

EVALUASI KALIBRASI KAMERA MONOKULAR TERHADAP AKURASI ESTIMASI POSE ArUco MARKER PADA ROBOT OMNIDIRECTIONAL

Panderaja Berutu

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: panderaja.22077@mhs.unesa.ac.id

Parama Diptya Widayaka

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: paramawidayaka@unesa.ac.id

Abstrak

Kalibrasi kamera merupakan tahap penting pada sistem vision berbasis ArUco Marker karena matriks kamera dan koefisien distorsi menentukan ketelitian estimasi pose marker. Penelitian ini mengevaluasi hasil kalibrasi kamera monokular dan hubungannya dengan akurasi estimasi posisi serta orientasi yaw pada robot omnidirectional. Metode penelitian meliputi akuisisi citra checkerboard, deteksi titik sudut, perhitungan matriks kamera dan koefisien distorsi menggunakan OpenCV, serta validasi melalui deteksi ArUco Marker dan estimasi pose. Kalibrasi dilakukan menggunakan checkerboard 10 x 7 dengan ukuran kotak 0,022 m dan 93 citra kalibrasi. Hasil kalibrasi menghasilkan galat reproyeksi sebesar 0,081185 piksel. Sistem vision bekerja pada resolusi 860 x 480 piksel dengan rata-rata 23,90 FPS atau interval pembaruan frame 41,8 ms. Validasi deteksi menunjukkan keberhasilan 100% pada jarak 30-120 cm dan sudut 0-60 derajat. Estimasi pose menghasilkan rata-rata galat posisi X sebesar 0,33 cm, jarak terhadap marker sebesar 7 cm, dan yaw sebesar 7,16 derajat. Hasil ini menunjukkan bahwa kalibrasi kamera yang diperoleh memadai untuk mendukung estimasi pose ArUco Marker sebagai umpan balik posisi robot pada rentang kerja tersebut, meskipun akurasi jarak dan yaw masih dipengaruhi oleh jarak marker, sudut pandang, dan distorsi perspektif.

Kata Kunci: ArUco Marker, kalibrasi kamera, estimasi pose, galat reproyeksi, robot omnidirectional.

Abstract

Camera calibration is an essential stage in an ArUco Marker-based vision system because the camera matrix and lens distortion coefficients determine the accuracy of marker pose estimation. This study evaluates monocular camera calibration and its relationship with position and yaw estimation accuracy for an omnidirectional mobile robot. The method consists of checkerboard image acquisition, corner detection, camera matrix and distortion coefficient calculation using OpenCV, and validation through ArUco Marker detection and pose estimation. The calibration used a 10 x 7 checkerboard with a square size of 0.022 m and 93 calibration images. The calibration produced a reprojection error of 0.081185 px. The vision system operated at 860 x 480 pixels with an average processing rate of 23.90 FPS, corresponding to a frame update interval of 41.8 ms. Detection validation achieved 100% success at distances of 30-120 cm and marker angles of 0-60 degrees. Pose estimation produced average errors of 0.33 cm for the X position, 7 cm for the marker distance, and 7.16 degrees for yaw. These results indicate that the obtained camera calibration is adequate to support ArUco Marker pose estimation as robot position feedback within the evaluated working range, although distance and yaw accuracy are still affected by marker distance, viewing angle, and perspective distortion.

Keywords: ArUco Marker, camera calibration, pose estimation, reprojection error, omnidirectional robot.

PENDAHULUAN

Robot bergerak omnidirectional membutuhkan informasi posisi yang akurat agar mampu mengoreksi gerak lateral, jarak, dan orientasi terhadap target. Pada sistem berbasis kamera, akurasi informasi posisi tidak hanya ditentukan oleh algoritma deteksi marker, tetapi juga oleh kualitas kalibrasi kamera. Kalibrasi diperlukan untuk memperoleh parameter intrinsik dan koefisien distorsi sehingga hubungan koordinat ruang nyata dan citra 2D dapat dimodelkan secara metrik (Zhang, 2000; OpenCV Documentation, 2026a). Tanpa kalibrasi yang tepat, data estimasi pose ArUco

Marker berpotensi menghasilkan galat posisi dan orientasi yang lebih besar.

ArUco Marker dipilih karena memiliki pola biner dengan identitas unik serta empat titik sudut yang dapat digunakan sebagai korespondensi antara koordinat 3D marker dan koordinat 2D pada citra. Sistem fiducial marker berbasis ArUco telah digunakan untuk estimasi pose kamera pada aplikasi penglihatan komputer dan lokalisasi robot (Garrido-Jurado et al., 2014). Dalam OpenCV, estimasi pose memerlukan koordinat sudut

marker, ukuran fisik marker, matriks kamera (camera matrix), dan koefisien distorsi (distortion coefficients) (OpenCV Documentation, 2026b).

Oleh karena itu, kalibrasi kamera menjadi prasyarat teknis sebelum data posisi dan orientasi marker digunakan sebagai umpan balik robot. Kualitas kalibrasi perlu divalidasi tidak hanya dari nilai galat reproyeksi, tetapi juga dari kemampuan deteksi marker dan akurasi estimasi pose pada kondisi kerja robot.

Artikel ini difokuskan pada evaluasi kalibrasi kamera monokular dalam sistem vision ArUco Marker pada robot omnidirectional. Tuning PID, kinematika, motor, dan mekanisme pick and place tidak dibahas sebagai objek utama, tetapi diposisikan sebagai konteks penggunaan data pose sebagai umpan balik posisi dan orientasi robot. Beberapa penelitian terkini menunjukkan bahwa ArUco Marker banyak digunakan pada docking robot mobile berbasis kamera monokular, dan konsistensi estimasi pose dapat ditingkatkan melalui strategi multi-marker serta deteksi outlier (Oh dan Kim, 2025; Kim et al., 2024).

Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi hasil kalibrasi kamera monokular berdasarkan matriks kamera, koefisien distorsi, dan galat reproyeksi, kemudian menganalisis hubungannya dengan keberhasilan deteksi marker serta akurasi estimasi posisi X, jarak terhadap marker, dan orientasi yaw. Kontribusi utama artikel ini adalah menyajikan evaluasi terukur yang mengaitkan kualitas kalibrasi kamera dengan akurasi estimasi pose ArUco Marker pada robot omnidirectional.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen pada sistem vision berbasis kamera monokular. Kamera Logitech HD 720p dipasang pada bagian atas robot omnidirectional pada ketinggian sekitar 26 cm dengan kemiringan 30 derajat dan dihubungkan ke Raspberry Pi 5 sebagai unit pemrosesan citra. Pengujian dilakukan pada area laboratorium dengan pencahayaan ruangan yang relatif konstan. Sistem dikembangkan menggunakan OpenCV untuk mendeteksi ArUco Marker, menghitung estimasi pose, dan menampilkan data posisi serta orientasi marker. Modul ArUco pada OpenCV mendeteksi marker berdasarkan kontur persegi, identifikasi pola biner, dan korespondensi titik sudut marker (OpenCV Documentation, 2026b). Marker yang digunakan berukuran fisik 0,10 m. Marker ID 43 digunakan sebagai acuan utama pengujian sistem vision, sedangkan marker ID 42 menjadi marker target lain pada sistem robot secara

keseluruhan.

Kalibrasi kamera dilakukan menggunakan pola checkerboard dengan ukuran titik sudut internal 10 x 7 dan ukuran setiap kotak 0,022 m. Citra checkerboard diambil sebanyak 93 gambar dengan variasi posisi dan sudut agar model kalibrasi memperoleh representasi distorsi lensa yang lebih baik. Penggunaan pola planar dari beberapa orientasi merupakan pendekatan umum dalam kalibrasi kamera karena tidak memerlukan perangkat kalibrasi 3D yang kompleks (Zhang, 2000). Setiap citra diproses untuk mendeteksi titik sudut checkerboard. Titik sudut hasil deteksi kemudian dipetakan terhadap koordinat objek 3D untuk memperoleh matriks kamera dan koefisien distorsi menggunakan fungsi `calibrateCamera` pada OpenCV (OpenCV Documentation, 2026a).

Kualitas kalibrasi dievaluasi menggunakan galat reproyeksi (reprojection error), yaitu selisih antara titik sudut hasil deteksi pada citra dan titik hasil reproyeksi berdasarkan parameter kamera yang diperoleh. Secara umum, galat kalibrasi dinyatakan sebagai $e = |\text{nilai aktual} - \text{nilai proyeksi}|$. Nilai galat reproyeksi yang lebih kecil menunjukkan bahwa parameter kamera semakin mampu merepresentasikan hubungan antara koordinat ruang nyata dan koordinat citra (OpenCV Documentation, 2026a).

Validasi hasil kalibrasi dilakukan melalui tiga pengujian. Pertama, deteksi marker berdasarkan jarak pada rentang 20-190 cm untuk mengetahui batas kerja marker terhadap kamera. Kedua, deteksi marker berdasarkan sudut pada jarak tetap 40 cm untuk mengetahui pengaruh orientasi marker terhadap keberhasilan deteksi. Ketiga, estimasi pose untuk membandingkan pembacaan sistem terhadap posisi aktual pada parameter posisi X, jarak terhadap marker, dan orientasi yaw. Pengujian deteksi jarak dan sudut dilakukan sebanyak lima kali pada setiap variasi. Persentase keberhasilan deteksi dihitung dengan membandingkan jumlah deteksi berhasil terhadap jumlah percobaan, sedangkan galat estimasi pose dihitung dari selisih absolut antara data aktual dan data sistem. Jarak kamera-marker dan orientasi marker berpengaruh terhadap tingkat deteksi serta kestabilan pengukuran pada sistem fiducial marker (Kalaitzakis et al., 2020; Adámek et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Kalibrasi Kamera

Hasil kalibrasi menghasilkan parameter intrinsik kamera berupa matriks kamera dan koefisien distorsi lensa. Matriks kamera yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} 688.46543582, & 0, & 307.85670495 \\ 689.92741241, & 257.64915141, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix}$$

Koefisien distorsi yang diperoleh adalah $D = [0.08659111, -0.26699090, 0.00438857, -0.00197322,$

Evaluasi Kalibrasi Kamera Monokular Terhadap Akurasi Estimasi Pose ArUco Marker Pada Robot Omnidirectional

0.80862358]. Parameter tersebut digunakan pada program Raspberry Pi 5 untuk mengoreksi distorsi citra dan menghitung pose ArUco Marker. Koefisien distorsi pada model kamera OpenCV mencakup komponen distorsi radial dan tangensial, sedangkan matriks kamera memuat focal length dan titik pusat optik kamera (OpenCV Documentation, 2026a). Nilai galat reproyeksi yang diperoleh sebesar 0,081185 piksel. Nilai ini menunjukkan bahwa selisih antara titik sudut hasil deteksi checkerboard dan titik hasil reproyeksi relatif kecil, sehingga parameter kamera layak digunakan untuk tahap estimasi pose.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Kalibrasi Kamera

Parameter	Nilai
Checkerboard	10 x 7 titik sudut internal
Ukuran kotak	0,022 m
Jumlah citra	93 gambar
Resolusi uji	860 x 480 piksel
Galat reproyeksi	0,081185 px
Rata-rata FPS	23,90 FPS
Interval frame	41,8 ms

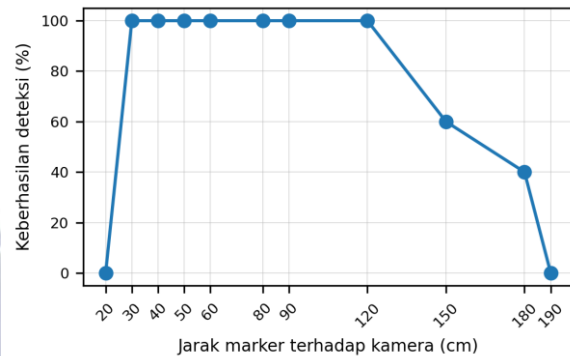
Selain parameter kalibrasi, sistem menghasilkan rata-rata 23,90 FPS pada resolusi 860 x 480 piksel sehingga interval pembaruan frame sekitar 41,8 ms. Nilai FPS tersebut hanya menunjukkan performa pemrosesan citra pada Raspberry Pi 5, bukan performa kendali robot secara keseluruhan. Delay komunikasi, respons aktuator, dan dinamika gerak robot tidak dievaluasi secara khusus dalam artikel ini.

Validasi Deteksi Marker terhadap Jarak

Pengujian jarak dilakukan sebanyak lima kali pada setiap variasi jarak. Marker tidak terdeteksi pada jarak 20 cm karena posisi marker terlalu dekat dengan kamera sehingga bidang pandang dan geometri proyeksi marker tidak sesuai untuk proses identifikasi. Pada rentang 30-120 cm, marker terdeteksi pada seluruh percobaan dengan keberhasilan 100%. Setelah jarak melebihi 120 cm, keberhasilan deteksi menurun menjadi 60% pada 150 cm dan 40% pada 180 cm. Pada 190 cm, marker kembali tidak terdeteksi. Pola penurunan pada jarak besar sejalan dengan karakteristik fiducial marker, yaitu ukuran proyeksi marker pada citra semakin kecil sehingga kesalahan deteksi sudut dan identifikasi pola menjadi lebih dominan (Kalaitzakis et al., 2020). Ringkasan hasil ditunjukkan pada Tabel 2, sedangkan kecenderungan keberhasilan deteksi terhadap jarak ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Ringkasan Deteksi Marker terhadap Jarak

Jarak	Berhasil (%)	Interpretasi
20 cm	0%	Terlalu dekat
30-120 cm	100%	Rentang andal
150 cm	60%	Mulai tidak stabil
180 cm	40%	Tidak layak utama
190 cm	0%	Di luar batas deteksi



Gambar 1. Grafik keberhasilan deteksi ArUco Marker terhadap jarak

Gambar 1 menunjukkan bahwa rentang deteksi paling andal berada pada 30-120 cm. Hasil ini menegaskan bahwa kalibrasi kamera mampu mendukung deteksi marker secara konsisten pada rentang kerja tertentu, tetapi ukuran marker, resolusi kamera, dan jarak objek tetap menjadi batas utama. Pada jarak yang terlalu jauh, ukuran marker pada citra semakin kecil sehingga kontur persegi dan pola biner internal lebih sulit dikenali.

Validasi Deteksi Marker terhadap Sudut

Pada pengujian sudut, marker diletakkan pada jarak tetap 40 cm dan diputar terhadap sumbu vertikal dari 0 hingga 90 derajat. Setiap variasi sudut diuji sebanyak lima kali. Hasil pengujian menunjukkan deteksi 100% pada sudut 0-60 derajat. Pada sudut 75 derajat, keberhasilan turun menjadi 20%, sedangkan pada sudut 80 dan 90 derajat marker tidak terdeteksi. Penurunan ini terjadi karena perubahan perspektif membuat bentuk marker pada citra semakin menyempit dan pola biner menjadi sulit dibaca. Orientasi marker terhadap kamera terbukti memengaruhi akurasi pengukuran dan tingkat keberhasilan deteksi fiducial marker (Kalaitzakis et al., 2020). Ringkasan hasil ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Deteksi Marker terhadap Sudut

Sudut	Berhasil (%)	Interpretasi
0-60°	100%	Terdeteksi konsisten
75°	20%	Deteksi tidak stabil
80-90°	0%	Tidak terdeteksi

Temuan ini penting untuk penggunaan sistem vision sebagai umpan balik posisi. Meskipun kalibrasi kamera menghasilkan galat reproyeksi rendah, deteksi ArUco tetap sensitif terhadap sudut pandang. Sudut marker yang terlalu miring menyebabkan informasi sudut marker tidak

cukup stabil untuk estimasi pose, khususnya estimasi yaw. Berdasarkan hasil tersebut, sudut kerja aman sistem sebaiknya dibatasi pada 0-60 derajat.

Akurasi Estimasi Pose

Validasi estimasi pose dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan kamera terhadap nilai aktual. Pada posisi lateral X, marker digeser dari -18 cm hingga 18 cm pada jarak tetap 40 cm. Rata-rata galat absolut posisi X sebesar 0,33 cm dengan rata-rata galat 2,78%. Galat hanya muncul pada beberapa posisi positif dengan nilai maksimum 1 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa estimasi posisi lateral relatif lebih kuat untuk koreksi gerak kanan-kiri robot dibandingkan estimasi jarak dan yaw. Secara teoretis, pose marker diperoleh dari korespondensi titik 3D marker dan titik 2D pada citra, sehingga ketelitian sudut marker menjadi faktor penting dalam estimasi translasi dan rotasi (Garrido-Jurado et al., 2014; OpenCV Documentation, 2026b).

Pada pengujian jarak terhadap marker, galat meningkat seiring bertambahnya jarak. Pada jarak 30 cm, galat yang diperoleh adalah 0 cm, sedangkan pada jarak 180 cm galat meningkat menjadi 21 cm. Rata-rata galat absolut jarak sebesar 7 cm dengan rata-rata galat 7,55%. Pola ini menunjukkan bahwa komponen jarak lebih sensitif terhadap perspektif kamera dan ukuran marker pada citra dibandingkan komponen lateral X. Hasil ini konsisten dengan model variansi pose fiducial marker yang menunjukkan bahwa noise estimasi pose berubah terhadap rentang pengukuran dan perlu dipertimbangkan dalam lokalisasi robot (Adámek et al., 2023).

Pada orientasi yaw, rata-rata galat absolut sebesar 7,16 derajat dengan rata-rata galat 20,54%. Pada sudut kecil, seperti -20 derajat hingga 20 derajat, galat masih relatif rendah. Namun, galat meningkat pada sudut yang lebih besar, yaitu 15,4 derajat pada -50 derajat dan 23,3 derajat pada 50 derajat. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi yaw perlu digunakan dengan batasan sudut kerja tertentu. Sensitivitas ini juga menjadi perhatian pada sistem docking berbasis ArUco karena metode solvePnP dapat dipengaruhi oleh sudut pandang, pencahayaan, dan galat kalibrasi kamera (Oh dan Kim, 2025).

Tabel 4. Ringkasan Akurasi Estimasi Pose

Parameter	Galat	Catatan
Posisi X	0,33 cm (2,78%)	Koreksi lateral
Jarak marker	7 cm (7,55%)	Naik saat jarak membesar
Yaw	7,16° (20,54%)	Sensitif pada sudut besar

Analisis Pengaruh Kalibrasi terhadap Estimasi Pose

Galat reproyeksi sebesar 0,081185 piksel menunjukkan bahwa parameter kamera mampu merepresentasikan hubungan antara titik dunia nyata dan bidang citra dengan baik. Parameter intrinsik dan koefisien distorsi membantu sistem mengoreksi efek lensa sebelum pose marker dihitung. Dampaknya terlihat pada pembacaan posisi lateral X yang sangat dekat terhadap nilai aktual.

Meskipun demikian, galat jarak dan yaw tidak sepenuhnya ditentukan oleh hasil kalibrasi. Pada kamera monokular, estimasi kedalaman sangat bergantung pada ukuran proyeksi marker di citra. Semakin jauh posisi marker, semakin kecil area marker yang terbaca sehingga ketelitian titik sudut menurun. Saat marker diputar, deformasi perspektif juga membuat perubahan kecil pada deteksi sudut dapat menghasilkan galat yaw yang lebih besar (Kalaitzakis et al., 2020; Adámek et al., 2023).

Dengan demikian, kalibrasi kamera diperlukan tetapi tidak cukup sebagai satu-satunya faktor penentu akurasi sistem vision. Akurasi akhir tetap dipengaruhi oleh jarak kerja, sudut hadap marker, pencahayaan, resolusi kamera, ketepatan ukuran cetak marker, dan kestabilan pemasangan kamera pada robot. Berdasarkan hasil pengujian, data pose paling rasional digunakan pada jarak 30-120 cm dan sudut marker 0-60 derajat. Di luar rentang tersebut, data pose sebaiknya tidak digunakan sebagai dasar utama koreksi posisi robot tanpa mekanisme validasi tambahan, seperti multi-marker dan outlier rejection (Kim et al., 2024).

PENUTUP

Simpulan

Kalibrasi kamera monokular pada sistem vision ArUco Marker berhasil dilakukan menggunakan checkerboard 10 x 7 dengan ukuran kotak 0,022 m dan 93 citra kalibrasi. Hasil kalibrasi menghasilkan matriks kamera dan koefisien distorsi dengan galat reproyeksi sebesar 0,081185 piksel. Nilai tersebut menunjukkan bahwa parameter kamera layak digunakan untuk mendukung proses deteksi marker dan estimasi pose.

Validasi hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sistem mampu memproses citra pada rata-rata 23,90 FPS dengan interval frame 41,8 ms. Deteksi marker paling andal berada pada jarak 30-120 cm dan sudut 0-60 derajat dengan keberhasilan 100%. Akurasi estimasi pose menghasilkan rata-rata galat posisi X sebesar 0,33 cm, jarak terhadap marker sebesar 7 cm, dan yaw sebesar 7,16 derajat. Sistem vision memadai sebagai sumber umpan balik posisi robot pada rentang kerja 30-120 cm dan sudut 0-60 derajat, terutama untuk koreksi lateral. Estimasi jarak dan yaw perlu digunakan dengan batasan kerja tersebut karena lebih sensitif terhadap jarak dan sudut pandang

marker.

Saran

Pengembangan berikutnya perlu menambahkan validasi multi-marker atau metode outlier rejection agar estimasi pose lebih stabil pada sudut besar dan jarak jauh. Selain itu, pengujian perlu dilakukan dengan variasi pencahayaan, resolusi kamera, ukuran marker, serta perbandingan sebelum dan sesudah kalibrasi agar pengaruh kalibrasi terhadap akurasi pose dapat dianalisis lebih kuat secara kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adámek, R., Brabc, M., Vávra, P., Dobossy, B., Formánek, M., & Radil, F. (2023). Analytical models for pose estimate variance of planar fiducial markers for mobile robot localisation. *Sensors*, 23(12), 5746. <https://doi.org/10.3390/s23125746>
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín-Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280-2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
- Kalaitzakis, M., Carroll, S., Ambrosi, A., Whitehead, C., & Vitzilaios, N. I. (2020). Experimental comparison of fiducial markers for pose estimation. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 781-789. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213977>
- Kim, D., Bong, J. H., & Jeong, S. (2024). Enhancing pose estimation using multiple graphical markers with spatial and temporal outlier detection. *Applied Sciences*, 14(22), 10225. <https://doi.org/10.3390/app142210225>
- Oh, J. S., & Kim, M. Y. (2025). Regression-based docking system for autonomous mobile robots using a monocular camera and ArUco markers. *Sensors*, 25(12), 3742. <https://doi.org/10.3390/s25123742>
- OpenCV Documentation. (2026a). Camera calibration. OpenCV. https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- OpenCV Documentation. (2026b). Detection of ArUco markers. OpenCV. https://docs.opencv.org/4.x/d5/dac/tutorial_aruco_detection.html
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334. <https://doi.org/10.1109/34.88>