

# 基于迭代校正的鱼眼棋盘格图像角点检测

申夏晶<sup>1,2</sup> 程梦娇<sup>1,2</sup> 肖江剑<sup>2</sup> 宋文祥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

<sup>2</sup>中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

**摘要** 传统的棋盘格角点检测方法难以准确提取鱼眼图像边缘处的角点,造成相机标定精度低,为此提出一种面向鱼镜头大畸变成像的棋盘格角点检测方法。该方法通过多次拍摄和逐级迭代估计和优化相机参数,利用远距中心小畸变区域的图像获取相机初始参数,通过空间坐标变换和像素点灰度插值实现近距大畸变图像畸变补偿,进而实现对图像边缘处各角点的检测,并根据参数映射关系计算出近距大畸变图中所对应的角点坐标。仿真实验与真实鱼眼图像实验结果表明,该方法实现简单,能够有效提高角点检测的数量和质量,满足实际应用需求。

**关键词** 机器视觉; 测量; 角点检测; 畸变校正; 鱼镜头

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.091501

## Corner Detection for Fisheye Checkerboard Images Based on Iterative Correction

Shen Xiajing<sup>1,2</sup> Cheng Mengjiao<sup>1,2</sup> Xiao Jiangjian<sup>2</sup> Song Wenxiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

<sup>2</sup>*Ningbo Institute of Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China*

**Abstract** There is a challenging problem during camera calibration with fisheye lens using the traditional checkerboard corner detection method, and leads to low calibration precision of camera. So, an iterative correction checkerboard corner detection method for large distortion images is proposed. The main idea of this method is step by step iterative estimation and optimization of camera parameters through several shots. The camera initial parameters are obtained using the images from the remote-center small-distortion region. The distortion compensation of near-distance large distortion is realized through space and coordinate transformation and pixel interpolation gray. On this basis, the corner points of image edges can be detected, and the corner coordinates corresponding to the near-distance large-distortion images are calculated based on the parameter mapping relationship. Simulation and real image experimental results show that the proposed method is simple to be implemented, and improves the quantity and quality of corner detection effectively, which can satisfy the practical application requirements.

**Key words** machine vision; measurement; corner detection; distortion correction; fisheye lens

**OCIS codes** 150.0155; 120.1880; 110.2960; 040.1490

## 1 引言

鱼眼摄像机能一次性捕获视野 180°甚至更大范围的场景信息,在视频监控、机器人导航、目标跟踪及定位等领域具有广泛应用。鱼镜头的设计结构复杂,其成像呈强非线性和分辨率非均匀分布的特征,同普通

**收稿日期:** 2016-05-05; **收到修改稿日期:** 2016-05-12; **网络出版日期:** 2016-08-23

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2015BAF14B00)

**作者简介:** 申夏晶(1992—),女,硕士研究生,主要从事摄像机标定与视觉导航方面的研究。

E-mail: shenxiajing@nimte.ac.cn

**导师简介:** 肖江剑(1972—),男,博士,研究员,主要从事计算机视觉方面的研究。

E-mail: xiaojj@nimte.ac.cn (通信联系人)

相机相比存在更大的变形失真,因此普通视觉传感器所采用的相机标定方法无法满足精度的要求。近年来,鱼镜头的标定得到了广泛的关注<sup>[1-3]</sup>,其中应用较多的是基于参照物的标定方法,通常所采用的参照物有1D标定物<sup>[4-5]</sup>、2D模板<sup>[6-7]</sup>和3D标定块<sup>[8-9]</sup>。目前最常用的是棋盘格平面标定板,与3D标定相比,该方法简单可靠、易于实现。其中,棋盘格角点的检测精度是影响相机标定结果的重要因素,但是对于鱼镜头成像,周边变形较大,只有中心区域的角点容易准确提取,而在图像边缘的角点却很难准确提取,甚至检测不到。

针对上述问题,本文提出一种基于迭代校正技术计算棋盘格角点坐标的方法。在OpenCV配备的Vladimir等提出的算法的基础上,通过平面标定法估计鱼眼相机的参数,根据多次拍摄和逐级迭代优化相机参数。利用图像校正前后像素点坐标的映射关系,实现图像的畸变校正,然后对复原的鱼眼图像进行检测,可以精确地提取棋盘格角点坐标。最后通过坐标变换,计算得到原图中的角点坐标。与Vladimir算法对近距离拍摄的大畸变棋盘格图像角点检测相比,该方法不仅增加了检测到的角点数量,提高了检测的精度,而且能够得到更精确的相机参数,标定结果表明改进后的算法重投影误差更小。

## 2 鱼镜头畸变模型

对于鱼镜头的标定,基于镜头成像模型的标定方法应用广泛,精度较高。根据鱼镜头的设计原理,常采用的投影函数有等距投影、等立体角投影、立体投影和正交投影<sup>[10]</sup>。实际中由于制造的原因,光学成像系统都存在着不同程度的光学偏差和装配误差,这些误差易造成剧烈的镜头畸变,主要表现为由镜头自身光学结构引起的径向畸变。

对于径向畸变,投影中心的畸变量为0,越靠近边缘,镜头畸变越严重,因此可以在 $r=0$ 处将畸变函数展开为多项式形式。1980年Slama<sup>[11]</sup>最早提出用含有畸变系数的奇次多项式来模拟鱼眼图像的径向畸变,并得到了众多学者的关注。1996年Shah等<sup>[12]</sup>证明在标定鱼镜头时,即使采用七阶的奇次多项式径向畸变仍然存在,因此提出采用同时包含奇次项和偶次项的多项式模型(PFET)来代替单一的奇次多项式,增加了模型的自由度,改善了效果。对应的径向畸变函数为

$$r_d = \sum_{n=1}^{\infty} k_n r_u^n = k_1 r_u + k_2 r_u^2 + \cdots + k_n r_u^n, \quad (1)$$

式中 $r_d$ 为畸变半径, $r_u$ 为无畸变的理想半径, $k_n$ 为径向畸变系数。

Devemay等<sup>[13]</sup>基于鱼镜头的设计原理提出了视场角(FOV)模型。该模型只有一个参数,即对应理想鱼镜头的视场角 $\omega$ ,模型简单,计算量小。

$$r_d = \frac{1}{\omega} \arctan \left[ 2r_u \tan \left( \frac{\omega}{2} \right) \right], \quad (2)$$

$$r_u = \frac{\tan(r_d \omega)}{2 \tan \left( \frac{\omega}{2} \right)}. \quad (3)$$

如果只有一个参数的FOV模型不能满足复杂的鱼镜头畸变模型,则可以结合多项式模型添加额外的径向畸变系数 $\Delta r_d$ ,将 $\omega$ 作为一阶畸变系数。

$$\Delta r_d = k_2 r_u^3 + k_3 r_u^5 + k_4 r_u^7. \quad (4)$$

## 3 迭代校正的角点检测

基于迭代校正的角点检测流程如图1所示,该方法主要分为三个步骤。

### 3.1 估计相机参数

实验中所采用圆形鱼镜头视场角约为 $180^\circ$ 。首先,拍摄10张距离镜头较远的棋盘格图片,并且棋盘格靠近中心,以避免检测不到边缘上的角点;然后,进行标定,得到相机的初始参数,包括内参数和畸变参数,更换不同的畸变模型,得到不同的初始参数。利用这组参数对鱼镜头拍摄的远距小畸变图像校正结果较好,如图2所示。由于没有充分考虑到镜头边缘畸变,所以该方法估计出的参数与实际相机参数存在一定误

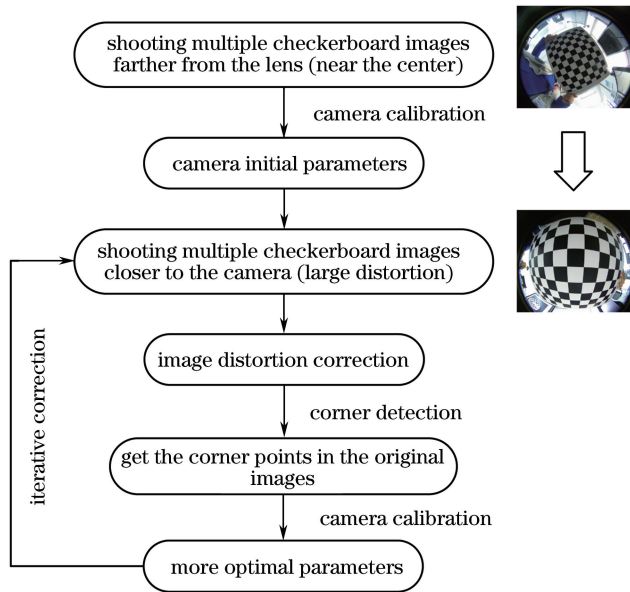


图 1 基于迭代校正的角点检测流程

Fig. 1 Corner detection process based on iteration correction

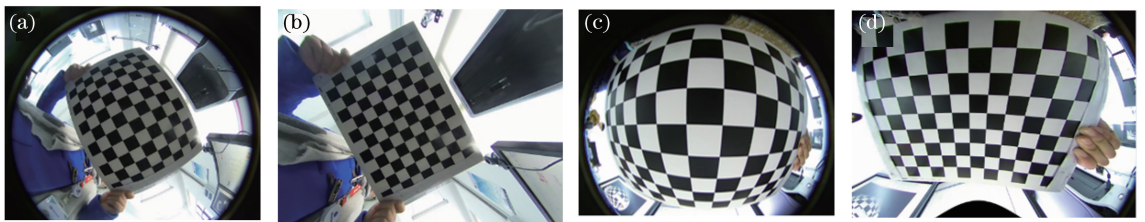


图 2 远距小畸变和近距大畸变图像以及相对应的校正图像。

(a)远距小畸变;(b)图(a)的校正图;(c)近距大畸变;(d)图(c)的校正图

Fig. 2 Distortion images of remote small distortion, close large distortion and corresponding correction images. (a) Remote small distortion image; (b) correction image of Fig. (a); (c) close large distortion image; (d) correction image of Fig. (c)

差,主要体现在利用这组参数对鱼镜头拍摄的近距大畸变图像校正结果较差[图 2(d)],以及最后得到的标定结果像素误差较大。

为了改善该问题,方法有:1) 采用多次拍摄与逐级迭代估计和优化相机参数。首先,拍摄 30 张棋盘格图片,与镜头距离分别为 12,7,5 cm 左右,各 10 张(距离镜头由远变近,棋盘格变形越来越大),并分为 3 类:远距小畸变棋盘格图像、较大畸变棋盘格图像、近距大畸变棋盘格图像。然后,利用远距小畸变棋盘格图像估计的初始内参数,对较大畸变棋盘格图像校正,通过角点检测算法获得棋盘格角点坐标,再进行标定,得到新的相机参数。最后,对这一过程进行迭代,利用大畸变的棋盘格图像(充分考虑边缘畸变)得到更优的参数。2) 采用模拟退火算法,将像素误差作为评价函数值,改变内参数,以一定的概率在解空间内不断改变搜索全局最优解,最后得到初始参数更优解。

### 3.2 鱼眼图像畸变校正

$r_u$  与  $r_d$  之间的关系取决于镜头的畸变模型。根据它们的数学关系可以得到畸变图像坐标和校正图像坐标的映射关系,利用此映射对图像进行校正,即可得到鱼眼图像的复原<sup>[14]</sup>。采用逆向映射的方法<sup>[15]</sup>实现像素点的空间坐标变换,其中,以校正后的图像像素坐标  $(u_i, v_i)$  为原始坐标,从左上角坐标  $(0, 0)$  开始,对  $x$ 、 $y$  方向分别移动一个像素,直至右下角的点截止,求出鱼眼畸变图像中对应的坐标。最后利用像素点灰度插值算法得到校正图像。

$$(x, y, z)^T = \mathbf{A}^{-1} (u_i, v_i)^T, \quad (5)$$

$$u = f_x \cdot \frac{x}{z} \cdot \frac{r_d}{r_u} + u_0, \quad (6)$$

$$v = f_y \cdot \frac{y}{z} \cdot \frac{r_d}{r_u} + v_0, \quad (7)$$

式中  $(x, y, z)$  为相机坐标系下任意一点,  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  为相机的内参数,  $f_x$  和  $f_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的等效焦距。

$(u, v)$  为对应的鱼眼畸变图像的像素坐标,  $(u_0, v_0)$  为鱼眼相机的成像中心。

### 3.3 获取原图中的角点

首先采用 Vladimir 算法提取校正后的鱼眼图像棋盘格亚像素角点。通过公式计算出原图中的角点。

$$x_u = \frac{u_j - u_0}{f_x}, \quad (8)$$

$$y_u = \frac{v_j - v_0}{f_y}, \quad (9)$$

$$r_u = \text{sqrt}(x_u^2 + y_u^2), \quad (10)$$

$$r_d = R(r_u), \quad (11)$$

$$u = f_x \cdot x_u \cdot r_d / r_u + u_0, \quad (12)$$

$$v = f_y \cdot y_u \cdot r_d / r_u + v_0, \quad (13)$$

式中  $(x_u, y_u)$  为无畸变的图像物理坐标,  $(u_j, v_j)$  是检测到的校正后的棋盘格角点,  $R(\cdot)$  为径向畸变函数。

## 4 实验与结果分析

通常情况下,鱼眼镜头的设计旨在遵循等距或等立体角投影函数,很少采用立体投影和正交投影函数。因此,在仿真实验中采用等距投影函数模拟鱼眼相机的成像模型。分别进行仿真实验与真实鱼眼图像的实验,并比较分析结果。

### 4.1 仿真实验

鱼眼相机的畸变模型采用 FOV 模型。对于等距投影,参数  $f$  可由  $f = (\omega_{\text{FOV}}/2)^{-1}$  得到,其中视场角  $\omega_{\text{FOV}} = 180^\circ$ 。鱼眼相机的内参数为:  $f_x = 418.0866, f_y = 418.3035, u_0 = 901.8821, v_0 = 940.5763, \omega = 1$ ; 外参数为: 旋转向量  $\mathbf{R}_1 = (1.5634, 2.66026, 0.316968)$ , 平移向量  $\mathbf{t}_1 = (-100.612, -320.967, 86.9447)$ 。

采用  $14 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$  的模拟 2D 空间点 ( $z$  设为 0), 图像大小为  $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$ , 根据设置的内外参数得到等距投影模型生成的图像像素点, 考虑到实际情况, 在每个像素点坐标加上 2 pixel 的高斯白噪声, 如图 3(a) 所示, 用“.”表示。“+”表示选择 FOV 畸变模型, 优化内外参数后得到的像素坐标。仿真得到的像素均方根误差 (RMSE) 为  $5.67343 \times 10^{-5}$ 。图 3 (b) 为校正后的鱼眼图像, 曲线已还原成直线, 验证了 FOV 模型的可靠性与灵活性。

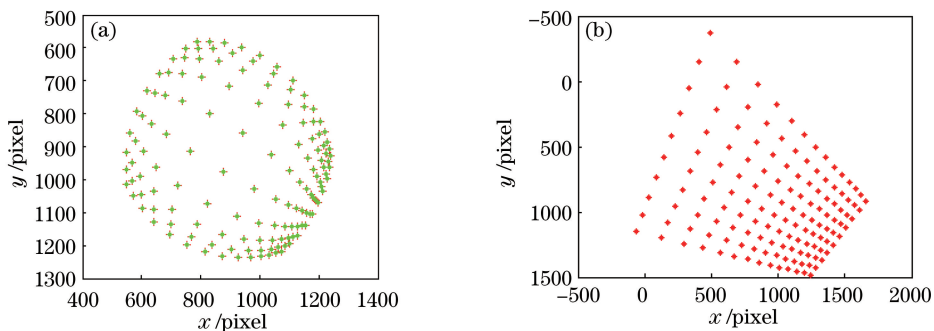


图 3 模拟实验结果。(a) 鱼眼图像(加白噪声); (b) 校正图像

Fig. 3 Results of simulation experiment. (a) Fisheye image (added white noises); (b) corrected image

由 FOV 模型模拟鱼镜头畸变生成的图像如图 4(a) 所示。由图 4(b) 可知, 边缘畸变较大, 利用 Vladimir 算法难以提取角点, 因此采用本文方法对鱼眼棋盘格图像进行校正[图 4(d)], 经过校正可以准确

地检测出所有的角点,最后结果如图 4(e)所示。

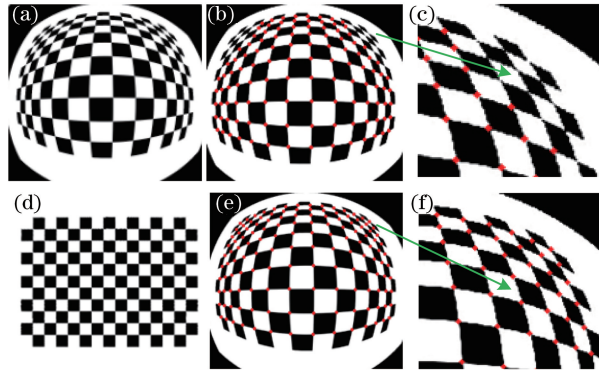


图 4 模拟鱼眼镜头畸变图像的两角点检测算法结果对比。(a)鱼眼棋盘格;(b) Vladimir 算法;(c)图(b)的局部放大图;(d)校正图像;(e)本文方法;(f)图(e)的局部放大图

Fig. 4 Comparison of corner detection results of simulated fisheye image with distortion.

(a) Fisheye checkerboard image; (b) Vladimir algorithm; (c) local enlarged drawing of Fig. (b); (d) corrected image; (e) proposed method; (f) local enlarged drawing of Fig. (e)

改变视场角,得到不同的鱼眼畸变图像,通过两种算法的检测结果,对比分析角点检测数量(准确率),如表 1 所示。可见,本文方法增加了检测的角点数量,且提高了检测的准确率。

表 1 两种算法的检测数量(准确率)对比

Table 1 Contrast of detection quantity (accuracy rate) of two algorithms

FOV	170°	180°	190°	200°
Vladimir algorithm	123(82%)	116(77%)	114(75%)	110(72%)
Proposed method	140(98%)	140(97%)	140(95%)	140(95%)

## 4.2 真实鱼眼图像实验

拍摄 10 张鱼眼棋盘格图像,大小为 2048 pixel×1536 pixel。采用先前得到的相机参数对鱼眼图像进行校正,其中一个校正结果如图 5 所示,弯曲线经校正后还原成直线,畸变的图像恢复成理想图像。分别采用几种不同的非线性畸变模型进行实验,包括 FOV 模型、增加额外径向畸变系数的二阶和三阶 FOV 模型以及五阶 PFET 模型。结果显示,本文方法可以有效且准确地检测出所有的棋盘格亚像素角点,如图 6 所示。与 Vladimir 算法直接检测原始图像相比,不仅增加了检测到的角点数量,而且提高了检测的精度;同时,增多可用于摄像机的数据,参数计算会更精确。

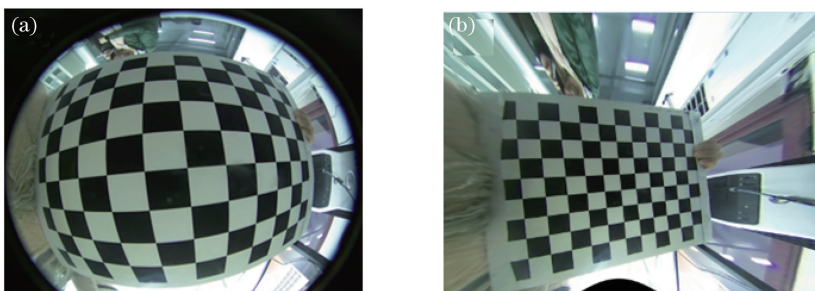


图 5 (a)真实的鱼眼图像和(b)校正结果

Fig. 5 (a) Real fisheye image and (b) correction result

为了验证该算法的有效性,运用平面相机标定法对鱼眼摄像机进行标定,分别采用 Vladimir 算法和所提算法对棋盘格标定板进行角点检测,求出重投影误差。表 2 列出了重投影误差的数据,包括  $x$ 、 $y$  方向的平均误差  $E_u$ 、 $E_v$ 、RMSE,结果表明,本文算法具有较高的定位精度。

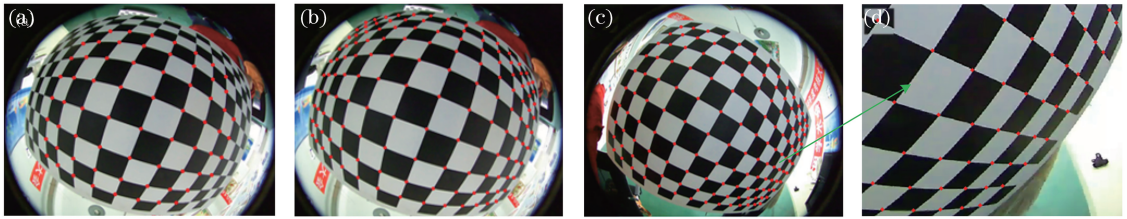


图 6 两种角点检测算法的结果对比。(a) Vladimir 算法;(b)(c)本文方法;(d)图(c)的边缘放大图

Fig. 6 Comparison of the corner detection results of two algorithms. (a) Vladimir algorithm;

(b)(c) proposed method; (d) local enlarged drawing of Fig. (c)

表 2 标定结果数据对比分析

Table 2 Comparative analysis of calibration results

Error	$E_u$	$E_v$	RMSE /pixel
Vladimir algorithm	0.7069	0.7108	1.0025
Proposed method	0.4932	0.5006	0.7027

## 5 结 论

针对鱼镜头拍摄的大畸变棋盘格图像,提出了基于逐级迭代和图像校正技术的棋盘格角点检测方法。为证明该方法的可靠性,分别进行了模拟仿真实验和真实鱼眼棋盘格图像实验。结果表明,该方法可以有效提高图像边缘处角点检测的精度和准确度,并且获得了较好的标定结果,具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Wang X F, Feng W J, Liu Q J. Calibration research on fisheye lens[C]. IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), 2010: 385-390.
- 2 Wu Zejun, Wu Qingyang, Zhang Baichun. A new calibration method for fisheye lens based on spherical model[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0508006.  
吴泽俊, 吴庆阳, 张佰春. 一种新的基于球面模型的鱼镜头标定方法[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508006.
- 3 Wang Yongzhong. Fisheye lens optics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 5-15.  
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 5-15.
- 4 Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0115001.  
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0115001.
- 5 Zhang Lingfei, Chen Gang, Ye Dong, *et al.* Cameras calibration based on one-dimensional reference object and improved evolutionary strategy[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3136-3142.  
张灵飞, 陈刚, 叶东, 等. 基于一维标定物和改进进化策略的相机标定[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3136-3142.
- 6 Zhang Min, Jin Longxu, Li Guoning, *et al.* Camera distortion calibration method based on straight line characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615001.  
张敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615001.
- 7 Bu Penghui, Zhao Hong, Gu Feifei, *et al.* A fully automatic camera calibration method based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.  
卜鹏辉, 赵宏, 谷飞飞, 等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015004.
- 8 Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: The Cambridge University Press, 2000: 65-77.
- 9 Xu Xiaobo. Research on fisheye camera calibration and fisheye image matching [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013: 38-42.  
徐晓波. 鱼眼摄像机标定及图像特征点匹配方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013: 38-42.
- 10 Hughes C, Denny P, Jones E, *et al.* Accuracy of fisheye lens model[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3338-3347.

- 11 Slama C. Manual of photogrammetry[M]. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1980.
- 12 Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation[J]. Pattern Recognition, 1996, 29(11): 1775-1788.
- 13 Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight: Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments[J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1): 14-24.
- 14 Lai Hanxuan, Zhang Zhengyu, Zhu Long, *et al*. Nonlinear distortion correction of camera based on linear characteristic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021502.  
赖瀚轩, 张征宇, 朱 龙, 等. 基于直线特征的摄像机非线性畸变自校正[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021502
- 15 Xiao Han. Correction algorithm of fish-eye lens image distortion based on accurate estimation of the distortion center[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2011: 19-24.  
肖 茜. 基于失真中心精确估计的鱼眼图像畸变校正算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2011: 19-24.