

doi: 10.3788/gzxb20164505.0512005

基于质心点优化的鱼眼摄像机标定

宋涛^{1,2}, 褚光宇¹, 侯培国¹, 李海滨¹, 陈琛^{1,2}

(1 燕山大学 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

(2 秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 针对圆形标志点标定鱼镜头模型参量准确度不高的问题, 提出一种基于质心点优化的鱼眼相机标定方法. 首先在已有的鱼镜头成像模型的基础上, 获取模型内外参量的初值, 并利用两步求解法求取畸变参量的初值; 然后通过模型求取标志圆的投影椭圆, 对该投影椭圆和图像上的椭圆分别求质心, 进而建立目标函数并优化模型各参量, 最后实现鱼镜头的精确标定. 模拟实验和真实图像实验结果均表明: 本文提出的方法能够明显提高鱼镜头的标定准确度, 为鱼眼视觉相关问题的研究提供了可靠的参量依据.

关键词: 机器视觉; 摄像机标定; 质心点优化; 鱼镜头; 畸变参量; 图像校正; 圆形标志点

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0512005-6

Fisheye Camera Calibration Algorithm Optimized by Centroid Method

SONG Tao^{1,2}, CHU Guang-yu¹, HOU Pei-guo¹, LI Hai-bin¹, CHEN Chen^{1,2}

(1 Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

(2 Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao, Hebei 066000, China)

Abstract: Due to the low calibration accuracy for fisheye lenses by using circular control points, this paper proposes a fisheye camera calibration algorithm optimized by centroid method. Firstly, initial values of intrinsic and extrinsic parameters of imaging model were obtained, and then initial value of distortion parameters were solved by Two Step method. Secondly, centroid of ellipse detected from image and ellipse projected by imaging model were solved respectively. Then distance between those two centroid was minimized and cost function was established in order to optimizing the model's parameters. Finally, parameters of imaging model were calibrated precisely. Experiment results with quantitative and qualitative comparison show that our method can improve the accuracy of calibration for fisheye lens.

Key words: Machine vision; Camera calibration; Centroid optimization; Fisheye lenses; Distortion parameters; Image correction; Circular control points

OCIS Codes: 120.0120; 010.1290; 150.1488; 330.7326

0 引言

近年来, 具有较大视场的鱼眼摄像机逐渐被应用到机器人导航、视频监控以及三维重建等计算机视觉领域^[1-3]. 其中许多领域对于测量准确度都有一定的要求, 如产品质量检测、三维测量等^[4-5]. 然而, 鱼镜头在获取大视场的同时会发生形变, 传统成像模型不再成立, 模型成像准确度受到影响^[6]. 因此, 如何得到更

精确的成像模型是鱼眼相机研究的重要方向之一.

工程上把视场角大于 120° 的镜头称为鱼镜头. 为提高鱼镜头的标定准确度, 文献[7-9]提出采用高阶奇次多项式法近似地估计鱼镜头模型, Kannala J^[9]给出了一种含 14 个参量的畸变模型. 一般情况下, 该方法能够较好地描述鱼镜头的成像过程, 但模型中引入的未知参量尤其是畸变参量过多, 容易引起解的不稳定. 针对该问题, 李海滨^[10]提出一种优化的鱼

基金项目: 河北省自然科学基金(Nos. D2014203153, D2015203310)资助

第一作者: 宋涛(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为图像处理及机器视觉、智能仪器设计. Email: tonysong66@gmail.com

通讯作者: 侯培国(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能仪器设计. Email: pghou@ysu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-23; 录用日期: 2016-02-03

<http://www.photon.ac.cn>

鱼镜头模型,以鱼镜头内部结构中每组镜片的入射角与折射角之间的关系作为成像理论,并以此建立了新的畸变模型,该模型参量少、复杂度小、准确度高。从优化标定方法的角度考虑,为了减少标定过程中人为或机器误差,Gui C^[11]证明了圆形标志点比棋盘格标定板标定模型参量更精确,而 Rudakova V^[12]指出使用圆形标志点也存在一定误差,其标志圆圆心与对应的图像椭圆的质心并不是对应的空间点与图像点,并针对该问题提出二次曲线仿射变换的方法,然而该方法是建立在针孔成像模型的基础上的,并不适用于鱼眼相机模型。

本文提出一种质心点优化法用于鱼眼相机标定。在文献[10]提出的鱼镜头模型的基础上,采用圆形标志点标定模型参量,通过模型求取标志圆的投影椭圆,并对该投影椭圆和图像椭圆分别求质心作为优化点对,最小化该优化点对的距离并以此建立新的目标函数,解决标志圆圆心与图像椭圆质心不对应的问题,最后提出用两步求解法求得该目标函数所需畸变参量的初值,提高了模型参量的标定准确度。

1 鱼镜头成像模型

对鱼眼相机进行标定,需要建立数学模型。鱼镜头具有很大的视场角,从光学上说,这种大视场可通过人为地引入大量“桶形”畸变来实现;从数学上说,就是选择恰当的理想成像公式。本文的鱼镜头遵循等立体角投影定理,即

$$r = 2f \sin(\theta/2) \quad (1)$$

式中, θ 为入射角, r 为图像上一点到图像中心的距离, f 为镜头焦距,由此建立鱼镜头的成像模型,如图1。 P 为空间点,按照等立体角投影定理,该点投影到图像点 p , p 点到图像中心的距离为 r ,与 x 轴夹角为 φ 。遵循其他投影定理的成像模型与之相同。

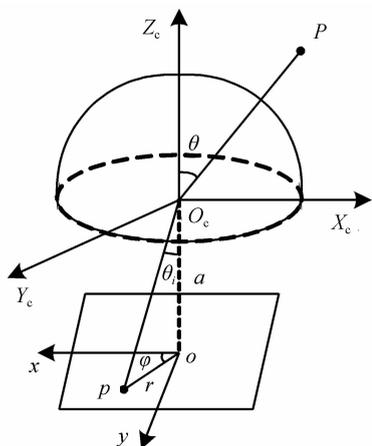


图1 鱼眼相机的成像模型

Fig. 1 The imaging model of fisheye camera

1) 世界坐标系转化到摄像机坐标系

$$X_c = \mathbf{R}X_w + \mathbf{t} \quad (2)$$

式中 X_w 为世界坐标系坐标, $X_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ 为摄像机坐标系坐标, \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移向量。

2) 摄像机坐标系投影到成像平面

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中 (x, y) 为图像坐标, (θ, φ) 可由 X_c 转换为极坐标得到。由于镜片存在加工误差,式(1)无法反映镜头的真实成像,因此,本文采用光学折射法估计鱼镜头成像^[10],以镜头内部结构中每组镜片的入射角与折射角之间的关系作为成像理论,即

$$r = \frac{a \sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

式中参量 a 相当于镜头焦距, a 与 n^2 均为常量。

3) 引入径向畸变 Δr 和切向畸变 Δt

采用文献[10]提出的畸变模型

$$\begin{cases} \Delta r = 3(i_1 r^2 + i_2 r^4)(m_1 \sin \varphi - m_2 \cos \varphi) \\ \Delta t = (j_1 r^2 + j_2 r^4)(m_1 \cos \varphi + m_2 \sin \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中 r 为式(4)关于 θ 的函数, $i_1, i_2, j_1, j_2, m_1, m_2$ 为畸变模型参量。

通过式(6)来修正镜头的径向以及切向畸变,即

$$\begin{cases} x_d = (r + \Delta r) \cos \varphi - \Delta t \sin \varphi \\ y_d = (r + \Delta r) \sin \varphi + \Delta t \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中 $(x_d, y_d)^T$ 为加入畸变后的图像坐标。

4) 加入畸变后的成像平面转化到以像素为单位的图像坐标系

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_u & 0 \\ 0 & m_v \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 $m = (u, v)^T$ 为图像的像素坐标, $m_u, m_v, (u_0, v_0)$ 均为鱼眼相机的内部参量。令 G 为该鱼眼相机成像模型,记作

$$m = G(X_w) \quad (8)$$

2 质心点优化法建立目标函数

2.1 质心点优化法

相机标定方法一般需要用到标定板。目前常用的棋盘格标定板提取角点的准确度不高,而使用圆形标志点可达到亚像素准确度^[13]。因此,本文用圆形标志点求解模型参量。在对模型参量进行标定时,需要用到一系列空间点与图像特征点对,特征点对选取的好坏,直接影响了对镜头模型参量进行非线性优化的精确程度。然而,由于图像畸变的存在,标定板圆的圆心和图像椭圆的质心并不是对应点。针对该问题,提出了一种质心点优化法以提高标定准确度。如图2所示,投影椭圆为标定圆通过鱼镜头模型 G 投影到图像上形成的椭圆,图像椭圆为鱼眼图像上检测到的椭圆。对投影椭圆与图像椭圆分别求质心得到质点 \hat{m} 和 m ,这两点

即为对应的同一图像点.由于误差的存在,成像模型 G 难以达到理想模型,因此 \hat{m} 与 m 并不相同,本文通过最小化 \hat{m} 与 m 的距离建立目标函数来优化模型参数.

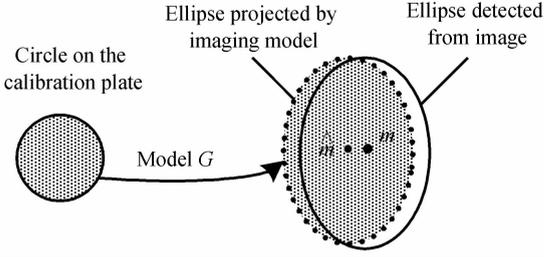


图2 质心点优化法

Fig. 2 Centroid optimization method

2.2 建立目标函数

设标定板上某一标定圆的圆心坐标为 $X_w = (X_0, Y_0, 0)^T$, 半径为 R , 则该圆内任意一点 P_i 表示为

$$P_i(\rho, \omega) = (X_0 + \rho \sin \omega, Y_0 + \rho \cos \omega, 0)^T \quad (9)$$

式中 $\rho \in [0, R]$, $\omega \in [0, 2\pi]$. 由式(8)可求出点 P_i 对应的图像点 $P'_i = (x_i(\rho, \omega), y_i(\rho, \omega))^T$, 标定板认为是均匀密度的薄板, 质量元素即为面积元素 $d\sigma$. 由质心的定义可知, 投影椭圆的质心 \hat{m} 为

$$\hat{m} = \frac{\iint_{(\sigma)} P'_i d\sigma}{\iint_{(\sigma)} d\sigma} \quad (10)$$

对式(10)的重积分进行换元后, 得到

$$\hat{m} = \frac{\int_0^R \int_0^{2\pi} (x_i(\rho, \omega), y_i(\rho, \omega))^T |J_i(\omega, \rho)| d\omega d\rho}{\int_0^R \int_0^{2\pi} |J_i(\omega, \rho)| d\omega d\rho} \quad (11)$$

式中 $|J_i(\omega, \rho)|$ 为式(8)关于 ρ 和 ω 的二阶雅可比行列式. 由于成像模型 G 比较复杂, 不能直接对式(11)进行积分运算, 因此考虑用离散的数值求积分. 本文对 ρ 和 ω 的积分上下限进行分块, 具体方法是 ρ 在 0 到 R 之间等分为 25 份, ω 在 0 到 2π 之间等分为 25 份, 因此, 相当于在标定圆中均匀的选取 $N = 25 \times 25 = 625$ 个离散点逼近式(11)的积分. 则质心式(11)可近似为

$$\hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i(\rho, \omega), y_i(\rho, \omega))^T |J_i|]}{\sum_{i=1}^N |J_i|} \quad (12)$$

式中 $\sum_{i=1}^N |J_i|$ 相当于投影椭圆的面积. 通过最小化 \hat{m} 与 m 之间的距离, 最终得到目标函数为

$$E = \min \sum_{i=1}^M [d(m_i, \hat{m}_i)]^2 \quad (13)$$

式中 M 为提取标志圆的个数, m_i 为实际图像中第 i 个椭圆的质心坐标, \hat{m}_i 为由模型计算得到的第 i 个投影椭圆的质心坐标.

3 鱼眼摄像机标定

3.1 模型参量初始化

建立优化的目标函数后, 需要求解的参量有: a 、 n^2 、 m_u 、 m_v 、 u_0 和 v_0 共 6 个内部参量; 外部参量有旋转矩阵 R 和平移向量 t ; 畸变参量为 i_1 、 i_2 、 j_1 、 j_2 、 m_1 和 m_2 . 内外参量初始化方法如下:

1) 求解内部参量初值

光学折射模型中的参量 a 和 n^2 的初值可由文献[10]求得. 对于以椭圆(或圆)为成像边界的鱼眼图像, 可以求出该椭圆(或圆)的一般方程为

$$Au^2 + 2Buv + Cv^2 + 2Du + 2Ev + F = 0 \quad (14)$$

选取椭圆(或圆)中心作为 (u_0, v_0) 的初值, 由文献[14]可以得到 m_u 和 m_v 的初值为

$$\begin{cases} m_u = \sqrt{-\frac{B^2 + C}{A^2 + A}} \\ m_v = \frac{B}{A} \end{cases} \quad (15)$$

2) 求解外部参量初值

估计上述内部参量初值后, 可以由式(8)、(3)和(2)求出空间点对应的摄像机坐标点 X_c . 这里, 用 $\lambda X_c = H X_w$ 表示摄像机坐标点和空间点之间的关系, H 为单应性矩阵, 并用张正友的方法[15]估计外部参量的初值.

3) 两步求解法求畸变参量初值

由式(5)、(6)知, 该模型共有 6 个畸变参量, 大多数文献[14]在选择畸变参量初值时, 会赋各个参量初值为 0. 然而, 对于畸变较大的鱼镜头, 这样选择必然会影响到标定准确度. 另一方面, 所有畸变参量赋值为 0, 极易使求解结果陷入局部最优解, 导致很大的求解误差. 为解决畸变参量初值的求解问题, 本文提出两步求解法, 为优化目标函数提供一个准确的初值. 具体方法如下:

第一步, 先将摄像机视为理想成像系统, 并选取图像中心区域作为标定的初始像点, 以减少畸变的影响, 用质心点优化法(不含畸变)获得理想图像坐标点 (x_p, y_p) , 由式(8)得到实际图像坐标点 (x_d, y_d) .

第二步, 由式(6)可以得到理想与实际图像坐标点的关系, 通过这个关系可以求出畸变参量的初值. 根据径向畸变以及切向畸变的定义[15], 只取径向畸变 Δr 的前半部分和切向畸变 Δt 的后半部分. 通过上述方法及公式可以推导出:

$$\begin{cases} x_d - x_p = 3(i_1 r^2 + i_2 r^4) \cos \varphi - (m_1 \cos \varphi + m_2 \sin \varphi) \sin \varphi \\ y_d - y_p = 3(i_1 r^2 + i_2 r^4) \sin \varphi + (m_1 \cos \varphi + m_2 \sin \varphi) \cos \varphi \end{cases} \quad (16)$$

由于 r 可求, 因此上述两个公式均为线性, 有 4 个待求

畸变参量,可选取图像中心附近区域的 2 组对应点求出这些未知参量. 本文采用多组对应点并求畸变参量算数平均的方法,作为畸变参量的初值.

3.2 标定方法的实现

采用圆形标志点的标定板进行鱼眼摄像机标定,主要步骤如下:

- 1) 获取所选取圆心的世界坐标点与对应的图像坐标点;
- 2) 求解模型内、外参量的初值,并用两步求解法求出畸变参量的初值;
- 3) 通过质心点优化法建立目标函数,采用 Levenberg-Marguardt^[16] 优化算法,在最小化目标函数的过程中,实现对鱼镜头模型参量的标定.

4 实验

4.1 模拟数据实验

模拟实验用来验证本文提出的质心优化法的鲁棒性. 使用真实拍摄的 12 幅标定板图片,以此得到的 432 个圆心图像坐标作为模拟实验数据(圆的半径 $R = 15 \text{ mm}$),模拟实验所用摄像机参量设定为 $a = 1.27$, $n^2 = 1.73$, $m_u = m_v = 131$, $i_1 = -0.01$, $i_2 = -0.02$, $j_1 = -0.01$, $j_2 = -0.02$, $m_1 = m_2 = -0.001$, R_i 和 t_i 随机生成. 为了验证质心优化法的稳健性,在获得的圆心点图像坐标上加入标准差为 $0 \sim 3 \text{ pixel}$ 的高斯随机噪声,在不同的噪声水平下重复 100 次实验,消除随机性的影响,以模型反投影点与实际像点的均方根误差(RMS)为标准,误差公式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(u_{ij}^{\wedge} - u_{ij})^2 + (v_{ij}^{\wedge} - v_{ij})^2]}{n \cdot m}} \quad (17)$$

式中 $(u_{ij}^{\wedge}, v_{ij}^{\wedge})$ 为第 i 图中第 j 个投影椭圆的真实质心坐标, (u_{ij}, v_{ij}) 为加入高斯随机噪声后反投影计算得到的第 i 图中第 j 个投影椭圆的质心坐标. 本文方法的 RMS 误差和噪声水平关系曲线如图 3.

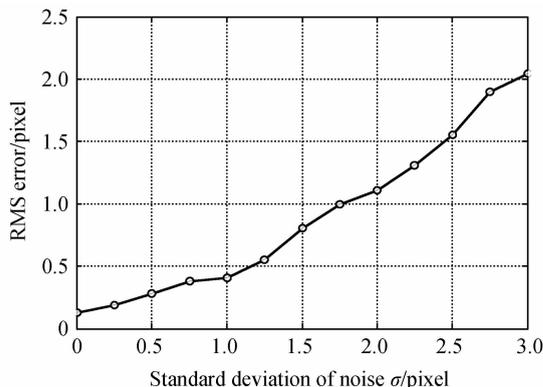


图 3 RMS 误差和噪声水平关系曲线

Fig. 3 Relationship between RMS error and noise level

从图 3 的仿真结果可以看出,随着噪声的提高,RMS 误差有所增高,但增长的幅度并不大. 噪声水平小于 1 pixel 时,准确度能达到 0.5 pixel 以内,在高噪声的情况下,本文提出的质心优化法仍能保持一定的准确度. 因此,仿真结果表明,本文算法具有较好的鲁棒性.

4.2 真实图像实验

真实图像实验中,本文使用的硬件设备包括: NM33-F 鱼眼摄像头,视场角为 180° , CCD 分辨率为 $640 \times 480 \text{ pixel}$, 焦距 1.27 mm , 并遵循等立体角投影; $420 \times 594 \text{ mm}$ 规格的标定板,其中圆的半径 $R = 15 \text{ mm}$, 相邻圆心间距 40 mm ; 视觉支架台; Intel Core 2 处理器的计算机. 实验在 Matlab 2010a 环境下运行.

4.2.1 离散点 N 的选取及标定性能分析

式(12)中离散点 N 是数值积分求图像椭圆质心的一个重要的参量. 本文实验从不同角度对标定板共拍摄 12 次,共选取 432 个标定圆,每个标定圆用 N 个离散点进行近似积分运算. 图 4 为离散点 N 与标定误差和标定时间的关系曲线,可以看出,本文方法的标定误差随着离散点 N 的增加而减小,在 $N = 10 \times 10$ 时,与传统的使用标定圆圆心的方法误差相当; $N > 10 \times 10$ 时,误差小于使用标定圆圆心的方法;当 N 增加到一定程度时,标定误差变化不明显,基本趋于稳定,而标定时所需时间却越来越长. 综合以上因素,本文选取 $N = 25 \times 25$ 进行近似积分运算,在保证准确度的同时,兼顾了标定时间.

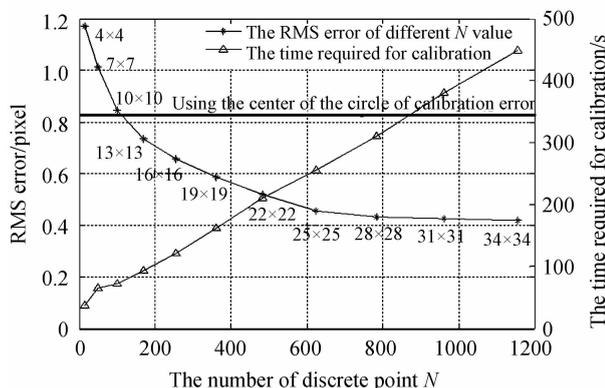


图 4 离散点 N 与标定误差和标定时间的关系曲线

Fig. 4 Relationship among the number of discrete point N , RMS error and times

采用离散点 $N = 25 \times 25$ 进行近似积分运算求出投影椭圆的质心,非线性优化前的投影椭圆和图像椭圆的质心坐标如图 5 所示,“ \cdot ”为投影椭圆的质心坐标,“ $+$ ”为图像椭圆的质心坐标,“ $*$ ”为标定圆圆心的投影坐标,可以看出,经过质心点优化的质心更接近于图像椭圆的质心. 最后优化得到本文方法的标定参量,结果见表 1. 为验证本文方法(方法 1)的有效性,与文献^[10]未进行质心优化的方法(方法 2)的标定性能进

行对比,结果如表 2.

由表 2 可以看出,方法 1 的模型参量标定的平均误差、均方根误差和残差三个标定性能均优于方法 2. 由此可知,本文提出的方法对于各项标定性能都有很大的提升,具有更高的标定准确度.

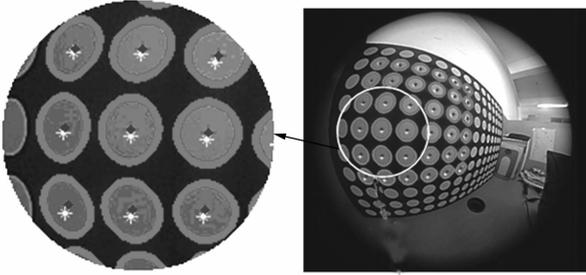


图 5 标定图像
Fig. 5 Calibration image

表 1 参量标定结果

Table 1 Parameter calibration results

Parameter	Value
a, n^2	1.275 0, 1.739 5
m_u, m_v	131.553 0, 131.534 3
u_0, v_0	318.613 6, 241.389 3
i_1, i_2	-0.012 2, -0.022 0
j_1, j_2	-0.190 0, -0.021 4
m_1, m_2	-0.010 4, -0.000 7

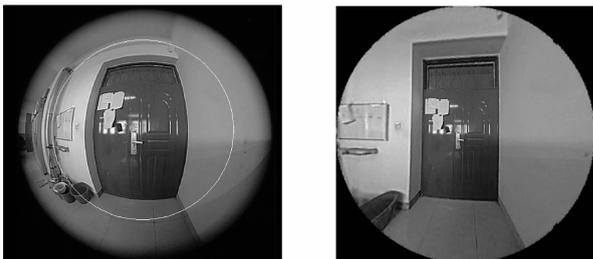
表 2 两种方法的标定性能比较

Table 2 Comparison of calibration performance between two different methods

	Mean error /pixel	RMS error /pixel	Residuals /pixel	
			u	v
Method 1	0.376 5	0.454 7	0.263 0	0.374 8
Method 2	0.757 0	0.829 8	0.555 3	0.620 8

4.2.2 图像校正对比实验及结果分析

为了分别验证提出的质心点优化法和两步求解法的有效性,本文方法(方法一)分别与文献[10]未进行质心优化的标定方法(方法二),和未采用两步求解法、直接令畸变参量初值为 0 的本文方法(方法三)进行对比实验. 采集大量实际的鱼眼图像,并随机选取两组实际图像进行分析,用三种方法的标定数据分别对鱼眼图像进行畸变校正,图 6 为第一幅鱼眼图像(门框图像)及校正图像,图 7 为第二幅鱼眼图像(教学楼图像)及校正图像,均选取 140° 校正范围.



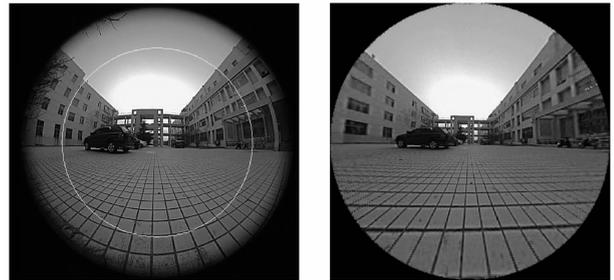
(a) Fisheye image (b) Corrected image of the method 1



(c) Corrected image of the method 2 (d) Corrected image of the method 3

图 6 第一幅实景图图像校正

Fig. 6 The first corrected image of real scene



(a) Fisheye image (b) Corrected image of the method 1



(c) Corrected image of the method 2 (d) Corrected image of the method 3

图 7 第二幅实景图图像校正

Fig. 7 The second corrected image of real scene

从图 6(b)和图 7(b)可以看出,采用方法一校正得到的图像,门框和地面纹理比较直;图 6(c)和图 7(c)是采用方法二得到的校正图像,图中的门框、地面横向纹理仍有一定程度的弯曲;采用校正方法三的图 6(d)的门框边缘略有弯曲,图 7(d)的地面横向纹理也稍有弯曲,但不明显. 因此,直观上可以看出,用本文方法校正的图像更接近真实图像. 值得注意的是,仔细观察用三种方法校正后的图像,会发现它们的图像范围稍有不同,这是由于不同标定方法求出的光心位置以及图像半径等参量不完全相同,因此校正的图像范围也不完全相同.

然后,对鱼眼畸变图像恢复程度进行定量分析. 随机提取 10 条校正图像中的边缘曲线,进行直线拟合,若图像无畸变,则图像上的点到拟合直线的距离应为 0. 因此可以通过计算边缘曲线到拟合直线的平均距离作为衡量标定准确度的标准,距离越小,说明图像恢复的越好,准确度越高. 经过计算,方法一的图 6(b)和图

7(b)的平均距离分别为 0.6067 pixel 和 0.4980 pixel, 弯曲程度最低, 效果最好; 方法二的图 6(c)和图 7(c)的平均距离分别为 1.7775 pixel 和 1.2947 pixel, 效果最差; 方法三的图 6(d)和图 7(d)的平均距离分别为 0.6980 pixel 和 0.6011 pixel, 优于方法二的校正图像. 两组对比实验表明, 本文提出的质心点优化法大大地提高了鱼镜头的标定准确度, 同时也证明了两步求解法的有效性和本文方法的普适性.

5 结论

对摄像机标定准确度的相关问题进行了研究, 提出了一种质心点优化法用于标定鱼眼相机, 并解决了模型畸变参量初值的求解问题. 实验结果表明, 本文的质心点优化法有效地解决了标志圆心与图像椭圆质心不对应的问题, 可以明显提高鱼眼摄像机的标定准确度, 弥补了鱼眼相机使用圆形标志点的缺陷. 综上所述, 基于质心点优化的标定法是一种有效的标定方法, 为鱼眼视觉后续匹配与重建相关问题的研究提供了切实可行的参考方案.

参考文献

- [1] LI Wei-shan, CHEN Chen, SONG Tao, *et al.* Design of ultra wide-angle digital universal projection lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 29-37.
李维善, 陈琛, 宋涛, 等. 超广角数字通用型投影镜头设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 29-37.
- [2] WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, *et al.* Design of refractive/diffractive IR fisheye optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1533-1536.
- [3] ZHANG Bao-long, LI Dan, ZHANG Shao-jing, *et al.* Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12): 230-235.
张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(12): 230-235.
- [4] WU Ze-jun, WU Qing-yang, ZHANG Bai-chun. A new calibration method for fisheye lens based on spherical model. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(5): 234-241.
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): 234-241.
- [5] LIU Ning, LU Rong-sheng, XIA Run-xue, *et al.* A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2):

179-184.

刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 179-184.

- [6] BURCHARD C B, VOSS K. A new algorithm to correct fisheye and strong wide-angle lens distortion from single images[C]. *International Conference on Image Processing*, 2001, **1**: 225-228.
- [7] KANATANI K. Calibration of ultrawide fisheye lens cameras by eigenvalue minimization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(4): 813-822.
- [8] YING Xiang-hua, HU Zhan-yi. Fisheye lenses distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, **26**(12): 1702-1708.
英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼镜头校正方法[J]. *计算机学报*, 2004, **26**(12): 1702-1708.
- [9] KANNALA J, HEIKKILA J, BRANDT S S. Geometric camera calibration [J]. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 2008, **13**(6) 1-20.
- [10] LI Hai-bin, CHU Guang-yu, ZHANG Qiang, *et al.* Space point positioning based on optimization of fisheye lens imaging model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 247-253.
李海滨, 褚光宇, 张强, 等. 基于优化的鱼镜头成像模型的空间点定位[J]. *光学学报*, 2015, **35**(7): 247-253.
- [11] GUI C, TU L. A stereo camera calibration based on robotic vision [C]. *IEEE International Conference on Cognitive Informatics & Cognitive Computing*, 2011, 318-323.
- [12] RUDAKOVA V, MONASSE P. Camera matrix calibration using circular control points and separate correction of the geometric distortion field[C]. *2014 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 2014: 195-202.
- [13] WU Fan-lu, LIU Jian-jun, CHEN Xin, *et al.* Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(11): 147-153.
吴凡路, 刘建军, 任鑫, 等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. *光学学报*, 2013, **33**(11): 147-153.
- [14] YING X H, HU Z Y, ZHA H B. Fisheye lenses calibration using straight-line spherical perspective projection constraint [C]. *Asian Conference on Computer Vision*, 2006, 61-70.
- [15] WANG Jian-hua, FENG Fan, LIANG Wei, *et al.* Nonlinear model based camera calibration[J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, **32**(1): 33-38.
王建华, 冯帆, 梁伟, 等. 非线性模型下的摄像机标定[J]. *光电子技术*, 2012, **32**(1): 33-38.
- [16] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.