

IMPLEMENTASI EMPAT MOTOR DC PADA AUTONOMOUS GROUND VEHICLE BERBASIS KONTROL PID

Muhammad Izza Ramadhan Arrayyan
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
izza.ramadhan02@gmail.com

Angga Rusdinar
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

Azam Zamhuri Fuadi
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
azamzamhurifuadi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — *Autonomous Ground Vehicle (AGV)* merupakan kendaraan cerdas yang berpotensi digunakan pada lingkungan outdoor, namun menghadapi tantangan dalam menjaga keseragaman pergerakan motor pada medan yang tidak rata. Penelitian ini bertujuan menguji penggunaan kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) untuk mengatur empat motor DC PG45 yang dilengkapi sensor rotary encoder sebagai umpan balik kecepatan. Sistem dirancang dengan mikrokontroler Arduino yang mengimplementasikan hasil pemodelan dan tuning PID. Uji coba dilakukan di area taman Universitas Telkom yang merepresentasikan kondisi lapangan dengan permukaan bervariasi.

Pengujian membandingkan performa sistem sebelum dan sesudah tuning. Hasil menunjukkan bahwa sebelum tuning, kecepatan motor belum seragam dengan rata-rata error sekitar 7%, deviasi antar motor ± 20 RPM, dan tingkat kesesuaian gerak antar motor hanya 85%. Setelah tuning, kinerja sistem meningkat dengan rata-rata error $< 1\%$, deviasi antar motor $\pm 1,8$ RPM, dan kesesuaian gerak mencapai 98,7%.

Temuan ini membuktikan bahwa kendali PID mampu menjaga keseragaman kecepatan serta sinkronisasi empat motor DC sehingga AGV dapat bergerak lebih terkoordinasi pada medan luar ruangan.

Kata Kunci: *Autonomous Ground Vehicle (AGV)*, Kendali PID, Motor DC, Rotary Encoder, Stabilitas Kecepatan, Medan Tidak Rata.

I. PENDAHULUAN

Dalam dunia manufaktur modern yang terus berkembang, kebutuhan akan efisiensi, presisi, dan adaptabilitas mendorong penggunaan teknologi canggih. *Autonomous Ground Vehicle (AGV)* muncul sebagai inovasi utama, menggabungkan robotika, kecerdasan buatan dan sistem navigasi, sehingga menjadi komponen vital di berbagai pabrik di seluruh dunia [1].

Pasar AGV di Korea Selatan tercatat sebesar 66,7 juta dolar pada tahun 2017, meningkat menjadi 72,7 juta dolar pada 2018, dan mencapai 78,8 juta dolar pada 2019,

dengan rata-rata pertumbuhan tahunan sebesar 5,92%. Diproyeksikan, nilai pasar ini akan terus meningkat hingga 87,6 juta dolar pada 2023 dan 102,4 juta dolar pada 2025 [2].

Lahan outdoor untuk aplikasi AGV (*Autonomous Ground Vehicle*) memiliki permukaan yang tidak rata dan lingkungan yang tidak terstruktur, berbeda dengan permukaan pabrik dan jalan raya. Oleh karena itu diperlukan sistem pengendalian untuk memastikan AGV dapat bergerak dengan lancar dan stabil di medan yang tidak teratur.

Sistem kontrol memainkan peran penting dalam mengatur kecepatan sudut motor DC sebagai sumber tenaga AGV, yang dirancang untuk mempertahankan kecepatan konstan di permukaan yang tidak rata. Pengendalian ini memastikan AGV beroperasi pada kecepatan yang diinginkan, sehingga mampu melaksanakan tugasnya secara optimal [3].

Sistem kontrol yang umum digunakan untuk robot pegikur garis adalah Proportional-Integral-Derivative (PID), yang mengoreksi kesalahan umpan balik hingga nol. Set point dicapai melalui kombinasi nilai PID berdasarkan pembacaan posisi robot terhadap garis, memungkinkan robot tetap berada ditengah jalur. [4].

II. KAJIAN TEORI

Berikut adalah teori-teori yang mendukung penulisan jurnal penelitian yang dilakukan oleh penulis:

A. AGV

Selama bertahun-tahun, pengembangan teknologi otonom seperti *Autonomous Ground Vehicle (AGV)* telah menjadi fokus perhatian industri dan akademisi. AGV didefinisikan sebagai kendaraan yang mampu bernavigasi secara mandiri dengan sedikit atau tanpa bantuan manusia. Teknologi ini merupakan salah satu terobosan modern dalam penelitian robotika [5].

AGV adalah sistem robotik yang dirancang untuk bernavigasi secara mandiri di medan *off-road* dan lingkungan yang tidak terstruktur. Kendaraan ini menggunakan teknologi

seperti sensor, algoritma kontrol, dan *machine learning* untuk melewati berbagai jenis medan. AGV banyak dimanfaatkan dalam bidang pertanian, pertambangan, dan logistik, di mana kemampuan beradaptasi terhadap medana yang sulit dan dinamis sangat diperlukan [6].

Kontrol PID digunakan untuk mempertahankan kecepatan putar motor DC pada nilai konstan (*constant RPM*). Hal ini diperlukan untuk mengurangi waktu henti (*downtime*) dan waktu proses (*lead time*). Sistem ini melibatkan motor DC dengan encoder, driver motor, mikrokontroler (Arduino), dan baterai. Encoder memberikan umpan balik dalam bentuk posisi poros motor kepada mikrokontroler [7].

B. Kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

Stabilitas gerakan AGV sangat bergantung pada kemampuan sistem kendala dalam menjaga kecepatan motor DC tetap konsisten [8]. Untuk mencapai hal ini, diperlukan pendekatan kontrol yang dapat mengatasi perubahan kondisi secara efektif. Salah satu metode yang bisa digunakan adalah sistem kendala PID, yang dirancang untuk memastikan performa optimal dalam berbagai situasi operasional.

Dalam sistem PID (*Proportional-Integral-Derivative*) bertujuan untuk menjaga stabilitas gerakan AGV dengan memastikan kecepatan motor DC tetap sesuai dengan nilai referensi yang ditentukan. Parameter PID (*Proportional, Integral, dan Derivative*) diatur untuk menangani perubahan kecepatan motor akibat gangguan atau variasi beban [8].

C. Prinsip Dasar Kontrol PID

Stabilitas dan akurasi adalah aspek penting dalam sistem kendala untuk memastikan performa optimal. Kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) menjadi metode andalan yang dapat digunakan karena mampu mengintegrasikan umpan balik presisi, menyelaraskan respons sistem, dan mengelola gangguan. Dengan tiga komponen utama, PID menawarkan solusi ideal untuk berbagai aplikasi, termasuk kontrol kecepatan motor DC, melalui keseimbangan antara respons cepat dan kestabilan sistem [9].

Pengendali proporsional bertindak sebagai penguat yang mengubah output sistem secara sebanding dengan kesalahan tanpa efek dinamis [10]. Respon pengendali ini dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.1)$$

Pengendali integral memperbaiki kesalahan steady-state, sehingga mampu mengurangi kesalahan sistem [10]. Respon pengendali ini dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_i \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (2.2)$$

Pengendali derivative memanfaatkan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter kontrol. Pengendali ini dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

D. Tuning PID

Tuning PID adalah proses penyesuaian parameter kontrol K_p (*Proportional*), K_i (*Integral*), dan K_d (*Derivative*) untuk mencapai performa sistem yang optimal. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan respons sistem terhadap perubahan nilai referensi (*set point*) dan gangguan, dengan memastikan stabilitas, meminimalkan kesalahan steady-state, dan mengurangi overshoot [11].

Proses tuning dimulai dengan Pengumpulan data sistem melalui eksperimen menggunakan perangkat keras seperti Arduino Mega dan motor DC PG45 yang dilengkapi dengan encoder. Data input berupa tegangan dan data output berupa kecepatan motor dalam RPM digunakan untuk melakukan identifikasi sistem [12].

E. Tahapan Tuning PID

Dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols, tahapan awal tuning PID adalah dengan menentukan parameter awal, eksperimen bisa dilakukan dalam mode loop terbuka untuk mengidentifikasi karakteristik sistem seperti gain (K), waktu tunda (θ), dan konstanta waktu (τ) [13][14].

Kemudian sistem dialihkan ke mode loop tertutup dengan kontrol PID menggunakan metode pumping (osilasi berkelanjutan) digunakan untuk menentukan ultimate gain (K_u) dan ultimate period (T_u) [15]. Parameter PID dihitung menggunakan rumus:

$$K_p = 0,6 K_u \quad (2.4)$$

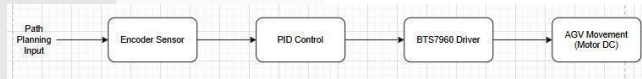
$$T_i = 0,5 T_u \quad (2.5)$$

$$T_d = 0,125 T_u \quad (2.6)$$

Parameter PID yang dihitung diterapkan pada pengontrol, dan sistem diuji dengan beban (*torsi resistif*) dan tanpa beban untuk mengamati respons sistem [15].

III. METODE

A. Desain Sistem

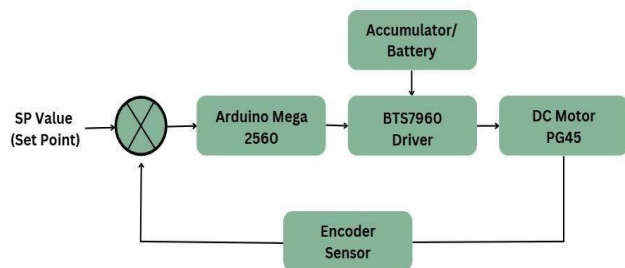


Gambar 3.1
(Ilustrasi Desain Sistem)

Sistem AGV ini dirancang untuk lingkungan luar ruangan dengan medan tidak rata, berbeda dari AGV konvensional yang biasanya beroperasi di dalam ruangan. Pengendali PID digunakan untuk menjaga kecepatan empat motor DC tetap sinkron dengan umpan balik dari sensor rotary encoder, memastikan kecepatan sesuai dengan nilai referensi.

Mikrokontroler berbasis Arduino berfungsi sebagai pengontrol utama. Parameter PID dioptimalkan menggunakan metode tuning seperti Ziegler-Nichols. Desain ini memastikan AGV dapat bergerak sinkron, meskipun ada gangguan atau perubahan beban di medan luar ruangan.

B. Diagram Blok

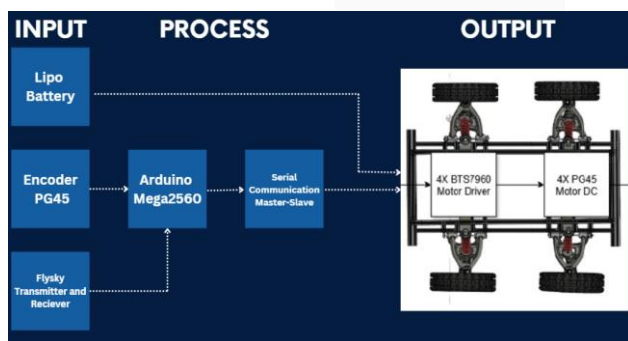


Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

Sistem kontrol PID yang dirancang digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC agar sesuai dengan nilai yang diinginkan (Set Point). Proses ini dimulai dari nilai referensi (Set Point) yang merupakan kecepatan yang diharapkan. Nilai ini dibandingkan dengan kecepatan aktual motor yang diperoleh dari sensor encoder menghasilkan selisih atau error. PID kontrol memproses error ini menggunakan parameter Kp (Proportional), Ki (Integral), dan Kd (Derivative) untuk menghasilkan sinyal kontrol yang dikirim ke driver motor. Driver motor BTS7960 mengatur daya yang diberikan ke motor DC dan memastikan motor dapat berputar sesuai dengan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh PID kontrol.

Kecepatan rotasi motor yang dihasilkan dipantau oleh sensor encoder, yang memberikan data umpan balik ke PID kontrol. Proses ini akan berlangsung secara berulang dalam loop tertutup (feedback loop), sehingga sistem dapat terus menyesuaikan kontrol untuk meminimalkan error dan menjaga kestabilan kecepatan motor meskipun ada gangguan atau perubahan beban. Dengan desain ini kontrol PID mampu memastikan kecepatan motor DC tetap stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem.

C. Desain Perangkat Keras

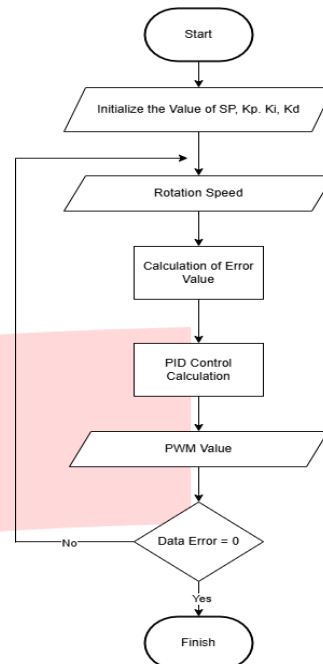


Gambar 3.2
(Desain Perangkat Keras Sistem)

Berdasarkan tampilan pada **Gambar 3.2**, perangkat keras sistem dirancang dengan menggabungkan motor DC PG45 yang dilengkapi *gearbox* dan *encoder* guna menghasilkan torsi tinggi serta memungkinkan pembacaan kecepatan secara real-time untuk mendukung kendali PID yang presisi. Sistem dikendalikan oleh Arduino Mega 2560, sebuah mikrokontroler dengan banyak pin I/O dan *port* komunikasi serial yang cocok untuk sistem AGV kompleks. Untuk mengatur daya motor, digunakan driver BTS7960 yang mampu menangani arus besar dan memiliki fitur

proteksi, sehingga andal digunakan di lingkungan lapangan yang menuntut stabilitas dan ketahanan tinggi.

D. Desain Perangkat Lunak



Gambar 3.3
(Diagram Alir Sistem)

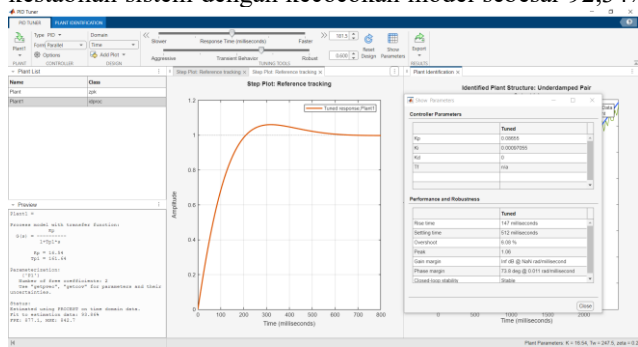
Untuk mengatur kecepatan motor DC agar sesuai dengan nilai referensi (Set Point), proses dimulai dengan Inisialisasi parameter PID (Kp, Ki, Kd) dan nilai Set Point. Sistem membaca kecepatan aktual motor melalui sensor encoder, menghitung nilai error sebagai selisih antara kecepatan aktual dan Set Point, lalu memproses error tersebut menggunakan PID Controller untuk menghasilkan sinyal kontrol berupa PWM. Sinyal PWM ini mengatur driver motor untuk menyesuaikan daya ke motor DC, sehingga motor bergerak mendekati kecepatan yang diinginkan. Jika nilai error belum nol, sistem akan kembali ke pengukuran kecepatan untuk perhitungan ulang. Proses berulang hingga error mendekati nol, menandakan kecepatan motor sesuai target, lalu sistem berhenti.

E. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi performa awal keempat motor DC PG45 sebelum dan sesudah penerapan kontrol PID. Pengujian dilaksanakan secara dinamis di area outdoor sekitar Gedung Deli (P) Telkom University dengan pembacaan data kecepatan melalui encoder. Input kecepatan motor diberikan menggunakan remote Flysky, dan hasil pembacaan encoder secara otomatis disimpan dalam file teks. Hasil awal menunjukkan adanya variasi respons antar motor terhadap sinyal PWM yang sama, menandakan perlunya tuning PID untuk mencapai kestabilan gerak AGV.

Tuning PID dilakukan menggunakan MATLAB dengan mengimpor data kecepatan dari encoder dalam format .txt untuk setiap motor. Proses ini melibatkan identifikasi sistem dan penyusunan model plant berdasarkan respons kecepatan motor terhadap PWM. MATLAB PID Tuner digunakan untuk menentukan parameter PID (Kp, Ki, Kd) yang optimal

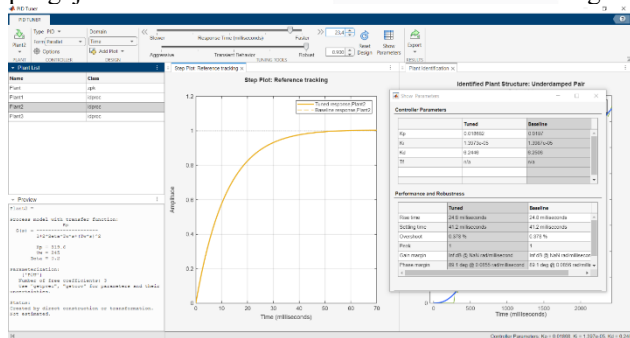
dengan metode auto tuning, diikuti penyesuaian manual untuk mengurangi overshoot dan mempercepat settling time. Hasil tuning menunjukkan perbaikan signifikan pada kestabilan sistem dengan kecocokan model sebesar 92,34%.



Gambar 3.4
(Kurva Respons Sebelum Diubah)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem dilakukan dalam kondisi dinamis untuk menilai efektivitas kontrol PID dalam menjaga kestabilan kecepatan keempat motor DC PG45 saat AGV bergerak. Nilai encoder yang direkam menunjukkan peningkatan bertahap dari 0 hingga sekitar 1280 count per detik, mencerminkan respons sistem terhadap perubahan setpoint. Meskipun terdapat sedikit perbedaan antar motor, sistem secara umum menunjukkan keselarasan gerak dan kestabilan yang baik. Data ini mendemonstrasikan bahwa kontrol PID berhasil menjaga kecepatan motor tetap konsisten selama pengujian berlangsung.



Gambar 3.5
(Kurva Respons Setelah Diubah)

Evaluasi performa dilakukan dengan membandingkan respons sistem sebelum dan sesudah tuning PID. Hasil tuning menunjukkan perbaikan pada overshoot yang rendah (sekitar 0,378%) serta respons yang lebih halus dan stabil terhadap variasi input dari remote Flysky. Parameter seperti rise time dan settling time juga menunjukkan peningkatan tanpa adanya getaran atau delay yang signifikan. Komunikasi satu arah antara mikrokontroler master dan slave berjalan dengan baik, menjaga sinkronisasi antara motor depan dan belakang. Hasil ini menandakan bahwa sistem kendali PID telah mampu meningkatkan kinerja AGV di kondisi nyata.

V. KESIMPULAN

Penerapan kontrol PID pada motor DC PG45 berhasil meningkatkan kestabilan dan akurasi kecepatan pada AGV di

medan luar ruang yang tidak rata. Tuning parameter PID dilakukan secara otomatis menggunakan MATLAB dan hasilnya diintegrasikan langsung ke dalam program Arduino. Pengujian menunjukkan bahwa respons motor menjadi lebih halus, cepat, dan minim overshoot, dibandingkan sebelum tuning. Sinkronisasi gerak keempat motor dapat dicapai dengan komunikasi serial satu arah antara master dan slave. Secara keseluruhan, sistem kontrol yang dirancang telah mampu memenuhi tujuan tugas akhir, yaitu menciptakan AGV yang stabil dan responsif terhadap kendali pengguna.

REFERENSI

- [1] S. Ketsayom, D. Maneetham, M. M. Aung, and W. Srichaipanya, "Enhancing outdoor warehouse operations: Design and development of GPS and compass-guided automatic vehicles," in *Proc. 2023 Int. Conf. Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 2023, pp. 1–8.
- [2] D. Kim, H. Yoon, J. Song, J. Lee, and T. Park, "A study on the design of BLDC motor drive for AGV system," in *Proc. ACK 2022 Conf.*, vol. 29, no. 2, 2022, pp. 285–287.
- [3] W. Purbowaskito and C.-H. Hsu, "Sistem kendali PID untuk pengendalian kecepatan motor penggerak unmanned ground vehicle untuk aplikasi industri pertanian," *J. Infotel*, vol. 9, no. 4, pp. 376–381, Nov. 2017.
- [4] K. Joni, M. Ulum, and Z. Abidin, "Robot line follower berbasis kendali proportional-integral-derivative (PID) untuk lintasan dengan sudut ekstrim," *J. Infotel*, vol. 8, no. 2, pp. 138–142, Nov. 2016.
- [5] F. Islam, M. M. Nabi, and J. E. Ball, "Off-Road Detection Analysis for Autonomous Ground Vehicles: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 8463, pp. 1–23, 2022.
- [6] P. V. K. Borges, T. Peynot, S. Liang, B. Arain, M. Wildie, M. G. Minareci, S. Lichman, G. Samvedi, I. Sa, N. Hudson, M. Milford, P. Moghadam, and P. Corke, "A Survey on Terrain Traversability Analysis for Autonomous Ground Vehicles: Methods, Sensors, and Challenges," *Field Robotics*, vol. 2, pp. 1567–1627, Jul. 2022.
- [7] P. Parikh, S. Sheth, R. Vasani, and J. K. Gohil, "Implementing Fuzzy Logic Controller and PID Controller to a DC Encoder Motor – 'A case of an Automated Guided Vehicle'," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 219–226, 2018.
- [8] H. A. Neamah and H. A. Akkad, "A Comparative Review of Omnidirectional Wheel Types for Mobile Robotics," *Preprint*, Aug. 2023.
- [9] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID Control System Analysis, Design, and Technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, Jul. 2005.
- [10] M. I. Ma'arif, F. I. Adhim, and F. Istiqomah, "Implementasi Metode PID untuk Mengontrol Posisi Motor Servo pada Sistem Sortir Berat Adonan," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 2, pp. A352–A359, 2021.
- [11] P. V. G. K. Rao, M. V. Subramanyam, and K. Satyaprasad, "Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques," in *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, Kanyakumari, India, 2014, pp. 1411–1417.
- [12] A. Zarifi, H. A. Abbas, and A. Seghiour, "Design of Real-time PID Tracking Controller Using Arduino Mega 2560 for a Permanent Magnet DC Motor Under Real Disturbances," in *2018 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Systems Engineering (CISTEM)*, Algiers, Algeria, Oct. 29–31, 2018.
- [13] M. A. Zaiton and R. Ngadengon, "System Identification and Control of Direct Current Motor," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 979–986, 2022.
- [14] Q. Ariyansyah and A. Ma'arif, "DC Motor Speed Control with Proportional Integral Derivative (PID) Control on the Prototype of a Mini-Submarine," *Journal of Fuzzy Systems and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 18–24, 2023.
- [15] M. K. Hat, B. S. K. K. Ibrahim, T. A. T. Mohd, and M. K. Hassan, "Model Based Design of PID Controller for BLDC Motor with Implementation of Embedded Arduino Mega Controller," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. X, no. X, pp. 1–7.
- [16] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [17] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.
- [18] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2011.