

Omnidirectional Camera untuk Positioning Robot Soccer dengan Metode 2-Fixed-Point

Arif Irwansyah¹, Arie Zuliyah Putra², Reesa Akbar³

Program Studi Teknik Elektronika,
Jurusan Teknik Elektro,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia
¹arif@pens.ac.id, ²arieputra2807@gmail.com, ³reesa@pens.ac.id

Abstrak

Kamera omnidireksional banyak digunakan sebagai sensor utama pada robot soccer yang bertanding dalam kompetisi *Robocup Junior League*. Hal ini dikarenakan kamera omnidireksional mampu menangkap gambar dari area sekitar robot pada sudut pandang 360 derajat hanya dalam satu frame gambar. Selanjutnya, informasi dari gambar tersebut dapat digunakan untuk menentukan lokasi robot di lapangan. Lokasi yang didapat merupakan data yang sangat penting sebagai dasar untuk menentukan kontrol, strategi, dan koordinasi robot. Pada penelitian ini, sebuah sistem kamera omnidireksional untuk *self localization robot soccer* dengan metode *2 fixed-point* telah berhasil diimplementasikan. Sistem yang dirancang berhasil mendapatkan gambar 360 derajat disekitar robot, sekaligus lokasi robot dilapangan. Dari hasil pengujian, sistem yang dirancang telah berhasil melakukan self localization dengan tingkat akurasi hingga 92,9 persen pada sumbu x dan 92,1 persen pada sumbu y.

Kata kunci: omnidireksional, self localization, 2 fixed-point, robot soccer

Abstract

Omnidirectional cameras are widely used as the main sensor in soccer robots that compete in the Robocup Junior League competition. This is because the omnidirectional camera is capable of capturing images of the area around the robot at a 360 degree viewing angle in just one image frame. Furthermore, the information from the image can be used to determine the location of the robot in the field. The location obtained is very important data as a basis for determining robot control, strategy and coordination. In this study, an omnidirectional camera system for self-localization robot soccer with 2 fixed-point methods has been successfully implemented. The designed system succeeded in getting a 360 degree image around the robot, as well as the location of the robot in the field. From the test results, the designed system has succeeded in self-localization with an accuracy rate of up to 92.9 percent on the x-axis and 92.1 percent on the y-axis.

Keywords: omnidirectional, self localization, 2 fixed-point, robot soccer

1. Pendahuluan

Robot soccer merupakan jenis robot yang dirancang untuk memainkan permainan sepak bola dengan mengikuti aturan yang telah ditentukan. Untuk dapat mengatur strategi dan mengendalikan gerakan robot, robot sepak bola dilengkapi dengan beberapa jenis sensor. Salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengumpulkan informasi

adalah kamera. Data gambar yang diambil oleh kamera akan diproses menggunakan metode pengolahan citra (*image processing*) agar dapat diubah menjadi informasi yang berguna. Informasi yang dihasilkan akan diproses menggunakan algoritma kecerdasan buatan pada setiap robot untuk pengambilan keputusan. Dengan begitu, robot sepak bola dapat mengejar target dan menghindari halangan dengan kemampuan yang dimilikinya.

Pada penelitian ini, difokuskan pada perancangan sistem menggunakan kamera omnidireksional untuk menentukan posisi robot terhadap lapangan pada *Robocup Junior Soccer*. Kamera yang digunakan sebagai sensor utama adalah kamera omnidireksional. Sejumlah penelitian terkait pada implementasi kamera omnidireksional untuk robot diantaranya adalah penggunaan kamera omnidireksional pada makalah yang dibuat oleh Liu dkk [1] yang memanfaatkan kamera omnidireksional untuk fungsi *visual homing*, yaitu suatu fungsi yang memungkinkan robot untuk bergerak kembali ke posisi referensi hanya dengan menggunakan informasi visual yang berbasis pada pencocokan *key points* pada gambar. Metode sejenis *scale-invariant feature transform* (SIFT) ini cenderung memerlukan proses komputasi yang cukup berat, sementara dalam *robot soccer* umumnya memerlukan proses komputasi yang relative ringan agar robot bisa merespon dengan cepat. Jamzad dkk [2] memaparkan perancangan dan konstruksi untuk membuat kamera omnidireksional sekaligus juga metode *self localization* pada *robot soccer* menggunakan metode referensi sudut dari beberapa landmark tetap di lapangan dan garis batas tegak lurus lapangan. Tidak ditampilkan hasil evaluasi keakuratan dari metode *self localization* yang digunakan. Gil Lopez dkk [3] memaparkan dengan rinci sejumlah jenis cermin dan kombinasinya untuk membentuk kamera omnidireksional yang optimal tetapi tidak menjelaskan implementasi metode *self localization*.

Lin dkk [4] menggunakan omnidireksional kamera dan metode *Feature Matching* untuk *localization* robot bergerak melalui lingkungan virtual yang disimulasikan. Robot yang dibuat berbasis *industrial PC* untuk menjalankan algoritma *Feature Matching*. Algoritma ini cukup berat apabila dijalankan pada *platform* umum di robot soccer. Disamping itu pengujian terkait akurasi metode *self localization* yang digunakan belum dilakukan. Sementara itu penelitian oleh V. -D. Hoang dkk [5] menggunakan kamera omnidireksional dan *2D LRF sensor* untuk melakukan *3D motion estimation* pada area *outdoor*.

Implementasi pada *Robocup Middle Size League* dengan kamera omnidireksional untuk *localization* dilakukan pada penelitian robot oleh I.K. Wibowo dkk [6] dan Nurrohmah dkk[7], kedua makalah memaparkan *robot soccer* bernama ERSOW yang menggunakan kamera omnidireksional. Pada makalah [6] tidak dijelaskan secara spesifik metode yang digunakan untuk *localization*, sementara *localization* pada makalah [7] menggunakan *X-junction detection* yang berbasis pada metode *Haar Cascade Classifier*. Hasil pendeteksian lokasi lebih baik ketika jarak X-junction ke robot kurang dari 230 cm. *Error* pada rentang jarak 50 cm – 230 cm kurang dari 8%. Namun pada jarak di atas 230 cm, kesalahan akan meningkat. Selanjutnya penelitian deteksi posisi obyek bola dan arah sudutnya untuk *robot soccer* menggunakan kamera omnidireksional dilakukan oleh A. K. Mulya dkk, [8] dan S. R. Santosa dkk [9].

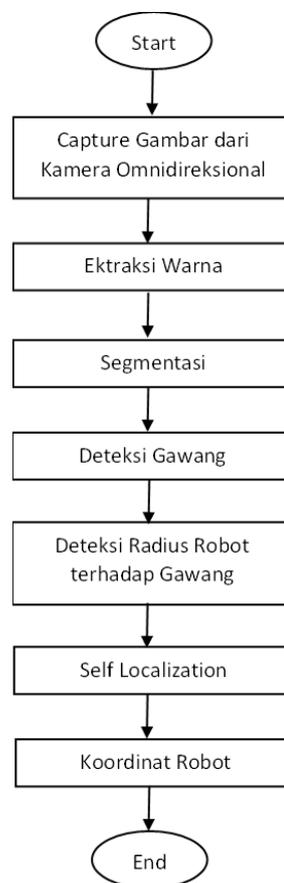
Sebagaimana penggunaan pada penelitian terkait sebelumnya, keunggulan dari kamera ini adalah dapat menangkap gambar sekitar dengan sudut pandang 360° hanya dalam satu frame. Sehingga, disamping mendapatkan informasi gambar disekeliling robot, lokasi dari robot tersebut juga dapat diperkirakan. *Self-localization* ini didapatkan

dengan menentukan posisi robot berdasarkan tanda-tanda dasar lapangan, seperti garis lapangan dan gawang. Salah satunya adalah sisi-sisi dan ujung dari gawang akan didapatkan dengan menggunakan minimum area dari gawang, kemudian dihitung koordinat perpotongan berdasarkan referensi yang ada untuk mendapatkan posisi robot.

Yang membedakan penelitian ini dibandingkan pada pekerjaan terkait pada penelitian *robot soccer* ERSOW [6] [7] adalah perancangan cermin omnidireksional yang lebih ringkas menyesuaikan *rule* dan ukuran lapangan *Robocup Junior Soccer*, serta penggunaan metode *2-fixed point* untuk mendapatkan lokasi robot di lapangan.

2. Metode

Sistem yang dibuat diimplementasikan dalam beberapa tahap, berikut merupakan tahapan dari sistem yang telah dibuat:

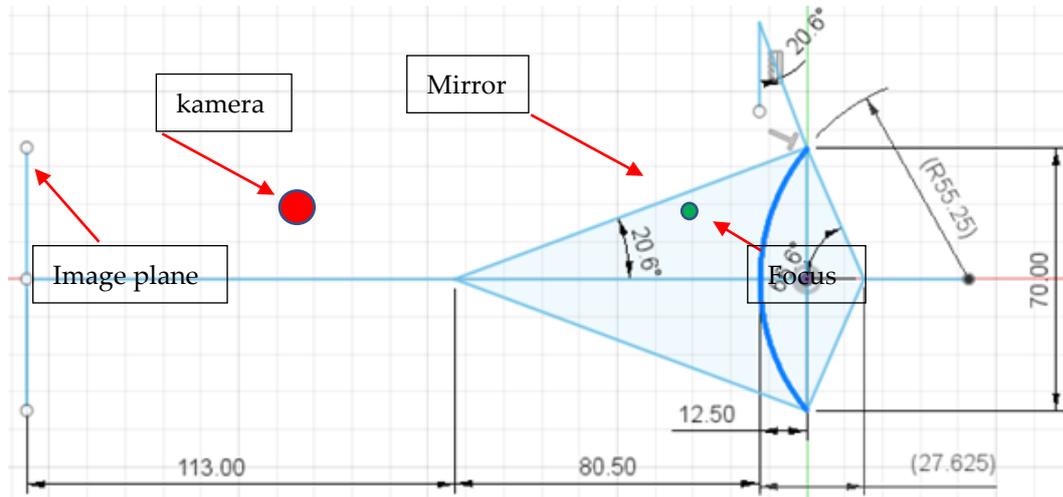


Gambar 1. Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan sistem yang akan dibuat secara keseluruhan. Kamera omnidireksional digunakan sebagai input yang akan menangkap gambar dalam sudut pandang 360°. Gambar yang dihasilkan kamera akan diekstraksi nilai warna pada pikselnya ke dalam *color space HSV* untuk dapat mendeteksi gawang. Hasil dari segmentasi akan digunakan untuk mencari minimum area dari objek sehingga dapat digunakan untuk mendapatkan radius jarak sisi-sisi gawang terhadap robot. Setelah radius jarak sisi gawang didapatkan robot akan melakukan *self localization* dengan metode *2 fixed-point* dan menghasilkan keluaran berupa koordinat (x,y) robot di lapangan.

2.1. Kamera dengan Cermin Omnidireksional

Robot soccer dirancang agar dapat melihat dengan jangkauan 360° di dalam lapangan. Sehingga digunakan cermin cembung yang akan merefleksikan gambar sekitar area robot. Gambar yang direfleksikan cermin akan ditangkap oleh kamera seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Perancangan Kamera Omnidireksional

Gambar 2, memperlihatkan desain dari kamera omnidireksional yang digunakan pada robot. Cermin cembung yang digunakan memiliki diameter 70 mm dan radius lengkungan 55,25 mm dengan jarak fokus pada cermin 27,625 mm. Cermin reflektor dipasang pada robot dengan jarak 80,5 mm dari kamera, sedangkan kamera yang terpasang pada robot berjarak 113 mm dari dasar lapangan.

2.2. Perancangan struktur dan cermin reflektor

Desain struktur pada robot disesuaikan dengan dimensi yang telah diatur pada aturan *Robocup Junior Soccer open*, dengan maksimal dimensi yang diperbolehkan adalah 22cm x 22cm x 22cm. Hasil rancangan sebagaimana terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain Robot dengan Cermin Reflektor

Desain pada robot menggunakan kamera webcam dan tidak menggunakan kit kamera omnidireksional yang sudah siap pakai, sehingga desain harus menyesuaikan kebutuhan dari jarak kamera dengan cermin reflektor yang digunakan, sehingga gambar yang dihasilkan cukup baik kualitasnya untuk dapat diolah. Jarak antar kamera dan

cermin reflektor pada robot yang dibuat adalah 9 cm. Pemasangan kamera dan cermin reflektor dapat dilihat pada gambar 3.

2.3. Ekstraksi Warna

Obyek yang harus dideteksi pada *robot soccer* memiliki warna yang unik dan cukup berbeda dari warna obyek lainnya. Keunikan warna ini dimanfaatkan dengan baik sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh R. A. Fatekha dkk [10]. Pada aturan *Robocup Junior League 2020-2022* [11], kondisinya adalah robot berwarna hitam dengan bola berwarna oranye yang terletak di atas lapangan hijau dengan garis putih, sedangkan warna gawang biru dan kuning. Perbedaan warna ini dimanfaatkan untuk segmentasi obyek. Ekstraksi warna dilakukan dalam *color space* HSV, *pseudo-code* proses merubah warna dari BGR ke HSV ditunjukkan pada Gambar 4.

```
_, frame = cap.read()
hsv_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)

#Berikutnya masking warna dari gawang:
low = np.array([h_min, s_min, v_min])
high = np.array([h_max, s_max, v_max])
mask = cv2.inRange(hsv_frame, low, high)
```

Gambar 4. Pseudo-code Proses Merubah Warna dari BGR ke HSV

2.4. Deteksi Area Gawang

Setelah mendapatkan perbedaan antara gawang dengan obyek lain dengan memanfaatkan informasi warna dari gawang, kemudian akan didapatkan minimal area dari gawang sehingga akan mempermudah untuk mendapatkan titik pada ujung dan tengah gawang yang akan digunakan sebagai *landmark* untuk lokalisasi pada robot. *Pseudo-code* untuk mendapatkan minimal area pada gawang ditunjukkan pada gambar 5.

```
contours, hierarchy = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for cnt in contours:
    area = cv2.contourArea(cnt)
    if (area > 800):
        rect = cv2.minAreaRect(cnt)
        box1 = cv2.boxPoints(rect)
        box = np.int0(box1)
        im = cv2.drawContours(frame, [box], 0, (0,0,255), 2)
```

Gambar 5. Pseudo-code untuk Mendapatkan Minimal Area pada Gawang

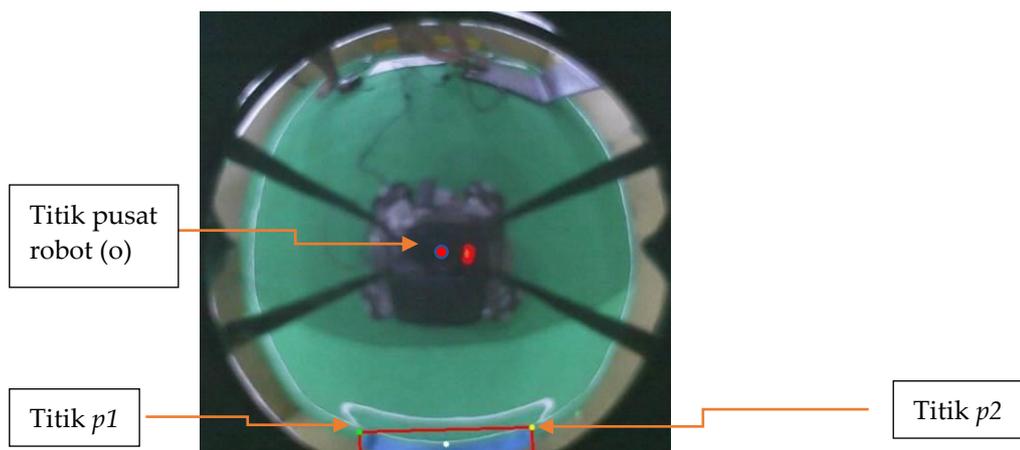
Hasil proses segmentasi dengan ekstraksi warna untuk mendapatkan area gawang ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat bahwasannya proses pengolahan citra yang dilakukan berhasil mendeteksi area gawang.

Gambar Input	Hasil Segmentasi	Gambar Input	Hasil Segmentasi

Gambar 6. Hasil Segmentasi untuk Deteksi Area Gawang

2.5. Jarak Robot Dengan Gawang

Setelah ujung-ujung gawang p1 dan p2 ditentukan maka dengan mengetahui posisi piksel dari setiap ujung gawang akan dapat diketahui jarak robot dari p1 dan p2. Dengan diketahui panjang dari gawang 60 cm maka jarak masing-masing p1 dan p2 yang akan selalu sama sehingga dapat dihitung jarak robot dari tengah maupun ujung gawang. Berikut perhitungan estimasi jarak robot terhadap masing-masing ujung gawang:



Gambar 7. Titik p1 dan p2 pada Kamera Omnidirectional

Gambar 7 menunjukkan titik koordinat p1 dan p2 pada gambar yang didapatkan robot, untuk mencari berapa piksel jarak antara p1 dan p2 digunakan rumus sebagai berikut:

Resultan piksel antar titik:

$$Zn^2 = Xn^2 + Yn^2 \tag{1}$$

Perhitungan nilai piksel per cm:

$$Z_{p1,p2}^2 = X_{p1,p2}^2 + Y_{p1,p2}^2 \tag{2}$$

$$\text{piksel per cm} = Z_{p1,p2} / 60 \tag{3}$$

sehingga jarak robot dari masing titik landmark:

$$\text{jarak} = Zn / \text{piksel per cm} \tag{4}$$

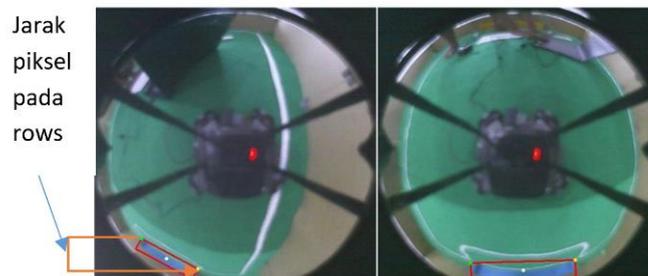
keterangan :

Zn = resultan antar koordinat piksel

Xn = selisih koordinat pixel x

Yn = selisih koordinat pixel y

Karena gambar yang didapatkan oleh robot terdistorsi oleh cermin yang cembung maka jarak estimasi yang didapatkan robot dari gawang akan mengalami perbedaan dengan jarak aslinya. Untuk itu dilakukan kompensasi terhadap jarak estimasi yang didapatkan oleh robot dari perhitungan, sebelum dimasukkan pada operasi *self localization*.

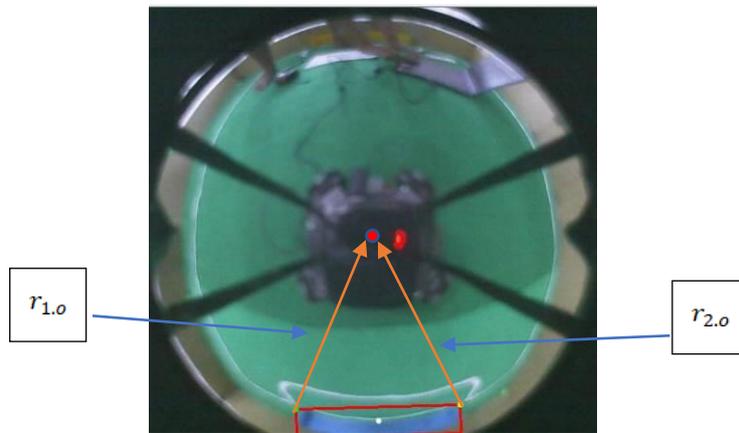


Gambar 8. Perbedaan Posisi Robot di Tengah dan Pinggir

Pada Gambar 8 dapat dilihat perbedaan saat robot berada di tengah dan di samping lapangan. Semakin robot ke samping maka akan ada selisih antara piksel *row* pada $p1$ dan $p2$. Dengan memanfaatkan selisih ini maka dapat dibedakan nilai pengurang saat robot di tengah dan di samping lapangan. Konstanta pengurang agar nilai radius tetap sesuai, berikut perhitungan yang digunakan:

$$\text{Konst pengurang} = \text{remaping}(r, \text{fn}(\text{maks}), \text{fn}(\text{min}), k(\text{min}), k(\text{maks})) \tag{5}$$

$$r = r - \text{Konst pengurang} \tag{6}$$



Gambar 9. Resultan $r_{1.o}$ dan $r_{2.o}$

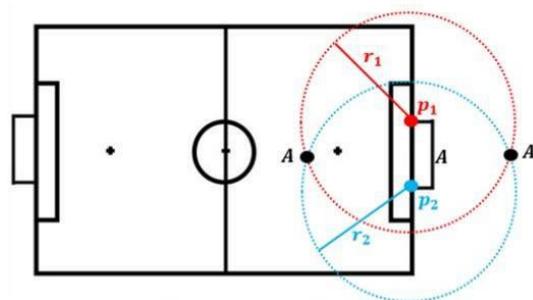
Pada Gambar 9. dapat dilihat ilustrasi dari resultan $r_{1.o}$ dan $r_{2.o}$. Untuk dapat menentukan jarak robot dari p_1 dan p_2 maka resultan dalam piksel yang telah didapatkan diubah ke dalam cm dengan membagi nilai resultan dengan nilai piksel per cm yang telah didapatkan sebelumnya. Berikut perhitungan yang digunakan:

$$\text{jarak} = (r_{1.o.2.o}) / \text{piksel per cm} \quad (7)$$

2.6. Self Localization dengan 2 fixed-point

Self-Localization adalah teknik yang digunakan untuk mengetahui koordinat robot dilapangan. Metode *localization* yang digunakan terinspirasi dari penelitian Hsu dkk [12] untuk robot soccer serta [13][14] untuk penggunaan wireless localization. Metode yang digunakan untuk penelitian kali ini adalah memanfaatkan 2 fixed-point sebagai acuan penentuan lokasi. Dengan memanfaatkan perpotongan dari 2 lingkaran untuk menemukan koordinat dari robot, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 10.

Lingkaran 1 merupakan lingkaran yang terbentuk dari titik p_1 dengan radius jarak robot r_1 . Sedangkan lingkaran 2 merupakan lingkaran yang terbentuk dari titik p_2 dengan radius jarak robot r_2 . Dari 2 lingkaran tersebut akan diperoleh titik perpotongan yaitu A dan A'. Titik perpotongan yang dipakai sebagai titik robot berada merupakan titik yang masih berada di dalam koordinat lapangan.



Gambar 10. Self-Localization Robot di Lapangan

Berikut merupakan perhitungan koordinat perpotongan 2 buah lingkaran, digunakan rumus sebagai berikut:

$$x_{1,2} = \frac{a+c}{2} + \frac{(c-a)(r_1^2 - r_2^2)}{2D^2} \pm 2 \frac{b-d}{D^2} \theta \quad (8)$$

$$y_{1,2} = \frac{b+d}{2} + \frac{(d-b)(r_1^2 - r_2^2)}{2D^2} \pm 2 \frac{a-c}{D^2} \vartheta \quad (9)$$

dimana

$$\vartheta = 1/4 \sqrt{(D + r_1 + r_2)(D + r_1 - r_2)(D - r_1 + r_2)(-D + r_1 + r_2)}$$

D = jarak lebar gawang

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dan Analisa dimaksudkan untuk mengetahui sejauh mana sistem yang dibuat ini dapat berjalan seperti yang diharapkan. Pada pengujian jarak robot terhadap masing-masing sisi lapangan dilakukan dengan menaruh robot pada beberapa titik yang berbeda dan kemudian hasil estimasi r1 dan r2 akan dibandingkan dengan jarak sesungguhnya.

Dapat dilihat hasil pada pengujian jarak robot dari masing-masing sisi gawang pada Tabel 1 dan Tabel 2, dimana pengujian dilakukan dari koordinat yang berbeda-beda di lapangan, didapatkan hasilnya error terkecil sekitar 1,04 persen (1 cm) dan error terbesar 3,70 persen (6 cm).

Tabel 1. Hasil Estimasi Jarak Robot Dari Sisi Kanan Gawang p2

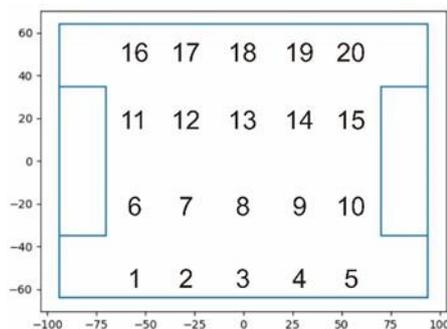
No	Koordinat (x,y) Robot di lapangan	Jarak Real Robot (cm)	Estimasi Jarak Dari Sisi Kanan (cm)	Error (%)
1	(-52,-54)	98	100	2,04
2	(-26,-20)	84	81	3,57
3	(0,-54)	124	120	3,22
4	(-26,54)	73	74	1,36
5	(0,54)	98	95	3,06
Rata-rata error				2,65

Tabel 2. Hasil Estimasi Jarak Robot Dari Sisi Kiri Gawang p1

No	Koordinat (x,y) Robot di lapangan	Jarak Real Robot (cm)	Estimasi Jarak Dari Sisi Kiri (cm)	Error (%)
1	(-52,-54)	51	50	1,96
2	(-26,-20)	72	74	2,77
3	(0,-54)	96	97	1,04
4	(-26,54)	108	104	3,70
5	(0,54)	125	122	2,40
Rata-rata error				2,37

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 yang merupakan hasil dari pengujian dapat dilihat error rata-rata r1 adalah 2,37 persen dan error rata-rata dari r2 adalah 2,65 persen. Pengujian *self localization* dilakukan untuk mengetahui keakuratan prediksi koordinat robot terhadap lapangan. Pengujian dibuat pada 20 titik yang tersebar di lapangan seperti pada Gambar 8. Koordinat (0,0) berada pada tengah lapangan, sedangkan untuk koordinat x negatif merupakan area gawang A (kiri) dan koordinat x positif merupakan area gawang B (kanan). Peletakan koordinat (0,0) pada tengah lapangan dikarenakan untuk memudahkan

perhitungan *self localization* dimana saat posisi robot pada area gawang A maka *self localization* dilakukan dengan mendeteksi parameter pada gawang A, sedangkan saat robot pada area gawang B robot melakukan *self localization* dengan mendeteksi parameter pada gawang B. Gambar 11 menunjukkan lokasi titik-titik peletakan robot untuk uji coba *self localization* dari robot.



Gambar 11. Posisi Titik Uji Self Localization

Tabel 3. Table Estimasi Koordinat Robot Terhadap Koordinat Sesungguhnya

No	Xr	Yr	xr	yr	Err x (cm)	Err y (cm)	% Err x	% Err y
1	-52	-54	-53	-47,4	1	6,6	1.9	12.2
2	-26	-54	-30	-52	4	2	15.4	3.7
3	0	-54	-0,4	-48,8	0,4	5,2	0.4	9.6
4	26	-54	22	-49	4	5	15.4	9.3
5	52	-54	50	-50	2	4	3.8	7.4
6	-52	-20	-53	-24	1	4	1.9	20.0
7	-26	-20	-18	-19,2	8	0,8	30.8	4.0
8	0	-20	-0,2	-18,1	0,2	1,9	0.2	9.5
9	26	-20	27,2	-22	1,2	2	4.6	10.0
10	52	-20	49	-18,3	3	1,7	5.8	8.5
11	-52	20	-50	17,5	2	2,5	3.8	12.5
12	-26	20	-25	18,8	1	1,2	3.8	6.0
13	0	20	-0,5	17,1	0,5	2,9	0.5	14.5
14	26	20	28,6	18,7	2,6	1,3	10.0	6.5
15	52	20	51	22	1	2	1.9	10.0
16	-52	54	-47	51,7	5	2,3	9.6	4.3
17	-26	54	-29	55	3	1	11.5	1.9
18	0	54	-2,5	54	2,5	0	2.5	0.0
19	26	54	24,5	52	1,5	2	5.8	3.7
20	52	54	48,5	51,5	3,5	2,5	6.7	4.6
Rata-rata					2,37	2,545	7.1	7.9

Keterangan :

Xr : koordinat x pada lapangan

Yr : koordinat y pada lapangan

xr : estimasi koordinat x pada lapangan

yr : estimasi koordinat y pada lapangan

Sebagaimana disajikan pada Tabel 3, pada penelitian ini *self localization* robot soccer telah dapat dicapai dengan hasil *error* rata sumbu x adalah 7,1 persen dan sumbu y adalah 7,9 persen. Dari pengerjaan yang telah dilakukan algoritma 2 *fixed-point* dapat berjalan dengan baik. Algoritma ini bekerja dengan menghasilkan 2 titik koordinat dari perpotongan 2 lingkaran yang terbentuk dari p1 dan p2. Kemungkinan penyebab *error* didapatkan dari distorsi cermin cembung (sebagaimana telah ditunjukkan pada gambar 8) belum secara sangat akurat dikompensasi oleh konstanta pengurang.

Dibandingkan dengan metode pada penelitian [6][7] yang mendapatkan *error* rata-rata 8 persen, hasil yang didapatkan pada metode 2 *fixed-point* ini relative setara secara akurasi. Meskipun perbandingan ini bisa jadi tidak mutlak dapat dibandingkan mengingat konstruksi kamera omnidireksional dan ukuran lapangan yang berbeda mengikuti kelas *robot soccer*, dimana [6][7] menggunakan *rule* dan lapangan untuk *Robocup Middle Size League*, sementara pada penelitian ini diimplementasikan untuk *Robocup Junior League* yang memiliki ukuran lapangan yang lebih kecil.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pemaparan dan pengujian sistem yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: Pada penelitian kali ini telah dijelaskan penggunaan metode 2 *fixed-point* untuk *self localization* yang dilakukan pada *robot soccer* untuk *Robocup Junior League*. Jarak radius robot dari masing-masing sisi gawang dapat ditentukan dengan menggunakan minimum area dari gawang, dan didapatkan rata-rata *error* 2,37 persen radius dari sisi kiri gawang, rata-rata *error* 2,65 persen dari sisi kanan gawang. *Self localization* dilakukan dengan menerapkan metode 2 *fixed-point* didapatkan rata-rata *error* sumbu x 7,1 persen dan sumbu y 7,9 persen.

Pada penelitian selanjutnya disarankan penggunaan kamera dengan kualitas yang lebih baik serta algoritma yang diterapkan pada *self localization* menambahkan satu referensi lagi berbasis garis lapangan untuk meningkatkan akurasi.

Daftar Pustaka

- [1] M. Liu, C. Pradalier & R. Siegwart (2013), "Visual Homing From Scale With an Uncalibrated Omnidirectional Camera," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, no. 6, pp. 1353-1365, Dec. 2013
- [2] Jamzad, M., Hadjkhodabakhshi, & A. Mirrokni, V (2007), "Object Detection and Localization Using Omnidirectional Vision in the Robocup Environment". In Scientia Iranica 14(6). November. 2007.
- [3] Lopes, G., Ribeiro, F., Pereira, N. (2012). Catadioptric System Optimisation for Omnidirectional RoboCup MSL Robots. In: Röfer, T., Mayer, N.M., Savage, J., Saranlı, U. (eds) RoboCup 2011: Robot Soccer World Cup XV. RoboCup 2011. Lecture Notes in Computer Science(), vol 7416. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [4] Lin, H.-Y.; He, C.-H. Mobile Robot Self-Localization Using Omnidirectional Vision with Feature Matching from Real and Virtual Spaces. Appl. Sci. 2021, 11, 3360.
- [5] V. -D. Hoang and K. -H. Jo (2016), "A Simplified Solution to Motion Estimation Using an Omnidirectional Camera and a 2-D LRF Sensor," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 12, no. 3, pp. 1064-1073, June 2016
- [6] Wibowo, I.K., Bachtiar, M.M., Ulil, R.T., Romadon, Z.T., Jauharul, M., & Khoirul, M. (2017), "Desain Omnidirectional Vision pada ERSOW". In 5 th Indonesian Symposium on Robotic Systems and Control.
- [7] E. A. Nurrohmah, B. Sena Bayu, M. M. Bachtiar, I. Kurnianto Wibowo & R. Adryantoro (2020), "Detecting Features of Middle Size Soccer Field using Omnidirectional Camera for Robot Soccer ERSOW," 2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA), 2020, pp. 1-6

- [8] A. K. Mulya, F. Ardilla & D. Pramadihanto (2016), "Ball tracking and goal detection for middle size soccer robot using omnidirectional camera," 2016 International Electronics Symposium (IES) pp. 432-437
- [9] S. R. Santosa, B. S. B. Dewantara, I. K. Wibowo (2019), "Ball Detection Under Variety Lighting using Omnidirectional Camera," 2019 International Electronics Symposium (IES), 2019, pp. 235-240
- [10] R. A. Fatekha, B. S. B. Dewantara & H. Oktavianto (2021), "Color Based Object Segmentation on Wheeled Goalkeeper Robot," 2021 International Electronics Symposium (IES), pp. 405-410
- [11] Georgia Gallant, Javier E. Delgado Moreno, Hikaru Sugiura, Marco Dankel, Felipe Nascimento Martins, & Marek Suppa "Robocup Junior Soccer Rules 2020-2022" from <http://junior.robotcup.org/previous-years-rules/>
- [12] Chen-Chien Hsu, Ching-Chang Wong, Hung-Chih Teng & Cheng-Yao Ho (2012) Dual-circle self-localization for soccer robots with omnidirectional vision, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 35:6, 619-631
- [13] Obeidat, H., Shuaieb, W., Obeidat, O. et al ((2021). A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies. Wireless Pers Commun 119, 289–327.
- [14] A. Maddumabandara, H. Leung and M. Liu (2015), "Experimental Evaluation of Indoor Localization Using Wireless Sensor Networks," in IEEE Sensors