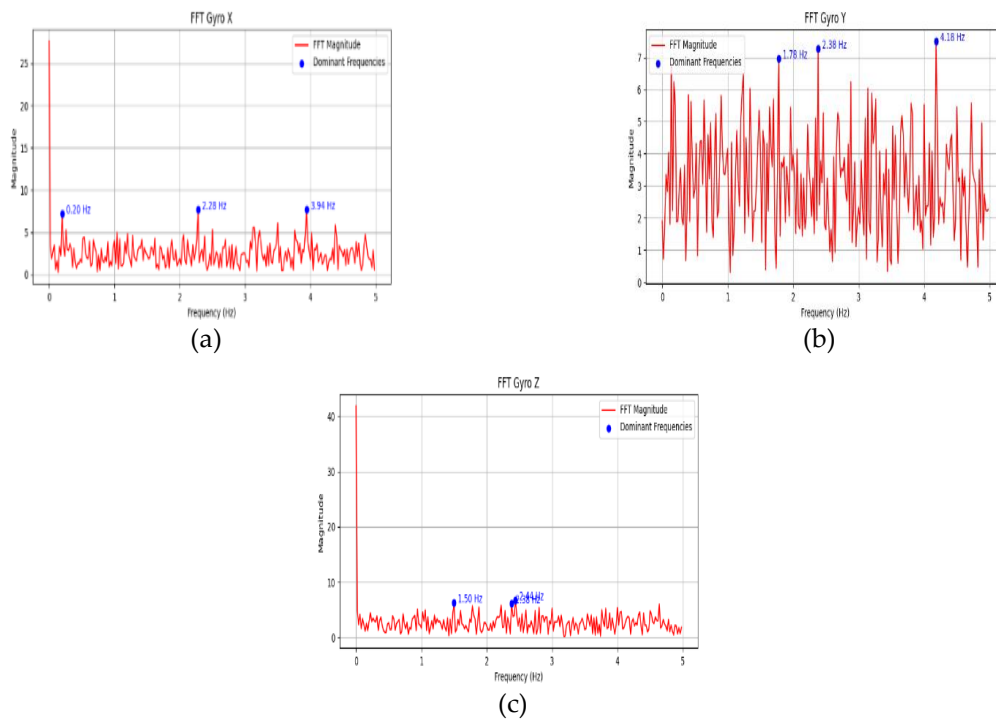




(c) **Gambar 6.** Grafik FFT akselerometer pada sumbu X, Y, Z

Gambar 6 menunjukkan hasil analisis spektrum frekuensi (*Fast Fourier Transform* atau FFT) dari data percepatan pada tiga sumbu (X, Y, dan Z). Terdapat tiga grafik yang masing-masing merepresentasikan hasil FFT untuk setiap sumbu. Pada grafik sumbu X, terlihat bahwa magnitudo frekuensi tersebar dengan beberapa puncak dominan yang berada pada frekuensi 1.70 Hz, 1.82 Hz, dan 2.92 Hz. Grafik ini menunjukkan fluktuasi kecil pada magnitudo. Grafik sumbu Y menunjukkan pola serupa, dengan puncak frekuensi dominan pada 2.87 Hz, 4.06 Hz, dan 4.02 Hz. Grafik ini memiliki karakteristik yang lebih bervariasi dibandingkan sumbu X. Sedangkan pada grafik sumbu Z, terlihat adanya magnitudo yang jauh lebih tinggi dibandingkan dua sumbu lainnya. Frekuensi dominan pada grafik ini berada pada 1.42 Hz, 4.22 Hz, dan 4.58 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa sumbu Z memiliki komponen getaran yang lebih signifikan.

Setiap grafik menggunakan garis merah untuk menunjukkan magnitudo FFT, dengan titik biru untuk menandai frekuensi dominan yang dilabeli sesuai dengan nilainya. Analisis ini dapat digunakan untuk memahami pola getaran atau fenomena fisik yang terjadi dalam data percepatan. Frekuensi dominan dapat diidentifikasi sebagai puncak-puncak yang terlihat jelas pada grafik, sedangkan noise biasanya muncul sebagai komponen amplitudo kecil di area frekuensi tinggi.



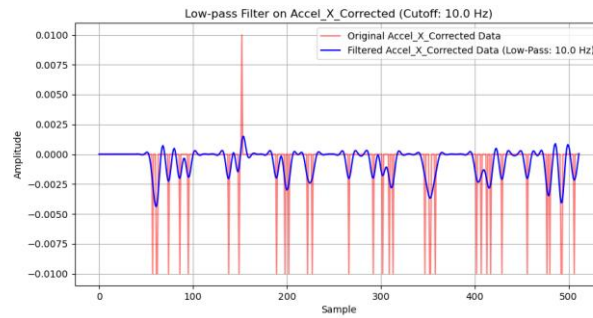
Gambar 7. Grafik FFT giroskop pada sumbu X, Y, Z

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis spektrum frekuensi FFT dari data giroskop pada tiga sumbu X, Y, dan Z. Setiap grafik memberikan informasi mengenai distribusi magnitudo pada frekuensi tertentu, dengan puncak frekuensi dominan yang diidentifikasi. Pada grafik FFT Gyro X, distribusi magnitudo FFT terlihat cukup rendah, dengan beberapa puncak frekuensi dominan yang teridentifikasi pada 0.20 Hz, 2.28 Hz, dan 3.94 Hz. Grafik ini menunjukkan bahwa sinyal giroskop pada sumbu X memiliki intensitas kecil dengan komponen dominan pada frekuensi rendah hingga menengah. Grafik FFT Gyro Y menunjukkan pola yang lebih fluktuatif dibandingkan sumbu X, dengan distribusi magnitudo yang lebih merata. Frekuensi dominan yang teridentifikasi pada grafik ini berada di 1.78 Hz, 2.39 Hz, dan 4.18 Hz. Puncak-puncak tersebut menunjukkan adanya komponen frekuensi yang lebih signifikan pada sinyal giroskop sumbu Y. Pada grafik FFT Gyro Z, terlihat adanya magnitudo yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua sumbu lainnya, khususnya pada frekuensi rendah. Frekuensi dominan yang teridentifikasi pada grafik ini adalah 1.50 Hz, 2.85 Hz, dan 4.12 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa sumbu Z memiliki sinyal dengan komponen dominan yang lebih signifikan dibandingkan sumbu X dan Y.

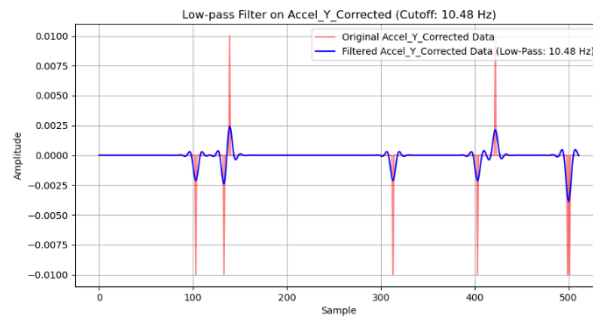
Terdapat beberapa keterbatasan yang harus diperhatikan. Akurasi hasil FFT dipengaruhi oleh resolusi analisis dan tingkat pengambilan sampel (*sampling rate*). Untuk memastikan akurasi, *sampling rate* harus lebih dari dua kali lipat frekuensi tertinggi sesuai dengan aturan Nyquist (De Agostino, 2008). Selain itu, potensi kesalahan seperti aliasing atau noise dalam sinyal dapat memengaruhi hasil analisis. Oleh karena itu, diperlukan langkah preprocessing, seperti penggunaan *windowing*, untuk mengurangi efek noise pada data (Fan et al., 2004). Sebagai tindak lanjut, beberapa langkah dapat diambil, seperti merancang filter *low-pass* untuk menghilangkan noise di frekuensi tinggi atau *high-pass* untuk fokus pada frekuensi rendah, membandingkan hasil FFT dengan referensi dari penelitian sebelumnya untuk validasi, dan mengaitkan frekuensi dominan dengan fenomena fisik tertentu.

Penerapan Filter Digital

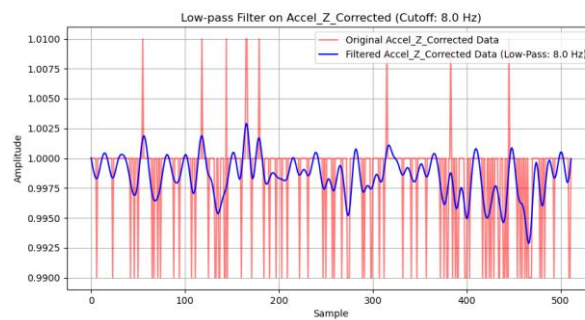
Penerapan Low-Pass Filter pada Accelerometer. Gambar 8 menunjukkan hasil pemrosesan data akselerometer pada sumbu X, Y, dan Z menggunakan filter *low-pass* untuk mengurangi noise pada frekuensi tinggi. Tujuan utama dari penerapan filter ini adalah menghasilkan sinyal yang lebih halus, sehingga mempermudah analisis terhadap data akselerasi yang lebih relevan. Dalam grafik, sumbu horizontal (*x-axis*) mewakili jumlah sampel data, sedangkan sumbu vertikal (*y-axis*) menunjukkan amplitudo akselerasi. Garis merah merepresentasikan data mentah akselerometer yang telah dikoreksi, sementara garis biru menunjukkan data hasil filter dengan *cutoff frequency* yang berbeda pada setiap sumbu.



(a)



(b)



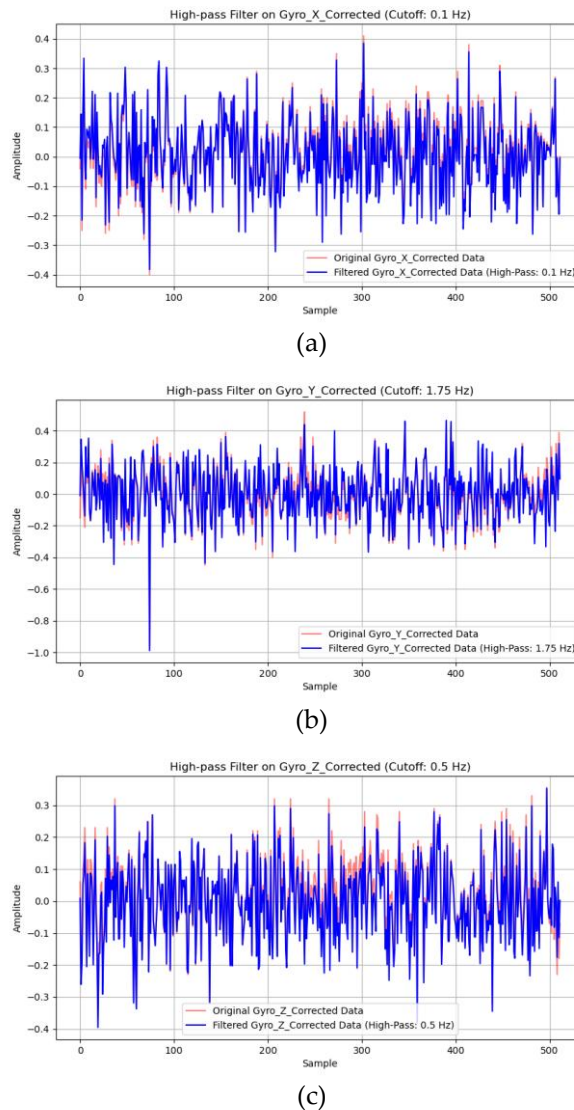
(c)

Gambar 8. Grafik akselerometer pada sumbu X, Y, Z

Data pada sumbu X ini difilter dengan *cutoff frequency* 10 Hz. Hasil filter (garis biru) terlihat lebih halus dibandingkan data mentah (garis merah), menunjukkan bahwa filter low-pass berhasil mengurangi noise pada frekuensi tinggi, tanpa menghilangkan informasi gerakan yang signifikan. Sedangkan, Data akselerometer pada sumbu Y menggunakan *cutoff frequency* sebesar 10.48 Hz. Setelah difilter, sinyal lebih stabil dan bebas dari gangguan noise, mencerminkan efektivitas filter low-pass dalam menjaga informasi yang relevan pada sumbu ini. Sementara itu, *cutoff frequency* yang digunakan untuk sumbu Z lebih rendah, yakni 8 Hz. Pemilihan ini kemungkinan untuk mempertahankan informasi gerakan yang signifikan pada frekuensi menengah, seperti perubahan akibat gravitasi atau posisi vertikal.

Filter low-pass sangat membantu dalam aplikasi navigasi berbasis akselerometer atau analisis gerakan. *Cutoff frequency* yang dipilih menentukan batas di mana noise dihilangkan, sementara informasi gerakan tetap dipertahankan (Magsi et al., 2018). Pada ketiga gambar diatas sudah sesuai dengan prinsip penggunaan filter low pass karena filter low pass hanya menerapkan atau mengambil frekuensi rendah dan mengabaikan frekuensi tinggi (Pangestu et al., 2021).

Penerapan High-Pass Filter pada Giroskop. Jika dibandingkan dengan kebutuhan tersebut, intensitas cahaya dari sebuah lampu LED 15 watt dengan luminous flux sekitar 1500 lumen pada jarak 3 meter.



Gambar 9. Grafik giroskop pada sumbu X, Y, Z

Gambar 9 menunjukkan pemrosesan sinyal giroskop pada sumbu X, Y, dan Z menggunakan filter high-pass untuk menghilangkan komponen frekuensi rendah, seperti bias atau bias. Filter ini bertujuan agar sinyal hanya menyimpan informasi terkait perubahan cepat atau getaran dengan frekuensi tinggi. Data giroskop pada sumbu X difilter menggunakan *cutoff frequency* sebesar 0,1 Hz. Hasilnya menunjukkan bahwa filter berhasil mengurangi komponen frekuensi rendah sehingga menghasilkan sinyal yang lebih stabil di sekitar nilai rata-rata, dengan komponen perubahan cepat yang lebih terlihat jelas. Sedangkan, data giroskop pada sumbu Y menggunakan *cutoff frequency* sebesar 1,75 Hz. Tingkat *cutoff* ini lebih tinggi dibandingkan sumbu X, sehingga lebih banyak komponen frekuensi rendah yang dihilangkan. Hasilnya, sinyal lebih fokus pada getaran atau perubahan cepat yang terjadi pada sumbu Y. Sementara itu, proses filtering data giroskop pada sumbu Z dengan *cutoff frequency* sebesar 0,5 Hz. Hasil filtering ini menyeimbangkan antara pengurangan bias dan pelestarian komponen frekuensi menengah hingga tinggi yang relevan untuk analisis gerakan pada sumbu tersebut.

Uji Presisi Sensor MPU6050

Tabel 1. Data hasil uji presisi giroskop pada sumbu X, Y, Z

N data	Sumbu X			Sumbu Y			Sumbu Z		
	Data Awal	θ	$\% \Delta \theta$	Data Awal	θ	$\% \Delta \theta$	Data Awal	θ	$\% \Delta \theta$
Ke-1	877,13	87,71	-2,54	834,32	83,43	-7,3	-894,31	-89,43	0,63
Ke-2	-881,62	-88,16	2,04	-888,59	-88,86	1,27	884,07	88,41	-1,77
Ke-3	846,24	84,62	-5,98	863,65	86,36	-4,04	-941,99	-94,2	-4,67
Ke-4	-874,65	-87,46	2,82	-886,34	-88,63	1,52	914,65	91,46	1,62
Ke-5	884,31	88,43	-1,74	887,48	88,75	-1,39	-888,86	-88,89	1,23
Ke-6	-883,03	-88,3	1,89	-891,04	-89,1	1	979,35	97,94	8,82
Ke-7	882,94	88,29	-1,9	897,34	89,73	-0,3	-850,9	-85,09	5,46
Ke-8	-903,6	-90,36	-0,4	-899,2	-89,92	0,08	838,61	83,86	-6,82
Ke-9	955,14	95,51	6,12	854,6	85,46	-5,04	-830,87	-83,09	7,68
Ke-10	-888,58	-88,86	1,27	-836,95	-83,7	7	874,19	87,42	-2,87
Ke-11	866,73	86,67	-3,7	857,89	85,79	-4,68	-832,47	-83,25	7,5
Ke-12	-879,21	-87,92	2,31	-929,28	-92,93	-3,26	872,35	87,24	-3,07
Ke-13	873,38	87,34	-2,96	864,04	86,4	-4	-818,29	-81,83	9,08
Ke-14	-871,02	-87,1	3,22	-905,11	-90,51	-0,57	853,96	85,4	-5,11
Ke-15	864,72	86,47	-3,92	830,53	83,05	-7,72	-871,29	-87,13	3,19
Ke-16	-889,3	-88,93	1,19	-889,72	-88,97	1,14	861,63	86,16	-4,27
Ke-17	877,74	87,77	-2,48	894,78	89,48	-0,58	-886,77	-88,68	1,47
Ke-18	-892,69	-89,27	0,81	-897,49	-89,75	0,28	920,06	92,01	2,23
Ke-19	898,65	89,86	-0,16	885,3	88,53	-1,63	-937,45	-93,74	-4,16
Ke-20	-889,2	-88,92	1,2	-895,38	-89,54	0,51	888,65	88,86	-1,27
Ke-21	915,76	91,58	1,76	882,55	88,26	-1,93	-961,84	-96,18	-6,87
Ke-22	-887,4	-88,74	1,4	-834,39	-83,44	7,29	941,61	94,16	4,62

Pada uji presisi giroskop dengan sensor MPU-6050, dilakukan pengujian pada tiga sumbu (X, Y, Z). Pengujian bertujuan untuk menilai seberapa akurat pembacaan sudut (θ) yang dihasilkan oleh sensor, dibandingkan dengan sudut yang diharapkan, serta menghitung persentase penyimpangan ($\% \Delta \theta$). Data pada tabel telah melalui proses kalibrasi namun tidak menggunakan filter digital untuk memeriksa tingkat presisi alami dari sensor tersebut.

Hasil uji presisi giroskop sumbu x (Tabel 1), penyimpangan pada sumbu X berkisar antara -5,98% hingga 6,12%, dengan distribusi penyimpangan positif dan negatif yang hampir seimbang. Penyimpangan maksimum tercatat sebesar 6,12% pada pengukuran ke-9. Penyimpangan minimum tercatat sebesar -5,98% pada pengukuran ke-3. Secara umum, data pada sumbu X menunjukkan tingkat presisi yang baik, meskipun terdapat beberapa pengukuran dengan penyimpangan yang lebih signifikan pada titik-titik tertentu. Sedangkan, hasil uji presisi giroskop sumbu Y (Tabel 1), penyimpangan pada sumbu Y berkisar antara -7,3% hingga 7,29%. Penyimpangan maksimum tercatat sebesar 7,29% pada pengukuran ke-22.

Penyimpangan minimum tercatat sebesar -7,3% pada pengukuran ke-1. Secara keseluruhan, data pada sumbu Y menunjukkan adanya variasi yang lebih besar pada beberapa pengukuran, terutama pada pengukuran pertama dan terakhir, yang kemungkinan disebabkan oleh ketidakstabilan pada awal atau akhir pengujian. Sementara itu, hasil uji presisi giroskop sumbu Z (Tabel 1), penyimpangan pada sumbu Z bervariasi antara -6,87% hingga 9,08%. Penyimpangan maksimum tercatat sebesar 9,08% pada pengukuran ke-13. Penyimpangan minimum tercatat sebesar -6,87% pada pengukuran ke-21. Secara keseluruhan, sumbu Z menunjukkan penyimpangan yang lebih besar dibandingkan dengan sumbu lainnya. Penyimpangan tertinggi mencapai 9,08%, yang mengindikasikan bahwa faktor eksternal atau noise mungkin memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap pengukuran pada sumbu ini (Shiau et al., 2012). Tanpa menggunakan filter digital, data menunjukkan bahwa pembacaan sudut dari giroskop relatif stabil, namun terdapat beberapa pengukuran dengan penyimpangan lebih dari 5%, terutama pada sumbu Z. Selain itu, sumbu Z menunjukkan penyimpangan yang lebih besar dibandingkan dengan sumbu X dan Y, yang mungkin disebabkan oleh adanya pengaruh noise atau kondisi tertentu saat pengujian.

Kesimpulan

Pada penelitian kali ini, telah dilakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi performa dan kualitas data yang dihasilkan oleh sensor MPU6050. Pengujian mencakup proses pembacaan data mentah, penerapan metode kalibrasi untuk mengurangi bias dan noise, analisis frekuensi menggunakan FFT, serta implementasi filter digital seperti low-pass dan high-pass filter. Selain itu, uji presisi juga dilakukan untuk memastikan keandalan data setelah melalui berbagai tahap pengolahan. Kombinasi metode kalibrasi, analisis FFT, dan penerapan filter digital terbukti meningkatkan kualitas data dan performa sensor MPU6050. Hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut, terutama dalam sistem navigasi berbasis sensor yang menggunakan perangkat keras berbiaya rendah seperti MPU6050.

Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima pendanaan dari sumber manapun.

Ucapan Terima Kasih

Kami ucapkan terima kasih kepada Bapak Muhammad Alif beserta PT PAL Indonesia yang mendukung dalam proses penelitian ini.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan apapun selama penelitian ini berlangsung.

Kontribusi Penulis

Permono Adi Putro: supervisor, validation, formal analysis, review & editing. **Kuntjoro Pinardi:** supervisor, validation, conceptualization, methodology. **Aditia Ramadhan:** resources, data curation, visualization, writing – original draft. **Aulia Sultan Rafael Zein:** resources, data curation, visualization, writing – original draft. **Yokeu Nurfalih:** resources, data curation, visualization, writing – original draft

Daftar Pustaka

1. De Agostino, M. (2008). A multi-frequency filtering procedure for inertial navigation. *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 1115–1121. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4569998>
2. Fan, N., Balan, R. V., & Rosca, J. (2004). Comparison of wavelet- and FFT-based single-channel speech signal noise reduction techniques. In F. Truchetet & O. Lalignant (Eds.), *Proc. SPIE 5607, Wavelet Applications in Industrial Processing II* (pp. 127–138). <https://doi.org/10.1117/12.574050>
3. Han, S., Meng, Z., Omisore, O., Akinyemi, T., & Yan, Y. (2020). Random Error Reduction Algorithms for MEMS Inertial Sensor Accuracy Improvement—A Review. *Micromachines*, *11*(11), 1021. <https://doi.org/10.3390/mi11111021>
4. Liu, J., Yu, T., Wu, C., Zhou, C., Lu, D., & Zeng, Q. (2024). A Low-Cost and High-Precision Underwater Integrated Navigation System. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(2), 200. <https://doi.org/10.3390/jmse12020200>
5. Ma'arif, A., Iswanto, I., Nuryono, A. A., & Alfian, R. I. (2019). Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings. *Signal and Image Processing Letters*, *1*(2), 11–22. <https://doi.org/10.31763/simple.v1i2.2>
6. Magsi, H., Sodhro, A. H., Chachar, F. A., & Abro, S. A. K. (2018). Analysis of signal noise reduction by using filters. *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICOMET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346412>
7. Pangestu, R. D., Erfianto, B. B., & Pahlevi, R. R. (2021). Analisis kenyamanan berkendara kereta api menggunakan sensor IMU pada smartphone. *EProceedings of Engineering*, 9898–9922.
8. Prasetyo, R. T., Wahyudi, W., & Setiyono, B. (2014). Karakteristik dan kalibrasi Untuk sensor inertial measurement unit. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *3*(4), 479–486. <https://doi.org/10.14710/transient.v3i4.479-486>
9. Shiau, J.-K., Huang, C.-X., & Chang, M.-Y. (2012). Noise characteristics of MEMS gyro's null drift and temperature compensation. *Journal of Applied Science and Engineering*, *15*(3), 239–246. <https://doi.org/10.6180/jase.2012.15.3.04>
10. Tjhai, C. (2019). *Integration of multiple low-cost wearable inertial/magnetic sensors and kinematics of lower limbs for improving pedestrian navigation systems*. University of Calgary.
11. Wahyudi, D. (2022). *Pengukuran gelombang air laut menggunakan accelerometer pada PSoC untuk deteksi parameter tsunami*. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.