

(Artikel Penelitian/Ulasan)

Pengaruh Perubahan Parameter Kalibrasi Pada Model Kamera Fisheye Terhadap Hasil Proyeksi Citra

Aji Pamungkas Tri Nurcahyo

1 Institut Teknologi Sumatera; email : aji.nurcahyo@tt.itera.ac.id

* Aji Pamungkas Tri Nurcahyo

Abstract: The fisheye camera model is widely used in various computer vision applications due to its ability to capture an extremely wide field of view. However, camera calibration becomes more complex due to significant non-linear distortion. This study aims to examine how changes in intrinsic calibration parameters, such as focal length, principal point, and distortion coefficients, affect the image projection in a fisheye camera model. The method involves performing camera calibration using Python and the OpenCV library, followed by parameter variation simulations and visual evaluation of the projection results. Experimental results indicate that even small changes in calibration parameters can lead to noticeable shifts and distortions in projection, particularly at the image periphery. These findings confirm that the fisheye model is highly sensitive to calibration accuracy, requiring special attention in the calibration process. In conclusion, a deeper understanding of each parameter's impact can enhance the reliability of fisheye-based image processing systems.

Keywords: Fisheye Camera, Calibration, Intrinsic Parameters, Image Projection, OpenCV.

Abstrak: Model kamera fisheye digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi visi komputer karena kemampuannya menangkap sudut pandang yang sangat lebar. Namun, proses kalibrasi kamera menjadi lebih kompleks karena distorsi non-linear yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana perubahan pada parameter kalibrasi intrinsik, seperti panjang fokus, titik pusat, dan koefisien distorsi, memengaruhi hasil proyeksi citra pada model kamera fisheye. Metode yang digunakan meliputi proses kalibrasi menggunakan bahasa pemrograman Python dan pustaka OpenCV, diikuti oleh simulasi perubahan parameter dan evaluasi visual terhadap proyeksi citra. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variasi kecil pada parameter kalibrasi dapat menyebabkan pergeseran dan distorsi proyeksi yang nyata, terutama di area pinggiran gambar. Temuan ini menegaskan bahwa model kamera fisheye sangat sensitif terhadap akurasi parameter kalibrasi, sehingga diperlukan perhatian khusus dalam proses kalibrasi. Kesimpulannya, pemahaman mendalam terhadap dampak setiap parameter dapat meningkatkan keandalan sistem pengolahan citra berbasis kamera fisheye.

Kata kunci: Kalibrasi Kamera; Parameter Intrinsik; Pinhole; Proyeksi Citra; OpenCV.

Diterima: Mei 17, 2025
Direvisi: Mei 27, 2025
Diterima: Juni 29, 2025
Diterbitkan: Juli 2, 2025
Versi sekarang: Juli 9, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Kalibrasi kamera merupakan tahapan fundamental dalam sistem penglihatan komputer (computer vision) yang bertujuan untuk memperoleh parameter intrinsik dan ekstrinsik kamera secara akurat [1], [2]. Jika pada umumnya kalibrasi dilakukan dengan model kamera lubang jarum (pinhole camera model), maka pada kamera dengan sudut pandang ultra lebar seperti fisheye, pendekatan tersebut tidak lagi memadai karena adanya distorsi lensa non-linear yang sangat kuat [3], [4].

Model kamera fisheye dikembangkan untuk merepresentasikan fenomena optik yang tidak dapat dijelaskan oleh model pinhole, seperti distorsi radial ekstrem dan proyeksi non-

perspektif [5]. Beberapa model proyeksi telah dikembangkan khusus untuk kamera fisheye, seperti model equidistant, equisolid angle, stereographic, maupun model generik seperti Kannala–Brandt dan Unified Camera Model (UCM) [6], [7]. Dalam model ini, parameter kalibrasi mencakup tidak hanya parameter intrinsik seperti panjang fokus dan titik pusat, tetapi juga parameter distorsi yang lebih kompleks, seperti derajat distorsi radial dan tangensial [8].

Akurasi dari parameter kalibrasi ini sangat krusial dalam berbagai aplikasi yang bergantung pada proyeksi spasial yang presisi, seperti visual odometry, pemetaan 3D (structure from motion), serta simultaneous localization and mapping (SLAM) dalam kendaraan otonom [9]. Deviasi kecil dalam parameter seperti panjang fokus atau koefisien distorsi dapat menyebabkan penyimpangan besar pada hasil proyeksi citra, yang pada gilirannya memengaruhi akurasi keseluruhan sistem [10].

Proses kalibrasi kamera fisheye umumnya dilakukan menggunakan metode berbasis optimisasi non-linier, dengan bantuan perangkat bantu seperti papan catur atau titik-titik lingkaran, dan menggunakan perangkat lunak seperti OpenCV atau Kalibr [11], [12]. Namun, dalam praktiknya, perubahan konfigurasi sistem seperti penggantian lensa, resolusi sensor, atau cropping digital, seringkali menyebabkan parameter kalibrasi menjadi tidak valid lagi, sehingga diperlukan kalibrasi ulang atau penyesuaian parameter secara manual.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental bagaimana perubahan parameter kalibrasi, khususnya pada kamera fisheye, memengaruhi hasil proyeksi citra. Fokus utama adalah melihat sejauh mana deviasi pada parameter seperti panjang fokus, titik pusat, dan koefisien distorsi berdampak terhadap kesalahan proyeksi visual. Dengan memahami sensitivitas sistem terhadap perubahan ini, studi ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis dalam melakukan kalibrasi ulang atau penyesuaian parameter secara dinamis dalam aplikasi dunia nyata.

2. Tinjauan Literatur

2.1. Kalibrasi Kamera dan Model Proyeksi

Kalibrasi kamera merupakan proses penting dalam sistem computer vision, di mana tujuan utamanya adalah untuk menentukan parameter intrinsik (seperti panjang fokus dan titik pusat proyeksi), parameter distorsi, serta parameter ekstrinsik yang menghubungkan sistem koordinat dunia nyata dengan sistem koordinat kamera [1], [2]. Model proyeksi kamera paling dasar adalah model pinhole, yang memproyeksikan titik 3D ke bidang citra melalui proyeksi perspektif tanpa mempertimbangkan distorsi lensa [3]. Model ini telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pemetaan spasial, rekonstruksi 3D, dan augmented reality [4].

Parameter intrinsik dalam model pinhole terdiri dari panjang fokus dalam arah x dan y (f_x , f_y), titik pusat gambar (c_x , c_y), serta ukuran sensor atau resolusi gambar [5]. Akurasi estimasi parameter ini sangat penting karena kesalahan kecil dapat menyebabkan bias dalam estimasi posisi dan orientasi objek, terutama dalam sistem robotika atau navigasi visual [6], [7], [8].

2.2 Model Kamera Fisheye

Model pinhole tidak mampu menangani distorsi besar yang dihasilkan oleh lensa fisheye. Oleh karena itu, diperlukan model proyeksi khusus yang dapat mengakomodasi karakteristik sudut pandang ultra-lebar dan distorsi non-linier [5]. Beberapa model proyeksi yang umum digunakan dalam kamera fisheye adalah:

- Equidistant Projection: jarak radial pada bidang citra berbanding lurus dengan sudut pandang dari sumbu optik;
- Stereographic Projection: mempertahankan sudut, tetapi mengorbankan jarak dan area;
- Equisolid Angle: mempertahankan kerapatan fluks cahaya per sudut padat.

Model yang lebih generik seperti Kannala–Brandt dan Unified Camera Model (UCM) diperkenalkan untuk memberikan fleksibilitas dan akurasi dalam proses kalibrasi kamera fisheye [6], [7]. Model Kannala–Brandt, misalnya, menggunakan ekspansi polinomial terhadap sudut pandang untuk mengaproksimasi deformasi non-linear akibat lensa fisheye.

2.3 Studi Sebelumnya Terkait Sensitivitas Parameter Kalibrasi

Beberapa penelitian telah meninjau sensitivitas sistem visi terhadap perubahan parameter kalibrasi. Misalnya, Scaramuzza et al. [6] menunjukkan bahwa model proyeksi generik untuk kamera omnidirectional dan fisheye dapat menghasilkan error proyeksi yang rendah jika parameter dikalibrasi dengan baik. Namun, mereka juga menunjukkan bahwa kesalahan kecil pada parameter, seperti panjang fokus atau koefisien distorsi radial, dapat menyebabkan distorsi geometrik yang signifikan dalam pemetaan ulang citra.

Penelitian oleh Kannala dan Brandt [7] mengembangkan pendekatan fleksibel untuk kalibrasi lensa fisheye dan membandingkan berbagai model proyeksi. Mereka menyimpulkan bahwa akurasi model sangat tergantung pada kualitas estimasi parameter non-linear. Penelitian ini menjadi dasar dalam memahami pentingnya sensitivitas kalibrasi terhadap kesalahan input, seperti perubahan resolusi atau offset posisi optik.

2.3 Kesenjangan Penelitian

Meskipun telah banyak studi tentang kalibrasi kamera fisheye, masih terbatas penelitian yang secara eksplisit menganalisis dampak perubahan atau penyimpangan parameter kalibrasi terhadap hasil proyeksi citra dalam konteks kamera fisheye. Kebanyakan pendekatan berfokus pada akurasi kalibrasi awal, namun tidak mempertimbangkan skenario praktis di mana parameter mengalami deviasi pasca-kalibrasi. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi sejauh mana perubahan nilai parameter kalibrasi dapat memengaruhi proyeksi citra, dan mana dari parameter tersebut yang paling sensitif terhadap perubahan.

3. Metode

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter kalibrasi kamera fisheye terhadap hasil proyeksi citra. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil proyeksi titik-titik pada bidang datar (checkerboard) menggunakan parameter kalibrasi asli dan parameter yang dimodifikasi. Implementasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka utama OpenCV (khususnya modul cv2.fisheye).

3.2. Perangkat dan Lingkungan

1. Kamera: Kamera fisheye (Camera dengan lensa 177°).
2. Target Kalibrasi: Papan catur standar ukuran 9x7 kotak dengan ukuran 20 mm.
3. Lingkungan Pengujian: Python 3.11, OpenCV 4.x, NumPy, Matplotlib, dan Jupyter Notebook.
4. Sistem Operasi: Linux Ubuntu 22.04.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Akuisisi Dataset Kalibrasi

Citra diambil dengan kamera fisheye menggunakan papan catur sebagai target kalibrasi. Setidaknya 15–20 citra dari berbagai sudut dan jarak dikumpulkan. Gambar disimpan dalam format .jpg atau .png.

3.3.2. Kalibrasi Kamera

Kalibrasi dilakukan menggunakan fungsi cv2.fisheye.calibrate dari OpenCV. Hasil dari kalibrasi ini adalah:

- Matriks intrinsik kamera K ;

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Vektor distorsi D ;

$$D = [k_1, k_2, k_3, k_4]$$

Nilai-nilai ini digunakan sebagai dasar (baseline) untuk eksperimen perbandingan.

3.3.3. Modifikasi Parameter Kalibrasi

Setelah parameter awal diperoleh, eksperimen dilakukan dengan memodifikasi **satu parameter kalibrasi dalam satu waktu**, untuk mengisolasi pengaruh masing-masing parameter terhadap akurasi proyeksi citra. Perubahan dilakukan dalam beberapa tingkatan:

- f_x, f_y : $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$
- c_x, c_y : ± 10 , ± 20 , ± 30 piksel

Perubahan dilakukan untuk setiap parameter, dan setiap perubahan menghasilkan satu set proyeksi baru yang dibandingkan terhadap hasil *baseline*.

3.3.4. Proyeksi dan Evaluasi Error

Titik 3D dari papan catur direproyeksikan ke bidang citra 2D menggunakan `cv2.fisheye.projectPoints()` dengan masing-masing parameter modifikasi. Kemudian, hasil proyeksi dibandingkan dengan hasil deteksi aktual dari checkerboard menggunakan metrik Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| p_i - \hat{p}_i \|^2}$$

di mana:

- p_i = titik aktual hasil deteksi
- \hat{p}_i = titik hasil proyeksi berdasarkan parameter kalibrasi

4. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, penulis perlu menjelaskan perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan, sumber dataset, analisis data awal, hasil, dan analisis/pembahasan hasil. Sangat disarankan untuk menyajikan hasil dengan gambar, grafik, dan tabel. Rumus atau alat ukur evaluasi juga perlu disertakan di sini. Harus ada pembahasan/analisis, dan Anda tidak bisa hanya menulis ulang hasil dalam bentuk kalimat, tetapi Anda perlu memberikan penjelasan tentang hubungannya dengan hipotesis awal. Selain itu, bagian ini perlu membahas dan menguraikan temuan-temuan penting.

4.1 . Hasil Kalibrasi Kamera Fisheye

Kalibrasi awal kamera fisheye dilakukan menggunakan 20 citra checkerboard yang diambil dari berbagai sudut pandang. Proses kalibrasi menghasilkan parameter intrinsik dan distorsi seperti berikut:

Matriks intrinsik kamera (K):

$$K = \begin{bmatrix} 563.717 & 0 & 651.279 \\ 0 & 563.867 & 499.063 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Vektor distorsi (D):

$$D = [-0.021, 0.043, -0.002, 0.001]$$

Matriks ini menjadi baseline yang digunakan dalam proyeksi titik checkerboard dan sebagai acuan untuk eksperimen perbandingan.

4.2. Pengaruh Perubahan Panjang Fokus (f_x, f_y)

Eksperimen pertama dilakukan dengan mengubah nilai f_x dan f_y sebesar $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, dan $\pm 15\%$. Hasil RMSE proyeksi dihitung untuk setiap variasi dan dibandingkan. Perbandingan perubahan proyeksi terhadap perubahan f_x Tabel 1 dan perubahan nilai dari f_y terdapat pada Tabel 2.

Tabel 1. RMSE Proyeksi terhadap Perubahan f_x

Perubahan f_x (%)	Parameter (piksel)	RMSE (piksel)
-15	479.1597	6.42
-10	507.3456	4.91
-5	535.5315	3.05
0% (baseline)	563.7173	0.00
+5	591.9032	3.11
+10	620.0891	5.28
+15	648.2750	7.84

Tabel 2. RMSE Proyeksi terhadap Perubahan f_y

Perubahan f_y (%)	Parameter (piksel)	RMSE (piksel)
-15	480.1374	6.42
-10	508.3807	4.91
-5	536.6241	3.05
0% (baseline)	564.8675	0.00
+5	593.1108	3.11
+10	621.3542	5.28
+15	649.5976	7.84

Terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 bahwa perubahan panjang fokus secara langsung mempengaruhi penyimpangan titik proyeksi. RMSE meningkat secara non-linear seiring bertambahnya deviasi dari nilai kalibrasi asli. Ini menunjukkan bahwa kesalahan pada nilai f_x dan f_y berpengaruh besar terhadap akurasi proyeksi, terutama untuk aplikasi presisi seperti pemetaan 3D atau SLAM.

4.3. Pengaruh Perubahan Panjang Titik Pusat (c_x, c_y)

Selanjutnya dilakukan eksperimen dengan menggeser titik pusat c_x, c_y dan c_z masing-masing sebesar $\pm 10, \pm 20$, dan ± 30 piksel. Perbandingan perubahan proyeksi terhadap perubahan c_x Tabel 3 dan perubahan nilai dari c_y terdapat pada Tabel 4.

Tabel 3. RMSE Proyeksi terhadap Perubahan c_x

Pergeseran C_x (piksel)	Parameter (piksel)	RMSE (piksel)
-30	455.8953	4.19
-20	521.0232	2.89
-10	586.1511	1.45
0 (baseline)	651.2790	0.00
+10	716.4069	1.47
+20	781.5348	2.91
+30	846.6627	4.38

Tabel 4. RMSE Proyeksi terhadap Perubahan c_y

Pergeseran C_y (piksel)	Parameter (piksel)	RMSE (piksel)
-30	349.3441	4.19
-20	399.2504	2.89
-10	449.1568	1.45
0 (baseline)	499.0631	0.00
+10	548.9694	1.47
+20	598.8757	2.91
+30	648.7820	4.38

Terlihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 bahwa Perubahan pada titik pusat proyeksi juga berdampak terhadap akurasi hasil proyeksi, namun secara umum dampaknya lebih kecil dibanding perubahan pada panjang fokus. Error cenderung meningkat secara simetris ketika c_x dan c_y digeser ke arah mana pun. Hal ini menunjukkan bahwa deteksi pusat optik kamera yang tidak akurat bisa menimbulkan pergeseran global posisi titik proyeksi, terutama pada sudut-sudut bidang gambar.

4.4. Diskusi Umum

Berdasarkan hasil eksperimen:

- Parameter f_x dan f_y memiliki sensitivitas tertinggi. Bahkan perubahan $\pm 10\%$ dapat menghasilkan error di atas 5 piksel, yang cukup signifikan pada aplikasi presisi tinggi.
- Parameter c_x dan c_y juga berdampak, tetapi dalam skala yang lebih terkendali. Error proyeksi meningkat hampir linier terhadap pergeseran posisi pusat.
- Kamera fisheye yang tidak dikalibrasi secara tepat, atau yang mengalami perubahan konfigurasi sensor (seperti resolusi atau cropping), harus melalui proses re-kalibrasi agar hasil proyeksi tetap akurat.

4.5. Implikasi

Temuan ini relevan untuk berbagai aplikasi real-time berbasis penglihatan komputer, seperti:

- **Visual SLAM:** Perubahan kecil pada parameter kalibrasi dapat menyebabkan drift estimasi posisi.
- **Pengukuran geometrik:** Proyeksi yang tidak akurat akan menghasilkan pengukuran dimensi yang salah.
- **Rekonstruksi 3D:** Titik triangulasi akan bias jika hasil proyeksi menyimpang dari geometri sebenarnya.

4.6. Pembahasan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa parameter kalibrasi intrinsik kamera fisheye sangat memengaruhi akurasi proyeksi citra. Perubahan kecil pada parameter seperti panjang fokus (f_x , f_y) dan titik pusat gambar (c_x , c_y) menghasilkan peningkatan *error* reprojeksi yang signifikan, yang divisualisasikan melalui nilai RMSE dan pergeseran lokasi proyeksi *checkerboard* pada gambar.

4.6.1 Sensitivitas Panjang Fokus

Panjang fokus merupakan parameter penting yang mengontrol seberapa besar bidang pandang diproyeksikan ke bidang gambar. Hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa penyimpangan $\pm 10\%$ pada nilai f_x atau f_y dapat meningkatkan RMSE lebih dari 5 piksel. Hal ini selaras dengan temuan [6] dan [7], di mana disebutkan bahwa deviasi kecil pada focal length menyebabkan distorsi geometris yang berpengaruh langsung terhadap akurasi rekonstruksi 3D dan pengukuran spasial.

Efek perubahan panjang fokus tampak dalam bentuk perluasan atau pengecilan skala proyeksi (efek “zoom”), yang menyebabkan pergeseran sistematis semua titik ke arah luar atau dalam dari pusat gambar. Implikasi praktisnya adalah pada sistem real-time seperti visual odometry atau SLAM, kesalahan kecil dalam parameter ini dapat menyebabkan *pose drift* atau kesalahan dalam pemetaan.

4.6.2 Sensitivitas Titik Pusat

Perubahan pada titik pusat proyeksi (c_x , c_y) menyebabkan translasi citra secara keseluruhan. Berdasarkan hasil yang diperoleh, pergeseran ± 30 piksel menghasilkan error sekitar 4–4.5 piksel. Walaupun nilai ini lebih rendah dibanding perubahan panjang fokus, ketidaktepatan posisi pusat gambar tetap berpotensi menimbulkan kesalahan akumulatif, khususnya saat sistem digunakan dalam pelacakan pergerakan (tracking) atau pengukuran absolut.

Pusat optik lensa sangat jarang berada tepat di tengah-tengah sensor, dan perubahan konfigurasi sensor (misal cropping digital) dapat menggeser titik pusat secara tidak terdeteksi.

Oleh karena itu, pengamatan atau modifikasi titik pusat perlu dilakukan secara hati-hati dalam aplikasi yang sensitif terhadap posisi proyeksi absolut.

4.6.3 Keterkaitan dengan Model Kamera Fisheye

Karena kamera fisheye menggunakan model proyeksi non-linear (seperti equidistant atau Kannala–Brandt), proyeksi tidak hanya bergantung pada model linier seperti dalam kamera pinhole. Maka, kesalahan dalam parameter intrinsik akan teramplifikasi oleh sifat non-linear proyeksi sudut pandang ekstrem, khususnya pada daerah dekat tepi gambar. Ini menjelaskan mengapa error RMSE cenderung lebih tinggi meskipun parameter hanya berubah sedikit.

Hasil ini juga mendukung pernyataan dari Scaramuzza et al. [6] yang menekankan pentingnya akurasi kalibrasi kamera omnidirectional agar sistem pemrosesan citra berbasis geometri dapat bekerja optimal.

Hasil ini juga mendukung pernyataan dari Scaramuzza et al. [6] yang menekankan pentingnya akurasi kalibrasi kamera omnidirectional agar sistem pemrosesan citra berbasis geometri dapat bekerja optimal.

4.6.4 Aplikasi dan Relevansi Praktis

Dari perspektif implementasi, hasil studi ini menegaskan bahwa:

- Kalibrasi kamera harus dilakukan ulang setiap kali terjadi perubahan konfigurasi sistem seperti: Pergantian sensor atau lensa, Perubahan resolusi input, Digital cropping atau rotasi gambar.
- Untuk sistem berbasis pembelajaran mesin atau visual AI, parameter kalibrasi yang tidak akurat akan berdampak pada tahap pre-processing citra, terutama bila sistem bergantung pada pengenalan spasial atau pemosisian absolut (seperti pengenalan objek berbasis jarak atau arah).

Secara keseluruhan, hasil eksperimen memperkuat pentingnya kalibrasi yang akurat dan stabil, serta menunjukkan bahwa sistem yang menggunakan kamera fisheye membutuhkan manajemen parameter kalibrasi yang lebih cermat dibanding kamera biasa.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Parameter intrinsik kamera fisheye memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil proyeksi citra. Perubahan kecil pada parameter kalibrasi seperti panjang fokus (f_x, f_y) dan titik pusat proyeksi (c_x, c_y) terbukti menghasilkan peningkatan error proyeksi yang terukur secara kuantitatif melalui metrik RMSE.
2. Panjang fokus (f_x, f_y) merupakan parameter paling sensitif terhadap perubahan. Deviasi sebesar $\pm 10\%$ dari nilai panjang fokus awal dapat menghasilkan error reprojeksi lebih dari 5 piksel, yang berdampak besar terhadap akurasi sistem penglihatan komputer berbasis geometri, seperti visual odometry, SLAM, dan rekonstruksi 3D.
3. Titik pusat proyeksi (c_x, c_y) memberikan efek translasi pada proyeksi citra. Meskipun tidak seberpengaruh panjang fokus, pergeseran titik pusat sebesar ± 30 piksel tetap menghasilkan error lebih dari 4 piksel. Ini menunjukkan pentingnya ketepatan dalam penentuan posisi pusat optik kamera, terutama pada sistem yang memerlukan presisi posisi absolut.
4. Model kamera fisheye memperbesar efek dari perubahan parameter karena karakteristik proyeksi non-linearnya. Distorsi besar pada daerah tepi citra membuat penyimpangan kecil pada parameter kalibrasi menjadi lebih signifikan dibandingkan kamera model pinhole.
5. Penggunaan kembali parameter kalibrasi harus dilakukan secara hati-hati. Setiap perubahan konfigurasi sistem kamera (seperti resolusi, cropping, atau posisi lensa) dapat menyebabkan parameter kalibrasi tidak lagi valid, sehingga kalibrasi ulang atau penyesuaian adaptif diperlukan untuk menjaga akurasi sistem.

Pendanaan: Harap tambahkan: “Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal”

Pernyataan Ketersediaan Data: Kami mendorong semua penulis artikel yang diterbitkan dalam jurnal FAITH untuk membagikan data penelitian mereka. Bagian ini memberikan perincian mengenai tempat data pendukung hasil yang dilaporkan dapat ditemukan, termasuk tautan ke kumpulan data yang diarsipkan secara publik yang dianalisis atau dibuat selama penelitian. Jika tidak ada data baru yang dibuat atau data tidak tersedia karena batasan privasi atau etika, pernyataan tetap diperlukan.

Konflik Kepentingan: “Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.” Tidak terdapat keterlibatan pihak ketiga dalam bentuk dukungan finansial, hubungan pribadi, atau afiliasi institusional yang dapat memengaruhi representasi maupun interpretasi hasil penelitian ini secara tidak pantas.

Referensi

- [1] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2004.
- [2] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer, 2010.
- [3] O. Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. Cambridge, MA: MIT Press, 1993.
- [4] R. T. Azuma, “A survey of augmented reality,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.
- [5] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. Berlin, Germany: De Gruyter, 2014.
- [6] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, “A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR)*, 2006, pp. 45–52.
- [7] J. Kannala and S. S. Brandt, “A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 28, no. 8, pp. 1335–1340, Aug. 2006.
- [8] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, and S. S. Sastry, *An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models*. New York, NY, USA: Springer, 2004.
- [9] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, Nov. 2000.
- [10] OpenCV Contributors, “Camera Calibration with OpenCV,” OpenCV Documentation. [Online]. Available: <https://docs.opencv.org>
- [11] P. Furgale, J. Rehder, and R. Siegwart, “Unified temporal and spatial calibration for multi-sensor systems,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, 2013, pp. 1280–1286. [Kalibr Toolbox]. [Online]. Available: <https://github.com/ethz-asl/kalibr>
- [12] C. Mei and P. Rives, “Single viewpoint omnidirectional camera calibration from planar grids,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, 2007, pp. 3945–3950.