JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Vol. 7, No. 2, Desember 2022, Hal. 295-300
Terakreditasi "**Peringkat 3**" oleh Kemenristek/BRIN, Nomor SK: 85/M/KPT/2020
DOI: 10.31544/jtera.v7.i2.2022.295-300
p-ISSN 2548-737X
e-ISSN 2548-8678

Visual Servoing pada *Ball-on-Plate* dengan Kendali PID dan Filter Kalman

Martin[#], Deni Ramdani, Yana Sudarsa, Feni Isdaryani
Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559, Indonesia
[#]martin@polban.ac.id

Abstrak

Ball-on-plate merupakan sebuah sistem yang dapat menyeimbangkan sebuah bola di atas papan datar pada titik tertentu. Sistem ini merupakan bagian dari ilmu *visual servo control* yang menggunakan sensor kamera sebagai umpan balik sistem. Penelitian ini bertujuan menggunakan kendali PID untuk menyeimbangkan bola di atas papan dan sensor kamera dengan filter Kalman untuk mendeteksi objek. Proses membaca gerakan bola menggunakan algoritma pendeteksi objek berdasarkan filter Kalman, kemudian pendeteksian objek menghasilkan koordinat kartesian X dan Y. Koordinat tersebut merupakan umpan balik sistem pada kendali *ball-on-plate*. Sistem ini memiliki masukan berupa koordinat X dan Y, masukan tersebut akan dibandingkan dengan umpan balik sehingga didapatkan *error* posisi bola. Kendali PID mendapatkan masukan berupa nilai *error* posisi, kemudian akan menghasilkan nilai PWM untuk menggerakan servo sumbu X dan sumbu Y. Seluruh proses pendeteksian dan pengendalian dilakukan dengan *embedded system* menggunakan *minicomputer*. Hasil penelitian menunjukkan filter Kalman dapat bekerja dengan baik dengan parameter *Q_frame* sebesar 0,001, *Q_rate sebesar* 0,003, dan R sebesar 0,001. Sistem kendali PID dapat mengendalikan posisi bola dengan membutuhkan waktu 21,31 detik untuk mencapai *setpoint.*

Kata kunci: *ball on plate*, filter Kalman, kendali PID

Abstract

Ball-on-plate is a system that can balance a ball on a flat board at a certain point. This system is part of the visual science of servo control which uses the camera sensor as system feedback. This study aims to use PID control to balance a ball on a board and a camera sensor with a Kalman filter to detect objects. The process of reading the ball's movement uses an object detection algorithm based on the Kalman filter, then object detection produces X and Y cartesian coordinates. These coordinates are system feedback to the ball-on-plate control. This system has input in the form of X and Y coordinates, this input will be compared with the feedback so that the ball position error is obtained. The PID control gets input in the form of a position error value, then generates a PWM value to drive the X-axis and Y-axis servos. The entire detection and control process is carried out with an embedded system using a minicomputer. The results show that the Kalman filter can work well with the parameters Q_frame of 0.001, Q_rate of 0.003, and R of 0.001. The PID control system can control the position of the ball in 21.31 seconds to reach the setpoint.

Keywords: *ball on plate, Kalman filter, PID control*

I. 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 atau sebagainya sesuai dengan nilai acuan yang telah diberikan. Adapun Knuplez, et al [1] menjelaskan bahwa sistem *ball-on-plate* adalah sistem elektromekanis dua dimensi yang ditujukan untuk mempelajari sistem dinamik dan eksperimen laboratorium dengan proses kontrol yang berbeda berdasarkan teori kontrol klasik dan modern. Masalah dari sistem ini yaitu papan yang pergerakannya diatur menggunakan 2 buah motor servo yang masing-masing memiliki 1 derajat kebebasan sendiri (DoF). *Ball-on-plate* merupakan sistem yang memiliki 2 DoF yang dapat diberikan kendali klasik ataupun modern. Tujuan *ball-on-plate* adalah untuk menempatkan bola di posisi koordinat x dan y yang diinginkan. Sistem ini

Diterima: 21 September 2022; Direvisi: 22 November 2022; Disetujui: 12 Desember 2022
JTERA, Vol. 7, No. 2, Desember 2022

© 2022 JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), Politeknik Sukabumi

mengontrol kestabilan papan agar bola selalu diposisi yang telah ditentukan. Horowitz [2] menjelaskan bahwa pengendalian beberapa DoF merupakan sistem kendali lingkar tertutup yang dapat diatur secara terpisah.

Kendali PID merupakan salah satu 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. Pengendali PID disusun oleh pengendali tipe proporsional, integral, dan 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* (Kp), *integral time* (Ti), dan *derivative time* (Td) dari kendali PID didapatkan dengan menggunakan metode penalaan Ziegler-Nichols [3]. Salah satu penerapan kendali PID dengan Ziegler-Nichols oleh [4], penerapan yang dilakukan yaitu mengendalikan kecepatan motor DC menggunakan kendali PID dengan metode penalaan Ziegler-Nichols. Penerapan kendali PID lainnya dilakukan oleh Mituhiko Araki, et al [5] yang melakukan penerapan pada pengendalian 2 DOF menggunakan kendali PID dengan membandingkan respon PID dan I-PD.

Sensor merupakan alat yang dapat mengubah besaran fisik ke besaran listrik, sensor dapat difungsikan sebagai umpan balik suatu sistem yang dikendalikan. Sensor juga merupakan salah satu komponen yang sangat dibutuhkan dalam sistem ini, 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). Liu et al. [6] melakukan penelitian untuk mendeteksi pergeran objek berdasarkan model warna RGB. Penelitian ini menjelaskan bahwa setiap objek memiliki kriteria warna RGB yang berbeda, sehingga hal tersebut memudahkan untuk mendeteksi pergerakan sebuah objek pada bentu dengan jenis atau model warna RGB tertentu.

M. Ho, et al melakukan penelitian tentang *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 *modelling*, dan sistem kendali yang digunakan.

Penelitian ini bertujuan merancang sistem yang tertanam dengan mini komputer Raspberry Pi. Sistem *ball-on-plate* dapat melakukan pengendalian posisi bola secara otomatis. Sensor kamera digunakan dengan menggunakan filter Kalman untuk mendeteksi bola dan kendali PID untuk mengatur posisi bola dengan menggerakan aktuator motor servo sumbu x dan y.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini memiliki 2 landasan teori utama yang dijadikan acuan dalam pelaksanaan, perancangan, pengujian dan analisis akhir. Teori pertama yaitu deteksi objek dengan filter Kalman dan teori kedua yaitu kendali PID.

A. Filter Kalman

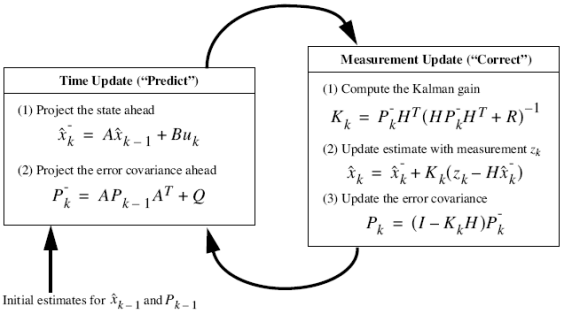
Filter merupakan metode yang digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi sinyal *white noise* atau *noise* yang dapat mempengaruhi kesalahan pada pengukuran [9]. Filter Kalman bekerja dengan memprediksi pengukuran berdasarkan pengukuran. Filter Kalman dalam prosesya akan mengetahui *measurement noise* dan *process noise* [10]. Gambar 1 menampilkan proses filter Kalman secara keseluruhan.

Proses perancangan filter Kalman dibagi menjadi dua tahap utama yaitu prediksi dan koreksi. Tahap prediksi berperan sebagai prediksi atau estimasi dari *current state* dan *covariance error* untuk waktu berikutnya. Persamaan estimasi dapat dilihat pada persamaan (1) dan (2) berikut.

$$X_k|k-1 = F.X_{k-1}|k-1 + B.u_k \quad (1)$$

$$P_k|k-1 = F.P_{k-1}|k-1.F^T + Q_k \quad (2)$$

Persamaan (1) merupakan persamaan untuk memprediksi *state* berikutnya, sedangkan persamaan (2) merupakan persamaan untuk memprediksi *error covariance* berikutnya. $X_k|k\text{-}1$ adalah sinyal prediksi pada waktu k yang dihasilkan oleh filter Kalman. Variabel $P_k|k\text{-}1$ merupakan matriks hasil proses kovarians. Persamaan pada



Gambar 1. Proses kerja filter Kalman

keadaan prediksi digunakan untuk mengetahui atau memprediksi keadaan saat ini dengan kovarian waktu k. filter Kalman akan memperkirakan status saat ini berdasarkan hasil data-data pengukuran sebelumnya. P menurut persamaan (2) merupakan *estimation state* yang berfungsi untuk memprediksi berapa data yang dapat merupakan hasil tanpa *noise*.

Tahap koreksi atau *update* pada filter Kalman memiliki tujuan untuk umpan balik untuk *system*. Tahap ini memiliki persamaan sebagai berikut.

$$K_k = P_k|k-1.H^T.\left(H.P_k|k-1.H^T + R\right)^{-1} \quad (3)$$

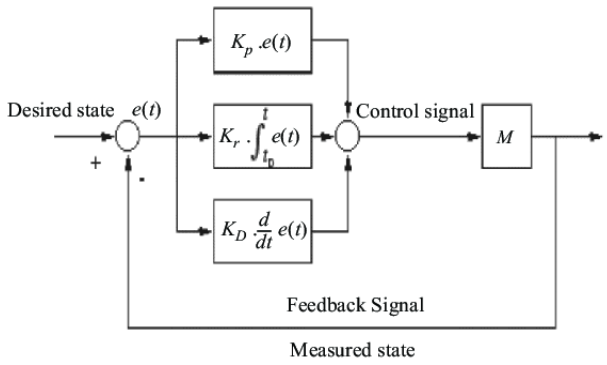
$$P_{k-1}|k-1 = \left(I - K_k.H_k\right)P_k|k-1 \quad (4)$$

Persamaan (3) memiliki variabel K_k yang merupakan penguat Kalman yang digunakan dalam kalibrasi filter Kalman. Variabel tersebut digunakan sebagai penentu dari performa filter Kalman. Variabel R adalah standar deviasi pada persamaan dari *state* X_k. Persamaan (4) merupakan persamaan untuk memperbaharui nilai *error covariance*. Variabel Q dan R merupakan variabel utama yang dapat mempengaruhi hasil dari filter Kalman pada persamaan (1) sampai (4). Kedua variabel tersebut dapat diatur sehingga mendapatkan keadaan optimal yang dapat memfilter *noise* dari pengukuran.

B. Kendali PID

Kendali PID merupakan sebuah kendali untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik dengan adanya *feedback* pada sistem tersebut. Komponen kendali PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu proposional, integral dan *derivative*. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu *plant*, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasarkan karakteristik pengendali ini, pengendali PID umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak



Gambar 2. Diagram blok sistem kendali PID

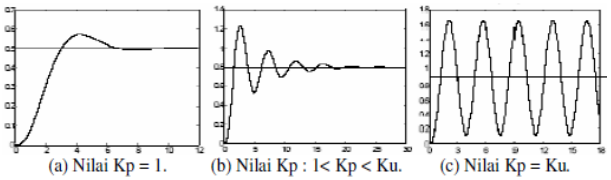
memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja pengendali diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu pengontrol diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kontroler lainnya.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_{t_0}^{t} e(t)dt + K_d \quad (5)$$

Persamaan (5) merupakan persamaan sinyal kendali dari pengendali PID. Pengendali PID dapat memperbaiki sekaligus menghilangkan *error steady-state* serta memiliki sifat yang dapat digunakan untuk memperbaiki respon transien dengan memprediksi *error* yang akan terjadi.

C. Ziegler Nichols Tipe 2 (ZN2)

Proses penentuan nilai parameter Kp, Ki dan Kd dapat dilakukan dengan menggunakan tuning manual ataupun menggunakan metode tertentu dengan cara melakukan pendekatan matematis sehingga didapatkan nilai parameter yang terbaik. Proses tuning parameter PID yang terbaik dapat dilakukan oleh operator atau peneliti dengan berbagai macam cara untuk menghasilkan nilai parameter terbaik [11]. Dalam [12] mengusulkan desain untuk pengontrol 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 [13], bentuk S dari kurva merupakan karakteristik dari sistem dan dapat didekati dengan respon step dari suatu plant dengan fungsi transfer. Penelitian ini menggunakan ZN tipe 2 untuk mendapatkan parameter pengendali PID. metode ZN ke-2 hanya menggunakan pengendali proporsional dengan menaikkan nilai Kp dari 0 hingga nilai kritis, sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama. Nilai kritis Kp ini disebut sebagai *ultimated gain* (Ku). Tanggapan keluaran untuk Kp sebesar 1, Kp antara 1 dan Ku, dan Kp lebih besar dari Ku yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik respon menggunakan kendali P

Gambar 3 poin (c) menampilkan keluaran yang berosilasi secara kontinyu sehingga nilai Kp merupakan nilai Kcr atau nilai penguatan pada saat keadaan kritikal. Nilai Kcr, Pcr, diperoleh setelah keluaran sistem mencapai kondisi yang terus menerus berosilasi. Nilai Kcr dan Pcr digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta pengendali sesuai dengan tetapan empiris Ziegler-Nichols pada Tabel 1.

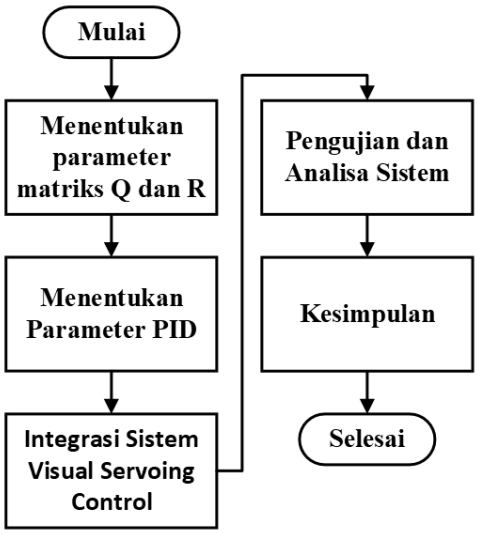
D. Perancangan Visual Servoing Control

Perancangan pada penelitian *visual servoing control* ini akan menentukan nilai matriks Q dan R untuk filter Kalman, dan menentukan nilai parameter PID. Parameter filter Kalman dan PID yang telah didapat akan digunakan dan diuji pada penelitian ini. Data hasil pengujian akan dianalisa dari respon transien keluaran system yang didapatkan. Perancangan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Gambar 5 merupakan proses *visual servoing control*, input dan image processing menggunakan filter Kalman untuk mendapatkan koordinat X dan Y akan dilakukan pada mini komputer Raspberry Pi, dan hasil koordinat X dan Y akan dikirimkan ke Arduino melalui komunikasi serial dan pengendalian kemiringan papan menggunakan motor servo menggunakan 2 motor servo. Pengendalian dilakukan menggunakan pengendali PID dengan diagram blok seperti Gambar 6.

Tabel 1. Parameter ZN2

Kendali	Kp	Ti	Td
P	0,5Kcr	∞	0
PI	0,45Kcr	(1/1,2)*Pcr	0
PID	0,6Kcr	0,5Pcr	0,125Pcr

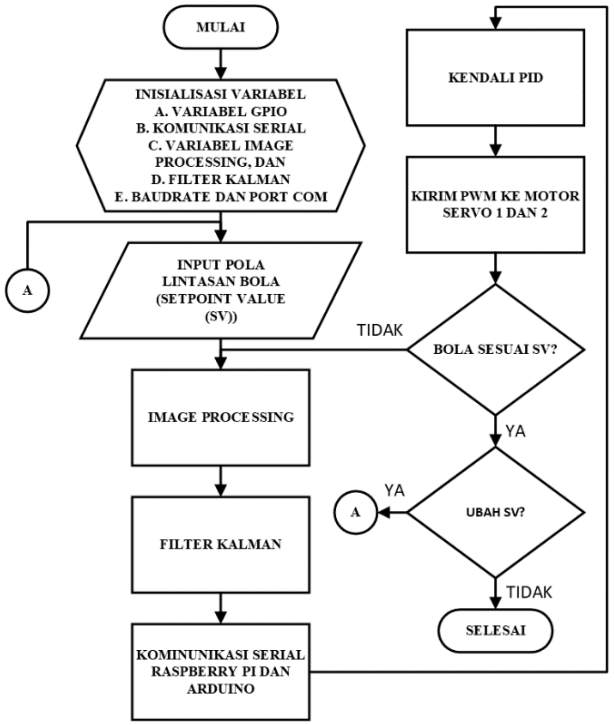


Gambar 4. Diagram alir proses perancangan penelitian

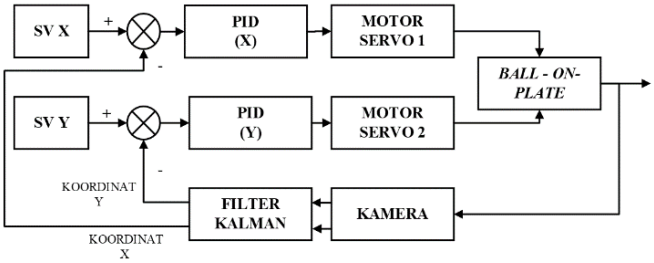
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tunning Parameter Matriks Q dan R Filter Kalman

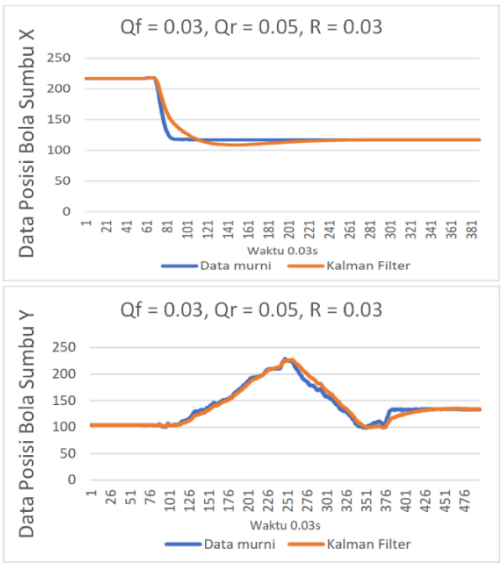
Matriks variabel Q dan R merupakan variabel yang sangat berpengaruh terhadap kehandalan filter Kalman dalam menghilangkan noise selama pengukuran. Matriks Q dan R di*tunning* menggunakan Teknik penalaan dengan secara kontinu mengukur data sensor posisi bola 2 sumbu sampai dengan didapatkan nilai paling mendekati pembacaan sensor sesungguhnya. Penalaan dilakukan dengan 3 nilai yang berbeda, antara lain pertama nilai Qf = 5, Qr = 3, dan R = 0,5, kedua nilai Qf = 0,03, Qr = 0,05, dan R = 0,03, dan ketiga nilai Qf = 0,001, Qr = 0,003, dan R = 0,001. hasil pengukuran ketiga nilai penalaan matriks dapat dilihat Gambar 7, Gambar 8 dan Gambar 9.



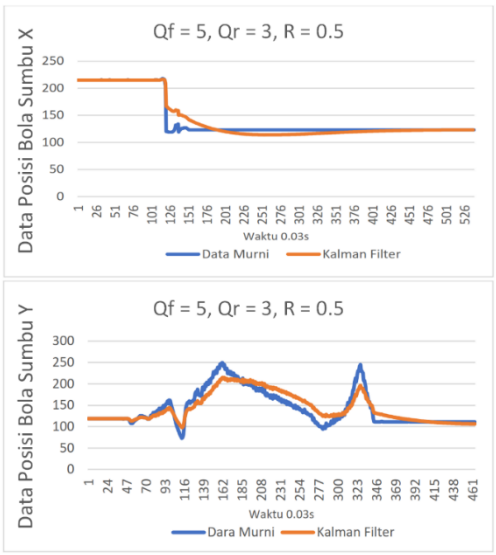
Gambar 5. Diagram alir *visual servoing control*



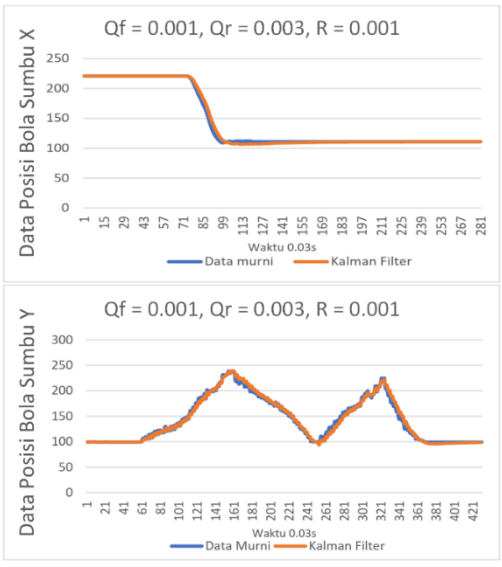
Gambar 6. Diagram blok kendali *visual servoing control*



Gambar 7. Qf = 5, Qr = 3, dan R = 0,5



Gambar 8. Qf = 0,03, Qr = 0,05, dan R = 0,03

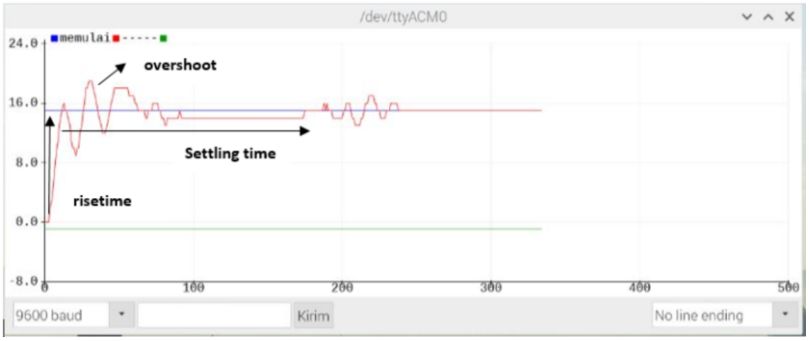


Gambar 9. Qf = 0,001, Qr = 0,003, dan R = 0,001

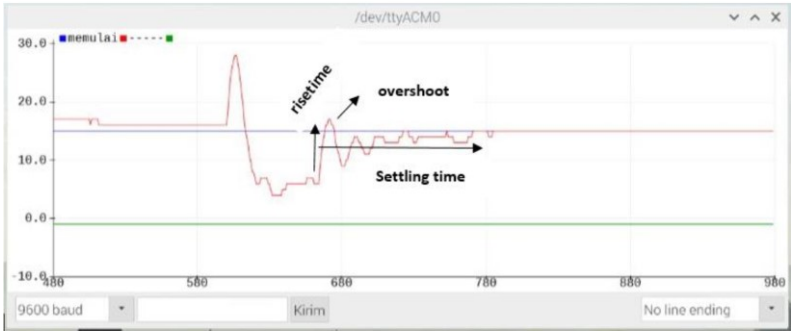
Pada hasil penalaan variabel Q dan R didapatkan nilai variabel yang optimal sehingga dapat menghilangkan *noise* selama pengukuran yaitu pada nilai parameter Qf = 0,001, Qr = 0,003, dan R = 0,001.

B. Pengujian dan Analisa Sistem Keseluruhan

Parameter PID yang telah dirancang pada bagian metode penelitian bagian C sebelumnya memiliki nilai Kp, Ti dan Td sebesar 0,8, 0,87, dan 0,5 untuk sumbu X dan 0,735, 0,95, dan 0,6 untuk sumbu Y. Pengujian keseluruhan system dilakukan dengan menggabungkan hasil filter Kalman sebagai *feedback system* kemudian akan dilakukan pengendalian menggunakan PID dengan parameter yang telah ditentukan dan menghasilkan respon keluaran Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Respon sumbu X



Gambar 11. Respon sumbu Y

Analisa pada respon transien dilakukan dengan menghitung parameter *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *error steady state*. Respon keluaran pada sumbu X sesuai Gambar 10 didapatkan nilai *rise time* sebesar 0,65 detik, *%overshoot* sebesar 16,13%, *settling time* 20,05 detik dan *error steady state* sebesar 0%, sedangkan respon keluaran pada sumbu Y sesuai gambar 11 didapatkan nilai *rise time* sebesar 3,1 detik, *%overshoot* sebesar 13,4%, *settling time* 12 detik dan *error steady state* sebesar 0%. Sistem dapat membuat bola pada posisi SV yang diinginkan dalam waktu rata-rata 21,30 detik untuk pengambilan 5 data.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan pada penelitian ini yaitu *visual servoing control* dapat mengendalikan posisi bola pada posisi yang diinginkan dalam waktu rata-rata 21,30 detik. Respon transien pada keluaran memiliki nilai parameter analisa seperti *rise time* sebesar 0,65 detik untuk sumbu X dan 3,1 untuk sumbu Y, *overshoot* sebesar 16,13% untuk sumbu X dan *overshoot* sebesar 13,4% untuk sumbu Y, *settling time* 20,05 detik untuk sumbu X dan *settling time* 12 detik untuk sumbu Y, dan *error steady state* sebesar 0% untuk sumbu X dan Y. Penelitian ini dapat berkembang lebih jauh dengan menerapkan perbandingan metode yang berbeda untuk menghasilkan kecepatan dalam pengendalian posisi bola.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih pada Politeknik Negeri Bandung yang telah memberikan sumber dana Penelitian Mandiri.

REFERENSI

[1] A. Knuplež, A. Chowdhury, and R. Svečko, "Modeling and control design for the ball and plate system," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2, pp. 1064–1067, 2003.

[2] I. M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*. Academic Press, 1963.

[3] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth. New Jersey: Prentice Hall, 2010. [Online]. Available: www.pearsonhighered.com

[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. Mater. 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," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 52, no. 4, pp. 370–384, 2015.

[9] Martin, D. I. H. Putri, Riyanto, and C. Machbub, "Gait Controllers on Humanoid Robot Using Kalman Filter and PD Controller," in *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Nov. 2018, pp. 36–41.

[10] Aripin, Riyanto, Martin, D. I. Hadi Putri, and C. Machbub, "Maintaining Trajectory of CoM for Stable Locomotion of Humanoid Robot Using Kalman Filter and Fuzzy Logic Controller," in *2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, Jul. 2019, pp. 97–102.

[11] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Eight. New York: Pearson, 2018. [Online]. Available: www.pearsonhighered.com

[12] A. Callender, D. R. Hartree, and A. Porter, "Time-lag in a control system," *Philosohical Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 756, pp. 415–444, 1936.

[13] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Process Lags in Automatic Control Circuits," *Trans. ASME*, vol. 65, no. 6, pp. 433–444, 1943.