

IMPLEMENTASI ALGORITMA SISTEM KONTROL PID PADA SERVO KEPALA ROBOT SEPAK BOLA *HUMANOID* UNTUK KETEPATAN *TRACKING* BOLA

Bayu Prayoga Setia Wicaksono

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
email : bayuprayoga.22014@mhs.unesa.ac.id

I Gusti Putu Asto Buditjahjanto

Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
email : asto@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengimplementasikan kontrol PID pada servo kepala robot *humanoid* untuk meningkatkan ketepatan *tracking* bola yang sebelumnya belum optimal akibat ketidakstabilan sistem *vision*. Pengujian dilakukan menggunakan metode *tuning trial and error* dan Ziegler-Nichols pada robot ROBOTIS OP3, dengan evaluasi berbasis MAE, RMSE, serta respon waktu. Hasil menunjukkan metode Ziegler-Nichols lebih akurat (MAE 0,046; RMSE 0,0926) dibanding metode manual (MAE 0,249; RMSE 0,277), namun menghasilkan *overshoot* lebih tinggi. Secara keseluruhan, kontrol PID efektif meningkatkan performa *tracking*, meskipun masih memerlukan optimasi untuk meningkatkan stabilitas.

Kata kunci: PID, *tracking* bola, servo *humanoid*, Ziegler-Nichols.

Abstract

This study implements a PID (Proportional-Integral-Derivative) control system on a humanoid robot head servo to improve ball tracking accuracy, which was previously limited by instability in the vision system. The evaluation compares trial-and-error and Ziegler-Nichols tuning methods on the ROBOTIS OP3 platform using MAE, RMSE, and time-response metrics. The results show that the Ziegler-Nichols method achieves better accuracy (MAE 0.046; RMSE 0.0926) than the manual method (MAE 0.249; RMSE 0.277), although it produces higher overshoot. Overall, PID control effectively enhances tracking performance, but further optimization is required to improve system stability

Keywords: PID, ball tracking, humanoid servo, Ziegler-Nichols.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika, khususnya pada robot *humanoid*, menuntut kemampuan sistem dalam melakukan interaksi secara *real-time* terhadap lingkungan, salah satunya melalui proses *tracking* objek. Pada robot sepak bola *humanoid*, kemampuan untuk mendeteksi dan mengikuti pergerakan bola merupakan aspek krusial yang sangat memengaruhi performa sistem secara keseluruhan. Namun demikian, permasalahan yang sering muncul adalah ketidakstabilan sistem *vision* dalam mendeteksi posisi bola, yang menyebabkan respon servo kepala robot menjadi kurang optimal dan tidak mampu mengikuti pergerakan objek secara akurat.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan suatu metode kontrol yang mampu meningkatkan stabilitas dan akurasi respon sistem. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), yang dikenal memiliki kemampuan dalam mempercepat respon sistem, mengurangi *error steady-state*, serta meningkatkan kestabilan (Åström & Hägglund, 2020). Dalam implementasinya, performa kontrol PID sangat dipengaruhi oleh proses tuning parameter, sehingga diperlukan metode penentuan parameter yang tepat.

Metode Ziegler-Nichols merupakan salah satu pendekatan yang umum digunakan karena mampu memberikan nilai awal parameter secara sistematis,

meskipun sering menghasilkan *overshoot* yang cukup tinggi (Bisták et al., 2023).

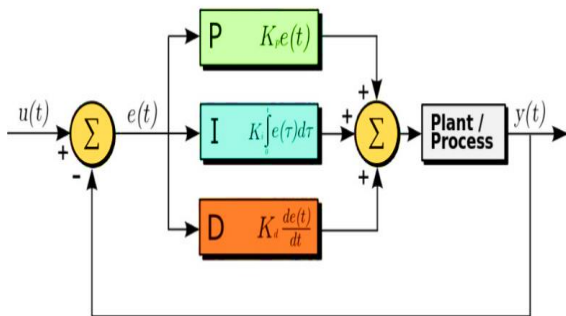
Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan kontrol PID pada servo kepala robot *humanoid* serta membandingkan performa dua metode tuning, yaitu *trial and error* dan Ziegler-Nichols, dalam meningkatkan ketepatan *tracking* bola. Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan menggunakan parameter *error* seperti *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE), serta karakteristik respon waktu seperti *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kontrol PID efektif digunakan dalam sistem robotika untuk meningkatkan stabilitas dan akurasi *tracking*, terutama pada sistem dengan dinamika yang kompleks dan adanya *delay* (Mureşan et al., 2022; Huba, 2024). Selain itu, penerapan metode tuning yang tepat dapat memberikan peningkatan signifikan terhadap performa sistem kontrol.

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Kontrol PID

Salah satu bahasan dalam mata kuliah sistem kontrol adalah kontrol PID yang sering digunakan dan banyak diberikan dalam materi sistem kontrol di perguruan tinggi. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya. Menurut (Ogata, 2009), kontroler PID mampu memperbaiki respon transien dan kondisi tunak secara simultan, sehingga banyak diterapkan pada sistem mekanik, elektronik.

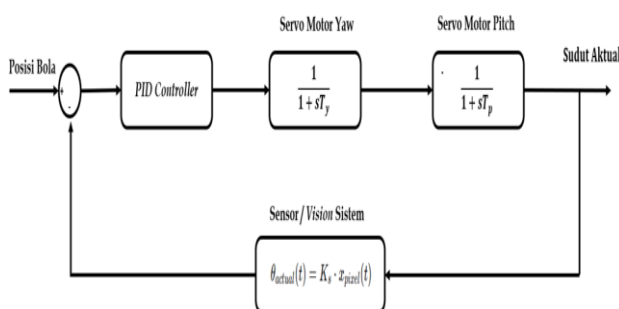


Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol PID

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$u(t)$ merepresentasikan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh pengendali untuk mengatur dinamika sistem. Sinyal ini dibentuk berdasarkan besarnya *error* $e(\tau)$, yaitu selisih antara nilai setpoint dan keluaran sistem aktual. Parameter K_p merupakan *konstanta proporsional* yang menentukan besar kecilnya respon pengendali terhadap *error* pada saat itu. Selanjutnya, K_i adalah *konstanta integral* yang berfungsi memperbaiki kesalahan secara kumulatif sehingga mampu menghilangkan *error* keadaan tunak (*steady-state error*). Sementara itu, K_d bertindak sebagai *konstanta derivatif* yang memberikan aksi kontrol berdasarkan laju perubahan *error*, sehingga dapat meningkatkan stabilitas sistem dan mengurangi *Overshoot*.

Sistem Kontrol PID Untuk Tracking Bola



Gambar 2. Diagram Blok Kontrol PID Tracking Bola

Jika pada penjelasan blok diagram diatas menjelaskan bahwa Diagram blok sistem pada penelitian ini menggambarkan suatu sistem kontrol tertutup (*closed-loop control system*) yang digunakan untuk mengendalikan pergerakan servo kepala robot *humanoid* dalam melakukan *tracking* bola secara dua sumbu, yaitu sumbu horizontal (*yaw*) dan vertikal (*pitch*). Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu *setpoint*, pembanding (*error*), kontroler PID, aktuator (*servo*), *plant*, output, serta *feedback* yang berasal dari sistem *vision*.

Metode Perhitungan Ziegler – Nichols

Metode ini digunakan sebagai point awal untuk memulai manual tuning. Ziegler-Nichols ini akan menentukan parameter-parameter PID yang akan digunakan untuk mendapatkan respon yang baik. Metode ini merupakan metode tuning PID controller untuk menentukan nilai proportional gain K_p , integral time T_i , dan derivative time T_d berdasarkan karakteristik respon transien dari sebuah plant atau sistem. Ada beberapa langkah yang bisa digunakan untuk menghitung metode Ziegler-Nichols yaitu Langkah awal Menentukan Nilai K_p , K_i , dan K_d , lalu untuk langkah ke dua adalah dengan Menentukan Nilai K_u (*Ultimate Gain*), langkah ke tiga Menentukan Nilai P_u (*Ultimate Period*), dan langkah yang terakhir yaitu kita bisa mulai menghitung nilai dari K_p , K_i , dan K_d tersebut. (Fitira Suryatini, 2018).

$$K_p = 0.6 \cdot K_u \quad (2)$$

$$K_i = \frac{2 \cdot K_p}{P_u} \quad (3)$$

$$K_d = \frac{K_p \cdot P_u}{8} \quad (4)$$

K_p = koefisien *Proporsional*

K_i = efisien *Integral*

K_d = efisien *Derivatif*

K_u = *Ultimate gain*

P_u = *Ultimate periode*

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental/ R&D karena bertujuan untuk mengembangkan dan menguji implementasi kontrol PID pada perangkat keras. Pilihan pendekatan eksperimental didukung oleh praktik umum dalam studi kontrol PID yang menguji penyetalan dan kinerja melalui pengujian lapangan atau laboratorium. (Díaz-Rodríguez, 2021)

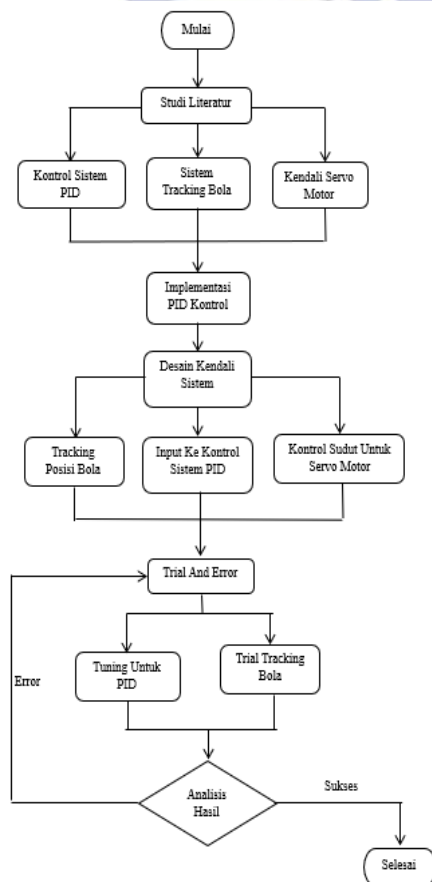
Berdasarkan pengertian dari *Research and Development* yang digunakan untuk judul penelitian kali ini yaitu "Implementasi Algoritma Sistem Kontrol PID

Implementasi Algoritma Sistem Kontrol PID Pada Servo Kepala Robot Sepak Bola *Humanoid* Untuk Ketepatan *Tracking* Bola

Pada Servo Kepala Robot Sepak Bola *Humanoid* Untuk Ketepatan *Tracking* Bola” bertujuan untuk mengembangkan sistem *tracking* yang ada pada program kepala servo robot *humanoid* yang sebelumnya belum begitu stabil namun pada penelitian kali ini yaitu pengembangan dilakukan dengan memanfaatkan sistem kontrol PID untuk kestabilan *tracking* bola yang dibantu dengan penggunaan sensor kamera yang terpasang dikepala robot *humanoid* yang diharapkan dapat lebih baik dari sebelumnya.

Penelitian ini diawali dengan penentuan judul yang sesuai untuk isi dari apa yang akan diteliti, dilanjutkan dengan pengumpulan data dari penelitian sebelumnya, melakukan perhitungan untuk tuning parameter PID dengan menerapkan sistem perhitungan yaitu dengan metode Ziegler-Nichols, menerapkan algoritma kontrol PID yang telah didapatkan parameternya pada metode perhitungan sebelumnya untuk robot sepak bola *humanoid*, melakukan perbandingan dengan program algoritma sebelumnya. Oleh karena itu, dibutuhkan variable yang digunakan sebagai titik *focus* dalam penelitian *Research and Development* yang dibagi dalam beberapa jenis sebagai berikut.

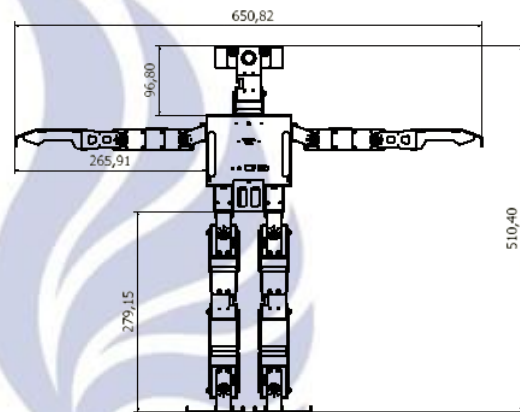
Penelitian ini melibatkan beberapa tahapan yang terdapat pada Gambar 3.



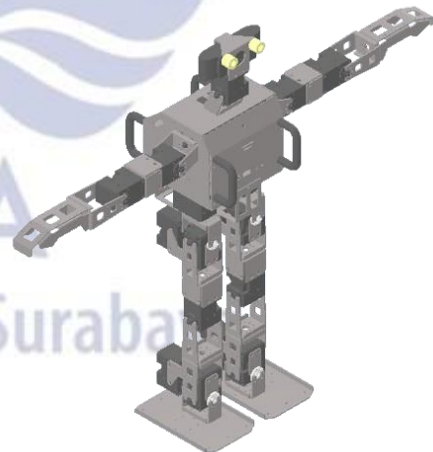
Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Desain Mekanik Robot

Prototipe robot yang digunakan merupakan salah satu *platform* robot *humanoid* dari ROBOTIS, yaitu ROBOTIS OP3 ROBOTIS OP3 adalah platform robot *humanoid* yang merupakan penerus dari ROBOTIS OP dan ROBOTIS OP2. Dengan menggunakan aktuator servo XM-430 yang mendukung Protocol DYNAMIXEL 2.0, robot memiliki torsi yang lebih baik dan kontrol berbasis arus serta dilengkapi dengan berbagai fitur. Serta robot ini juga dibekali dengan Mini PC Intel NUC memungkinkan pemrosesan data yang lebih kuat dan mendukung OS 64-bit serta memiliki koneksi Bluetooth. OP3 juga dikembangkan dengan menggunakan ROS (Robot Operating System) untuk memanfaatkan berbagai *library* yang ada pada platform ROS. (Dwi Novianto Nugroho, 2023)



Gambar 4. Desain 2D Robot *Humanoid*



Gambar 5. Desain 3D Robot *Humanoid*

Teknik Analisis Data

Evaluasi dilakukan dengan menghitung nilai *error* seperti *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), Akurasi Serta Koefisien Determinasi (R^2).

RMSE dan MAE digunakan untuk mengukur tingkat *error tracking*. RMSE lebih sensitif terhadap outlier, sedangkan MAE memberikan gambaran

kesalahan rata-rata yang lebih stabil. Kombinasi keduanya memberikan evaluasi yang lebih komprehensif (Hodson, 2022).

Akurasi dihitung berdasarkan persentase keberhasilan *tracking* dalam rentang toleransi *error* tertentu. Metrik ini umum digunakan untuk menilai kinerja sistem robotik dalam melacak target secara real-time (Palacín, 2021).

Koefisien determinasi digunakan untuk menilai sejauh mana prediksi sistem sesuai dengan data aktual (R^2) memberikan ukuran seberapa baik model PID menjelaskan variasi data hasil *tracking* (Chicco, 2021).

Hasil dan Pembahasan

Hasil Tuning Parameter P, PI, PID Dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols

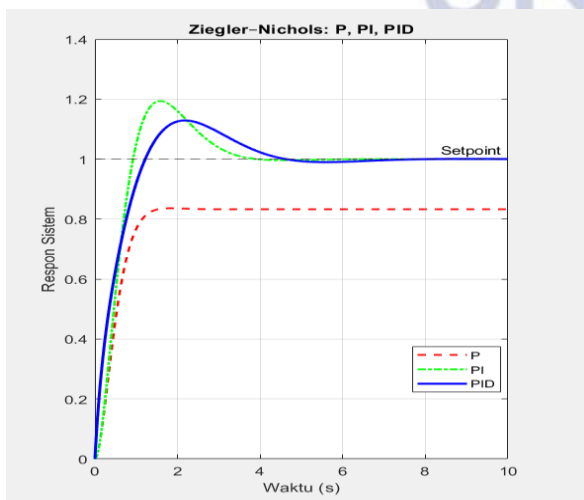
Dalam penelitian ini yaitu menggunakan dua metode tuning parameter yaitu dengan *trial and error* dan metode Ziegler-Nichols yang nantinya juga akan disajikan dalam sebuah tabel dan grafik perbandingan. Hasil pengujian awal di penelitian ini juga menunjukkan fenomena yang sama: nilai *overshoot* pada metode Ziegler-Nichols lebih tinggi dibandingkan dengan metode manual, metode Ziegler-Nichols dipilih karena merupakan salah satu metode klasik yang efektif dalam menentukan parameter awal kontrol PID.

$$K_p = 0,6 * 8,3 = 4,98 \text{ Hasil } K_p$$

$$K_i = \frac{2 * 4,98}{2.008} = 4,96 \text{ Hasil } K_i$$

$$K_d = \frac{4,98 * 2.008}{8} = 1,25 \text{ Hasil } K_d$$

Dengan metode Ziegler-Nichols didapatkan hasil tuning parameter K_p sebesar 4.98, K_i sebesar 4.96, dan K_d sebesar 1.25. Adapun hasil simulasi parameter tersebut ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik PID Ziegler - Nichols

Hasil Tuning Parameter P, PI, PID Dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols Modifikasi

Dikarenakan nilai tersebut pada hasil grafik simulasi masih mengalami *overshoot* yang terlalu besar maka dari itu perlu untuk menurunkan nilai dari parameter-parameternya. Penelitian tahun 2023 oleh Bisták et al (Xue Wang, 2023). pada jurnal Sensors juga membuktikan bahwa varian ZN termodifikasi diperlukan agar cocok untuk sistem orde lebih tinggi. Secara eksplisit menerapkan *scaling factors* pada ZN untuk menurunkan *overshoot*.

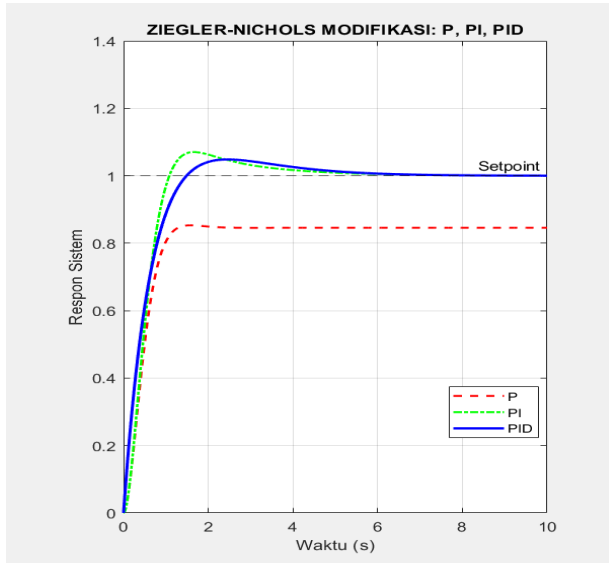
Oleh karena itu, penggunaan faktor modifikasi seperti α (penghalus K_p), β (penurun K_i), dan γ (penyesuaian K_d) tidak hanya umum dipakai, tetapi juga didukung kuat oleh literatur terbaru sebagai metode heuristic tuning yang valid dan efektif untuk meningkatkan stabilitas dan mengurangi *overshoot*.

Untuk menentukan nilai pada α , β , dan γ yaitu dengan cara melakukan beberapa percobaan atau biasa disebut *trial & error* dengan beberapa percobaan yang menghasilkan nilai macam-macam seperti yang tertera pada tabel berikut dan akan ditemukan salah satu dari beberapa percobaan tersebut yang paling stabil.

Tabel 1. Percobaan PID Ziegler - Nichols Modifikasi

Nilai α	Nilai β	Nilai γ	Hasil ZN	Karakteristik Respon
1.8	0.9	0.5	K_p 8.97 K_i 4.46 K_d 0.63	Respon sangat cepat, <i>overshoot</i> besar, tidak stabil
1.6	0.8	0.6	K_p 7.97 K_i 3.97 K_d 0.75	Masih cepat, <i>overshoot</i> tinggi, mulai mereda
1.4	0.7	0.6	K_p 6.97 K_i 3.47 K_d 0.75	<i>Overshoot</i> sedang, mulai stabil
1.3	0.7	0.65	K_p 6.47 K_i 3.47 K_d 0.81	<i>Overshoot</i> kecil, respon cukup halus
1.2	0.65	0.7	K_p 5.98 K_i 3.22 K_d 0.88	Hampir tanpa <i>overshoot</i> , respon stabil
1.1	0.6	0.7	K_p 5.48 K_i 2.98 K_d 0.88	Optimal cepat, stabil, <i>overshoot</i> sangat kecil
1.0	0.5	0.8	K_p 4.98 K_i 2.48 K_d 1.0	Tidak <i>overshoot</i> , tapi mulai lebih lambat
0.9	0.4	0.9	K_p 4.49 K_i 1.98 K_d 1.12	Respon lambat, stabil, kurang responsif

Implementasi Algoritma Sistem Kontrol PID Pada Servo Kepala Robot Sepak Bola *Humanoid* Untuk Ketepatan *Tracking* Bola



Gambar 7. Grafik PID Ziegler - Nichols Modifikasi

$$K_p = 1.1 * (0,6K_u) = 5.48 K_p$$

$$K_i = 0.6 * \left(\frac{2K_p}{P_u}\right) = 2.98 K_i$$

$$K_d = 0.7 * \left(\frac{K_p * P_u}{8}\right) = 0.88 K_d$$

Berdasarkan grafik respon sistem dengan metode Ziegler-Nichols modifikasi, terlihat bahwa masing-masing jenis kontrol (P, PI, dan PID) memberikan karakteristik respon yang berbeda terhadap setpoint 1. Kontrol P (garis merah putus-putus) menunjukkan respon yang cukup cepat namun tidak mampu mencapai setpoint secara penuh, sehingga menghasilkan *steady-state error* yang masih cukup besar. Kontrol PI (garis hijau titik-putus) mampu menghilangkan *error steady-state* dan mencapai setpoint dengan cepat, namun masih terdapat sedikit *overshoot* sebelum akhirnya stabil. Sementara itu, kontrol PID (garis biru) memberikan performa terbaik dengan respon yang halus, mampu mencapai setpoint tanpa *overshoot* yang signifikan, serta memiliki kestabilan yang baik dalam waktu yang relatif singkat.

Perbandingan Parameter P, PI, PID Dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols Dan Ziegler-Nichols Modifikasi

Pada percobaan di atas telah mendapatkan hasil berupa grafik dan juga nilai parameter dimana pada hasil grafik di Ziegler-Nichols modifikasi mendapatkan hasil yang lebih halus daripada dengan tuning Ziegler-Nichols sebelumnya maka dari untuk hasil perbandingannya akan ditampilkan pada tabel.

Tabel 2. Perbandingan PID 2 Metode

Metode	Jenis Kontrol	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Karakteristik
Ziegler-Nichols	P	0.792	1.261	0.42	Respon cepat, namun terdapat <i>steady-state error</i>
Ziegler-Nichols	PI	0.637	3.276	19.40	<i>Overshoot</i> besar, terdapat osilasi, settling time lebih lama
Ziegler-Nichols	PID	0.912	4.061	12.91	<i>Overshoot</i> cukup besar, respon cepat, namun masih berosilasi
ZN Modifikasi	P	0.722	1.121	0.88	Respon lebih stabil, <i>steady-state error</i> sedikit lebih kecil
ZN Modifikasi	PI	0.711	3.713	7.03	<i>Overshoot</i> kecil, respon lebih halus, osilasi berkurang
ZN Modifikasi	PID	0.977	4.407	4.83	Respon paling stabil, hampir tanpa <i>overshoot</i> , cepat set point

Berdasarkan tabel perbandingan, metode Ziegler-Nichols standar menghasilkan respon yang cenderung lebih agresif, ditunjukkan oleh nilai *overshoot* yang cukup besar pada kontrol PI (19,40%) dan PID (12,91%), serta settling time yang relatif lebih lama akibat adanya osilasi sebelum mencapai keadaan tunak. Meskipun *rise time* pada metode ini tergolong cepat, performa kestabilannya kurang baik. Sebaliknya, Ziegler-Nichols modifikasi menunjukkan peningkatan performa yang signifikan, di mana *overshoot* berhasil ditekan secara drastis, bahkan mencapai 4.83 % pada kontrol PID. Selain itu, settling time menjadi lebih singkat dan respon sistem lebih halus tanpa osilasi yang berarti.

Hasil Pengujian *Tracking* Bola

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kemampuan servo kepala robot dalam mengikuti posisi bola secara *real-time*. Data yang diambil meliputi posisi target bola dari kamera dan posisi servo hasil kontrol PID. Data posisi bola dibandingkan dengan posisi servo untuk menghitung besarnya kesalahan (*error*) setiap waktu dan untuk menghasilkan *error* dihitung dengan hasil dari selisih *setpoint* dan output sistem.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Tracking* Bola

Parameter	Nilai	Interpretasi
-----------	-------	--------------

MAE	0.046	Error rata-rata kecil
RMSE	0.0926	Penyimpangan kuadrat kecil
Akurasi	95.4%	Sistem sudah cukup baik mengikuti setpoint
R ²	-0.465	Tidak relevan penuh karena setpoint konstan

Nilai koefisien determinasi yang diperoleh pada penelitian ini bernilai negatif. Hal ini bukan menunjukkan bahwa sistem kontrol bekerja buruk, melainkan disebabkan oleh karakteristik data yang digunakan, yaitu setpoint yang bersifat konstan sehingga variasi data aktual sangat kecil. Dalam kondisi tersebut nilai penyebut pada perhitungan R² menjadi sangat kecil, sehingga menghasilkan nilai R² yang negatif. Oleh karena itu, penggunaan koefisien determinasi kurang relevan dalam evaluasi sistem kontrol dengan setpoint konstan, dan analisis performa lebih tepat menggunakan parameter seperti MAE, RMSE, serta karakteristik respon waktu seperti *rise time* dan *settling time*.

Hasil Analisis Terhadap Delay Deteksi Terhadap Kinerja Kontrol PID Servo Kepala

Delay deteksi terhadap sistem kinerja *tracking* pada robot *humanoid* berhasil ditangkap oleh sistem *vision* dengan sinyal posisi koordinat sudut x,y,z. Hal ini sejalan dengan temuan dalam beberapa studi terbaru yang menyatakan bahwa *delay* atau latensi sistem *vision* berkontribusi terhadap menurunnya kinerja kontrol PID pada aplikasi nyata. (Rakesh P. Borasel, 2020).

Metode pengukuran *delay* deteksi dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan *stopwatch* pada *smartphone* dengan resolusi 0,01 detik. Yang dimana dengan kondisi *stopwatch* diaktifkan ketika bola mulai muncul dan terlihat oleh kamera kemudian dihentikan ketika servo kepala sudah mulai menunjukkan pergerakan mendeteksi pada objek tersebut.

Pengambilan data dilakukan dengan membagi setiap koordinat sudut x,y,z dengan pengulangan 10 kali disetiap sudut koordinatnya yang dimana dengan total menjadi 30 data. Lalu ditambah dengan kondisi diruangan dengan keterangan variabel yaitu dekat-terang, sedang-terang, jauh-terang, dekat-gelap, sedang-gelap, jauh-gelap.

Tabel 4. Hasil Delay Setiap Koordinat x,y,z

Tx (s)	Ty (s)	Tz (s)
0,94	0,73	1,34
0,43	0,54	1,79
0,61	0,70	1,03
1,02	1,10	1,72
0,65	0,83	1,64
0,74	0,74	1,75
0,77	0,65	1,46
0,80	0,97	1,57
0,48	0,77	1,86
0,70	0,92	1,89
0,94	0,73	1,34
tx total 0,71	Ty total 0,80	Tz total 1,58

Tabel 5. Hasil Data Variabel Kondisi Ruangan

Dekat – Terang (s)	Sedang – Terang (s)	Jauh – Terang (s)	Dekat – Gelap (s)	Sedang – Gelap (s)	Jauh – Gelap (s)
9,09	4,96	6,15	3,27	7,18	7,95
8,99	4,56	4,67	5,21	6,79	20,34
3,25	4,69	6,57	3,16	3,30	6,71
3,80	13,11	4,23	3,45	4,63	8,58
10,68	4,70	4,69	3,32	7,26	21,50
5,99	3,72	8,48	4,05	8,14	6,33
13,35	10,24	5,14	5,02	4,45	15,07
11,79	10,23	7,93	6,91	6,83	3,16
4,84	7,31	7,02	3,24	12,44	8,77
3,98	5,14	4,20	3,58	11,23	25,45
Δt rata-rata 7,58	Δt rata-rata 6,87	Δt rata-rata 5,91	Δt rata-rata 4,12	Δt rata-rata 7,22	Δt rata-rata 12,38

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. I Gusti Putu Asto Buditjahjanto, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran, ketelitian, dan ketulusan memberikan bimbingan, arahan, serta masukan berharga sepanjang proses penelitian. Berkat dukungan beliau, penelitian ini dapat penulis selesaikan dengan lebih terarah dan mendalam serta motivasi yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan artikel ini.

PENUTUP Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai implementasi algoritma sistem kontrol PID pada servo kepala robot sepak bola *humanoid* untuk ketepatan *tracking* bola, dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol PID mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam mengikuti pergerakan bola secara lebih konsisten dengan menghasilkan gerakan servo yang lebih teratur.

Selain itu, optimasi parameter PID menggunakan pendekatan Ziegler-Nichols yang telah disesuaikan

Implementasi Algoritma Sistem Kontrol PID Pada Servo Kepala Robot Sepak Bola *Humanoid* Untuk Ketepatan *Tracking* Bola

terbukti memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode coba-coba, karena mampu meningkatkan stabilitas serta keandalan respons sistem terhadap perubahan posisi objek.

Secara keseluruhan, integrasi antara kontrol PID, mekanisme servo, dan sistem penglihatan memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan performa pelacakan bola pada robot *humanoid*, khususnya dalam hal stabilitas dan kecepatan respons pergerakan kepala robot saat mengikuti objek yang terdeteksi.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya, yaitu perlunya optimalisasi lanjutan terhadap parameter PID guna mengurangi *overshoot* yang masih muncul pada metode Ziegler-Nichols, misalnya dengan menerapkan pendekatan optimasi modern seperti Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, atau Fuzzy-PID agar diperoleh parameter yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi sistem.

Selain itu, integrasi antara sistem kontrol servo dan sistem *vision* perlu ditingkatkan agar respons robot menjadi lebih *real-time* dan stabil terhadap variasi jarak serta intensitas pencahayaan, mengingat hasil analisis *delay* menunjukkan bahwa latensi deteksi masih memengaruhi performa *tracking*, sehingga peningkatan kualitas kamera, penggunaan frame rate yang lebih tinggi, serta optimasi algoritma pemrosesan citra sangat direkomendasikan. Terakhir, pengujian sistem sebaiknya dilakukan pada kondisi lingkungan yang lebih dinamis, seperti lapangan pertandingan sebenarnya, dengan variasi pergerakan bola yang acak serta adanya gangguan eksternal, agar performa sistem dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

REFERENSI

- Chicco, D. W. (2021). The coefficient of determination R^2 is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623.
- Díaz-Rodríguez, I. D. (2021). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamic and Control*, 818-827.
- Dwi Novianto Nugroho, L. A. (2023). Perancangan Sistem Deteksi Objek Bola Dan Gawang Pada Robot Sepakbola Menggunakan Metode Darknet YOLO. *JIEET: Volume 07 Nomor 01, 2023*, 22-29.
- Fitira Suryatini, A. F. (2018). KENDALI P, PI, DAN PID ANALOG PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC DENGAN PENALAN ZIEGLER-NICHOLS. *Journal of Electrical and Electronics*, 65-80.
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error

(RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 5481-5495.

- Palacín, J. R. (2021). Evaluation of the path-tracking accuracy of a three-wheeled omnidirectional mobile robot designed as a personal assistant. *Sensors*, 21(21), 7216.
- Rakesh P. Borase, 2. . (2020). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*.
- Xue Wang, Z. F. (2023). A Flexible Pressure Sensor with a Mesh Structure Formed by Lost Hair for Human Epidermal Pulse Wave Monitoring. *Sensors (MDPI)*, 1-45.