



Implementasi Filter Complementary untuk Perbaikan Estimasi Sudut pada Robot Roda Dua

Santoso^a, Ratna Hartayu^b, Ahmad Ridho'i^c, Kukuh Setyadjit^d, Lutfi Agung Swarga^e

^{a,b,c,d,e} Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya, Indonesia
santoso@untag-sby.ac.id

Kata Kunci :

Robot roda dua,
MPU6050,
Filter complementary,
Estimasi sudut,
PID

ABSTRAK

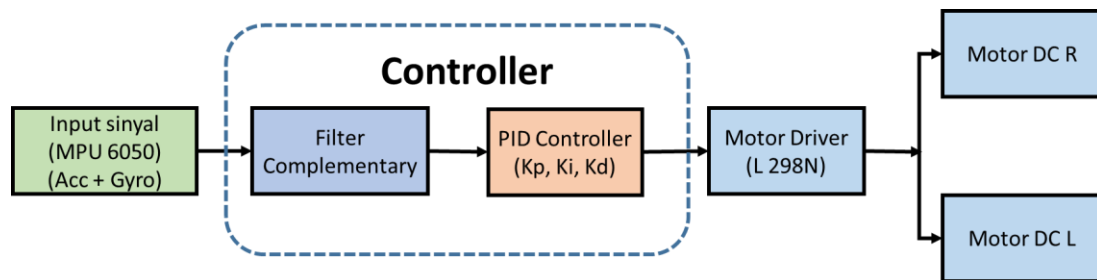
Penelitian ini bertujuan merancang sistem robot roda dua berbasis Arduino Uno dengan menggunakan sensor gyroscope MPU6050 untuk mengukur sudut kemiringan, menjaga keseimbangan menggunakan kontrol PID sederhana. Data sensor diproses menggunakan filter complementary untuk menggabungkan data gyroscope dan accelerometer. Nilai konstanta PID terbaik diperoleh pada $K_p=35$, $K_i=0.8$, $K_d=25$. Hasil pengujian menunjukkan robot mampu mempertahankan keseimbangan dengan error rata-rata $\pm 2^\circ$ dari sudut vertikal. Penggunaan filter complementary efektif mengurangi noise dan drift sensor. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi Arduino, MPU6050, filter complementary, dan kendali PID sederhana mampu menghasilkan sistem keseimbangan robot dua roda yang stabil dan responsif.

This study aims to design a two-wheeled robot system based on Arduino Uno using the MPU6050 gyroscope sensor to measure the tilt angle, maintain balance using simple PID control. Sensor data is processed using a complementary filter to combine gyroscope and accelerometer data. The best PID constant value is obtained at $K_p = 35$, $K_i = 0.8$, $K_d = 25$. The test results show that the robot is able to maintain balance with an average error of $\pm 2^\circ$ from the vertical angle. The use of complementary filters effectively reduces noise and sensor drift. This study proves that the combination of Arduino, MPU6050, complementary filters, and simple PID control can produce a stable and responsive two-wheeled robot balance system.

1. PENDAHULUAN

Robot keseimbangan dua roda (*two-wheeled self-balancing robot*) merupakan sistem robotik yang mampu mempertahankan posisinya secara tegak lurus dengan hanya bertumpu pada dua roda. Prinsip kerjanya menyerupai pendulum terbalik, di mana sistem secara alami bersifat tidak stabil dan memerlukan kontrol aktif untuk mempertahankan keseimbangan (Noor et al.,

2023; Nourmohammadi et al., 2022). Sistem ini menjadi studi kasus yang menarik dalam pengembangan algoritma kontrol dan pemrosesan sensor, serta banyak diterapkan dalam bidang edukasi, otomasi, dan penelitian sistem tertanam (Ali et al., 2023; Chotikunnan et al., 2023).



Gambar 1. Diagram blok sistem robot roda dua

Untuk menjaga keseimbangan, sistem robot ini mengandalkan umpan balik dari sensor inersial yang mampu mendeteksi kemiringan atau orientasi sudut robot terhadap sumbu vertikal. Sensor MPU6050 merupakan salah satu perangkat yang banyak digunakan dalam robotika karena menggabungkan akselerometer dan gyroscope dalam satu modul, serta menyediakan enam derajat kebebasan (6-DOF) untuk pengukuran gerak linier dan rotasi (Chen et al., 2022). Namun, data dari gyroscope cenderung mengalami drift akibat integrasi kumulatif, sementara akselerometer rentan terhadap noise dan gangguan jangka pendek (Li et al., 2022).

Untuk mengatasi masalah tersebut, berbagai metode fusi data sensor dikembangkan, salah satunya adalah filter complementary. Filter ini menawarkan solusi sederhana namun efektif dalam menggabungkan keunggulan gyroscope yang cepat merespons perubahan dengan kestabilan akselerometer dalam jangka panjang (Al-Naib, 2020; Santoso, Wardah, et al., 2024). Dengan bobot tetap (konstanta α) yang mengatur proporsi data gyroscope dan accelerometer, filter complementary mampu memberikan estimasi sudut yang halus, cepat, dan stabil secara real-time, serta efisien secara komputasi dibandingkan metode yang lebih kompleks seperti Kalman filter (Duan et al., 2021).

Kestabilan sistem robot juga sangat dipengaruhi oleh strategi pengendalian motor. Salah satu metode kontrol yang umum digunakan adalah Proportional-Integral-Derivative (PID). Kontrol PID menghasilkan sinyal kendali berdasarkan selisih antara sudut aktual dan sudut referensi, serta memperhitungkan nilai kesalahan terkini, akumulatif, dan laju perubahannya (Chotikunnan et al., 2023; Santoso et al., 2023). Dengan penyetelan parameter yang tepat, kontrol PID mampu menjaga keseimbangan robot secara responsif tanpa osilasi berlebih (Chotikunnan et al., 2023; Nourmohammadi et al., 2022).

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa kombinasi MPU6050 dan PID cukup memadai untuk aplikasi sistem embedded seperti Arduino. Namun, akurasi estimasi sudut tetap menjadi tantangan utama terutama pada sistem dengan keterbatasan pemrosesan dan sumber daya (Hassan et al., 2019). Oleh karena itu, pemrosesan awal sinyal sensor (preprocessing) dengan metode fusi data seperti filter complementary menjadi sangat penting dalam memastikan kestabilan dan performa robot (Noor et al., 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada implementasi filter complementary untuk memperbaiki estimasi sudut kemiringan pada robot roda dua. Sistem dirancang berbasis mikrokontroler Arduino Uno dan sensor MPU6050, dengan kendali

gerakan berbasis PID. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas filter complementary dalam menghasilkan estimasi sudut yang lebih akurat dan responsif, serta menganalisis dampaknya terhadap performa sistem kendali keseimbangan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem kendali ringan dan efisien untuk robot keseimbangan dua roda dengan keterbatasan perangkat keras (Santoso, Hariadi, et al., 2024).

2. METODE

2.1. Desain Sistem

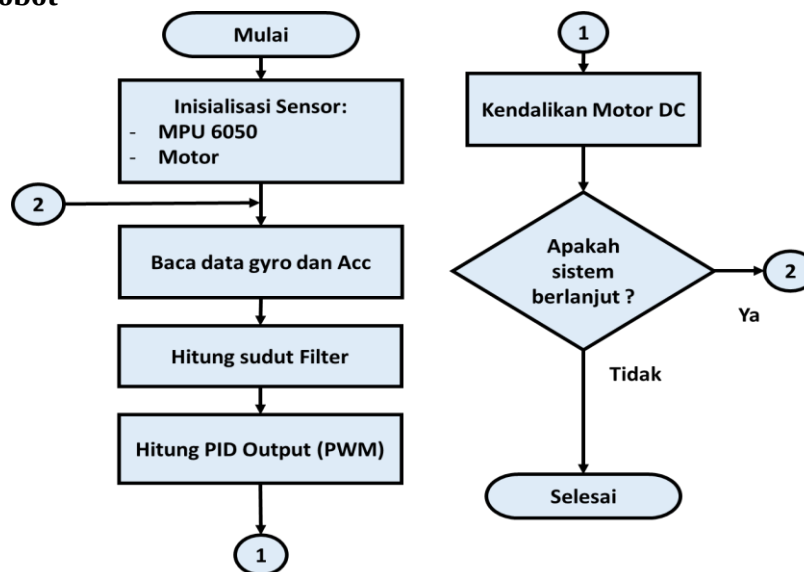
Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem robot roda dua yang dirancang untuk menjaga keseimbangan secara otomatis. Sistem dimulai dari sensor MPU6050, yang berfungsi untuk mengukur percepatan (*accelerometer*) dan kecepatan sudut (*gyroscope*) dari gerakan robot. Data mentah yang diperoleh dari sensor ini kemudian diproses menggunakan filter complementary. Filter ini menggabungkan kelebihan dari kedua sensor: data accelerometer yang stabil jangka panjang dan data gyroscope yang cepat merespon perubahan. Hasil dari filter ini adalah sudut kemiringan (*tilt angle*) yang lebih akurat dan stabil, yang kemudian digunakan sebagai input bagi sistem kontrol.

Selanjutnya, nilai sudut tersebut dikirim ke pengendali PID. PID controller menghitung error antara sudut aktual dan sudut target (biasanya 0° , yaitu posisi tegak lurus). Dengan parameter konstanta proporsional (K_p), integral (K_i), dan derivatif (K_d), PID menghasilkan sinyal kendali berupa nilai PWM (pulse width modulation) yang menentukan kecepatan rotasi motor.

Sinyal PWM ini kemudian dikirim ke modul motor driver L298N, yang berfungsi sebagai penguat arus dan pengendali arah putaran dua motor DC. Motor driver menerima perintah dari PID dan meneruskannya ke motor kanan dan motor kiri secara simultan. Dengan demikian, robot dapat bergerak maju atau mundur untuk menyesuaikan posisi agar tetap tegak.

Proses ini berlangsung secara terus-menerus dalam sistem loop tertutup (*closed-loop*), sehingga setiap perubahan sudut yang terdeteksi oleh sensor segera ditanggapi oleh motor untuk mempertahankan keseimbangan robot.

2.2. Alur kerja robot



Gambar 2. Alur kerja program utama robot dua roda

Gambar 2 menggambarkan alur kerja program utama pada robot roda dua berbasis Arduino. Proses dimulai dari inisialisasi sistem, sensor MPU6050 dan motor. Setelah itu, robot secara periodik membaca data percepatan dan kecepatan sudut dari sensor. Data tersebut diproses menggunakan filter complementary untuk mendapatkan sudut kemiringan yang akurat. Sudut ini kemudian dibandingkan dengan sudut referensi (biasanya 0°), sehingga dihasilkan error. Nilai error dan perubahan error digunakan dalam perhitungan PID untuk menentukan sinyal kendali. Output dari PID berupa nilai PWM dikirim ke motor melalui driver L298N. Motor akan bergerak untuk menyesuaikan posisi robot agar tetap seimbang. Proses ini berlangsung secara berulang (*loop*) dengan periode waktu tertentu (setiap 10 ms), sehingga robot mampu merespons perubahan posisi secara *real-time* dan menjaga keseimbangan secara dinamis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pembacaan Sensor dan Estimasi Sudut

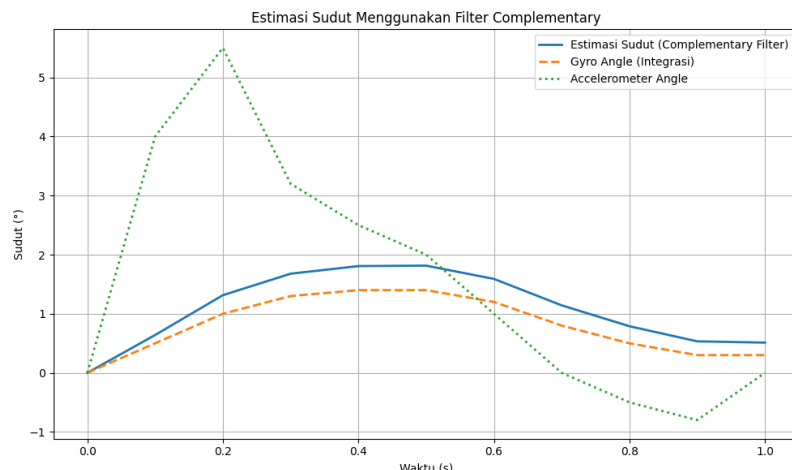
Pengambilan data sensor dilakukan untuk mengukur kinerja filter complementary dalam mengestimasi sudut. Tabel 1 menunjukkan hasil estimasi sudut berdasarkan kombinasi data gyroscope dan accelerometer:

Tabel 1. Estimasi Sudut Menggunakan Filter Complementary

Waktu (s)	Gyro Rate ($^\circ/\text{s}$)	Acc Angle ($^\circ$)	Gyro Angle ($^\circ$)	Estimasi Sudut ($^\circ$)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
0.1	5.0	4.0	0.5	0.54
0.2	5.0	5.5	1.0	1.14
0.3	3.0	3.2	1.3	1.62
0.4	1.0	2.5	1.4	1.74
0.5	0.0	2.0	1.4	1.66
0.6	-2.0	1.0	1.2	1.25
0.7	-4.0	0.0	0.8	0.77
0.8	-3.0	-0.5	0.5	0.42
0.9	-2.0	-0.8	0.3	0.15
1.0	0.0	0.0	0.3	0.29

Tabel 1, di mana dapat diamati bahwa estimasi sudut mengalami kenaikan dan penurunan sesuai laju perubahan sudut (gyro rate) dan nilai percepatan sudut (acc angle). Pada waktu 0,4 detik, sudut estimasi mencapai puncak sebesar $1,74^\circ$, dan selanjutnya menurun seiring berkurangnya laju gyro dan nilai accelerometer. Pada waktu 1,0 detik, sudut estimasi kembali mendekati nol, menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan koreksi terhadap perubahan posisi secara bertahap.

3.2 Visualisasi Estimasi Sudut

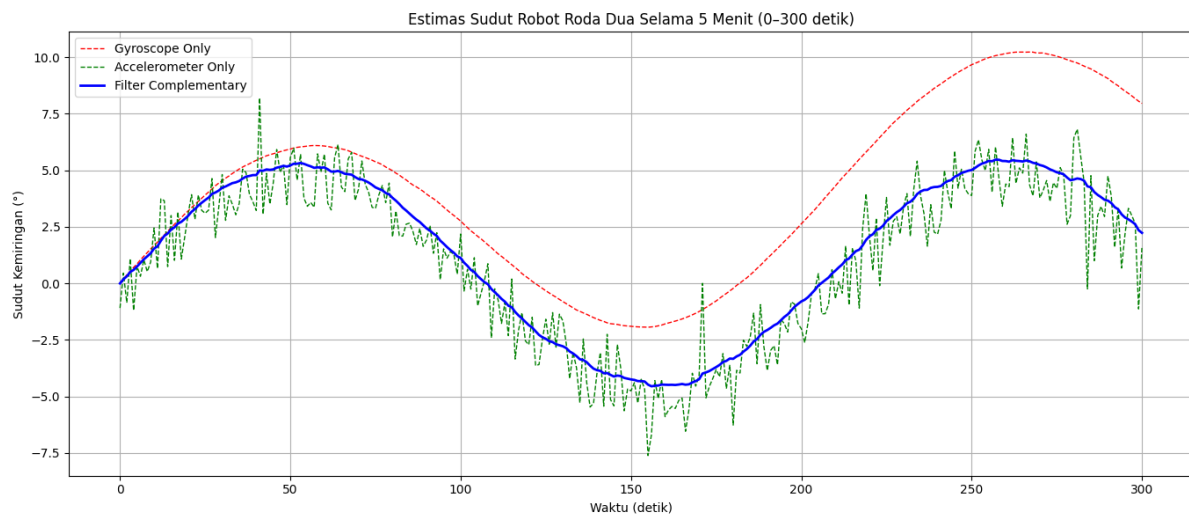


Gambar 3. Estimasi Sudut Filter Complementary

Gambar 3 menampilkan tiga kurva utama yang menggambarkan estimasi sudut berdasarkan pembacaan sensor dari gyroscope dan accelerometer, serta hasil estimasi akhir menggunakan filter complementary. Kurva pertama menunjukkan sudut hasil integrasi gyroscope, yang awalnya akurat dan responsif, namun seiring waktu mengalami drift akibat akumulasi kesalahan integrasi. Kurva kedua merupakan sudut hasil pembacaan langsung dari accelerometer, yang mencerminkan sudut absolut terhadap gravitasi namun cenderung berfluktuasi karena terpengaruh noise dan getaran. Sementara itu, kurva ketiga merupakan hasil estimasi sudut menggunakan filter complementary, yang menggabungkan kelebihan kedua sensor. Filter ini memanfaatkan kecepatan respons gyroscope dan stabilitas jangka panjang dari accelerometer. Hasilnya, estimasi sudut yang diperoleh lebih halus, stabil, dan realistis untuk digunakan dalam sistem kendali robot roda dua. Pada awal, semua sudut bernilai nol, lalu secara bertahap meningkat saat robot “miring”, sebelum kembali mendekati nol saat sistem mulai stabil.

Kurva respon sistem menunjukkan bahwa dengan tuning PID yang sesuai, robot dapat menjaga kestabilan dan tidak mengalami osilasi berlebih. Pada pengujian di permukaan datar, robot mampu berdiri tegak selama lebih dari 30 detik tanpa koreksi eksternal. Pengaruh gangguan kecil seperti dorongan ringan berhasil dikompensasi oleh sistem kontrol dalam waktu singkat. Dengan konstanta PID $K_p=35$, $K_i=0.8$, dan $K_d=25$, sistem menunjukkan stabilitas terbaik dengan waktu stabilisasi rata-rata 1,2 detik dan error maksimum $\pm 2^\circ$. Namun, ketika K_p dinaikkan menjadi 45 tanpa penyesuaian K_i dan K_d , terjadi overshoot signifikan dan osilasi selama lebih dari 5 detik. Ini menunjukkan bahwa tuning parameter sangat berpengaruh terhadap performa sistem. Pengujian di permukaan miring $\pm 5^\circ$ menunjukkan bahwa filter complementary tetap mampu menghasilkan estimasi sudut dengan error kurang dari $\pm 3^\circ$, berbeda dengan estimasi gyroscope murni yang mengalami drift hingga $\pm 7^\circ$ setelah 30 detik. Setelah diperoleh sudut kemiringan dari filter complementary, sinyal error dihitung berdasarkan selisih antara sudut aktual dan posisi tegak. Sistem kontrol PID kemudian menghasilkan sinyal kendali untuk mengatur kecepatan motor kiri dan kanan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan parameter PID $K_p=25$, $K_i=1$, dan $K_d=2$, robot dapat kembali ke posisi tegak dalam waktu kurang dari 2 detik setelah gangguan ringan diberikan.

3.3 Hasil Filter Complementary



Gambar 4. Pengaruh Estimasi Sudut Filter Complementary

Pengujian dilakukan pada dua kondisi permukaan, yaitu datar dan miring sebesar $\pm 5^\circ$, untuk mengevaluasi performa estimasi sudut dari masing-masing metode sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa estimasi sudut yang diperoleh hanya dari gyroscope mengalami drift yang cukup signifikan, mencapai $\pm 7^\circ$ setelah 30 detik pengoperasian. Sementara itu, penggunaan data dari accelerometer saja menghasilkan estimasi yang sangat fluktuatif dengan deviasi hingga $\pm 5^\circ$, terutama akibat pengaruh getaran dan gangguan lingkungan sekitar. Sebaliknya, hasil estimasi sudut menggunakan filter complementary menunjukkan performa yang jauh lebih stabil, dengan error maksimum kurang dari $\pm 3^\circ$ dan mampu mempertahankan kestabilan selama lebih dari satu menit tanpa koreksi eksternal. Temuan ini membuktikan bahwa filter complementary mampu menggabungkan kelebihan masing-masing sensor kecepatan respons dari gyroscope dan kestabilan jangka panjang dari accelerometer dengan hasil yang akurat dan responsif.

Pada gambar 4 terlihat hasil visualisasi estimasi sudut selama 5 menit menunjukkan karakteristik yang khas dari masing-masing metode sensor. Garis merah yang merepresentasikan estimasi sudut berbasis gyroscope memperlihatkan akurasi yang cukup baik pada awal pengukuran, namun seiring waktu mengalami drift secara perlahan akibat akumulasi kesalahan integrasi. Sementara itu, garis hijau yang menunjukkan hasil dari accelerometer tampak sangat fluktuatif, hal ini disebabkan oleh sensitivitas tinggi sensor terhadap noise jangka pendek dan gangguan lingkungan seperti getaran. Sebaliknya, garis biru yang merupakan hasil dari filter complementary menampilkan estimasi sudut yang jauh lebih halus, stabil, dan realistis. Hal ini menunjukkan bahwa filter complementary mampu memadukan keunggulan gyroscope dalam merespons perubahan cepat dan keunggulan accelerometer dalam kestabilan jangka panjang, sehingga menghasilkan data estimasi sudut yang optimal untuk keperluan kendali robot roda dua secara real-time.

3.4 Analisis Respon Sistem

Beberapa konfigurasi parameter PID diuji untuk mengevaluasi performa kontrol sistem:

Tabel 2. Hasil Pengujian Variasi Parameter PID terhadap Stabilitas Robot

Kp	Ki	Kd	Waktu Stabilisasi (s)	Error Maksimum (°)	Osilasi
25	1.0	2.0	1.8	± 3.5	Ada
35	0.8	25	1.2	± 2.0	Stabil
45	0.8	25	>5.0	± 6.0	Tinggi

Kombinasi $K_p=35$, $K_i=0.8$, $K_d=25$ menunjukkan performa terbaik. Sistem mampu kembali ke posisi tegak dalam waktu rata-rata 1,2 detik, dan error maksimum hanya $\pm 2^\circ$. Ketika K_p ditingkatkan menjadi 45 tanpa penyesuaian K_i dan K_d , terjadi overshoot dan osilasi yang memperburuk kestabilan robot. Dalam pengujian dengan gangguan ringan (dorongan tangan), robot dapat kembali ke posisi tegak dalam waktu <2 detik. Pada kondisi permukaan datar, robot mampu mempertahankan keseimbangan selama lebih dari 30 detik tanpa koreksi eksternal, menunjukkan efektivitas filter complementary dan tuning PID yang tepat.

4. KESIMPULAN

Metode filter complementary merupakan pendekatan yang efektif untuk mengestimasi sudut kemiringan pada robot roda dua dengan menggabungkan data dari sensor gyroscope dan accelerometer. Filter ini mampu mengatasi kelemahan masing-masing sensor, yaitu drift pada gyroscope dan noise pada accelerometer, sehingga menghasilkan estimasi sudut yang lebih stabil dan akurat. Dari yang dilakukan dengan parameter waktu sampling 0,1 detik dan konstanta filter α sebesar 0,96, diperoleh estimasi sudut yang responsif terhadap perubahan dan tetap menjaga kestabilan selama pergerakan robot.

Hasil estimasi sudut yang diperoleh sangat penting dalam implementasi sistem kendali robot roda dua berbasis kontrol umpan balik, seperti PID controller, untuk menjaga keseimbangan secara real-time. Dengan estimasi sudut yang akurat, sistem kendali dapat memberikan respon koreksi yang tepat terhadap gangguan atau perubahan posisi robot. Oleh karena itu, filter complementary menjadi pilihan yang tepat dan efisien dalam sistem kendali keseimbangan, terutama untuk aplikasi embedded system dengan keterbatasan komputasi dan kebutuhan terhadap estimasi sudut yang cepat dan stabil. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada penggabungan filter ini dengan metode kecerdasan buatan untuk meningkatkan adaptivitas sistem terhadap kondisi lingkungan yang lebih kompleks.

Daftar Pustaka

Ali, M. N., Brutti, A., & Falavigna, D. (2023). Direct enhancement of pre-trained speech embeddings for speech processing in noisy conditions. *Computer Speech & Language*, 81, 101501. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2023.101501>

Al-Naib, I. (2020). Novel terahertz metasurfaces based on complementary coupled split ring resonators. *Optical Materials*, 99, 109596. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109596>

Chen, T., Yang, G., Cai, Q., Wen, Z., & Zhang, W. (2022). A Novel Calibration Method for Gyro-Accelerometer Asynchronous Time in Foot-Mounted Pedestrian Navigation System. *Sensors*, 22(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/s22010209>

- Chotikunnan, P., Chotikunnan, R., Nirapai, A., Wongkamhang, A., Imura, P., & Sangworasil, M. (2023). Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i2.18108>
- Duan, T., Liao, Z., Li, T., Tang, H., & Chen, P. (2021). Bearing Fault Diagnosis Based on State-Space Principal Component Tracking Filter Algorithm. *IEEE Access*, 9, 158784–158795. [IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3131494](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3131494)
- Hassan, A., Liu, Z., Shehzeb Abbas, S. M., Li, Y., Wang, L., Liu, X., & Zhao, P. (2019). Statistical scheme for fault detection using Arduino and MPU 6050. *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PHM-Qingdao46334.2019.8942922>
- Li, C., Yin, X., Chen, J., Yang, H., & Hong, L. (2022). Bearing Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *Open Access Library Journal*, 9(6), Article 6. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108845>
- Noor, N. M. M., Halid, S. A. A. M., & Mahmod @Wahab, R. (2023). STUDY THE PERFORMANCE OF TWO-WHEELED BALANCING MOBILE ROBOT USING FUZZY PD CONTROLLER. *Jurnal Mekanikal*, 164–174. <https://doi.org/10.11113/jm.v46.500>
- Nourmohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. C. (2022). Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks. *Computers & Operations Research*, 140, 105674. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105674>
- Santoso, S., Hariadi, B., Hartayu, R., Widagdo, R. S., Pambudi, W. S., & Heryanto, M. A. (2024). Pengaruh Penyesuaian Parameter Membership Function pada Sistem Kendali Robot Balancing Berbasis Fuzzy Logic. *Jurnal JEETech*, 5(2), 145–150. <https://doi.org/10.32492/jeetech.v5i2.5205>
- Santoso, Wardah, I. A., Slamet, P., Andriawan, A. H., & Algopiki, A. R. (2023). *Design and Build Two Wheel Balancing Robot Simulation with Fuzzy PID*. 2, 124–128. <https://doi.org/10.5220/0012108300003680>