

# *Position Based Visual Servoing* untuk Robot Sepak Bola Beroda Menggunakan Kamera Omni

Febby Ayu Salsabilla<sup>1</sup>, Indrazno Siradjuddin<sup>2</sup>, Totok Winarno<sup>3</sup>

e-mail: [febbyasalsab@gmail.com](mailto:febbyasalsab@gmail.com), [indrazno@polinema.ac.id](mailto:indrazno@polinema.ac.id), [totok.winarno@polinema.ac.id](mailto:totok.winarno@polinema.ac.id)

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

## Informasi Artikel

### Riwayat Artikel

Diterima 6 Juli 2023

Direvisi 2 Oktober 2023

Diterbitkan 31 Mei 2024

## Kata kunci:

PBVS

Robot Sepak Bola Beroda

Kamera Omni

## ABSTRAK

Pada pertandingan robot sepak bola beroda, salah satu kinerja robot adalah bagaimana mendapatkan bola berdasarkan posisi bola berada. Biasanya, navigasi robot dilakukan dengan mengolah data informasi dari sensor penglihatan. Dalam beberapa kasus, sistem penglihatan yang dikembangkan untuk navigasi bergantung dari geometri lingkungan dan informasi lainnya dalam mendorong proses lokalisasi. Maka dari itu, pada penelitian ini digunakan kamera omni yang diletakkan pada bagian atas dari badan robot. Metode yang digunakan yaitu metode *Position Based Visual Servoing (PBVS)* untuk memperkirakan *pose* dari fitur gambar dalam ruang 2D yang diperoleh dari kalibrasi kamera intrinsik dan ekstrinsik. Robot didesain menggunakan 4 roda *omniwheels* dengan kontrol kinematik untuk pergerakannya. Tahapan yang dilakukan dimulai dari mendeteksi warna bola untuk mendapatkan nilai  $x, y$  dari *pixel* kamera. Nilai  $x, y$  digunakan sebagai *input* untuk menghitung rumus  $\theta$  yang nantinya dapat menghitung nilai jarak untuk mendapatkan posisi bola sebagai masukan memperoleh nilai *error*. Hasil dari penelitian ini yaitu robot mampu bergerak mendekati bola sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan, hal ini dibuktikan dengan rata-rata nilai RMSEnya 0.2. Berdasarkan hasil tersebut, menunjukkan bahwa robot mampu bergerak mendekati bola dengan baik menggunakan kontrol kinematik yang telah didesain dan mendapatkan bola dengan akurasi yang baik menggunakan metode *Position Based Visual Servoing (PBVS)*.

## ABSTRACT

*In a wheeled soccer robot match, one of the robot's performances is to get the ball based on the ball's position. Usually, robot navigation is carried out by processing information from vision sensors. In some cases, vision systems developed for navigation rely on environmental geometry and other information to drive the localization process. Therefore, in this study, an omnicaamera was used, which was placed at the top of the robot body. The method used is the Position-Based Visual Servoing (PBVS) method to estimate the poses of image features in 2D space obtained from intrinsic and extrinsic camera calibration. The robot is designed to use four omniwheels with kinematic controls for its movement. The steps taken start with detecting the color of the ball to get the  $x$  and  $y$  values of the camera pixel. The  $x, y$  value is used as input to calculate the theta formula, which can later calculate the distance value to get the ball's position as input to obtain the error value. The results of this study show that the robot is able to move closer to the ball according to a predetermined set point, as evidenced by the average RMSE value is 0.2. Based on these results, it shows that the robot is able to move closer to the ball properly using the kinematic controls that have been designed and get the ball with good accuracy using the Position Based Visual Servoing (PBVS) method.*

## Keywords:

PBVS

Wheeled Soccer Robot

Omni Camera

## Penulis Korespondensi:

Febby Ayu Salsabilla

Jurusan Teknik Elektro

Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno Hatta No. 9 Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65141.

Email: [febbyasalsab@gmail.com](mailto:febbyasalsab@gmail.com)



## 1. PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan zaman, perkembangan teknologi dalam dunia industri berkembang secara pesat. Salah satunya adalah teknologi di bidang robotika. Robot mempunyai peranan yang sangat penting karena mampu mempermudah pekerjaan manusia dalam sehari - hari [1]. Perkembangan teknologi saat ini telah menampilkan berbagai bentuk robot yang diterapkan dalam dunia industri [2]. Berbagai ajang perlombaan di bidang robotika telah banyak dijumpai, contohnya adalah robot sepak bola beroda. Pada pertandingan robot sepak bola beroda, robot harus menendang bola ke gawang musuh. Sementara itu, sebelum menendang bola robot harus mendapatkan bola berdasarkan posisi bola berada. Supaya robot bisa menjalankan peranannya dengan baik, perlu adanya informasi mengenai area sekitar beserta bidang kerjanya sebagai sinyal masukan [3], [4]. Sistem kontrol untuk *feedback* menggunakan sinyal input menentukan robot agar dapat bergerak dengan benar dan efektif. Sinyal masukan atau input berupa data gambar (*image*) dari objek target yang didapatkan dari kamera yang terpasang pada badan robot. Data gambar tersebut kemudian diubah menjadi informasi tentang koordinat posisi dan orientasi (*pose*) objek terhadap *pose* kamera. Dalam hal ini, metode *position based visual servoing* digunakan sebagai sinyal kontrol umpan balik.

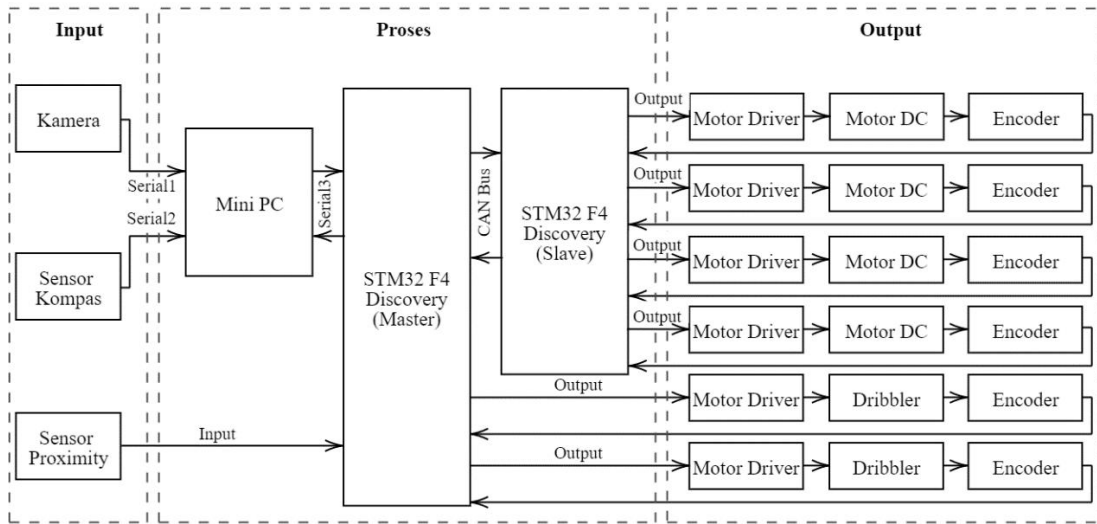
*Position Based Visual Servoing* melakukan proses dengan cara pencarian posisi objek yang dibaca dari kamera sehingga dapat diikuti pergerakannya, seperti pada percobaan [5] yang mengembangkan matriks independen untuk menyelesaikan masalah *visual servoing* bagi robot manipulator menggunakan kamera *eye-in-hand*. Umumnya terdapat tiga jenis *visual servoing*: *position based visual servoing (PBVS)*, *image based visual servoing (IBVS)*, dan *hybrid visual servoing* [6]. Dalam [7], *hybrid visual servoing* terdiri dari pendekatan berbasis gambar dan PBVS untuk menangani masing – masing pekerjaan pengambilan dan penempatan objek. Selain memperhatikan teknik *visual servoing*, teknik pengambilan gambar dengan kamera untuk mendeteksi objek juga diperlukan untuk metode pendukung. Segmentasi citra merupakan salah satu tahapan sebelum mendeteksi objek dengan cara mengklasifikasikan setiap *pixel* pada citra [8], hal tersebut dapat digunakan pada penelitian ini untuk menentukan posisi dari robot. Menentukan posisi robot dapat diminalisir menggunakan *rotary encoder* dan kamera, karena sensor kompas digital saja tidak cukup untuk mengurangi *error* yang terpengaruh karena adanya slip dan menyebabkan nilai *error* yang terintegralkan semakin lama semakin besar [9]. Penelitian [10] mengontrol pergerakan robot dan algoritma skema kontrol berbasis model dengan formula *inverse kinematic* yang dikembangkan. Pada penelitian ini, diharapkan robot sepak bola beroda melakukan pergerakan ke posisi target yang ingin didekati dengan meningkatkan akurasi keseluruhan sistem atau yang dikenal dengan *visual servoing*.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Diagram Blok Sistem

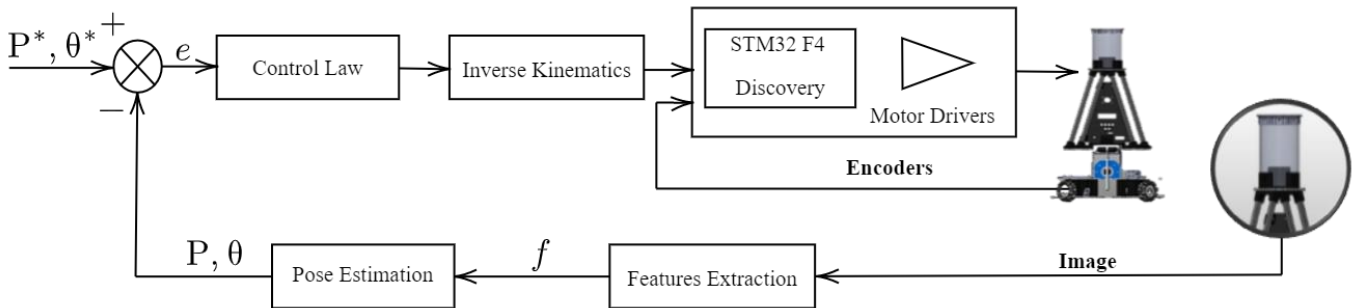
Diagram blok sistem adalah sebuah diagram yang menjelaskan alur setiap komponen yang berperan sebagai input, proses, dan juga output. Pada Gambar 1, terdapat sebuah input kamera yang digunakan untuk memperoleh data koordinat objek sebagai masukan input berupa nilai  $x$ ,  $y$  dan  $\theta$ . Input kamera dikirim ke Mini PC menggunakan komunikasi serial. Pada sensor kompas BNO055, menggunakan protokol komunikasi serial dalam pengoperasiannya untuk arah hadap atau sudut robot terhadap sumbu  $z$ . Input sensor kompas BNO055 dikirim ke Mini PC menggunakan komunikasi serial. Dan sensor proximity, digunakan untuk mendeteksi apakah bola sudah didapatkan. Lalu pada bagian proses terdapat mini PC, digunakan untuk memproses bagian *high control* pada robot. Mini PC mendeteksi bola pada kamera omni, memproses nilai koordinat objek yang dideteksi, selanjutnya mengirim masing – masing nilai pada setiap motor. STM32 F4 Discovery, digunakan sebagai *master* untuk robot dengan mengolah data yang telah dikirim Mini PC melalui USB serial. Master ini digunakan untuk menjalankan bagian motor dribbler dan *interface* robot. STM32 F4 Discovery sebagai *slave* digunakan untuk menjalankan bagian motor DC dan menerima nilai Encoder tiap – tiap motor utama. Komunikasi antara *master* dengan *slave* menggunakan CAN Bus. Pada bagian outputnya terdapat *motor driver*, yang digunakan untuk mengubah sinyal PWM dari mikrokontroler menjadi tegangan DC untuk suplai motor. *Motor driver* juga bisa untuk mengontrol kecepatan dan arah motor. Motor DC (utama), digunakan sebagai penggerak utama roda omni, dan dribbler digunakan untuk menggiring bola, serta encoder berfungsi untuk memberikan nilai *feedback* putaran motor pada mikrokontroler.





Gambar 1: Diagram Blok Sistem

## 2.2 Diagram Blok Kontrol



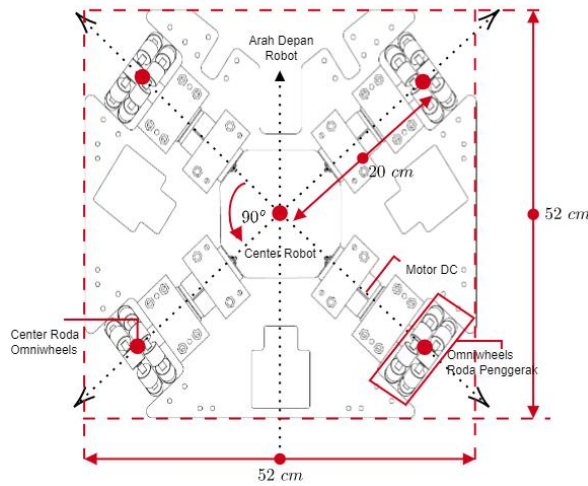
Gambar 2: Diagram Blok Kontrol

Gambar 2 merupakan diagram blok kontrol dengan metode *Position Based Visual Servoing*. Dalam diagram blok kontrol, terdapat *control law* sebagai pendekatan ekponensial dengan konversi proporsional yang kemudian diteruskan ke *inverse kinematics*. Pada *inverse kinematics*, terdapat algoritma kinematik untuk mengirim sinyal menuju mikrokontroler yaitu STM32 F4 Discovery untuk diolah datanya dan mengirimkan sinyal PWM ke *motor driver*. *Motor driver* tersebut sebagai *power amplifier* yang digunakan untuk menggerakkan aktuator motor DC karena keluaran dari *motor driver* berupa sinyal tegangan. Setelah aktuator motor bergerak, otomatis robot juga akan bergerak. Pergerakan robot terbaca oleh encoder, seperti berapa derajat putarannya (RPM) yang kemudian dikembalikan menuju kontroler STM32 F4 Discovery. Peletakkan kamera yang berada di bodi robot menyebabkan perubahan gambar yang ditangkap. Gambar yang di *capture* oleh kamera menghasilkan gambar digital yang mewakili objek yang di *tracking*. Objek tersebut diekstraksi untuk diambil fiturnya. Syarat dari fitur minimal dapat dideferensialkan 1 kali. Sehingga dalam kasus ini yang terdiferensialkan adalah posisi dari objek yang berpindah tempat, seperti berapa kecepatan di sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ . Simbol dari  $f$  merupakan fitur yang sudah diekstraksi  $f(x,y)$ . Satuan dari fitur tersebut adalah piksel. Kemudian diukur seberapa jauh objek dari kamera robot dan diestimasi jaraknya menggunakan *pose estimation* sehingga diketahui jaraknya berupa meter. Simbol  $P$  dan  $\theta$  merupakan posisi  $(x,y)$  dan orientasi (arah hadap) aktual robot saat ini, sedangkan simbol  $P^*$  dan  $\theta^*$  merupakan posisi  $x^*,y^*$  dan orientasi (arah hadap)  $\theta^*$  yang ingin dituju robot. Nilai tersebut dijadikan *feedback* dan dibandingkan dengan *setpoint* yang kemudian didapatkan nilai *error*.

## 2.3 Perancangan Mekanik



Pada penelitian ini, robot yang dirancang menggunakan 4 buah roda *omniwheels*. Perancangan *base* robot merupakan bagian yang terpenting dari robot beroda. Pada *base* robot masing-masing memiliki sudut pemasangan motor sebesar  $90^{\circ}$  seperti pada Gambar 3.



Gambar 3: *Base* Robot Beroda

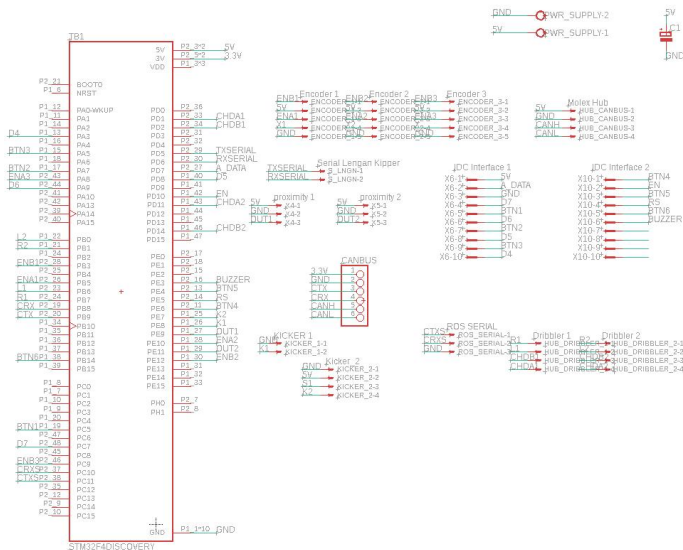
Jarak titik tengah robot dengan titik tengah roda sebesar 20 cm, dan masing-masing roda memiliki diameter 10 cm, serta jari - jari sebesar 5 cm. Total dimensi maksimal dari base robot sebesar 52 cm x 52 cm. Bagian depan dari base robot dipasang 2 buah roda omni wheels dengan jari - jari sebesar 2.43 cm. Sehingga secara keseluruhan terdapat 2 jenis roda omni wheels yang digunakan pada robot, yaitu 4 buah omni wheels dengan jari - jari sebesar 5 cm yang dipasang sebagai roda penggerak, dan 2 buah roda omni wheels yang dipasang sebagai dribbler bola.

## 2.4 Perancangan Elektronik

### Spesifikasi Elektrik

1. Catu daya : Baterai Lipo 11.1 v 3S 5200 mAh
2. Jenis mikrokontroler : STM32 F4 Discovery
3. Jenis LCD : LCD 16 x 2
4. Jenis sensor : Sensor Kompas BNO055
5. Jenis aktuator : Motor DC Geared

Perancangan *main board* pada robot seperti pada Gambar 4.



Gambar 4: Perancangan *Main Board*



### 2.5 Pendeteksian Posisi Bola Menggunakan Kamera Omni

Pendeteksian warna bola yang didapatkan mengakibatkan bola mempunyai titik tengah dari *pixel* gambar yang telah terkalibrasi. Sehingga data *pixel* gambar yang sudah terkalibrasi tersebut dapat dicari nilai jarak dari bola ke titik tengah kamera, dengan cara menggunakan persamaan berikut:

$${}^R l_b = \sqrt{(x_{mid} - x_b)^2 + (y_{mid} - y_b)^2} \tag{1}$$

$$\theta_b = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}{\|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{v}\|} \right) \tag{2}$$

$${}^R x_b = {}^R l_b \cos(\theta_b) \tag{3}$$

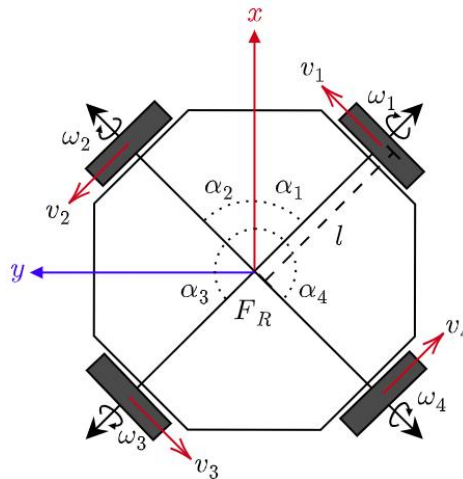
$${}^R y_b = {}^R l_b \sin(\theta_b) \tag{4}$$

Dimana,

- $\mathbf{u} = [0, 240]^T$ , merupakan selisih antara *pixel* dari arah hadap kamera dengan titik tengah kamera.
- $\mathbf{v} = [(x_{mid} - x_b) + (y_{mid} - y_b)]^T$ , merupakan selisih antara pixel dari titik tengah kamera dengan *pixel* titik tengah bola.
- $l_b$ , merupakan jarak antara bola dengan titik tengah kamera dalam satuan meter.
- $\theta_b$ , merupakan sudut *bearing* antara arah hadap kamera dengan bola.
- $[{}^R x_b, {}^R y_b]^T$ , merupakan titik koordinat bola terhadap robot dalam satuan meter.

### 2.6 Perancangan Kontrol Kinematik Robot Beroda dengan 4 Roda *Omnivheels*

Perancangan kinematik robot beroda menggunakan 4 buah roda *omnivheels* seperti pada Gambar 5.



Gambar 5: Perancangan *Frame* Robot Beroda dengan 4 Roda *Omnivheels*

Berdasarkan spesifikasi yang digunakan pada robot, nilai - nilai parameter yang digunakan yaitu:

- $\alpha_1 = 45^\circ$  (sudut antara titik tengah roda 1 robot dengan *frame* mekanik robot).
- $\alpha_2 = 135^\circ$  (sudut antara titik tengah roda 2 robot dengan *frame* mekanik robot).
- $\alpha_3 = -45^\circ$  (sudut antara titik tengah roda 3 robot dengan *frame* mekanik robot).
- $\alpha_4 = -135^\circ$  (sudut antara titik tengah roda 4 robot dengan *frame* mekanik robot).
- $l = 0.2$  m (jarak antara titik tengah robot dengan titik tengah roda).
- $r = 0.05$  m (jari - jari roda robot).

Sehingga *Jacobian* persamaan kinematiknya sebagai berikut:

$${}^R J_R(t) = r \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \cos(\alpha_2) \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) \\ \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_2) \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) \\ \frac{1}{l} & \frac{1}{l} & \frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \tag{5}$$



Jika robot semakin mendekati objek atau posisi bola berada, tentunya kecepatan robot akan semakin berkurang mendekati titik minimal kecepatannya, yang dituliskan menggunakan pendekatan error dan didapatkan rumus seperti berikut:

$$\dot{\xi}_R(t) = \lambda E(t) \tag{6}$$

Didapatkan hasil akhir berupa *invers velocity kinematic* untuk mengetahui nilai kecepatan dari masing – masing roda penggerak supaya bisa sampai ke posisi tujuan.

$$\omega(t) = \lambda^R J_R^{-1}(t) E(t) \tag{7}$$

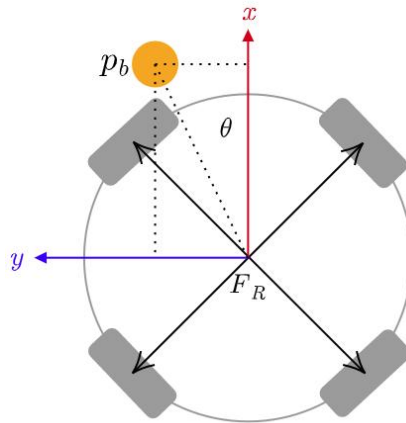
$$= \lambda^R J_R^{-1}(t) (\xi_R^*(t) - \xi_R(t)) \tag{8}$$

Dalam mengontrol kinematik robot beroda dengan 4 roda *omniwheels* ini, tujuannya yaitu posisi dari bola terhadap robot. Dikatakan posisi bola merupakan posisi terhadap *frame* robot ( $F_R$ ). Sehingga robot memiliki posisi tujuan berupa jarak terhadap bola seperti Gambar 6, dengan rumus:

$$\mathbf{p}_b^*(t) = [x_b^*(t), y_b^*(t), \theta_b^*(t)]^T \tag{9}$$

Kemudian posisi bola terhadap robot secara aktual dituliskan sebagai:

$$\mathbf{p}_b(t) = [x_b(t), y_b(t), \theta_b(t)]^T \tag{10}$$



Gambar 6: *Frame* Robot Berdasarkan Posisi Bola

Dengan menggunakan pendekatan *error*, dapat disubstitusikan nilai  $\mathbf{p}_b^*(t)$  dan  $\mathbf{p}_b(t)$  dengan mengganti  $J_R^{-1}(t)$  menjadi  ${}^R J_R^{-1}(t)$ .

$$\begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \omega_3(t) \\ \omega_4(t) \end{bmatrix} = 0.05\lambda \begin{bmatrix} \cos(45^\circ) & \cos(135^\circ) & \cos(-45^\circ) & \cos(-135^\circ) \\ \sin(45^\circ) & \sin(135^\circ) & \sin(-45^\circ) & \sin(-135^\circ) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} x_b(t) \\ y_b(t) \\ \theta_b(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_b^*(t) \\ y_b^*(t) \\ \theta_b^*(t) \end{bmatrix} \right) \tag{11}$$

$$\omega(t) = \lambda^R J_R^{-1}(t) (\mathbf{p}_b(t) - \mathbf{p}_b^*(t)) \tag{12}$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengujian Akurasi Mendapatkan Bola

Pengujian akurasi mendapatkan bola menggunakan kontrol kinematik untuk pergerakan robotnya seperti yang dijelaskan pada Bagian 2.6. Pada pengujian ini, akan diuji respon kontrol dari kinematik dengan simulasi dan secara *real-time*. Awal mulanya, robot akan diberikan titik tujuan berupa posisi bola terhadap *frame* robot (0,0), kemudian robot akan bergerak sampai mendapatkan bola. Pengujian dilakukan dengan melihat respon robot



terhadap posisi bola yang terdeteksi, sehingga pengujian respon kontrol kinematik berdasarkan posisi bola dari simulasi akan dibandingkan dengan pengujian secara *real-time*.

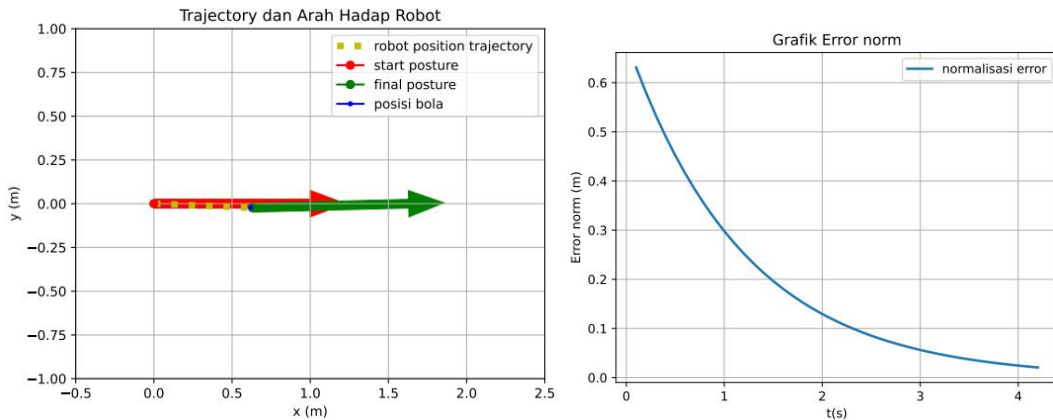
**3.1.1 Pengujian Secara Simulasi**

Pengujian respon kinematik untuk akurasi mendapatkan bola secara simulasi, dilakukan robot akan mendatangi bola berdasarkan *frame* robot (0,0). Diberikan posisi awal bola dan robot akan bergerak ke arah bola sesuai Tabel 1.

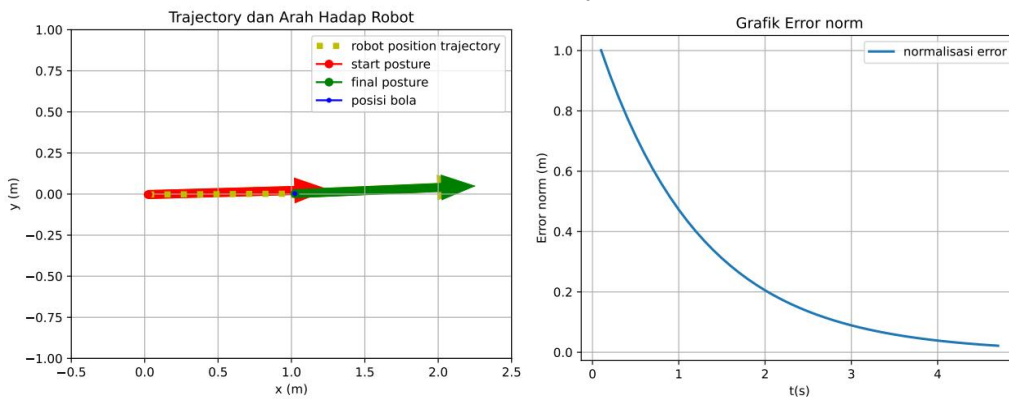
Tabel 1. Posisi Bola Sebagai Uji Coba Respon Simulasi

Posisi Bola	$x_b$	$y_b$	$\theta_b$
Posisi 1	0.62 m	-0.022 m	0.022 (rad)
Posisi 2	1.023 m	0.024 m	0.037 (rad)
Posisi 3	0.953 m	-0.16 m	-0.122 (rad)
Posisi 4	1.007 m	0.46 m	0.27 (rad)

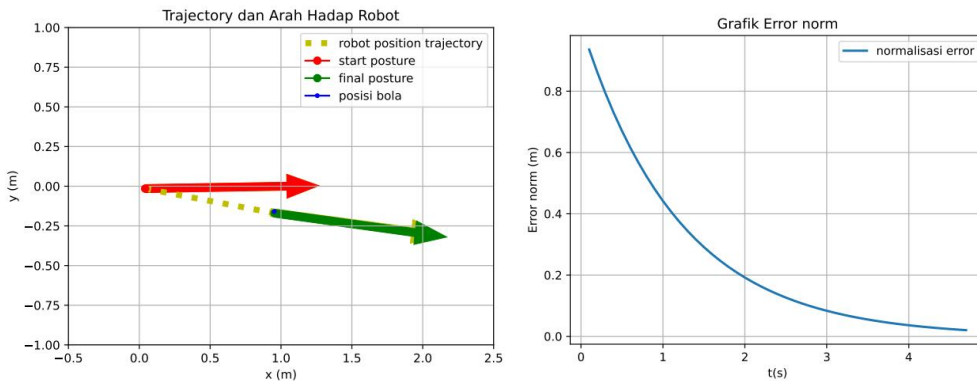
Berikut adalah hasil respon dari simulasi kinematiknya

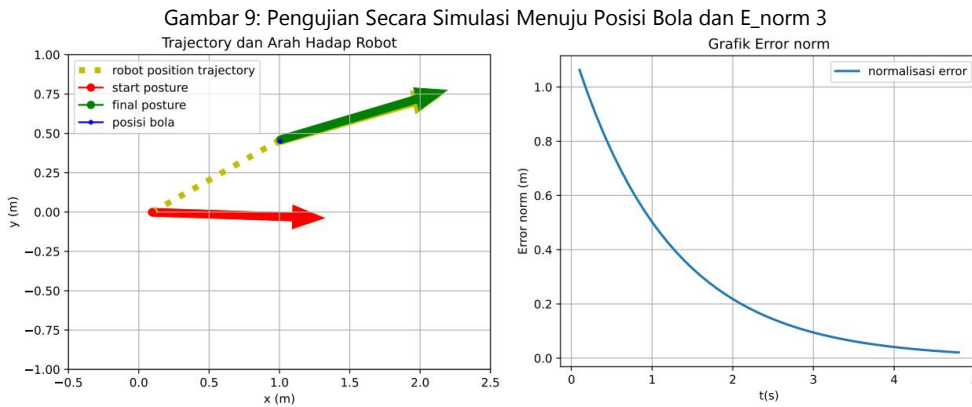


Gambar 7: Pengujian Secara Simulasi Menuju Posisi Bola dan E\_norm 1

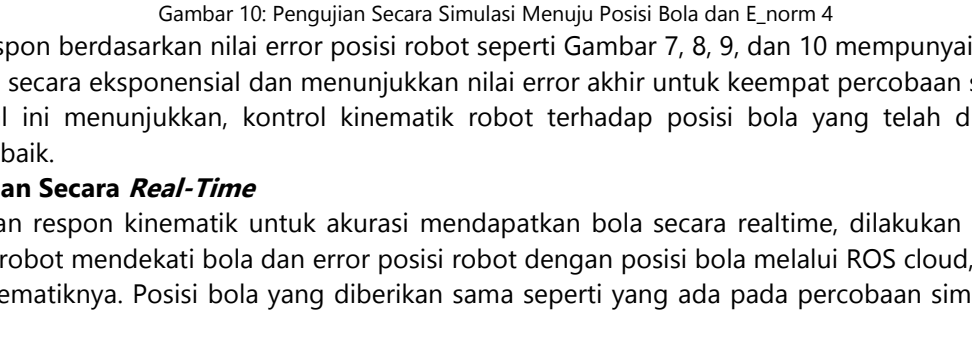


Gambar 8: Pengujian Secara Simulasi Menuju Posisi Bola dan E\_norm 2





Gambar 9: Pengujian Secara Simulasi Menuju Posisi Bola dan E\_norm 3

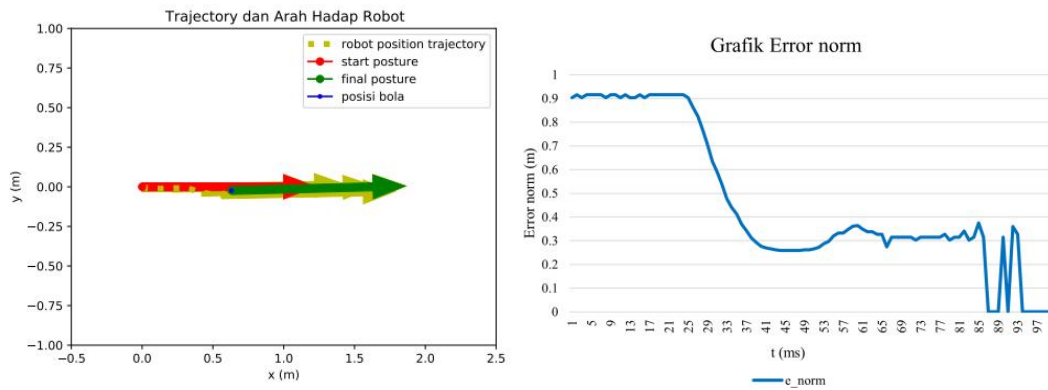


Gambar 10: Pengujian Secara Simulasi Menuju Posisi Bola dan E\_norm 4

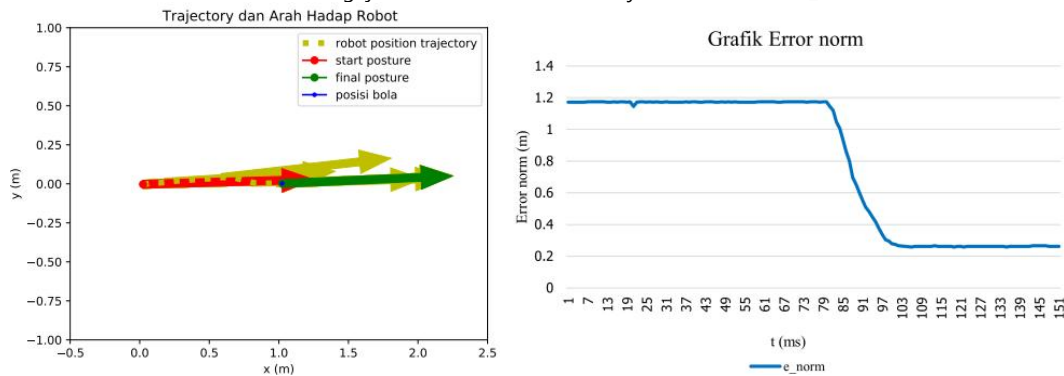
Hasil respon berdasarkan nilai error posisi robot seperti Gambar 7, 8, 9, dan 10 mempunyai nilai respon yang baik, error turun secara eksponensial dan menunjukkan nilai error akhir untuk keempat percobaan simulasi berada di bawah 0.02. Hal ini menunjukkan, kontrol kinematik robot terhadap posisi bola yang telah dirancang, mampu bekerja dengan baik.

**3.1.2 Pengujian Secara Real-Time**

Pengujian respon kinematik untuk akurasi mendapatkan bola secara realtime, dilakukan dengan merekam data saat posisi robot mendekati bola dan error posisi robot dengan posisi bola melalui ROS cloud, kemudian di plot hasil respon kinematiknya. Posisi bola yang diberikan sama seperti yang ada pada percobaan simulasi pada bagian sebelumnya.



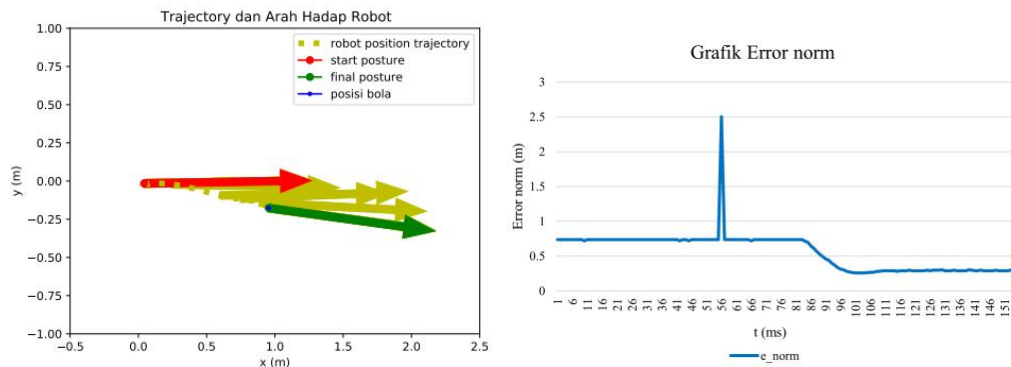
Gambar 11: Pengujian Secara Real-Time Menuju Posisi Bola dan E\_norm 1



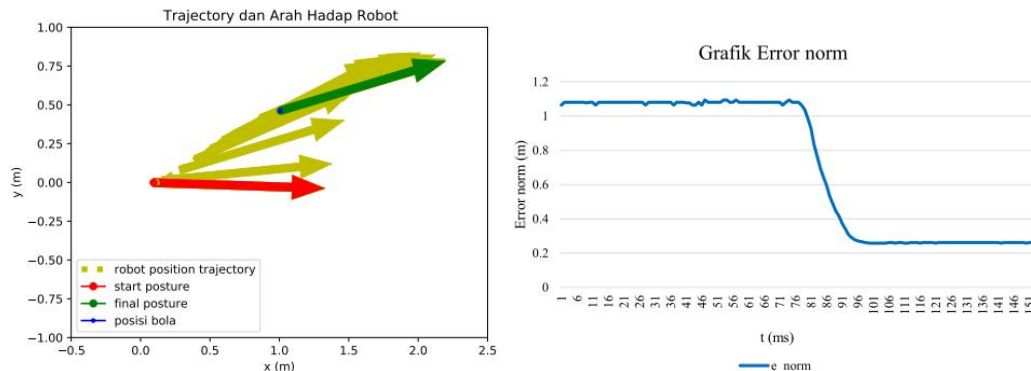
Gambar 12: Pengujian Secara Real-Time Menuju Posisi Bola dan E\_norm 2







Gambar 13: Pengujian Secara *Real-Time* Menuju Posisi Bola dan  $E_{norm}$  3



Gambar 14: Pengujian Secara *Real-Time* Menuju Posisi Bola dan  $E_{norm}$  4

Hasil pengujian secara real time pada Gambar 11, 12, 13, dan 14 menunjukkan bahwa robot mampu bergerak mendekati bola sesuai dengan set point yang telah ditentukan, hal ini dibuktikan dengan rata-rata nilai RMSEnya sebesar 0.2, dan menunjukkan bahwa robot mampu bergerak mendekati bola dengan baik, menggunakan kontrol kinematik yang telah didesain

#### 4. KESIMPULAN

Hasil pengujian respon menggunakan 4 buah roda omniwheels dengan kontrol kinematik sebagai pergerakan robot, robot mampu mendapatkan bola berdasarkan posisi bola yang diinginkan. Hasil respon sistem berdasarkan nilai error posisi robot terhadap posisi robot memiliki nilai respon yang bagus, Hasil pengujian secara real-time menunjukkan bahwa robot mampu bergerak mendekati bola sesuai dengan set point yang telah ditentukan, hal ini dibuktikan dengan rata-rata nilai RMSEnya sebesar 0.2. Berdasarkan hasil tersebut, menunjukkan bahwa robot mampu bergerak mendekati bola dengan baik menggunakan kontrol kinematik yang telah didesain dan mendapatkan bola dengan akurasi yang baik menggunakan metode Position Based Visual Servoing (PBVS).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Budi Prianggodo and R. Nur Rohmah, "PERANCANGAN OBJECT TRACKING ROBOT BERBASIS IMAGE PROCESSING MENGGUNAKAN RASPBERRY PI," 2016.
- [2] B. E. Nugraha and R. S. Gutami, "LOGARITHMUS: KIT ROBOT EDUKASI SCIENCE, TECHNOLOGY, ENGINEERING AND MATHEMATICS (STEM) UNTUK MENYONGSONG "MERDEKA BELAJAR," in *Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Bidang Ilmu Komputer dan Aplikasinya*, 2020, pp. 36–46.
- [3] J. S. Budiman, R. L. Desvabrahma, I. H. Ayega, and T. A. Tamba, "Sistem Penentuan Lokasi Objek Target Untuk Manipulator Lengan Robot Berbasis Sensor Penglihatan Biaya Rendah," *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 14, no. 1, pp. 21–30.
- [4] H. Shi, J. Chen, W. Pan, K.-S. Hwang, and Y.-Y. Cho, "Collision avoidance for redundant robots in position-based visual servoing," *IEEE Syst J*, vol. 13, no. 3, pp. 3479–3489, 2018.
- [5] H. Wang, D. Guo, H. Xu, W. Chen, T. Liu, and K. K. Leang, "Eye-in-hand tracking control of a free-floating space manipulator," *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 53, no. 4, pp. 1855–1865, 2017.



- [6] H. Shi, X. Li, K.-S. Hwang, W. Pan, and G. Xu, "Decoupled visual servoing with fuzzy Q-learning," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 1, pp. 241–252, 2016.
- [7] C.-Y. Tsai, C.-C. Wong, C.-J. Yu, C.-C. Liu, and T.-Y. Liu, "A hybrid switched reactive-based visual servo control of 5-DOF robot manipulators for pick-and-place tasks," *IEEE Syst J*, vol. 9, no. 1, pp. 119–130, 2014.
- [8] A. A. R. Stone, N. Suciati, and D. A. Navastara, "Segmentasi Citra pada Robot Sepak Bola Beroda Menggunakan Multilayer Neural Network dan Fitur Warna HSV," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, no. 2, pp. A276–A281, 2018.
- [9] A. Rachmawan, "Penentuan Posisi Robot Sepak Bola Beroda Menggunakan Rotary Encoder dan Kamera," *Undergraduate Thesis, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*, 2017.
- [10] I. Siradjuddin, G. Azhar, S. Wibowo, F. Ronilaya, C. Rahmad, and R. Erfan, "A General Inverse Kinematic Formulation and Control Schemes for Omnidirectional Robots," *Engineering Letters*, vol. 29, p. 1, 2022.

