



Kendali posisi *ball-on-plate* berbasis deteksi objek dengan pengendali PID dan filter RGB

Martin^{1*}, Suyanto², Feriyonika³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559, Indonesia

^{1*}martin@email.ac.id, ²suyanto@polban.ac.id, ³feriyonika@polban.ac.id

ABSTRAK

Ball-on-plate adalah sistem pengendalian posisi bola di atas papan menggunakan dua aktuator berupa motor servo untuk menggerakkan papan bola yang bergerak pada dua sumbu. Penelitian ini berfokus pada pengendalian posisi bola menggunakan pengendali proporsional-integral-derivatif (PID) dengan membaca posisi bola menggunakan sensor visual. Pendeteksian posisi bola menggunakan algoritma filter RGB untuk membaca gerakan bola berdasarkan warna. Sensor visual memberikan keluaran nilai koordinat kartesian dua dimensi dalam X dan Y. Pengendali PID menggunakan koordinat X dan Y sebagai *feedback* hasil pendeteksian posisi bola, kemudian koordinat umpan balik akan dibandingkan dengan *setpoint* untuk menghasilkan *error* koordinat. Keluaran kendali PID berupa sinyal *pulse width modulation* (PWM) untuk mengatur gerakan kedua servo agar posisi bola berada pada koordinat *setpoint*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengendali PID berhasil mengendalikan posisi bola dengan waktu rata-rata bola mencapai *setpoint* sekitar 8,85 detik. Keluaran respon kendali memiliki analisa respon transien dengan *error steady state* kurang dari 10%, *rise time* sebesar 4,74 detik untuk respon X dan 4,20 untuk respon Y, nilai *overshoot* sebesar 11,29% untuk respon X dan 31,95% untuk respon Y, serta nilai *settling time* sebesar 37 detik untuk respon X dan 37,3 detik untuk respon Y.

Kata kunci: pengendali PID, filter RGB, *visual servoing*, *ball-on-plate*

ABSTRACT

Ball-on-plate is a system for controlling the position of the ball on the board using two actuators in the form of servo motors to move the ball board which moves on two axes. This research focuses on controlling the ball position using a proportional-integral-derivative (PID) controller by reading the ball position using a visual sensor. Ball position detection uses an RGB filter algorithm to read ball movements based on color. The visual sensor outputs two-dimensional Cartesian coordinate values in X and Y. The PID controller uses the X and Y coordinates as feedback from the ball position detection results, then the feedback coordinates will be compared with the setpoint to produce coordinate errors. The output of the PID control is in the form of a pulse width modulation (PWM) signal to adjust the movement of the two servos so that the ball's position is at the setpoint coordinates. The test results show that the PID controller is successful in controlling the position of the ball with an average time the ball reaches the setpoint of around 8.85 seconds. The control response output has a transient response analysis with a steady state error of less than 10%, a rise time of 4.74 seconds for the X response and 4.20 for the Y response, an overshoot value of 11.29% for the X response and 31.95% for the response Y, and settling time values of 37 seconds for response X and 37.3 seconds for response Y.

Keywords: PID controller, RGB filter, *visual servoing*, *ball-on-plate*

1. PENDAHULUAN

Sistem kendali posisi bola merupakan salah satu persoalan paling menantang dalam sistem kendali. *Ball-on-plate* merupakan sebuah sistem yang bertujuan memposisikan bola di atas papan, dimana bola tersebut dapat memiliki lintasan tertentu sesuai dengan nilai acuan yang telah diberikan. Adapun referensi [1] menjelaskan bahwa sistem kendali posisi bola adalah sistem elektronik dua dimensi untuk mempelajari variabel proses dalam percobaan laboratorium dengan sistem kendali yang berbeda berdasarkan sistem kendali klasik dan modern. Masalah dari sistem ini yaitu papan yang pergerakannya diatur menggunakan dua buah motor servo yang masing-masing memiliki derajat kebebasan sendiri (DoF). Motor servo memiliki kemampuan yang dapat bergerak secara presisi pada derajat yang diberikan, hal tersebut dipengaruhi oleh terdapat rangkaian umpan balik yang dapat

memberitahukan posisi motor saat berputar. *Ball-on-plate* merupakan sistem 2-DoF yang dapat diberikan kendali klasik ataupun modern. Tujuan *ball-on-plate* adalah untuk menempatkan bola diposisi koordinat X dan Y yang diinginkan. Sistem ini mengutamakan kestabilan dari papan agar bola selalu diposisi yang telah ditentukan. Untuk mendapatkan mengendalikan sistem ini dibutuhkan sistem kendali yang tepat. Berdasarkan referensi [2] menjelaskan bahwa pengendalian sistem dinamik dengan beberapa DoF merupakan sistem kendali lingkaran tertutup yang dapat diatur secara terpisah.

Kendali proporsional-integral-derivatif (PID) merupakan salah satu metode kendali yang paling banyak digunakan dalam pengaturan di industri. Kendali PID membutuhkan umpan balik dari sensor untuk mendapatkan kondisi terbaru dari sistem yang sedang dikendalikan. Kemudian kendali PID merupakan bagian dari kendali proposional ditambah kendali integral dan kendali derivatif. Kendali PID dapat diterapkan pada berbagai jenis *plant* yang ingin dikendalikan tanpa membutuhkan pemodelan dari sistem yang ingin dikendalikan. Pemodelan sistem dapat dilakukan dengan metode 'black box'. *Proportional gain* (K_p), *integral time* (T_i), dan *derivative time* (T_d) dari kendali PID didapatkan dengan menggunakan metode penalaan *Ziegler-Nichols* [3]. Salah satu penerapan kendali PID dengan *Ziegler-Nichols* dilakukan oleh [4]. Penerapan yang dilakukan yaitu mengendalikan kecepatan motor DC menggunakan kendali PID dengan metode penalaan *Ziegler-Nichols*. Penerapan kendali PID lainnya dilakukan oleh [5] yang melakukan penerapan pada pengendalian sistem 2-DoF dengan membandingkan respon PID dan I-PD.

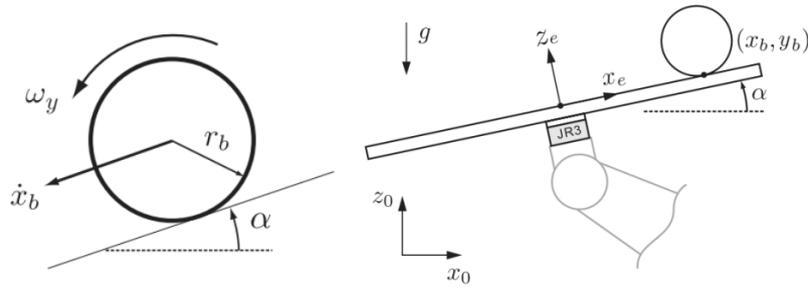
Dalam pengendalian sistem dinamik, sensor berperan sebagai alat yang dapat mengubah besaran fisik ke besaran listrik. Sensor dapat difungsikan sebagai umpan balik suatu sistem yang dikendalikan. Sensor merupakan salah satu komponen yang sangat dibutuhkan dalam sistem *ball-on-plate*, karena arah gerakan papan sangat dipengaruhi oleh pembacaan sensor. Salah satu sensor yang dapat digunakan untuk mendeteksi posisi bola di atas papan secara tepat yaitu sensor visual menggunakan kamera. Pendeteksian objek dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam algoritma pendeteksi objek. Namun, salah satu algoritma pendeteksi yang paling sederhana yaitu pendeteksian berdasarkan warna *red*, *green*, dan *blue* (RGB). Peneliti [6] melakukan penelitian untuk mendeteksi pergerakan objek berdasarkan model warna RGB dimana menjelaskan bahwa setiap objek memiliki kriteria warna RGB yang berbeda, sehingga hal tersebut memudahkan untuk mendeteksi pergerakan sebuah objek pada bentuk dengan jenis atau model warna RGB tertentu. Penelitian lainnya melakukan penerapan *visual servoing tracking* pada *ball-on-plate* menggunakan FPGA [7]. Penelitian yang dilakukan oleh [8] menjelaskan sistem *ball-on-plate* untuk modul pembelajaran kampus, tentang pemodelan dan sistem kendali yang digunakan. Peneliti [9] meneliti kendali *ball-on-plate* menggunakan filter Kalman dan PID tetapi masih kurang dalam peningkatan kestabilan dan keluaran transien sistem. Pada pengendalian berbasis *visual servoing*, sistem kendali PID merupakan sistem metode yang umum digunakan seperti untuk mengendalikan robot pengikut garis [10] dan kendali ketinggian [11].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang pengendalian sistem *ball-on-plate* menggunakan pengendali PID dan filter RGB. Algoritma pengendalian ditanamkan pada perangkat Raspberry Pi. Dengan menerapkan metode ini, sistem *ball-on-plate* dapat melakukan pengendalian posisi bola secara otomatis. Sensor kamera digunakan dengan menggunakan filter RGB untuk mendeteksi bola dan kendali PID untuk mengatur posisi bola dengan menggerakkan aktuator motor servo pada sumbu X dan Y. Koordinat ini didapatkan dengan pemrograman *image processing* dengan memproses benda bola berwarna yang terdeteksi menggunakan kamera sehingga menghasilkan koordinat X dan Y pada *frame* kamera.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Sistem *Ball-on-Plate*

Pada bagian ini akan dijelaskan bagaimana model dinamik dari sistem *ball-on-plate*. Asumsi yang digunakan diantaranya adalah tidak ada *slip* pada bola, bentuk bola simetris sempurna, tidak ada gesekan, dan bola selalu menyentuh papan setiap saat [12]. Adapun diagram gaya dinamik pada sistem *ball-on-plate* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi sistem *ball-on-plate* [12]

Berdasarkan pendekatan Euler-Lagrange, persamaan dinamik dari sistem *ball-on-plate* berbentuk nonlinier dapat didefinisikan sebagai berikut

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x}_b - m_b(x_b \dot{\alpha}^2 + y_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y}_b - m_b(y_b \dot{\beta}^2 + x_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + m_b g \sin \beta = 0 \quad (2)$$

dimana m_b adalah massa bola, r_b adalah jari-jari bola, I_b adalah momen inersia bola, x_b dan y_b adalah posisi koordinat bola, α dan β adalah kemiringan *plate* pada sumbu X dan Y, serta g adalah percepatan gravitasi. Dengan mengasumsikan momen inersia dari sebuah bola $I_b = \frac{2}{5} m_b r_b^2$, maka persamaan (1) dan (2) dapat ditulis

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{x}_b - (x_b \dot{\alpha}^2 + y_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \alpha \right] = 0 \quad (3)$$

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{y}_b - (y_b \dot{\alpha}^2 + x_b \dot{\alpha} \dot{\beta}) + g \sin \beta \right] = 0 \quad (4)$$

Persamaan (3) dan (4) dapat dilinerisasi dengan mengasumsikan sudut kemiringan *plate* yang kecil, sehingga $\sin \alpha \cong \alpha$ dan $\sin \beta \cong \beta$. Selain itu, kita dapat mengasumsikan kecepatan sudut $\dot{\alpha}$ dan $\dot{\beta}$ yang sangat kecil, sehingga $\dot{\alpha}^2 \cong 0$, $\dot{\beta}^2 \cong 0$, dan $\dot{\alpha} \dot{\beta} \cong 0$. Dengan demikian diperoleh model linier dari sistem *ball-on-plate* sebagai berikut

$$\frac{5}{7} \ddot{x}_b + g \alpha = 0 \quad (5)$$

$$\frac{5}{7} \ddot{y}_b + g \beta = 0 \quad (6)$$

Dalam bentuk fungsi alih dengan masukan α dan β serta keluaran berupa koordinat X dan Y, persamaan (5) dan (6) dapat ditulis

$$\frac{X_b}{\alpha} = \frac{g}{\frac{5}{7} s^2} \quad (7)$$

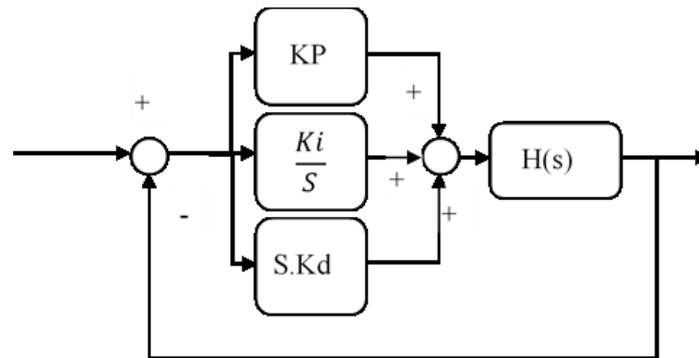
$$\frac{Y_b}{\beta} = \frac{g}{\frac{5}{7} s^2} \quad (8)$$

2.2 Perancangan Pengendali PID

Pada penelitian ini, sistem *ball-on-plate* akan dikendalikan menggunakan pengendali PID. Sinyal kendali yang dihasilkan oleh pengendali ini memenuhi persamaan berikut

$$U(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right] E(s) \quad (9)$$

dimana K_p , K_i , dan K_d merupakan konstanta PID dan $E(s)$ adalah sinyal *error* yang dihasilkan dari selisih antara *setpoint* dan keluaran. Adapun diagram blok dari pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram sistem kendali PID

Proses *tuning* parameter PID yang terbaik dapat dilakukan oleh operator atau peneliti dengan berbagai macam cara untuk menghasilkan nilai parameter terbaik [4]. Penelitian [13] mengusulkan desain untuk pengendali PID dengan menetapkan nilai parameter yang sesuai dengan hasil eksperimen dari sistem yang dilakukan oleh operator. Proses penentuan nilai parameter PID dapat dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols [14], [15]. Bentuk S dari kurva merupakan karakteristik dari sistem dan dapat didekati dengan respon *step* dari suatu plant dengan fungsi transfer.

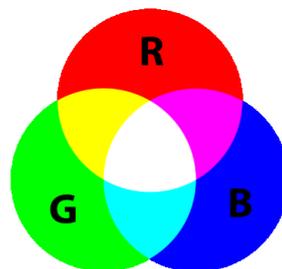
Pada penelitian ini menggunakan Ziegler-Nichols tipe 2 untuk mendapatkan parameter kendali PID. Metode ini hanya menggunakan kendali proporsional dengan menaikkan nilai K_p dari 0 sampai nilai kritis untuk mendapatkan keluaran yang menggunakan amplitudo konstan yang sama. Nilai K_p ini disebut nilai kritis (K_u). Pada kondisi ini, keluaran akan berosilasi pada keadaan kritikal dan hal tersebut menghasilkan nilai parameter K_{cr} dan P_{cr} yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai parameter PID berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Ziegler-Nichols 2

Kendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$(1/1,2)P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

2.3 Filter RGB

Model warna RGB merupakan bagian dari tiga unsur warna yaitu merah, hijau, dan biru yang digabungkan sehingga dapat menghasilkan warna tertentu. Penggabungan warna pada umumnya dilakukan berdasarkan skala yang berbeda, sehingga warna yang dihasilkan dapat bervariasi. Sebagai contoh ilustrasi dari penggabungan warna dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi model warna RGB

Gambar 3 menampilkan bahwa ketika warna campuran merah dan hijau, merah dan biru, dan hijau dan biru digabungkan akan menghasilkan warna putih. Hal tersebut telah diketahui juga dalam teori spektrum warna, dimana warna putih merupakan gabungan dari 7 spektrum warna [16].

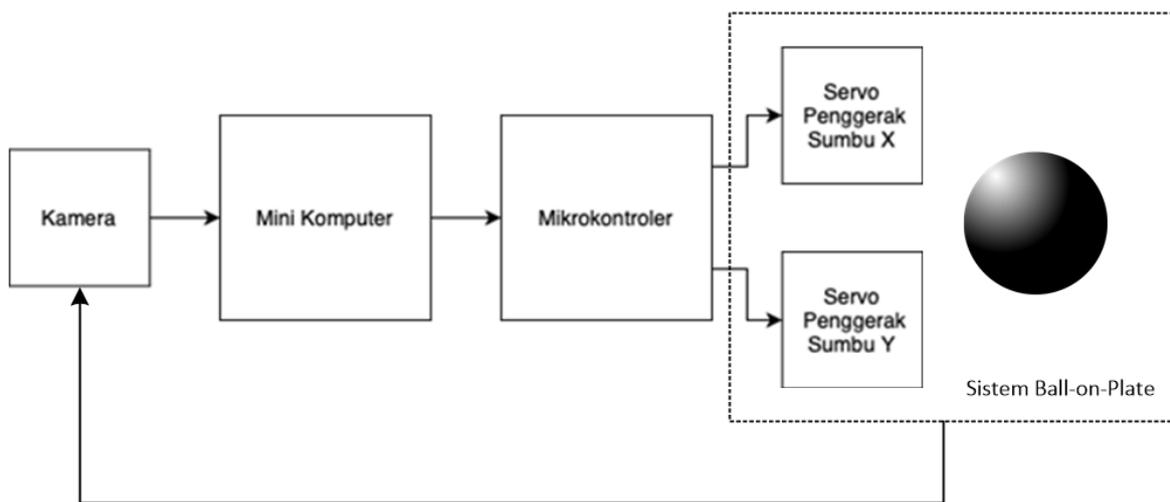
Pada penelitian ini pendeteksian objek berdasarkan model warna RGB dilakukan menggunakan sensor kamera. Kamera yang digunakan yaitu Logitech C525, resolusi yang digunakan kamera yaitu

320 x 240 piksel. Pengaturan resolusi dilakukan agar proses deteksi objek dapat berjalan lebih cepat karena jumlah piksel yang lebih kecil.

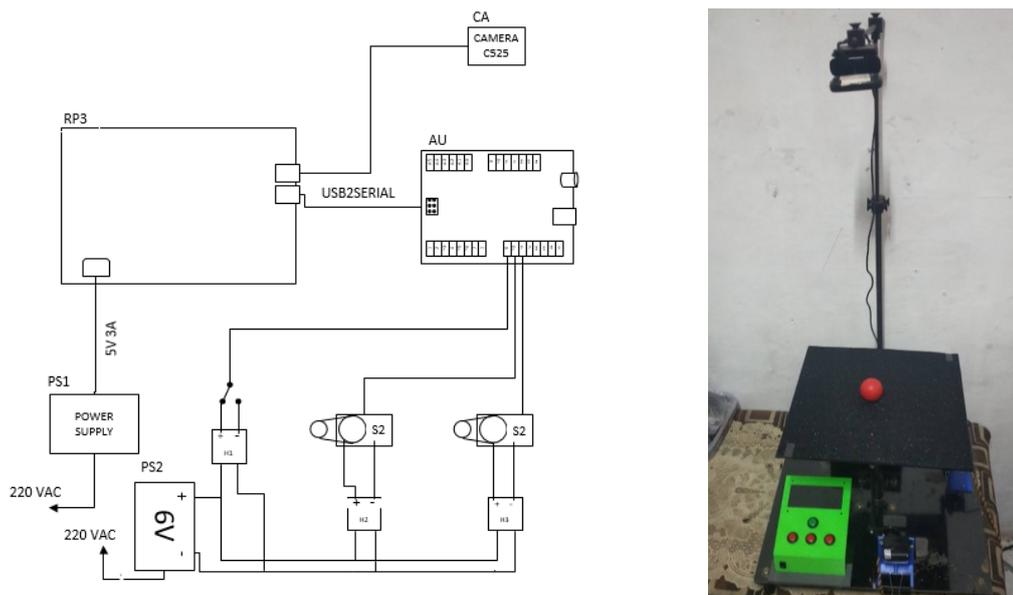
Dalam proses pengambilan video secara *realtime*, gambar akan dikonversi menjadi *grayscale* dari gambar yang berwarna. Hasil filter gambar *grayscale* kemudian akan dilakukan proses seleksi jenis piksel. Piksel yang dimaksud adalah jenis warna yang akan diambil dan jenis warna yang akan dihilangkan. Sehingga warna yang diinginkan akan diambil dan yang tidak diinginkan akan dihilangkan atau diubah menjadi warna putih. Hasil akhir dari pendeteksian akan menampilkan objek yang terdeteksi dengan warna yang ditentukan. Objek yang telah terdeteksi akan menghasilkan matriks yang dapat diproses hingga mendapatkan nilai koordinat X dan Y.

2.4 Perangkat Keras

Penelitian ini menggunakan mini komputer Raspberry Pi sebagai bagian utama untuk memproses *image processing* dan pengendalian sistem keseluruhan. Mikrokontroler berfungsi untuk membaca data sensor dan mengirimkan data PWM untuk menggerakkan motor servo. Gambar 4 mengilustrasikan hubungan antar perangkat keras yang digunakan. Adapun perancangan elektronik dan realisasi perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Diagram blok perangkat keras sistem kendali *ball-on-plate*



Gambar 5. Perancangan perangkat keras rangkaian elektronik (kiri) dan realisasi sistem (kanan)

Gambar 5 bagian kiri menampilkan diagram pengawatan dari mini komputer ke mikrokontroler dan koneksi kamera ke mini komputer. Servo terhubung pada mikrokontroler untuk mendapatkan sinyal PWM pengendalian yang dikirimkan mikrokontroler. *Power supply* digunakan untuk memberikan daya keseluruhan komponen yang digunakan pada sistem ini. Pada bagian kanan Gambar 5 menampilkan realisasi perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini untuk mengendalikan posisi bola di atas papan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Pendeteksian Bola Berwarna

Deteksi objek berupa bola pingpong berwarna merah dilakukan di atas papan dengan menggunakan kamera *webcam*. Proses pendeteksian menghasilkan posisi keberadaan objek bola dengan memberi kordinat X dan Y. Koordinat tersebut akan digunakan pada sistem kendali PID sebagai umpan balik. Hasil pendeteksian dapat dilihat pada Gambar 6 yang menunjukkan koordinat (X,Y) pada (78,226) dan (180,118).



Gambar 6. Hasil pendeteksian bola berwarna merah

3.2 Pengujian Pengendalian Sistem

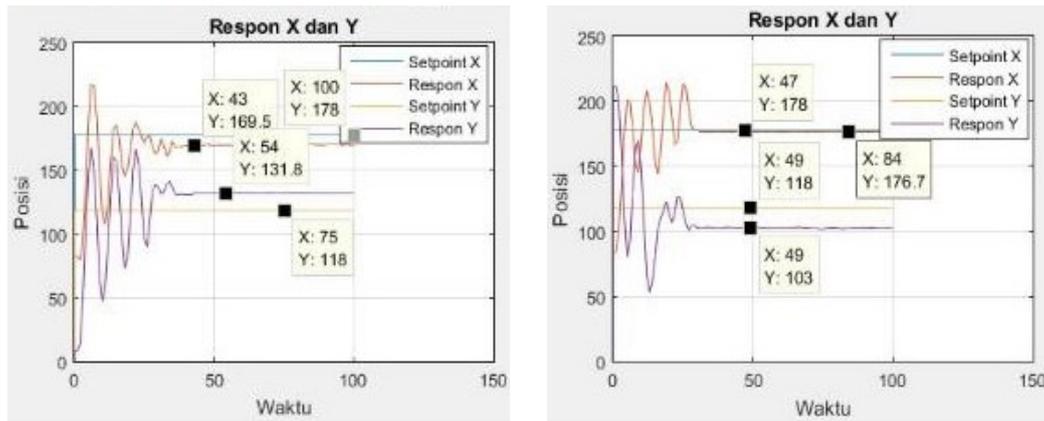
Pengujian sistem pengendalian dilakukan menggunakan nilai akhir dari parameter kendali PID berdasarkan pada tabel Ziegler Nichols 2 sehingga dihasilkan parameter seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Kcr, Pcr, dan parameter kendali PID

Koordinat	Kcr	Pcr	Kp	Ki	Kd
X	6	2,07	1,20	1,16	0,31
Y	6	1,92	1,20	1,25	0,29

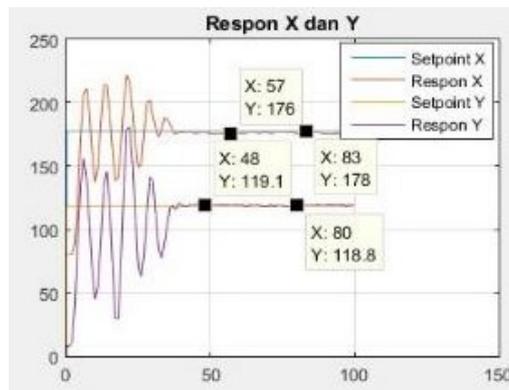
Gambar 7 menunjukkan hasil respon keluaran dari pengujian sistem secara keseluruhan pada tiga kali percobaan. Pengujian dilakukan pada nilai *setpoint* koordinat (X,Y) = (178,118) atau pada titik tengah papan. Analisa akan dilakukan pada hasil percobaan untuk mengetahui rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan *steady state*, besar *error steady state*, *overshoot*, *rise time*, dan *settling time*. Tabel 3 dan Tabel 4 merupakan hasil analisa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan *steady state*, dan besar *error steady state* (ess) untuk tiga kali percobaan yang telah dilakukan.

Berdasarkan hasil pengujian dapat dilihat bahwa pengendalian yang dirancang mampu mestabilkan posisi bola pada *setpoint* yang ditentukan. Pada kondisi transien, respon koordinat X memiliki *rise time* sebesar 4,74 detik, *overshoot* sebesar 11,29%, dan *settling time* 37,3 detik. Sedangkan untuk keluaran respon koordinat Y memiliki hasil respon transien *rise time* sebesar 4,20 detik, *overshoot* sebesar 31,95%, dan *settling time* 37 detik. Pada kondisi *steady state*, besar *error steady state* pada analisa memiliki nilai kurang dari 10% dan rata-rata waktu menuju *steady state* yaitu 8,85 detik.



(a)

(b)



(c)

Gambar 7. Hasil pengujian sistem: (a) percobaan pertama, (b) percobaan kedua, (c) percobaan ketiga

Tabel 3. Analisa respon *steady state* koordinat X

Parameter	Percobaan			
	1	2	3	Rata-rata
Setpoint	178	178	178	-
Steady state	169,5	176,7	176	-
Besar <i>error steady state</i>	8,5	1,3	2	3,93
Waktu keadaan <i>steady</i> (s)	7,02	9,95	9,58	8,85

Tabel 4. Analisa respon *steady state* koordinat Y

Parameter	Percobaan			
	1	2	3	Rata-rata
Setpoint	118	118	118	-
Steady state	131,8	103	119,1	-
Besar <i>error steady state</i>	13,8	15	1,1	9,96
Waktu keadaan <i>steady</i> (s)	7,02	9,95	9,58	8,85

4. KESIMPULAN

Pengendalian sistem *ball-on-plate* menggunakan metode PID berbasis umpan balik visual dengan filter RGB telah berhasil dilakukan secara eksperimen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menstabilkan posisi bola pada *setpoint* koordinat yang telah ditetapkan. Pada kondisi transien dan *steady state* dihasilkan respon yang cukup baik meskipun masih terdapat *overshoot* dan *error steady state* yang cukup besar. Hal ini terjadi karena metode *tunning* yang dilakukan pada pengendali

PID masih pada tahap yang paling sederhana. Selain itu, perancangan pengendali tidak didasarkan pada model matematis dari *plant* yang akan dikendalikan. Penelitian selanjutnya diperlukan metode yang lebih analitik dengan memperhatikan akurasi model *plant* sehingga dapat dihasilkan respon pengendalian yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Laboratorium Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung atas diberikan fasilitas pengujian dan percobaan alat untuk menganalisa hasil penelitian.

REFERENSI

- [1] A. Knuplež, A. Chowdhury, and R. Svečko, "Modeling and control design for the ball and plate system," *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, vol. 2, 2003, pp. 1064–1067.
- [2] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, New York: Pearson, 2018.
- [3] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [4] P. M. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor," in *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*, 2012, pp. 117–122.
- [5] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *Int J Control Autom Syst*, vol. 1, no. 4, pp. 401–411, 2003.
- [6] C. Y. Liu, D. Z. Hou, and L. Chang-An, "Study on moving object detection based on RGB color model," *Adv Mat Res*, vol. 710, pp. 700–703, 2013.
- [7] M. T. Ho, Y. Rizal, and L. M. Chu, "Visual servoing tracking control of a ball and plate system: Design, implementation and experimental validation," *Int J Adv Robot Syst*, vol. 10, 2013.
- [8] C. Parga, W. Yu, and X. Li, "A low-cost ball and plate system for advanced control education," *International Journal of Electrical Engineering and Education*, vol. 52, no. 4, pp. 370–384, 2015.
- [9] M. Martin, D. Ramdani, Y. Sudarsa, and F. Isdaryani, "Visual Servoing pada Ball-on-Plate dengan Kendali PID dan Filter Kalman," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 7, no. 2, pp. 295–300, 2022.
- [10] A. R. Al Tahtawi, Y. Somantri, and E. Haritman, "Design and Implementation of PID Control-based FSM Algorithm on Line Following Robot," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 1, no. 1, pp. 23-30, 2017.
- [11] S. W. Jadmiko, L. A. Suyitno, F. M. Lukman, and B. T. G. Gibran, "Aplikasi Kendali PID pada Simulator Water Level Control Berbasis TK-Series Controller," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 6, no. 1, pp. 155-162, 2021.
- [12] M. Nokhbeh, D. Khashabi, and H. A. Talebi, "Modelling and control of ball-plate system," *Doctoral Dissertation Amirkabir University of Technology*, 2011.
- [13] F. R. Betancourt, F. H. Escobar, and F. H. M. S., "PID Controller Applied To the System Ball and Plate Ce 151," *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, pp. 1825–1830, 2020.
- [14] C. Copot, C. Ionescu, and R. de Keyser, "Visual servo control of a Steward platform using fractional-order PID controller," *2014 18th International Conference on System Theory, Control and Computing*, 2014, pp. 70–75.
- [15] P. M. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor," in *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*, 2012, pp. 117–122.
- [16] R. Khrisna, *Computer Vision: Foundations and Applications*, Stanford University, 2017.