



## 一种用于鱼眼镜头的线性标定方法

徐昀泽<sup>1,2</sup>, 赵汝进<sup>1</sup>, 马跃博<sup>1</sup>, 罗欣宇<sup>3</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100080)

**摘 要:** 针对鱼眼镜头的高精度标定需求, 提出一种基于除法畸变模型的线性标定方法。通过除法模型将标定问题转换为线性方程组求解问题, 在确定相机畸变中心后对畸变方程与投影矩阵进行解耦, 分别求解相机内外参数和畸变系数, 从而实现鱼眼镜头的快速鲁棒标定。实验结果表明, 与非线性标定方法相比, 该方法在保证标定准确性和可靠性的同时, 计算效率提高了约 10 倍。

**关键词:** 相机标定; 除法模型; 鱼眼镜头; 畸变中心; 内外参数

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 徐昀泽, 赵汝进, 马跃博, 等. 一种用于鱼眼镜头的线性标定方法[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 196-200.

**英文引用格式:** XU Yunze, ZHAO Rujin, MA Yuebo, et al. A linear calibration method for fisheye lens[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 196-200.

## A Linear Calibration Method for Fisheye Lens

XU Yunze<sup>1,2</sup>, ZHAO Rujin<sup>1</sup>, MA Yuebo<sup>1</sup>, LUO Xinbo<sup>3</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Satellite Manufacturing Factory Co., Ltd., Beijing 100080, China)

**[Abstract]** To meet the high-precision calibration demands of fisheye lens, this paper proposes a linear calibration method based on the division distortion model. The method converts the calibration problem into solving linear equation sets with a division model. Center of camera distortion located, the distortion equation is decoupled from the projection matrix, and the intrinsic and extrinsic parameters of the camera and distortion coefficients are solved respectively. Then, the robust calibration of fisheye lens can be completed. Experimental results show that compared with non-linear calibration methods, the proposed method increases computational efficiency about 10 times while keeping the accuracy and reliability of calibration.

**[Key words]** camera calibration; division model; fisheye lens; distortion center; intrinsic and extrinsic parameter

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0052987

### 0 概述

随着计算机技术的发展, 计算机视觉被广泛应用于各领域, 其得以实施的前提是通过相机标定(即相机内外参数的求解过程<sup>[1]</sup>)建立相机坐标系到真实世界坐标系的映射。传统标定方法利用靶标上的控制点来辅助标定。文献[2]提出一种由 3 个正交平面组成的高精度立体靶标进行相机标定的方法, 但由于成像模型过于简单, 效果不理想。文献[3]提出一种自标定方法, 根据相机参数本身的约束关系

进行标定。相比传统标定方法, 自标定方法不依赖于靶标, 但要求相机进行刚体运动, 而且精度相对传统标定方法差。文献[4]提出张正友标定法, 使用单平面棋盘格作为靶标, 制作简便, 精度明显优于自标定方法, 且对普通相机可以保证较高的精度, 是当时的主流方法。

但张正友标定法通过 LM 算法<sup>[5]</sup>求解相机参数, 因此存在传统非线性优化方法共有的局限性, 即初值设置不当容易使其陷入局部最优。针对该问题, 文献[6]提出自适应阻尼因子的 LM 算法, 文

**基金项目:** 国家自然科学基金(61501429)。

**作者简介:** 徐昀泽(1994—), 男, 硕士研究生, 主研方向为相机标定; 赵汝进(通信作者), 副研究员、博士; 马跃博, 博士研究生; 罗欣宇, 高级工程师、硕士。

**收稿日期:** 2018-10-26      **修回日期:** 2018-12-17      **E-mail:** 1579152168@qq.com

献[7]使用改进的遗传算法代替LM算法对内参数求解进行优化,文献[8]在数据归一化前对成像中心附近的点使用非线性优化方法预先优化参数。另外,张正友标定法需要采集标定板不同方位的多张图片,无法应用于运动受限的场景,对此,一些学者进行了相关的改进,如文献[9]使用立体靶标的LM迭代优化,实现单张图像的标定。

随着全景视觉的发展,鱼镜头得到了广泛应用<sup>[10-11]</sup>。鱼镜头视场角一般超过 $140^\circ$ 甚至 $180^\circ$ <sup>[12]</sup>,具有比普通镜头大得多的径向畸变。传统多项式畸变模型对较大畸变的描述效果不好,因此文献[13]引入除法模型<sup>[14]</sup>对鱼镜头进行自标定,相比其他模型,除法模型具备描述较大畸变的能力<sup>[14]</sup>,但由于自标定方法受场景、运动等因素影响,精度较低,难以应用在高精度测量中。

针对鱼镜头高精度标定的需求,本文提出一种基于除法模型的标定方法,利用立体标靶,并结合畸变中心的特性,避免局部极小值的干扰,实现快速鲁棒的标定。

## 1 相机成像模型

通常真实镜头引入的畸变无法用透视投影来建模<sup>[15]</sup>,因此为准确描述相机成像模型,本文采用如图1所示的针孔透视模型与畸变除法模型对相机成像进行描述。

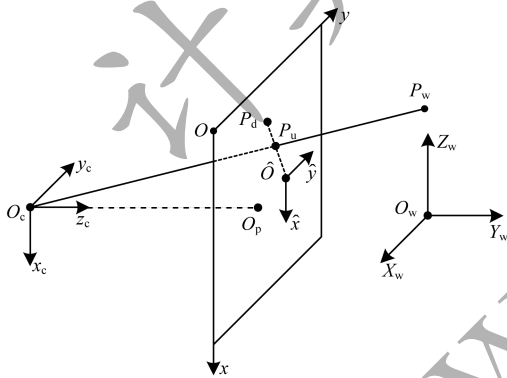


图1 相机成像模型

在图1中, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机(camera)空间坐标系, $O_{xy}$ 为像平面坐标系, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为真实世界(world)三维坐标系, $\hat{O} \hat{x} \hat{y}$ 为原点移至畸变中心的像平面坐标系。文献[16-17]实验证明畸变中心可能会明显偏离相机的成像中心或者主点,因此在该模型中畸变中心 $\hat{O}$ 和像主点 $O_p$ 不一定重合。

令 $P_w$ 为观测点在真实世界的三维坐标,则 $P_u$ 为 $P_w$ 在像平面上的无畸变的(undistorted)透视投影, $P_d$ 为 $P_w$ 在像平面上的带畸变的(distorted)真实投影。

设 $P_w$ 的坐标为 $V_w = (X_w \ Y_w \ Z_w \ 1)^T$ , $P_u$ 的坐标为 $v_u = (x_u \ y_u \ 1)^T$ ,则有:

$$\rho v_u = A[R \ t]V_w \quad (1)$$

其中, $\rho$ 为放缩因子, $A$ 为 $3 \times 3$ 的内参数矩阵, $R$ 为 $3 \times 3$ 的旋转矩阵, $t$ 为 $3 \times 1$ 的平移向量。

令投影矩阵为:

$$P = A[R \ t] \quad (2)$$

式(1)可简化为:

$$\rho v_u = PV_w \quad (3)$$

设 $P_d$ 的坐标为 $v_d = (x_d \ y_d \ 1)^T$ ,畸变中心 $\hat{O}$ 的坐标为 $e = (du_0 \ dv_0 \ 1)^T$ ,则真实像点 $P_d$ 到 $\hat{O}$ 的径向(radial)距离为:

$$r_d = \sqrt{(x_d - du_0)^2 + (y_d - dv_0)^2} \quad (4)$$

引入除法模型描述带畸变点 $P_u$ 和真实点 $P_d$ 的关系:

$$v_u - e = \frac{v_d - e}{1 + \lambda_1 r_d^2 + \lambda_2 r_d^4 + \dots} \quad (5)$$

## 2 标定方法

### 2.1 畸变中心估算

对单个像点,由式(5)可知:

$$v_d = e + k(v_u - e) \quad (6)$$

其中, $k = 1 + \lambda_1 r_d^2 + \lambda_2 r_d^4 + \dots$ 称为畸变因子。

在式(6)两边左乘向量 $e$ 的叉乘反对称矩阵 $e_x$ ,由 $e_x \cdot e = e \times e = 0$ 可知:

$$e_x v_d = k e_x v_u \quad (7)$$

其中:

$$e_x = \begin{pmatrix} 0 & -1 & dv_0 \\ 1 & 0 & -du_0 \\ -dv_0 & du_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

将式(7)两边左乘 $v_d^T$ ,由反对称矩阵的性质可知,等式左边 $v_d^T e_x v_d$ 为0,结合式(3)可得:

$$v_d^T e_x PV_w = 0 \quad (9)$$

令:

$$G_r = e_x P \quad (10)$$

式(10)可转换为:

$$v_d^T G_r V_w = 0 \quad (11)$$

其中, $G_r$ 为 $3 \times 4$ 矩阵,因此仅需最少12组已知点的坐标 $v_d$ 和 $V_w$ 即可求解 $G_r$ 。

对式(10)两边左乘 $e^T$ 得:

$$e^T G_r = e^T e_x P = 0 \quad (12)$$

将求取的 $G_r$ 代入式(12)即可求得畸变中心的坐标 $e$ 。

### 2.2 投影矩阵求解

由于 $e_x$ 是奇异矩阵,因此通过式(10)分解得到的投影矩阵 $P$ 不唯一。为方便求解,将像平面坐标系原点移至畸变中心 $\hat{O}$ 。此时,畸变中心坐标为 $\hat{e} = (0 \ 0 \ 1)^T$ ,相应的像点坐标变为:

$$\hat{\mathbf{v}}_d = \begin{pmatrix} \hat{x}_d \\ \hat{y}_d \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d - du_0 \\ y_d - dv_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -du_0 \\ 0 & 1 & -dv_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

令转换矩阵为:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -du_0 \\ 0 & 1 & -dv_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(13)简化为:

$$\hat{\mathbf{v}}_d = \mathbf{T} \mathbf{v}_d \quad (15)$$

结合式(11),得到矩阵  $\hat{\mathbf{G}}_r$  满足:

$$\mathbf{v}_d^T \mathbf{T}^T \hat{\mathbf{G}}_r \mathbf{V}_w = 0 \quad (16)$$

推导出:

$$\hat{\mathbf{G}}_r = \mathbf{T}^T \mathbf{G}_r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -du_0 & -dv_0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{G}_r \quad (17)$$

又由于  $\hat{\mathbf{e}} = (0 \ 0 \ 1)^T$ , 因此:

$$\hat{\mathbf{G}}_r = \hat{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \hat{\mathbf{P}} \quad (18)$$

令  $\hat{\mathbf{g}}_i^T$  为  $\hat{\mathbf{G}}_r$  的第  $i$  行,  $\hat{\mathbf{p}}_j^T$  为  $\hat{\mathbf{P}}$  的第  $j$  行, 则有:

$$\mathbf{g}_1^T = -\mathbf{p}_2^T, \mathbf{g}_2^T = \mathbf{p}_1^T \quad (19)$$

由于  $\mathbf{e}_x$  第 3 行为 0, 因此  $\hat{\mathbf{p}}_3^T$  无法由  $\hat{\mathbf{g}}_i^T$  表示。在坐标系  $\hat{O}\hat{x}\hat{y}$  下, 由式(3)和式(5)得到:

$$\frac{\rho}{\hat{k}} \begin{pmatrix} \hat{x}_d \\ \hat{y}_d \\ \hat{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{p}}_1^T \\ \hat{\mathbf{p}}_2^T \\ \hat{\mathbf{p}}_3^T \end{pmatrix} \mathbf{V}_w \quad (20)$$

该坐标系下新的畸变因子为:

$$\hat{k} = 1 + \lambda_1 \hat{r}_d^2 + \lambda_2 \hat{r}_d^4 + \dots \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)中, 简化后可得:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_d (\hat{\mathbf{p}}_3^T \mathbf{V}_w) - (\hat{\mathbf{p}}_1^T \mathbf{V}_w) \cdot (\lambda_1 \hat{r}_d^2 + \lambda_2 \hat{r}_d^4 + \dots) \\ \hat{y}_d (\hat{\mathbf{p}}_3^T \mathbf{V}_w) - (\hat{\mathbf{p}}_2^T \mathbf{V}_w) \cdot (\lambda_1 \hat{r}_d^2 + \lambda_2 \hat{r}_d^4 + \dots) \\ \hat{\mathbf{p}}_1^T \mathbf{V}_w \\ \hat{\mathbf{p}}_2^T \mathbf{V}_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{p}}_3^T \mathbf{V}_w \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (22)$$

将式(22)代入式(19)转换成矩阵乘法的形式:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_d \mathbf{V}_w & (-\hat{\mathbf{g}}_2^T \mathbf{V}_w) (\hat{r}_d^2 & \hat{r}_d^4 & 1) \\ \hat{y}_d \mathbf{V}_w & (\hat{\mathbf{g}}_1^T \mathbf{V}_w) (\hat{r}_d^2 & \hat{r}_d^4 & 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{p}}_3^T \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{g}}_2^T \mathbf{V}_w \\ -\hat{\mathbf{g}}_1^T \mathbf{V}_w \end{pmatrix} \quad (23)$$

将  $\hat{\mathbf{p}}_3^T$  作为未知参数进行分离, 通过若干点的坐标  $\mathbf{v}_d$  和  $\mathbf{V}_w$ , 即可一次性线性求解  $\hat{\mathbf{p}}_3^T$  和  $\lambda_i$ , 点数  $N$  满足  $2N \geq n + 3$ , 其中  $n$  为除法模型中系数  $\lambda_i$  的数量。结合式(3)和式(15)得到:

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}^{-1} \hat{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & du_0 \\ 0 & 1 & dv_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{\mathbf{P}} \quad (24)$$

将  $\mathbf{P}$  代入  $\hat{\mathbf{P}}$  可求得像平面坐标系  $Oxy$  下的投影矩阵  $\mathbf{P}$ 。

### 2.3 内外参数分离

设旋转矩阵  $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3)$ , 由式(2)可得:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}_i \quad (25)$$

由于  $\mathbf{R}$  为正交矩阵, 因此有:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_i^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}_j = 0 \\ \mathbf{p}_i^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_j^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p}_j \end{cases} \quad (26)$$

其中,  $1 \leq i, j \leq 3$  且  $i \neq j$ , 将  $i$  和  $j$  代入式(26)可以列出 5 个约束方程构成方程组。

内参数矩阵  $\mathbf{A}$  可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

式(27)仅包含 5 个内参数:  $f_x$  和  $f_y$  为  $x$  轴和  $y$  轴方向上的焦距,  $s$  为描述  $x$  轴和  $y$  轴倾斜角的参数,  $(x_0 \ y_0)$  为像主点的坐标。由于未知内参数数量等于式(26)的方程数量, 因此可以直接求解  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}^{-1}$ , 进而求解 5 个内参数。将  $\mathbf{A}$  代入式(2)即可求解外参数矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{t}$ 。

### 3 实验结果与分析

本文程序运行环境为: 操作系统 Windows10, 内存 6 GB, CPU Intel i5-4200M, Matlab2016a。使用 7.5 mm 鱼镜头 APS-C 画幅摄像机采集图像, 靶标为两正交的棋盘格平面组成。获取的靶标图像如图 2 所示。

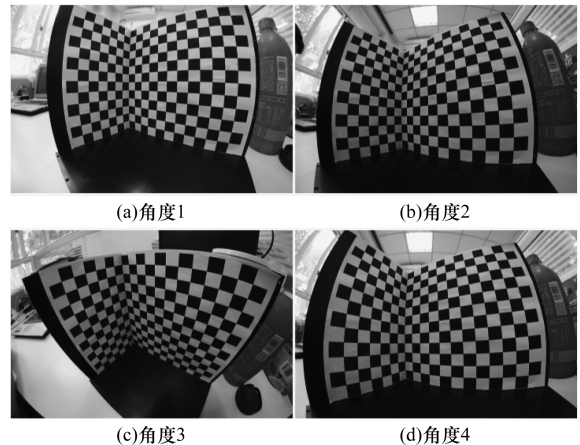


图 2 基于不同角度拍摄的靶标图像

通过角点提取方法可以得到每个角点(棋盘格顶点)在像平面的亚像素坐标  $v_d$ 。建立三维坐标系如图 3 所示,根据棋盘格实际大小,容易得到各角点(比如点  $P$ )在本体坐标系的三维坐标  $V_w$ 。

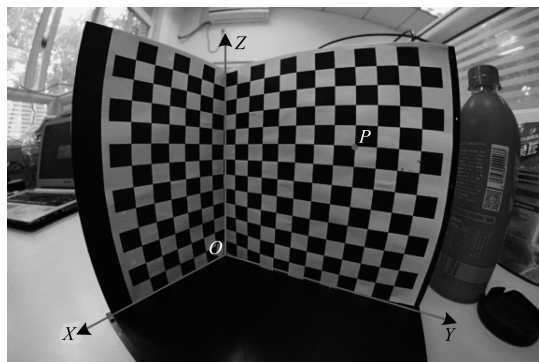


图 3 自定义三维坐标系

将  $v_d$  和  $V_w$  作为式(11)和式(23)的输入,即可完成标定。表 1 展示了本文方法和文献[9]方法的标定结果对比。2 种方法都采用立体靶标,只需 1 张图像即可完成标定,区别在于本文方法采用除法畸变模型结合线性求解方法,文献[9]方法采用多项式畸变模型,通过 LM 算法进行非线性优化求解。由表 1 可见,本文方法和文献[9]方法得到的焦距相差 2.0 像素~3.0 像素,主点坐标相差约 9.0 像素(由于文献[9]仅将张正友方法推广到三维靶标,仍未分离畸变中心,因此对主点精度影响较大),从而验证本文方法的有效性。

表 1 标定结果比较

内参数	本文方法	文献[9]方法
$f_x/\text{像素}$	721.5	723.8
$f_y/\text{像素}$	692.1	695.2
$x_0/\text{像素}$	978.2	967.2
$y_0/\text{像素}$	661.6	652.6
$s$	1.7	0.0

本文通过比较 5 张相片的重投影误差来评估标定精度,结果如表 2 所示。另外,将每张相片所有角点的  $x$  轴和  $y$  轴方向的重投影误差画在坐标系上,如图 4、图 5 所示。两种方法的重投影误差处于一个数量级。但是本文方法的重投影误差分布更集中,略优于文献[9]方法。

表 2 重投影误差对比

相片编号	本文方法	文献[9]方法
1	0.663 5	0.771 3
2	0.599 1	0.612 2
3	0.830 7	0.911 4
4	0.676 9	0.741 1
5	0.730 2	0.742 5

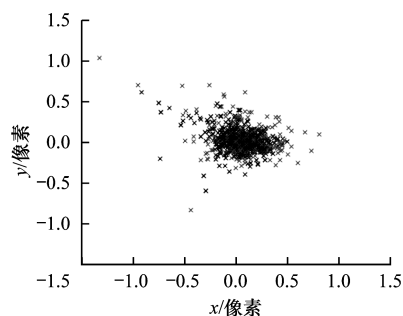


图 4 本文方法重投影误差

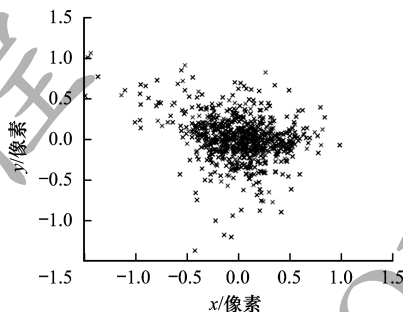


图 5 文献[9]方法重投影误差

由于本文提出的线性求解方法无需迭代,因此运行效率比文献[9]的非线性优化方法显著提升。图 6 显示了两种方法的标定时间比较,其中文献[9]方法的平均标定时间为 281.252 4 ms,本文方法的平均标定时间为 25.355 2 ms,可见,本文方法的标定速度是文献[9]方法的 10 倍左右。

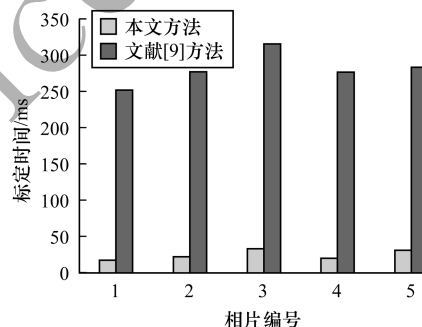


图 6 本文方法与文献[9]方法的标定时间对比

## 4 结束语

本文针对鱼眼镜头的特性,引入除法模型,利用畸变中心的解耦投影矩阵和畸变系数,提出鲁棒的鱼镜头线性标定方法。实验结果表明,该方法避免了传统非线性标定方法对初值敏感的问题,且求解过程为线性运算,极大提高了运行效率。在实际标定过程中,仅需已知靶标特征的空间分布,通过 1 次成像即可完成高精度的标定,适用于需要快速精确标定的场景。但由于本文线性标定方法是针对较大畸变的镜头,因此下一步将对畸变较小的镜头进行标定研究,使得该方法更具普适性。

## 参考文献

- [1] HE Meilin, GAO Minghui, LI Shuang, et al. Research on a monocular camera calibration algorithm [J]. Digital Communication World, 2018(5):11-14. (in Chinese)  
赫美琳, 高明慧, 李爽, 等. 一种单目相机标定算法研究[J]. 数字通信世界, 2018(5):11-14.
- [2] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 2003, 3(4):323-344.
- [3] FAUGERAS O D, LUONG Q T, MAYBANK S J. Camera self-calibration: theory and experiments [M]. Berlin, Germany: Springer, 1992.
- [4] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- [5] WILAMOWSKI B M, YU H. Improved computation for levenberg-marquardt training [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(6):930-937.
- [6] WANG Zihao, GUO Ling. Camera calibration research based on improved LM algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(10):94-96. (in Chinese)  
王子豪, 郭玲. 基于改进 LM 算法的摄像机标定研究[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(10):94-96.
- [7] CAO Yan, FU Jianghao, BAI Yu. Optimization and distortion analysis of camera nonlinear internal parameter calibration [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2017, 37(2):87-91. (in Chinese)  
曹岩, 付江浩, 白瑀. 摄像机非线性内参数优化标定与畸变分析[J]. 西安工业大学学报, 2017, 37(2):87-91.
- [8] LIU Yan, LI Tengfei. Research of the improvement of Zhang's camera calibration method [J]. Optical Technique, 2014, 40(6):565-570. (in Chinese)  
刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究[J]. 光学技术, 2014, 40(6):565-570.
- [9] ZHANG Jie, LI Xinde, DAI Xianzhong. Camera calibration method based on 3D board [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(3):543-548. (in Chinese)  
张捷, 李新德, 戴先中. 基于立体靶标的摄像机标定方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(3):543-548.
- [10] WANG Qichao. Panoramic visual observation technology based on double fish-eye lens [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)  
王启超. 基于双鱼眼透镜的全景视觉观测技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2018.
- [11] LIU Lei. An object surveillance system based on binocular vision guided by fish-eyes camera. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018. (in Chinese)  
刘蕾. 鱼眼镜头相机引导下的双目跟踪系统[D]. 天津:天津理工大学, 2018.
- [12] HOU Guozhu, LU Lijun. Design of fisheye lens system in visible light range [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2018, 16(3):90-95. (in Chinese)  
侯国柱, 吕丽军. 一款可见光鱼眼镜头系统设计[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(3):90-95.
- [13] ZHENG Liang, TAO Qian. Implementation of self-calibration and distortion correction for fish eye lens [J]. Computer Engineering, 2016, 42(9):252-256. (in Chinese)  
郑亮, 陶乾. 鱼眼镜头自标定和畸变校正的实现[J]. 计算机工程, 2016, 42(9):252-256.
- [14] FITZGIBBON A W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001:125-132.
- [15] RICOLFE-VIALA C, SANCHEZ-SALMERON A J. Camera calibration under optimal conditions [J]. Optics Express, 2011, 19(11):69-75.
- [16] HARTLEY R, KANG S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(8):1309-1321.
- [17] LI Hongdong, HARTLEY R. A non-iterative method for correcting lens distortion from nine point correspondences [C]//Proceedings of ICCV'05. Berlin, Germany: Springer, 2005:1-4.

编辑 陆燕菲