

Implementasi *Vision-Based* PID Control untuk Pengendalian Kecepatan Diferensial Motor pada *Autonomous Vehicle*

Aurizal Brelian

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail: aurizal.22072@mhs.unesa.ac.id

Rifqi Firmansyah

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia

e-mail: rifqifirmansyah@unesa.ac.id,

Abstrak

Perkembangan *autonomous vehicle* (AV) menghadapi tantangan dalam menjaga kestabilan pergerakan dan akurasi arah, khususnya pada sistem penggerak diferensial yang rentan terhadap ketidakseimbangan kecepatan motor serta gangguan eksternal. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem kendali berbasis *Vision-Based* PID Control dalam mengatur kecepatan diferensial motor guna meningkatkan stabilitas dan akurasi pergerakan AV. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan pengolahan citra berbasis ruang warna HSV untuk mendeteksi objek secara *real time* dengan algoritma PID sebagai pengendali kecepatan motor kiri dan kanan. Informasi posisi objek digunakan sebagai sinyal *error* yang diproses oleh pengendali PID untuk menghasilkan sinyal kendali berupa nilai PWM pada masing-masing motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *vision* berbasis HSV mampu mendeteksi objek dengan akurasi sebesar 96,07%. Pengendali PID menghasilkan *error tracking* rata-rata sebesar 0,111 *turnvalue* dengan *settling time* 1,497s dan *overshoot* 31,43%, yang masih berada dalam batas operasi sistem untuk menjaga objek tetap berada pada area pengamatan kamera. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi *vision system* berbasis HSV dan kendali PID mampu menghasilkan deteksi objek yang akurat serta pengendalian arah yang responsif, sehingga efektif meningkatkan performa navigasi pada *autonomous vehicle*.

Kata Kunci: *Autonomous Vehicle, PID Control, Vision System, HSV, Differential Drive.*

Abstract

The development of autonomous vehicles (AV) faces significant challenges in maintaining motion stability and directional accuracy, particularly in differential drive systems that are susceptible to motor speed imbalance and external disturbances. This study aims to implement a Vision-Based PID Control system to regulate the differential motor speeds in order to improve the stability and movement accuracy of an AV. The proposed system integrates image processing based on the HSV colour space for real-time object detection with a PID control algorithm to regulate the speeds of the left and right motors. The object position obtained from the vision system is used as an error signal, which is processed by the PID controller to generate control signals in the form of PWM values for each motor. The test results show that the HSV-based vision system is able to detect objects with an accuracy of 96.07%. The PID controller produces an average tracking error of 0.111 turnvalues with a settling time of 1.497s and an overshoot of 31.43%, which is still within the system's operating limits to keep objects within the camera's observation area. These results indicate that the integration of the HSV-based vision system and PID control is able to produce accurate object detection and responsive directional control, thereby effectively improving navigation performance in autonomous vehicles.

Keywords: *Autonomous Vehicle, PID Control, Vision System, HSV, Differential Drive.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *autonomous vehicle* (AV) atau kendaraan otonom mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Tidak hanya terbatas pada sektor transportasi, implementasi AV juga telah merambah ke berbagai bidang industri, seperti pengawasan area, logistik, pertanian, dan sistem robot bergerak untuk pemantauan lingkungan (Widiawan et al., 2020; Zhao et al., 2012). Kendaraan otonom didesain untuk mampu bergerak dan mengambil keputusan secara mandiri berdasarkan data dari sensor dan sistem kendali cerdas. Desain kendaraan tersebut dapat

berupa konfigurasi dua roda (*differential drive*) maupun empat roda dengan sistem kemudi aktif (Han et al., 2019).

Namun demikian, performa kendaraan otonom sangat bergantung pada kestabilan sistem kendalinya dan keakuratan persepsi lingkungannya. Ketidakseimbangan pada motor penggerak, keterlambatan *respons*, serta kesalahan pembacaan sensor dapat menyebabkan kendaraan keluar dari jalur, berbelok berlebihan, atau bahkan kehilangan arah (González-Olvera & Martínez-Vásquez, 2024; Pratikno et al., 2024). Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali yang mampu merespons perubahan kondisi secara cepat dan adaptif untuk menjaga kestabilan pergerakan serta mempertahankan akurasi

navigasi.

Salah satu metode kendali yang masih banyak digunakan karena kesederhanaan dan keefektifannya adalah *Proportional-Integral-Derivative* (PID) (Firmansyah et al., 2024). Kendali PID mengatur besar sinyal kendali berdasarkan tiga parameter utama: proporsional terhadap *error* yang dialami saat ini, integral terhadap akumulasi *error* sebelumnya, dan derivatif terhadap laju perubahan *error*. Metode ini terbukti efektif digunakan pada sistem diferensial pada kendaraan, baik dalam pengaturan kecepatan motor maupun dalam stabilisasi arah gerak (Han et al., 2019; Pratikno et al., 2024; Zhao et al., 2012).

Di sisi lain, sistem penglihatan (*vision system*) berbasis pengolahan citra warna juga dapat menjadi komponen yang dapat mendukung dalam navigasi kendaraan otonom. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah transformasi warna RGB (*Red, Green, Blue*) ke HSV (*Hue, Saturation, Value*). Model HSV dinilai lebih stabil terhadap variasi pencahayaan dan memisahkan informasi warna dari intensitas, sehingga lebih akurat dalam mendeteksi objek berwarna (Kang et al., 2021; Khamdi et al., 2017).

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, pengembangan sistem robotik umumnya berfokus pada peningkatan akurasi navigasi melalui integrasi *vision system* dan algoritma kendali cerdas. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengendali PID efektif dalam menjaga kestabilan pergerakan robot, sedangkan metode deteksi objek berbasis ruang warna HSV mampu memberikan kinerja yang baik untuk aplikasi *real-time* (Farkh & Aljaloud, 2023; Kang et al., 2021; Prakarsa Riadi & Surya Akbar Gumilang, 2024; Zhao et al., 2012). Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pengendalian lintasan atau deteksi objek sebagai subsistem yang terpisah, sehingga pemanfaatan posisi piksel hasil deteksi citra sebagai sinyal umpan balik langsung untuk pengendalian kecepatan diferensial motor masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan integrasi *vision system* berbasis HSV dengan pengendali PID, di mana posisi piksel objek pada sumbu x digunakan secara langsung sebagai sinyal *error* untuk mengatur kecepatan motor kiri dan kanan pada robot *differential drive*. Pendekatan ini menjadi kontribusi utama penelitian karena memungkinkan proses deteksi objek dan pengendalian arah kendaraan dilakukan secara terintegrasi dalam satu skema *vision-based control* yang sederhana, *real-time*, dan responsif terhadap perubahan posisi objek.

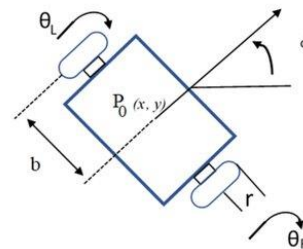
TINJAUAN PUSTAKA

Autonomous Vehicle

Autonomous vehicle (AV), atau kendaraan otonom, merupakan kendaraan yang mampu bergerak dan mengambil keputusan secara mandiri tanpa intervensi langsung dari manusia. Kendaraan ini biasanya memiliki sistem yang dilengkapi dengan berbagai sensor, serta pengendali yang mampu mendeteksi lingkungan sekitar dan meresponsnya secara *real-time*. *Autonomous vehicle* (AV) sering kali digunakan untuk meningkatkan keselamatan berkendara, efisiensi, serta mobilitas terintegrasi pada sektor transportasi maupun industri (Zhao et al., 2012).

Differential Speed Control

Differential Speed Control (kendali kecepatan diferensial) adalah metode pengendalian pada robot bergerak beroda dua (*differential drive mobile robot*), di mana arah dan pergerakan robot dikendalikan dengan cara mengatur kecepatan relatif kedua roda penggerak kanan dan kiri.



Gambar 1 Sistem Diferensial

Secara kinematik, hubungan antara kecepatan linear v dan kecepatan sudut ϕ dari robot dapat dinyatakan sebagai:

$$v = \frac{\theta_R + \theta_L}{2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\theta_R - \theta_L}{L} \quad (2)$$

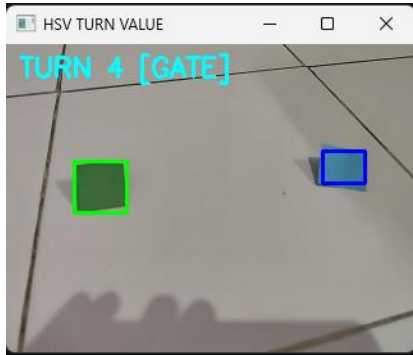
dimana v merupakan kecepatan linear dan ϕ sebagai kecepatan sudut dari *platform*, dengan θ_R dan θ_L masing-masing merupakan kecepatan roda kanan dan kiri, serta L adalah jarak antar roda (Sandeep Kumar Malu et al., 2014).

Ketika kedua roda bergerak pada kecepatan yang sama $\theta_R = \theta_L$, robot bergerak lurus maju atau mundur. Sebaliknya, perbedaan kecepatan $\theta_R \neq \theta_L$ menyebabkan robot berbelok atau berputar pada porosnya, pengendalian kecepatan motor kiri dan kanan dilakukan menggunakan *PID controller independen*. Tujuan utama PID di sini adalah memastikan kedua motor beroperasi dengan kecepatan sinkron agar robot bergerak dalam lintasan yang benar dan stabil (Pratikno et al., 2024).

HSV Image Processing

HSV (*Hue, Saturation, Value*) *image processing* merupakan salah satu teknik pengolahan citra yang umum

digunakan dalam bidang robotika dan sistem visi komputer, terutama untuk mendeteksi serta melacak objek berdasarkan warna (Khamdi et al., 2017).



Gambar 2 Tampilan deteksi HSV

Dalam penelitian ini, metode HSV digunakan untuk mendeteksi objek berdasarkan warna tertentu dan memperoleh posisi piksel objek tersebut terhadap sumbu x pada *frame*. Nilai posisi ini kemudian dibandingkan dengan titik tengah piksel *frame* untuk menentukan pergeseran (*offset*) objek terhadap pusat bidang pandang kamera. Pergeseran ini merepresentasikan posisi relatif objek di dalam *frame* dan digunakan sebagai indikator arah keberadaan rintangan terhadap AV. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$x_c = \frac{w}{2} \quad (3)$$

Nilai x_c merupakan titik tengah *frame* citra pada sumbu horizontal yang diperoleh dari setengah lebar *frame* W . Titik ini digunakan sebagai referensi pusat sistem penglihatan, di mana posisi objek diukur relatif terhadap pusat *frame* untuk menentukan arah koreksi gerak sistem.

$$T_x = \begin{cases} \frac{T_{max}}{W} \times x_1 \\ \frac{T_{max}}{W} \times x_2 - T_{max} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_g = \frac{T_{max}}{x_c} \times \left(\frac{x_1 + x_2}{2} - x_c \right) \quad (5)$$

Nilai T_x dan T_g masing masing merupakan *turnvalue* yang didapatkan jika hanya mendeteksi 1 warna saja atau 2 warna (*gate*), nilai digunakan untuk menghasilkan koreksi arah gerak sistem dalam rangka menghindari objek dan T_{max} merupakan batas nilai maksimal *turnvalue* yang bisa didapatkan. Dengan x_1 dan x_2 menunjukkan nilai piksel dari objek 1 dan 2. Nilai T ini digunakan sebagai masukan sistem kendali untuk menghasilkan koreksi arah gerak robot yang berlawanan dengan arah posisi objek, sehingga robot dapat menjauhi objek yang terdeteksi dan menghindari potensi tabrakan secara

visual (Saravanakumar & Ahmed, n.d.).

Integrasi Vision Based (HSV) dan Sistem Kendali PID untuk Pengendalian Kecepatan Diferensial

Integrasi antara pemrosesan citra berbasis HSV dan sistem kendali PID digunakan untuk mengarahkan pergerakan *Autonomous Vehicle* (AV) melalui pengaturan kecepatan diferensial roda kiri dan kanan (Farkh & Aljaloud, 2023; Prakarsa Riadi & Surya Akbar Gumilang, 2024). Pada sistem ini, hasil deteksi objek menggunakan metode HSV menghasilkan informasi posisi objek pada bidang pandang kamera dalam bentuk koordinat piksel. Selisih antara posisi piksel pusat objek terhadap titik tengah *frame* pada sumbu x menghasilkan nilai *error* posisi T , yang merepresentasikan posisi relatif objek terhadap pusat bidang pandang kamera. Nilai *error* ini kemudian dijadikan sebagai masukan pada pengendali PID, sehingga *error* sistem dapat didefinisikan sebagai $e(t)=T(t)$ (Paraskevopoulos, 2017). Persamaan kendali PID yang digunakan dapat dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p \cdot T(t) + K_i \int_0^t T(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (6)$$

dimana $u(t)$ merupakan nilai *output* dari sistem kontrol, K_p , K_i dan K_d merupakan konstanta proporsional juga integral, $T(t)$ merupakan sinyal *error*, dan $\int_0^t T(\tau) d\tau$ merupakan integral *error* terhadap waktu dan $\frac{dT(t)}{dt}$ menyatakan laju perubahan *error* terhadap waktu.

Sinyal keluaran pengendali PID digunakan untuk memodifikasi kecepatan roda kanan dan kiri berdasarkan prinsip *differential speed control*, yang dinyatakan sebagai:

$$\theta_R = \theta - u(t) \quad (7)$$

$$\theta_L = \theta + u(t) \quad (8)$$

dengan θ merupakan kecepatan *default* yang telah ditetapkan, θ_R dan θ_L masing-masing merupakan kecepatan roda kanan dan kiri setelah mendapatkan masukan dari sinyal PID.

Keluaran dari pengendali PID berupa sinyal koreksi yang digunakan untuk memodifikasi perbedaan kecepatan antara motor kanan dan motor kiri (Firmansyah & Irmawanto, 2021). Berdasarkan prinsip *differential speed control*, koreksi arah dilakukan dengan menaikkan kecepatan salah satu motor dan menurunkan kecepatan roda lainnya secara proporsional terhadap nilai *error* yang dihasilkan. Secara kinematik, perbedaan kecepatan motor θ_R dan θ_L akan menghasilkan kecepatan sudut ϕ yang menyebabkan AV berbelok menjauhi arah keberadaan objek sesuai dengan pendeteksian warna.

METODE PENELITIAN

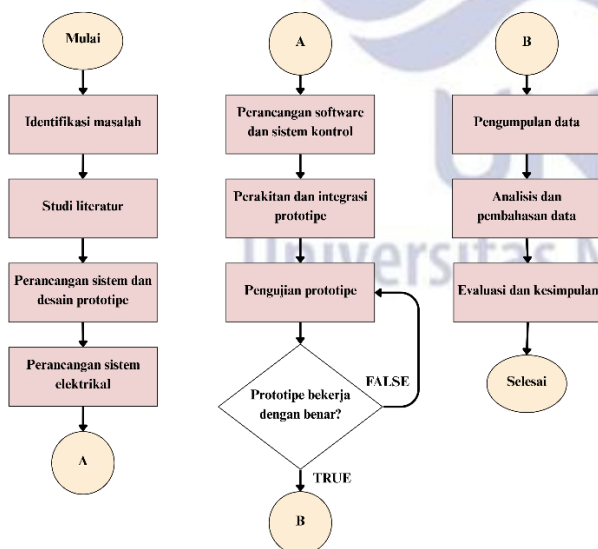
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif, yaitu metode yang berfokus pada pengolahan data numerik untuk mengukur variabel serta menguji hipotesis secara sistematis. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang objektif antara konsep teoritis dengan kondisi nyata di lapangan. Dalam penelitian ini, *autonomous vehicle* (AV) digunakan sebagai media implementasi sistem deteksi berbasis *vision*, dengan metode pengolahan citra menggunakan pendekatan *Hue, Saturation, Value* (HSV). Sistem ini dirancang untuk mendukung pengujian serta penerapan kontrol PID dalam mengatur kecepatan diferensial pada dua motor DC agar kendaraan dapat bergerak sesuai dengan arah yang diinginkan.

Nilai parameter kontrol PID, yaitu K_p , K_i , dan K_d , ditentukan melalui proses *tuning* menggunakan metode Ziegler–Nichols. Metode ini dipilih karena mampu memberikan pendekatan penyetelan parameter yang sistematis dan praktis tanpa memerlukan model matematis sistem.

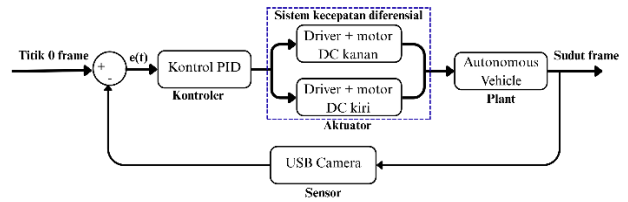
Perancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari identifikasi masalah dan studi literatur, kemudian perancangan sistem, baik desain prototipe, elektrik, maupun perangkat lunak dan sistem kontrol. Selanjutnya dilakukan perakitan, integrasi, serta pengujian prototipe hingga berfungsi sesuai kebutuhan. Setelah itu, penelitian dilanjutkan dengan pengumpulan data, analisis, serta pembahasan untuk menghasilkan evaluasi dan kesimpulan akhir.



Gambar 3 Flowchart Perancangan Penelitian

Blok Diagram



Gambar 4 Blok Diagram Sistem

Diagram blok pada Gambar 4 menunjukkan sistem kontrol tertutup berbasis algoritma PID yang dirancang untuk menjaga kestabilan arah gerak *Autonomous Vehicle* (AV) dengan mempertahankan posisi objek pada pusat *frame* kamera. Sistem memanfaatkan citra dari kamera sebagai umpan balik, di mana posisi objek dibandingkan dengan *setpoint* untuk menghasilkan nilai *error*. Nilai *error* tersebut diproses oleh mikrokontroler menggunakan algoritma PID yang terdiri dari komponen proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan sinyal kendali berupa PWM. Sinyal PWM digunakan untuk mengatur kecepatan diferensial motor DC kanan dan kiri melalui *driver* motor, sehingga AV dapat menyesuaikan arah pergerakannya secara kontinu. Komponen proporsional merespons *error* saat ini, komponen integral mengurangi *error steady state*, dan komponen derivatif meredam osilasi berdasarkan perubahan *error*. Dengan mekanisme ini, sistem mampu melakukan koreksi arah secara dinamis dan mempertahankan kestabilan pergerakan meskipun terdapat gangguan atau perubahan kondisi lingkungan.

Parameter Sistem

Pada penelitian ini, parameter yang digunakan meliputi parameter deteksi warna berbasis ruang warna HSV, parameter kendali PID yang diperoleh melalui metode Ziegler Nichols serta perangkat keras yang dipakai. Parameter parameter tersebut diperoleh dan diuji secara langsung di lapangan melalui proses kalibrasi dan pengujian sistem untuk memastikan kinerja yang optimal pada kondisi nyata. Penentuan parameter ini bertujuan agar sistem mampu mendeteksi objek secara akurat sekaligus menghasilkan respon kendali yang stabil dan responsif.

Tabel 1 Parameter Nilai HSV

Parameter	Hijau		Biru	
	Upper	Lower	Upper	Lower
H	69	49	111	91
S	158	78	225	145
V	147	67	182	102

Tabel 2 Parameter hasil metode Ziegler-Nichols

Parameter	Nilai
Kp	1,86
Ti	0,6285s
Td	0,157s
Ki	2,95943
Kd	0,292

Tabel 3 Spesifikasi perangkat keras

Parameter Perangkat	Jenis
Baterai	LiPo 12V
Kontroller	Orange Pi 4 Pro, ESP32
Driver	BTS7960
Motor	Motor DC TT
USB Kamera	1080P 30FPS
Dimensi AV	25cm x 20cm

Tabel 1 menunjukkan rentang nilai HSV yang digunakan dalam proses deteksi objek berwarna hijau dan biru. Rentang nilai tersebut ditentukan melalui proses kalibrasi guna memperoleh batas bawah dan batas atas yang efektif dalam membedakan objek dari latar belakang. Berdasarkan hasil pengujian, parameter HSV yang diperoleh mampu mencapai akurasi deteksi sebesar 96,07% pada berbagai kondisi pencahayaan yang telah diuji. Sementara itu, Tabel 2 menampilkan parameter kendali PID yang diperoleh menggunakan metode Ziegler Nichols, yang terdiri dari konstanta proporsional (Kp), waktu integral (Ti), dan waktu derivatif (Td), serta nilai turunan Ki dan Kd. Dan tabel 3 merupakan parameter dari perangkat keras yang terpasang dan digunakan pada *Autonomous Vehicle*. Parameter parameter ini digunakan untuk mengatur kecepatan diferensial motor sehingga sistem dapat merespons *error* secara cepat, mengurangi kesalahan *steady state*, dan meredam osilasi. Kombinasi antara parameter deteksi visual dan parameter kendali tersebut memungkinkan sistem bekerja secara terintegrasi dalam menjaga kestabilan dan akurasi pergerakan *Autonomous Vehicle*.

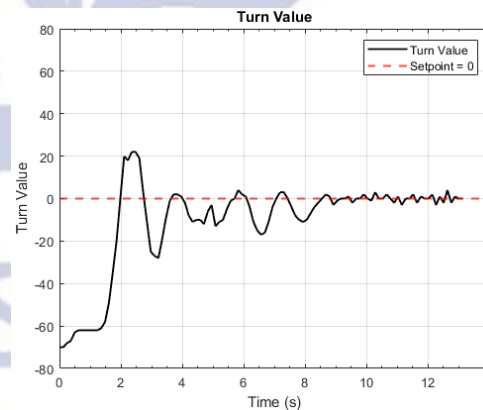
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Performa Sistem

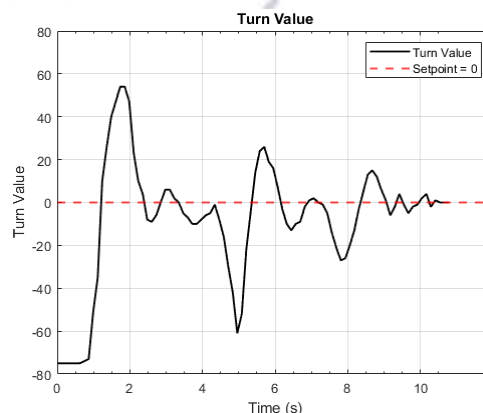
Pengujian ini bertujuan untuk melihat respon sistem *Autonomous Vehicle* dalam mempertahankan posisi objek pada titik tengah *frame* kamera (*turnvalue* = 0) selama proses *tracking* lintasan, baik pada kondisi normal maupun saat diberikan gangguan. Pengujian dilakukan dengan *setpoint* yang dijaga konstan pada posisi tengah sumbu x, sehingga sistem diharapkan mampu melakukan koreksi arah secara kontinu terhadap pergeseran objek.

Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan kondisi pencahayaan yang konstan untuk meminimalkan pengaruh perubahan intensitas cahaya terhadap proses deteksi objek. Lintasan yang digunakan berupa jalur lurus sepanjang 5m dan lebar 40cm yang dibentuk menggunakan dua warna berbeda. Pengujian dengan memberikan gangguan eksternal berupa dorongan terhadap AV juga dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan stabilitas kendaraan. Setiap skenario pengujian dilakukan sebanyak lima kali.

Parameter performa yang diamati meliputi kecepatan respon sistem, kestabilan arah, serta kemampuan sistem dalam meredam gangguan yang terjadi selama proses pergerakan. Hasil pengujian pada kondisi tersebut ditampilkan pada Gambar 5 dan 6, kemudian digunakan sebagai dasar analisis terhadap performa sistem kendali yang diterapkan.



Gambar 5 Grafik *tracking* lurus



Gambar 6 Grafik *tracking* dengan gangguan

Tabel 3. Data Hasil Uji Performa Sistem

Pengujian	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Over-shoot (%)	Steady State (turn value)
Tracking Lurus	0,512	7,305	31,43	0,111
Dengan Gangguan	0,248	1,497	72,00	0,222

Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat dilihat tabel 3 menunjukkan hasil pengujian performa sistem pada dua kondisi, yaitu *tracking* lurus dan *tracking* dengan gangguan. Pada kondisi *tracking* lurus, sistem mampu mencapai *setpoint* ($turnvalue = 0$) dengan *rise time* sebesar 0,512 s dan *settling time* 7,305 s. Respon awal menunjukkan adanya osilasi dengan *overshoot* sebesar 31,43%, yang mengindikasikan karakteristik sistem cenderung *underdamped*, sesuai dengan sifat *tuning* metode Ziegler Nichols yang menghasilkan respon cepat namun dengan lonjakan awal. Seiring waktu, amplitudo osilasi mereda dan sistem mencapai kondisi tunak dengan *steady state error* yang kecil, yaitu 0,111. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan arah dengan baik pada kondisi normal.

Pada pengujian dengan gangguan, sistem mengalami deviasi yang lebih besar akibat adanya dorongan eksternal, yang tercermin dari peningkatan *overshoot* hingga 72,00%. Meskipun demikian, sistem menunjukkan kemampuan pemulihan yang cukup cepat dengan *rise time* 0,248 s dan *settling time* 1,497 s. Respon ini menunjukkan bahwa pengendali PID memiliki tingkat *robustness* yang baik dalam mengoreksi *error* dan mengembalikan sistem menuju *setpoint* setelah terjadi gangguan. Namun, amplitudo lonjakan yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa sistem menjadi lebih agresif dalam merespons perubahan mendadak.

Secara keseluruhan, sistem kendali mampu mencapai dan mempertahankan *setpoint* pada kedua kondisi pengujian, meskipun dengan karakteristik respon yang berbeda. Nilai *steady state error* yang relatif kecil menunjukkan akurasi arah yang baik dalam kondisi tunak, sementara perbedaan *rise time*, *settling time*, dan *overshoot* mencerminkan pengaruh gangguan terhadap dinamika sistem. Perlu diperhatikan bahwa performa ini tidak hanya dipengaruhi oleh parameter kendali PID, tetapi juga oleh keterbatasan sistem *vision*, seperti *delay* pemrosesan citra, *noise* pengukuran, serta variasi pencahayaan. Faktor faktor tersebut dapat

menyebabkan fluktuasi pada nilai *turnvalue* yang berdampak pada munculnya osilasi dan *overshoot* pada respon sistem.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada Bapak Rifqi Firmansyah, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing, yang telah dengan penuh kesabaran, ketelitian, dan keikhlasan memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penelitian. Berkat dukungan dan bimbingan beliau, penelitian ini dapat diselesaikan dengan lebih terarah dan mendalam. Ilmu, pengalaman, serta semangat yang beliau berikan menjadi motivasi dan inspirasi yang sangat berarti dalam penyelesaian artikel ini.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *Vision-Based PID Control* pada *Autonomous Vehicle* (AV), dapat disimpulkan bahwa sistem mampu mencapai dan mempertahankan *setpoint* pada kondisi *tracking* lurus maupun saat diberikan gangguan. Pada kondisi normal, sistem menunjukkan respons yang stabil dengan kecenderungan karakteristik *underdamped*, ditandai dengan adanya osilasi sebelum mencapai keadaan tunak. Meskipun demikian, sistem tetap mampu mempertahankan akurasi arah dengan baik.

Pada kondisi dengan gangguan, sistem mengalami deviasi akibat pengaruh eksternal, namun mampu melakukan koreksi dan kembali menuju *setpoint* dalam waktu relatif singkat. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan *robustness* yang cukup baik dalam merespons gangguan selama proses pergerakan.

Secara keseluruhan, sistem kendali yang dirancang mampu bekerja secara stabil dan adaptif pada berbagai kondisi pengujian. Namun, karakteristik respons yang cenderung agresif menunjukkan bahwa metode *tuning* yang digunakan masih menghasilkan *overshoot* yang cukup besar. Selain itu, keterbatasan sistem *vision*, seperti *delay* pemrosesan citra dan *noise*, turut memengaruhi kualitas sinyal *error* dan berkontribusi terhadap munculnya osilasi. Dengan demikian, sistem telah memenuhi tujuan penelitian dalam hal kestabilan dan akurasi arah, meskipun masih terdapat peluang untuk pengembangan lebih lanjut pada aspek *tuning* kendali dan sistem persepsi.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi metode *tuning* untuk mengurangi karakteristik respon yang agresif, penggunaan metode deteksi visual yang lebih *robust*

terhadap variasi kondisi lingkungan, serta integrasi sensor tambahan seperti IMU atau *encoder* untuk meningkatkan *robustness* sistem. Selain itu, penerapan metode kontrol yang lebih adaptif juga dapat dipertimbangkan guna meningkatkan performa sistem secara keseluruhan.

REFERENSI

- Farkh, R., & Aljaloud, K. (2023). Vision Navigation Based PID Control for Line Tracking Robot. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 35(1), 901–911. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.027614>
- Firmansyah, R., & Irmawanto, R. (2021). Comparison Study of PI Controller Tuning Method to Regulate the DC Motor Speed. *ICRACOS 2021 - 2021 3rd International Conference on Research and Academic Community Services: Sustainable Innovation in Research and Community Services for Better Quality of Life towards Society 5*. <https://doi.org/10.1109/ICRACOS53680.2021.9702007>
- Firmansyah, R., M. M. B. A., K. M. M., Prayuda, A. G., Rafli, F., Saputra, P. P. S., & Althobiti, A. (2024). *DC Motor Speed Control using Particle Swarm Optimization based on Labview*. 8(2), 111–121.
- González-Olvera, M. A., & Martínez-Vásquez, E. (2024). Tuning of a Fractional-Order PID Controllers for Differential Two-Wheeled Mobile Robot Using Particle Swarm Optimization. *Memorias Del Congreso Nacional de Control Automático*, 7(1), 493–498. <https://doi.org/10.58571/cnca.amca.2024.084>
- Han, X., Zhang, X., Du, Y., & Cheng, G. (2019). Design of Autonomous Vehicle Controller Based on BP-PID. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 234(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/234/1/012097>
- Kang, H. C., Han, H. N., Bae, H. C., Kim, M. G., Son, J. Y., & Kim, Y. K. (2021). Hsv color-space-based automated object localization for robot grasping without prior knowledge. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167593>
- Khamdi, N., Susantok, M., & Leopard, P. (2017). Pendeteksian Objek Bola dengan Metode Color Filtering HSV pada Robot Soccer Humanoid. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 6(2), 123. <https://doi.org/10.25077/jnte.v6n2.398.2017>
- Paraskevopoulos, P. N. (2017). Modern control engineering. In *Modern Control Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9781315214573>
- Prakarsa Riadi, M., & Surya Akbar Gumilang, Y. (2024). JESCE (Journal of Electrical and System Control Engineering) Implementation of Object Detection by Color in HSV Space on Robot Arm. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 8(1), 155–165. <https://doi.org/10.31289/jesce.v6i2.12515>
- Pratikno, M. S., Isnianto, H. N., Mayub, A., & Maghfiroh, H. (2024). *Control and Navigation of Differential Drive Mobile Robot with PID and Hector SLAM: Simulation and Implementation*. 10(3), 594–607. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i3.29428>
- Sandeep Kumar Malu, B., Majumdar, J., Kumar Malu α , S., & Majumdar σ , J. (2014). Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. *Global Journals of Research in Engineering*, 14(H1), 1–7. https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1233/1-Kinematics-Localization-and-Control_html%0Ahttps://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1233
- Saravanakumar, S., & Ahmed, C. G. S. (n.d.). *Multiple object tracking using HSV color space*.
- Widiawan, B., Triwidiarto, C., Kautsar, S., & Firgiyanto, R. (2020). Wireless Greenhouse Monitoring System Using Tricycle Mobile-Robot Based on Raspberry PI. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/411/1/012058>
- Zhao, P., Chen, J., Song, Y., Tao, X., Xu, T., & Mei, T. (2012). Design of a control system for an autonomous vehicle based on adaptive-PID. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9, 1–11. <https://doi.org/10.5772/51314>