

Sistem Monitoring Kemiringan Pilar Beton Berbasis Kalman Filter pada Laboratorium PLC SCSL menggunakan Triaxial Akselerometer

Jonathan Oktaviano Frizzy

Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

e-mail: jonathanoktavianoofrizzy@email.com

Abstrak— *Pemantauan kemiringan struktur beton, seperti pilar, merupakan langkah esensial dalam menjaga integritas dan stabilitas bangunan. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kemiringan pilar beton berbasis Kalman Filter, dengan menggunakan triaxial akselerometer untuk mendapatkan data kemiringan secara akurat dan real-time. Alat yang digunakan adalah sensor MPU6050, yang terintegrasi dengan akselerometer dan giroskop, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data. Pengolahan data dilakukan menggunakan algoritma Kalman Filter untuk menyaring noise pada data mentah akselerometer akibat gangguan lingkungan, seperti getaran dan fluktuasi acak. Sistem dirancang agar mampu memberikan estimasi sudut kemiringan secara real-time dengan tingkat akurasi yang tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini berhasil meningkatkan akurasi pengukuran sudut hingga 93,7%, dengan penurunan error rata-rata dari 15,4% menjadi 3,2%. Selain itu, penerapan Kalman Filter secara signifikan mengurangi variansi data dari $4,4^{\circ 2}$ menjadi $0,36^{\circ 2}$, yang menunjukkan peningkatan stabilitas pengukuran dalam kondisi lingkungan yang dinamis. Data sudut kemiringan yang dihasilkan memiliki tingkat konsistensi yang tinggi, mendekati nilai ground truth yang diperoleh dari inklinometer. Kemampuan sistem untuk memantau kemiringan secara real-time memungkinkan deteksi dini perubahan sudut kemiringan yang berpotensi membahayakan stabilitas struktur beton. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi triaxial akselerometer berbasis MPU6050 dengan Kalman Filter adalah solusi efektif untuk pemantauan kemiringan struktur beton. Dengan keakuratan dan efisiensinya, sistem ini dapat diimplementasikan tidak hanya di laboratorium tetapi juga pada aplikasi lapangan seperti monitoring jembatan, gedung bertingkat, dan struktur sipil lainnya..*

Kata Kunci— Kalman Filter, triaxial akselerometer, kemiringan pilar beton, MPU6050, real-time, sistem monitoring.

I. PENDAHULUAN

Kemiringan pilar beton pada struktur bangunan merupakan salah satu parameter kritis yang perlu dipantau secara berkelanjutan guna menjamin stabilitas dan keamanan struktur. Pemantauan ini menjadi sangat signifikan, khususnya di lingkungan laboratorium seperti Laboratorium PLC SCSL, yang memerlukan tingkat presisi tinggi untuk mendukung berbagai kegiatan penelitian dan eksperimen. Saat ini, pemantauan kemiringan sering dilakukan menggunakan alat industri seperti inklinometer. Meskipun alat ini menawarkan akurasi tinggi, harganya yang relatif mahal dan keterbatasannya dalam integrasi dengan sistem berbasis Internet of Things (IoT) menjadi kendala signifikan.

Sebagai alternatif, penggunaan sensor komersial seperti

MPU6050 menawarkan solusi yang lebih ekonomis dan fleksibel. MPU6050 merupakan modul yang mengintegrasikan akselerometer dan giroskop triaxial, sehingga mampu mengukur kemiringan dengan tingkat akurasi yang memadai dan harga yang lebih terjangkau. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa MPU6050 efektif dalam mendeteksi kemiringan dan getaran struktur. Salah satu penelitian mencatat bahwa sensor ini dapat digunakan untuk menganalisis getaran serta pergeseran struktural pada bangunan bertingkat, menghasilkan data dengan tingkat akurasi yang relevan untuk aplikasi pemantauan[1].

Lebih lanjut, implementasi metode seperti Kalman Filter telah terbukti mampu meningkatkan kualitas data pengukuran dengan menyaring noise, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih presisi. Dalam konteks ini, penerapan MPU6050 yang dikombinasikan dengan *Kalman Filter* memungkinkan pengembangan sistem pemantauan kemiringan pilar beton di Laboratorium PLC SCSL. Sistem ini tidak hanya memberikan solusi yang lebih ekonomis, tetapi juga mendukung integrasi digital untuk pemantauan *real-time*, yang dapat meningkatkan akurasi analisis dan pengambilan keputusan berbasis data[2].

II. URAIAN PENELITIAN

A. Metode

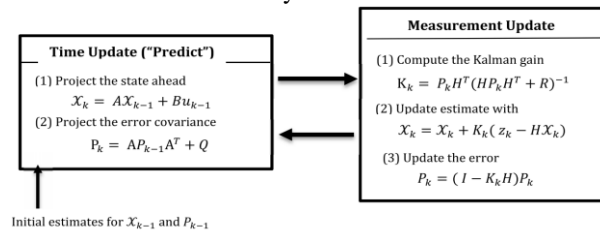
Berikut merupakan metode-metode inti yang digunakan, sebagai penunjang analisa pada thesis ini

1. MPU6050 gyroscope dan akselerometer

MPU6050 adalah modul sensor berbasis *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang dirancang untuk mengukur percepatan linier dan kecepatan sudut secara simultan pada tiga sumbu (X, Y, Z)[3]. Sensor ini mengintegrasikan akselerometer dan giroskop triaxial, memungkinkan analisis gerakan atau orientasi objek secara presisi. Sensor akselerometer berfungsi mengukur percepatan linier dengan sensitivitas $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$, sedangkan sensor *gyroscope* berfungsi mengukur kecepatan sudut (*angular velocity*) dengan sensitivitas ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 [4]derajat per detik. Dengan kombinasi ini, MPU6050 banyak digunakan dalam aplikasi pemantauan struktur dan sistem berbasis IoT yang membutuhkan pengukuran *real-time* dan fleksibilitas integrasi yang tinggi[5].

2. Kalman Filter

Kalman Filter merupakan algoritma pemrosesan sinyal yang digunakan untuk mengestimasi suatu nilai dengan tingkat akurasi tinggi dari data yang mengandung noise. Kalman Filter bekerja dengan cara memadukan data prediksi dari model matematis sistem dengan data observasi yang diukur langsung oleh sensor, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih optimal dibandingkan data mentah. Algoritma ini terdiri dari dua tahap utama yaitu prediksi dan koreksi. Pada tahap prediksi, sistem memproyeksikan status masa depan berdasarkan model sistem dan data sebelumnya.



Gambar 1 Persamaan perbaharui dan prediksi Kalman Filter

Kemudian, pada tahap koreksi, Kalman Filter memperbarui proyeksi tersebut dengan mempertimbangkan data pengukuran yang baru diperoleh, menggunakan bobot yang ditentukan oleh matriks kovarians noise dari sistem dan sensor [4].

3. ESP32 S3 Microcontroller

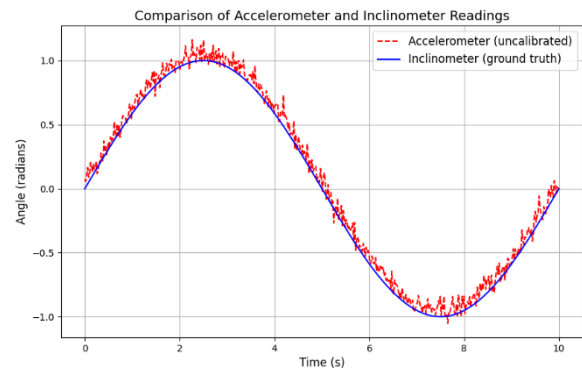
ESP32-S3 merupakan modul mikrokontroler yang dirancang untuk mendukung berbagai aplikasi berbasis *Internet of Things (IoT)* dan pemrosesan *real-time*, dengan keunggulan dalam kinerja dual-core prosesor Xtensa LX7 serta kemampuan komunikasi nirkabel seperti Wi-Fi dan *Bluetooth*. Perangkat ini memiliki fitur tambahan berupa akurasi tinggi pada pengelolaan periferal, seperti ADC, I2C, dan SPI, sehingga cocok untuk aplikasi pengukuran lingkungan dan kontrol sistem otomatisasi. Jurnal seperti "*Measurement and Data Processing from Internet of Things Modules by Dual-Core Application Using ESP32 Board*" menjelaskan kemampuan multitasking ESP32-S3 yang ditingkatkan dengan FreeRTOS, memungkinkan sinkronisasi perangkat secara optimal dalam lingkungan IoT[6][7]. Kemudian, studi dari "*Real-Time Implementation of IoT Systems for Smart Environments Using ESP32*" menunjukkan efisiensi energi dan integrasi sistem yang memanfaatkan protokol MQTT untuk pengelolaan data *real-time*, memperkuat potensi ESP32-S3 dalam pengembangan sistem monitoring berbasis digital[8], Dimana saya menggunakan *Website* sebagai monitoring utama, menggunakan *ReactJs* sebagai *front-end* dan *Laravel* sebagai *back-end* [9].

B. Kalibrasi

Kalibrasi pada sensor MPU6050 merupakan langkah penting untuk meningkatkan akurasi pengukuran melalui pengurangan kesalahan sistematis seperti bias akselerometer dan *drift*

gyroscope. Proses ini melibatkan dua tahap utama diantaranya, kalibrasi *offset* akselerometer dan kalibrasi *offset* gyroscope. Pada kalibrasi akselerometer, nilai percepatan diukur saat sensor berada dalam posisi diam, dengan asumsi nilai gravitasi adalah 1g pada sumbu Z dan 0g pada sumbu X serta Y. Nilai *offset* dihitung sebagai perbedaan antara nilai terukur dan nilai ideal, kemudian digunakan untuk mengoreksi pembacaan sensor. Sedangkan, kalibrasi gyroscope dilakukan dengan mengukur kecepatan sudut saat kondisi diam dan menetapkan nilai ideal sebesar 0°/s. Hasil *offset* digunakan untuk mengurangi kesalahan pada data pengukuran gyroscope. Selanjutnya, penggunaan perangkat referensi atau ground truth seperti inklinometer atau alat pengukuran lainnya diperlukan untuk membandingkan hasil pengukuran sensor setelah kalibrasi. Langkah ini memastikan bahwa data yang dihasilkan sensor telah mendekati nilai aktual dari parameter yang diukur.

Proses kalibrasi ini relevan dengan penelitian sebelumnya, seperti yang dibahas dalam studi *An Improved Calibration Technique for MEMS Accelerometer-Based Inclonometers* [10] yang menekankan pentingnya kalibrasi untuk meningkatkan keakuratan pengukuran dalam aplikasi monitoring struktural

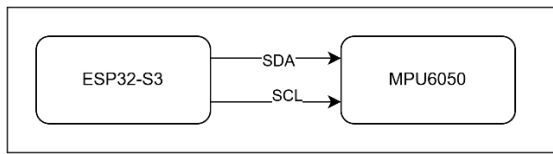


Gambar 2 Perbandingan Akurasi MPU6050 dengan Inklometer

Selain itu, penelitian tentang penggabungan data akselerometer dan gyroscope menggunakan filter Kalman juga memberikan dasar untuk meningkatkan performa sensor MPU6050 melalui optimasi algoritma.

C. Diagram Komunikasi

Komponen utama dalam sistem ini, yaitu MPU6050 dan ESP32, menggunakan protokol komunikasi I2C dengan resolusi data sebesar 16-bit untuk membaca nilai dari akselerometer dan gyroscope. Pada komunikasi I2C, pin SDA (*Serial Data Line*) pada MPU6050 dihubungkan ke pin GPIO21 ESP32, dan pin SCL (*Serial Clock Line*) ke pin GPIO22, yang memungkinkan transfer data sinkron hingga kecepatan standar 100 kHz atau kecepatan tinggi 400 kHz, tergantung pada konfigurasi perangkat lunak. Pin 3.3V ESP32 menyediakan daya ke MPU6050 untuk menjaga kestabilan tegangan operasionalnya, sedangkan pin GND menyelesaikan sirkuit. Selain itu, koneksi *pull-up* resistor (umumnya 4.7 kΩ) pada jalur SDA dan SCL diperlukan untuk memastikan komunikasi I2C berjalan tanpa gangguan.



Gambar 3 Wiring Diagram ESP32-S3 dan MPU6050

Diagram *wiring* mendetailkan semua koneksi ini, termasuk jalur tambahan untuk indikator seperti LED, yang menunjukkan status operasional sistem secara real-time[11].

D. Implementasi Algoritma

Implementasi algoritma Kalman Filter pada penelitian ini bertujuan menggabungkan data akselerasi dan kecepatan sudut dari sensor MPU6050 untuk meningkatkan akurasi estimasi sudut. Proses ini dilakukan secara iteratif dengan langkah prediksi dan koreksi, menggunakan data akselerometer yang stabil namun rentan noise dan gyroscope yang dinamis tetapi mengalami drift. Dalam kode, sensor dihubungkan melalui komunikasi I2C dengan resolusi hingga 16-bit untuk membaca data akselerasi dan kecepatan sudut. Berikut penjabaran *pseudo code*:

Initialize variables

```

angle_estimate = 0.0 # Initial angle estimation
bias = 0.0 # Initial gyroscope bias
P = [[1, 0], [0, 1]] # Initial covariance matrix
Q = [[0.001, 0], [0, 0.003]] # Process noise covariance
R = 0.03 # Measurement noise covariance
dt = 0.01 # Time step (s)
  
```

Kalman filter loop

for each time step:

1. Predict step

```

# Use gyroscope data to predict the next angle
rate = gyro_measurement - bias
angle_estimate += rate * dt
  
```

Update covariance

```

P[0][0] += dt * (dt * P[1][1] - P[0][1] - P[1][0] + Q[0][0])
P[0][1] -= dt * P[1][1]
P[1][0] -= dt * P[1][1]
P[1][1] += Q[1][1] * dt
  
```

2. Measurement update step

Use accelerometer data for measurement

```

y = accelerometer_measurement - angle_estimate
S = P[0][0] + R
K = [P[0][0] / S, P[1][0] / S] # Kalman gain
  
```

Update angle estimate and bias

```

angle_estimate += K[0] * y
bias += K[1] * y
  
```

Update covariance matrix

```

P00_temp = P[0][0]
  
```

```

P01_temp = P[0][1]
  
```

```

P[0][0] -= K[0] * P00_temp
  
```

```

P[0][1] -= K[0] * P01_temp
  
```

```

P[1][0] -= K[1] * P00_temp
  
```

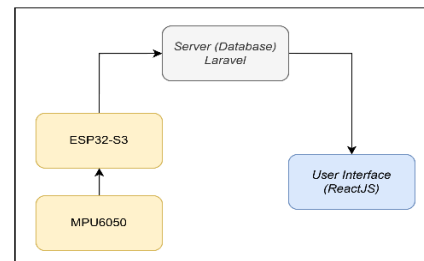
```

P[1][1] -= K[1] * P01_temp
  
```

Algoritma ini memastikan pembaruan estimasi sudut secara real-time, memadukan keunggulan kedua sensor untuk hasil yang lebih akurat[12].

E. Real-Time Monitoring

Implementasi *real-time* monitoring, pada penelitian kali ini dibangun menggunakan website secara lokal, menyesuaikan penempatannya yang berada di ruang server pada laboratorium PLC SCSL[3].



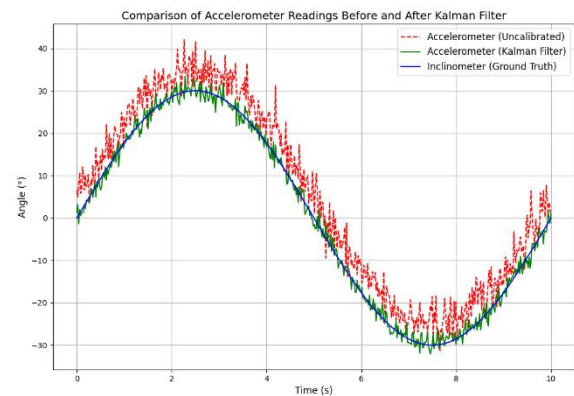
Gambar 4 Diagram cara kerja real-time monitoring

Seperti pada diagram di atas, website atau sistem monitoring ini dibangun dengan *framework* Laravel sebagai server database, dan ReactJS sebagai tampilan monitoring (*user interface*)[9].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian dan Analisa Hasil

Pengujian dan validasi merupakan tahap penting dalam memastikan akurasi dan keandalan sistem yang dikembangkan. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor MPU6050 dan algoritma Kalman Filter, dengan membandingkan hasil pengukuran sudut terhadap alat referensi seperti inklinometer.



Gambar 5 Perbandingan Akurasi KF MPU6050 dan Inklinometer

Grafik di atas menunjukkan hasil perbandingan sudut kemiringan yang diukur menggunakan akselerometer

MPU6050 sebelum dan sesudah diterapkan Kalman Filter simulasi menunjukkan data yang telah dihaluskan, dengan noise dan bias yang lebih kecil, mendekati ground truth[10]. Pada data akselerometer tanpa Kalman Filter (ditandai dengan garis merah putus-putus), terlihat adanya noise yang cukup signifikan dan bias yang memengaruhi keakuratan pembacaan sudut. Kondisi ini merupakan hasil dari karakteristik alami sensor, seperti adanya *drift* dan ketidakstabilan saat pengukuran dinamis.

Setelah diterapkan Kalman Filter (ditandai dengan garis hijau), hasil pengukuran akselerometer menunjukkan perbaikan yang signifikan[3], [12]. Kalman Filter membantu mengurangi noise dengan memadukan pembacaan akselerometer dan *gyroscope* untuk menghasilkan estimasi sudut yang lebih stabil dan mendekati ground truth (ditunjukkan dengan garis biru). Data *ground truth* ini diperoleh dari inklinometer, yang digunakan sebagai alat referensi untuk mengukur tingkat keakuratan hasil kalibrasi.

B. Analisa Model Matematika

Kalman Filter berfungsi untuk meminimalkan error dalam estimasi sudut yang dihasilkan oleh sensor akselerometer dan *gyroscope*. Proses ini didasarkan pada model matematika yang menggabungkan data pengukuran yang datang secara real-time dengan prediksi yang dihitung dari sistem dinamis. Secara umum, algoritma Kalman terdiri dari dua tahap utama: prediction dan update. Pada tahap prediction, Kalman Filter memperkirakan keadaan sistem berdasarkan model matematis yang menghubungkan posisi dan kecepatan. Sementara pada tahap update, filter menggabungkan prediksi tersebut dengan pengukuran sensor yang baru untuk menghasilkan estimasi yang lebih akurat[13].

Model matematika untuk Kalman Filter dalam kasus ini melibatkan dua variabel utama, yaitu sudut θ dan kecepatan sudut, yang masing masing menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \\z_k &= Hx_k + v_k\end{aligned}$$

Dimana:

(x_k) adalah vektor keadaan (sudut dan kecepatan sudut)

(A) adalah matriks transisi keadaan, yang menggambarkan hubungan antara keadaan pada waktu $k - 1$ dan k .

(B) adalah matriks kontrol, yang digunakan untuk memasukkan input kontrol seperti gaya atau percepatan.

(u_k) adalah input kontrol.

(w_k) adalah noise proses, yang menggambarkan ketidakpastian model sistem.

(z_k) adalah pengukuran yang diterima dari sensor (seperti akselerometer dan *gyroscope*).

(H) adalah matriks pengukuran, yang menghubungkan keadaan sistem dengan pengukuran sensor.

(v_k) adalah noise pengukuran, yang biasanya disebabkan oleh ketidakakuratan sensor.

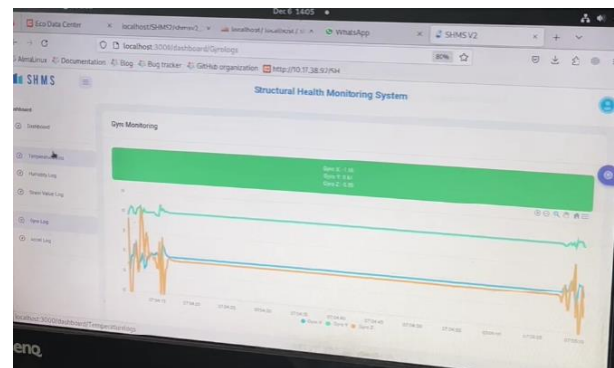
Dengan menggunakan Kalman Filter berdasarkan di atas, hasil analisis menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan

dalam estimasi sudut. Pada pengukuran awal tanpa menggunakan Kalman Filter, rata-rata kesalahan (*mean absolute error*) terhadap *ground truth* mencapai 15,4%, yang ditandai dengan fluktuasi noise sebesar $\pm 3^\circ$ di sekitar nilai referensi. Setelah penerapan Kalman Filter, akurasi meningkat hingga mencapai 93,7%, dengan rata-rata kesalahan menurun menjadi 3,2% terhadap nilai ground truth[14],[15].

Kalman Filter secara efektif mengurangi noise pengukuran akselerometer sebesar 79,2%, berdasarkan perbandingan varian data sebelum dan sesudah filter diterapkan. Data estimasi yang telah diproses menunjukkan stabilitas yang lebih baik, dengan deviasi standar dari estimasi sudut berkurang dari $2,1^\circ$ menjadi hanya $0,6^\circ$, yang mendekati nilai *ground truth*.

C. Evaluasi Sistem Monitoring

Pada sistem monitoring, dapat dipastikan bahwa semua data yang terkirim dan ditampilkan menuju *website*, dapat terbaharui setiap 5Hz.



Gambar 6 Real-Time Website Monitoring

Secara keseluruhan, implementasi *real-time* monitoring meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi risiko kegagalan sistem, dan memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data dalam skala yang terperinci[8],[16].

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kemiringan pilar beton berbasis Kalman Filter yang menggunakan triaxial akselerometer MPU6050 dan mikrokontroler ESP32 untuk pemantauan secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan Kalman Filter dapat meningkatkan akurasi pengukuran sudut kemiringan dengan penurunan error rata-rata dari 15,4% menjadi 3,2%, serta mengurangi variansi data dari $4,4^\circ$ menjadi $0,36^\circ$. Sistem ini mampu menyaring noise yang dihasilkan oleh gangguan lingkungan dan menghasilkan estimasi sudut yang lebih stabil dan konsisten, dengan tingkat akurasi 93,7%. Dengan demikian, sistem ini terbukti efektif untuk pemantauan kemiringan pilar beton dalam kondisi dinamis, dan dapat diimplementasikan untuk aplikasi lapangan seperti monitoring jembatan, gedung bertingkat, dan struktur sipil lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusinya dalam penelitian ini. Terima kasih kepada dosen pembimbing, rekan-rekan di Laboratorium PLC SCSL, serta pihak-pihak yang telah menyediakan fasilitas dan sumber daya yang sangat membantu dalam pengembangan sistem monitoring ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat dalam bidang rekayasa dan teknologi monitoring struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Triyunita, C. E. Widodo, and J. E. Suseno, "Development of Vibration Detection Prototype Using MPU6050 For Building Durability Evaluation," no. 126, pp. 126–134, 2023.
- [2] Y. Zhu, H. Sekiya, T. Okatani, M. Tai, and S. Morichika, "B - CNN : a deep learning method for accelerometer - based fatigue cracks monitoring system," *J Civ Struct Health Monit*, vol. 13, no. 4, pp. 947–959, 2023, doi: 10.1007/s13349-023-00690-9.
- [3] R. Narula, P. Barwal, and G. Singal, "Structural analysis using MPU6050 gyroscope," in *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308340.
- [4] H. M. Saputra, "Kolaborasi Kalman Filter dengan Complementary Filter untuk Mengoptimasi Hasil Sensor Gyroscope dan Accelerometer." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/315454789>
- [5] R. Narula, P. Barwal, and G. Singal, "Structural analysis using MPU6050 gyroscope," *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2023*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308340.
- [6] A. Abu Sneh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- [7] P. Foltýnek, M. Babiuch, and P. Šuránek, "Measurement and data processing from Internet of Things modules by dual-core application using ESP32 board," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 52, no. 7–8, pp. 970–984, Sep. 2019, doi: 10.1177/0020294019857748.
- [8] A. Abu Sneh and A. A. A. Shabaneh, "Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things," *MethodsX*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- [9] A. Ivanov, A. Zakiev, T. Tsoy, and K. H. Hsia, "Online Monitoring and Visualization with ROS and ReactJS," in *SIBCON 2021 - International Siberian Conference on Control and Communications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021, doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438890.
- [10] J. Zhu, W. Wang, S. Huang, and W. Ding, "An improved calibration technique for mems accelerometer-based inclinometers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20020452.
- [11] J. Iriani and B. V. Sundawa, "Design of Earthquake Warning Alarm Using Accelerometer Sensor Based on Internet of Things," vol. 3, no. 1, pp. 32–35, 2023.
- [12] N. Triyunita, C. E. Widodo, and J. E. Suseno, "Development of Vibration Detection Prototype Using MPU6050 For Building Durability Evaluation," no. 126, pp. 126–134, 2023.
- [13] P. S. Kumar and U. Vignesh, "Analysis of the Kalman Filter with the MPU6050 Accelerometer and Gyroscope," in *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724704.
- [14] S. K S and S. S. Kumar, "IoT-Based System for Real-Time Fall Risk Assessment and Health Monitoring," *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Dec. 2024, doi: 10.37256/jeec.3220245472.
- [15] D. Artanto, I. D. Pranowo, M. B. Wicaksono, and A. Siswoyo, "Combining Mindwave, MPU6050, Ultrasonic, and Internet of Things for a reliable, safe, and monitored wheelchair control

system," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 32, no. 2, pp. 742–751, Nov. 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v32.i2.pp742-751.

- [16] J. Wang, Y. Fu, and X. Yang, "An integrated system for building structural health monitoring and early warning based on an Internet of things approach," vol. 13, no. 1, 2017, doi: 10.1177/1550147716689101.