

# 一种新的基于球面模型的鱼镜头标定方法

吴泽俊 吴庆阳 张佰春

深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 提出了一种新的基于二维靶标的球面模型鱼镜头标定方法。根据球面成像模型中圆弧上的点与图像坐标系像点之间的约束关系,利用平面靶上的一根直线上的点,初步估计出摄像头的内部参数。利用平面靶上棋盘格角点在世界坐标系上的坐标点与其在球面坐标系下坐标的映射关系,求出相应的外部参数的初始值。以这些角点在图像中的实际坐标与重投影后坐标之间的均方差为优化参数,进行非线性优化,求出内部参数,畸变系数和外部参数的精确解。通过实验验证,该方法能够快速的估计鱼镜头的内、外部参数的初始值,具有较高的精度,能够满足实际应用的需求。

**关键词** 测量; 摄像机标定; 鱼镜头; 非线性优化

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0508006

## A New Calibration Method for Fisheye Lens Based on Spherical Model

Wu Zejun Wu Qingyang Zhang Baichun

*Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*

**Abstract** A new calibration method based on the spherical model for fisheye lens using two-dimensionally calibration target is presented. According to the relationship between the point on arc and the image points for the spherical model, the internal parameters by the points in a straight line on the plane target are preliminary estimate. And the corresponding external parameters by the mapping between the world points and the points in arc on the sphere are calculated. The rooy-mean-square error of the image points and the reprojection points are taken as the optimization parameter and the exact solution of the internal parameters, the distortion coefficients and the external parameters are solved by the nonlinear optimization algorithm. The experiment presents that the proposed method can quickly estimate the initial values of the internal and external parameters for the fisheye lens with high-precision and meet the practical applications.

**Key words** measurement; camera calibration; fisheye lens; nonlinear optimization algorithm

**OCIS codes** 150.1488; 040.1490; 120.4630

### 1 引言

鱼镜头是一种视场角非常大的镜头,其视角接近甚至大于 $180^\circ$ 。由于其具有焦距短、景深大、视场角大的优点,因此被广泛应用在视频监控,汽车导航,全方位视觉系统等领域<sup>[1-6]</sup>。但是鱼眼摄像机拍摄的图像具有严重的变形失真,要利用这些具有严重变形的投影信息,恢复出实际场景,需要将其转换成人眼视觉所习惯的透视投影图像<sup>[7-11]</sup>。因此,国内外学者针对鱼镜头的标定方法进行了大量研究。英向华等<sup>[12]</sup>提出了球面透视投影模型,该方法将空间直线的鱼眼投影曲线上的点投影为球面点,然后通过球面点到球面的球面距离最小来拟合大圆,从而恢复鱼镜头的变形参数,在透视投影模型下仍然为直线的约束来校正鱼眼

收稿日期: 2014-12-08; 收到修改稿日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(61027014)、国家自然科学基金青年项目(11109052)、深圳市科技计划项目(JCYJ20140418091413574)、深圳市战略性新兴产业发展专项(JCYJ20120614085204873)

作者简介: 吴泽俊(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: wuzejun0321@126.com

导师简介: 吴庆阳(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事三维传感和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: wuqy@szu.edu.cn(通信联系人)

镜。张琨等<sup>[4]</sup>提出了一种基于圆分割的鱼镜头校正算法。该方法将鱼眼图像分割成一系列的圆线,再利用函数法,将畸变图像中的圆线映射成方形线,这样从图像中心的小圆开始,将畸变的鱼眼圆形图像校正为透视投影图像。但是英和张等都没有提出世界坐标系到图像坐标系的变换关系,无法得到鱼眼相机的等效焦距等信息。Mei<sup>[13]</sup>提出了一种鱼镜头形状相关的折射成像模型,该方法把鱼眼形状作为一个参数因子参与计算,成像模型较为复杂。本文提出一种基于球面模型的眼镜头标定方法,根据弧上的点与图像坐标点之间的映射关系,初步估计摄像头的内部参数,利用平面靶上棋盘格角点在世界坐标系上的坐标点与其在球面坐标系下坐标的映射关系,求出相应的外部参数的初始值,最后利用 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化,求出各个参数的精确解,该方法具有较高的精度,能够满足实际应用的需要。

## 2 鱼镜头的成像模型

由于鱼眼镜头图像具有严重的桶形失真,普通的透视投影成像模型已经不再适用,因此采用了一种基于球坐标变换的鱼眼摄像机成像模型,该模型通过三次变换即可实现从空间点坐标到像素点坐标的变换。

### 2.1 世界坐标系与归一化平面坐标系之间的变换

世界坐标系下任意一点  $P=[X_w, Y_w, Z_w]^T$ , 经过旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ , 转换到摄像机坐标系, 得到点  $P_c$ . 满足以下关系:

$$P_c = R \cdot X_w + T, \quad (1)$$

式中旋转矩阵  $R$ , 平移矩阵  $T$  分别表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

则点  $P_c=[X_c, Y_c, Z_c]^T$  在摄像机坐标系表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

世界坐标系采用齐次坐标表示,(3)式可改写成

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于实验中采用的是平面二维(2D)标定靶,所以可以令点  $P$  在  $Z$  方向的世界坐标值均为 0, 故(4)式改写为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

基于摄像机光轴方向归一化,点  $P_c$  在归一化平面坐标系的对应点  $P_i$  可表示为

$$\begin{bmatrix} X_{cc} \\ Y_{cc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

### 2.2 归一化平面坐标系与单位球坐标系之间的变换

如图 1 所示,点  $P_i$  为点  $P$  在归一化平面坐标系中的对应点,坐标为  $(X_{cc}, Y_{cc})$ ,  $O_1P_i$  在单位球面所对应的弧长  $\widehat{O_1P_2}$  为

$$\varphi = a \tan(\sqrt{X_{cc}^2 + Y_{cc}^2}). \quad (7)$$

$X$  方向分量与和向量夹角  $\theta$  为

$$\theta = a \cos\left(\frac{X_{cc}}{\sqrt{X_{cc}^2 + Y_{cc}^2}}\right). \quad (8)$$

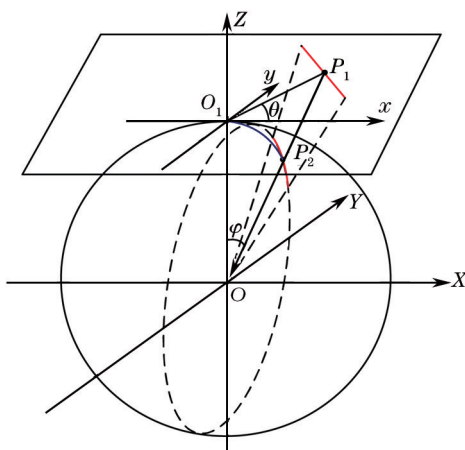


图1 归一化平面坐标系到单位球坐标系的变换

Fig.1 Transformation from normalized plane coordinate system to the unit sphere coordinate system

所得弧长在  $x, y$  两个方向的分量  $\varphi_x, \varphi_y$  分别为

$$\begin{cases} \varphi_x = \varphi \cdot \cos \theta \\ \varphi_y = \varphi \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 单位球坐标系与图像像素坐标之间的变换

由鱼镜头的内部参数  $K$  可以得到图像点  $P_i$  的像素坐标

$$P_i = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $f_x, f_y$  为鱼眼相机两个方向的等效焦距,  $u_0, v_0$  为鱼眼相机的成像中心。在单位球坐标系到图像坐标系变换过程中,把图1中弧  $\widehat{O_1P_2}$  作为一条拉直的线段进行处理。

### 2.4 鱼镜头的畸变

在实际成像过程中,总是会有一定程度的畸变,导致实际成像点与理想成像点并不一致。畸变包括径向畸变和切向畸变,因为鱼镜头中径向畸变的影响远大于切向畸变,因此这里仅考虑了径向畸变,其表达式为

$$\varphi' = \varphi \cdot (1 + k_0 \varphi^2 + k_1 \varphi^4), \quad (11)$$

式中  $\varphi$  为理想状态的弧,  $\varphi'$  为畸变后的弧,  $k_0, k_1$  为径向畸变系数。

## 3 鱼镜头标定算法

鱼镜头的标定包括内、外部参数的初始化,以及非线性优化三个过程,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化,该算法的参数初始值的选择与其迭代效率和精度直接相关,因此其内部参数的初始值的估计是一个非常重要的步骤。

### 3.1 鱼镜头内部参数的初始化

首先把径向畸变系数  $k_0, k_1$  的初始值设为 0, 0, 然后提取靶标上处于同一条直线上的几个特征点(至少 3 个点),最后根据空间直线在球坐标和图像坐标系映射关系,即可初步估计出鱼眼摄像机的成像中心和焦距等内部参数。

以鱼眼图像的中心点为初始成像中心,鱼眼图像宽,高分别为  $W, H$ , 则图像中心为

$$[u_0, v_0] = \left[ \frac{1}{2} \cdot W, \frac{1}{2} \cdot H \right]. \quad (12)$$

点  $P_i = [u_c, v_c]^T$  是点  $P$  在图像中的坐标,则  $P_i$  与成像中心有如下关系:

$$P_i = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

空间线段映射到单位球上为过球心的圆的一段弧,在三维坐标系上为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1 \\ x + ay + bz = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $a, b$  为系数, (14) 式用极坐标系表示为

$$\sin \varphi \cos \theta + a \sin \varphi \sin \theta + b \cos \varphi = 0. \quad (15)$$

简化后得到

$$\cos \theta + a \sin \theta + b \cot \varphi = 0. \quad (16)$$

$\cot \varphi$  根据泰勒中值定理展开, 取多项式前三项, 第三项系数为零, 可得

$$\cot \varphi = -2\varphi + 1 + \frac{1}{2}\pi. \quad (17)$$

假设两方向上的等效焦距相等, 根据成像模型可得

$$\begin{cases} u_c = f\varphi \cos \theta \\ v_c = f\varphi \sin \theta \end{cases} \quad (18)$$

根据(18)式, 可得

$$\begin{cases} \varphi = \left( \sqrt{u_c^2 + v_c^2} \right) / f \\ \cos \theta = u_c / \sqrt{u_c^2 + v_c^2} \\ \sin \theta = v_c / \sqrt{u_c^2 + v_c^2} \end{cases} \quad (19)$$

将(17), (19)式带入(16)式, 得

$$\frac{2b}{f} \sqrt{u_c^2 + v_c^2} - b \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right) - a \frac{v_c}{\sqrt{u_c^2 + v_c^2}} = \frac{u_c}{\sqrt{u_c^2 + v_c^2}}. \quad (20)$$

图像中点  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  在世界坐标系上所对应的点处于一条直线上, 则有

$$P = \begin{bmatrix} \sqrt{u_{c1}^2 + v_{c1}^2} & -\left(1 + \frac{\pi}{2}\right) & -\frac{v_{c1}}{\sqrt{u_{c1}^2 + v_{c1}^2}} \\ \sqrt{u_{c2}^2 + v_{c2}^2} & -\left(1 + \frac{\pi}{2}\right) & -\frac{v_{c2}}{\sqrt{u_{c2}^2 + v_{c2}^2}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sqrt{u_{cn}^2 + v_{cn}^2} & -\left(1 + \frac{\pi}{2}\right) & -\frac{v_{cn}}{\sqrt{u_{cn}^2 + v_{cn}^2}} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \frac{u_{c1}}{\sqrt{u_{c1}^2 + v_{c1}^2}} \\ \frac{u_{c2}}{\sqrt{u_{c2}^2 + v_{c2}^2}} \\ \dots \\ \frac{u_{cn}}{\sqrt{u_{cn}^2 + v_{cn}^2}} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

可以得到

$$P_{n \times 3} C_{3 \times 1} = Q. \quad (22)$$

$C$  记作

$$C = \begin{bmatrix} 2b/f \\ b \\ a \end{bmatrix}. \quad (23)$$

根据(22), (23)式得

$$C = P \setminus Q. \quad (24)$$

最后得到鱼眼镜头焦距的初始估计值

$$f = \frac{2C(2)}{C(1)}. \quad (25)$$

### 3.2 鱼眼镜头外部参数的初始化

得到鱼眼镜头内部参数估计值以后, 根据特征点的图像坐标系, 世界坐标系, 利用鱼眼镜头的成像模型, 即可得到每幅图像中靶标的外部参数。

根据图像坐标和摄像机内参初始值, 由(10)式可得相应的  $(\varphi_x, \varphi_y)$  值, 则

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_x^2 + \varphi_y^2 \\ \theta = a \cos\left(\frac{\varphi_x}{\varphi}\right), \end{cases} \quad (26)$$

式中  $\varphi$  为  $OP_2$  与  $Z$  轴的夹角。 $\theta$  为向量  $O_1P_1$  与  $x$  轴与之间的夹角,如图 1 所示。

则

$$|O_1P_1| = \tan \varphi. \quad (27)$$

由(5)式可知

$$\begin{cases} \frac{X_c}{Z_c} = \frac{r_{11} \cdot X_w + r_{12} \cdot Y_w + t_1}{r_{31} \cdot X_w + r_{32} \cdot Y_w + t_3} \\ \frac{Y_c}{Z_c} = \frac{r_{21} \cdot X_w + r_{22} \cdot Y_w + t_2}{r_{31} \cdot X_w + r_{32} \cdot Y_w + t_3} \end{cases}, \quad (28)$$

将  $\frac{X_c}{Z_c}$  和  $\frac{Y_c}{Z_c}$  记作  $s_1$  和  $s_2$ , 则

$$\begin{cases} s_1 = |O_1P| \cdot \cos \theta \\ s_2 = |O_1P| \cdot \sin \theta \end{cases}. \quad (29)$$

由(28),(29)式,可得

$$\begin{cases} r_{11} \cdot X_w + r_{12} \cdot Y_w + t_1 = s_1 \cdot r_{31} \cdot X_w + s_1 \cdot r_{32} \cdot Y_w + s_1 \cdot t_3 \\ r_{21} \cdot X_w + r_{22} \cdot Y_w + t_2 = s_2 \cdot r_{31} \cdot X_w + s_2 \cdot r_{32} \cdot Y_w + s_2 \cdot t_3 \end{cases}. \quad (30)$$

令  $t_3 = 1$ , 得

$$M \cdot N = B, \quad (31)$$

式中

$$\begin{cases} M = \begin{bmatrix} X_w & Y_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -s_1 \cdot X_w & -s_1 \cdot Y_w \\ 0 & 0 & 0 & X_w & Y_w & 1 & -s_2 \cdot X_w & -s_2 \cdot Y_w \end{bmatrix} \\ N = [r_{11} \quad r_{12} \quad t_1 \quad r_{21} \quad r_{22} \quad t_2 \quad r_{31} \quad r_{32}]^T \\ B = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (32)$$

根据(31)式可求出矩阵  $N$ , 再根据旋转矩阵的正交性, 求出每一幅图像中靶标的外部参数  $R, T$  初始值。

### 3.3 鱼镜头的非线性优化

得到鱼镜头内、外部参数的初始值后, 通过 Levenberg-Marquardt 算法进行非线性优化, 即得到各个参数的精确解。Levenberg-Marquardt 算法<sup>[14-15]</sup>是一种非线性最小二乘法, 通过最优化寻找使得目标函数值最小的参数向量。本文以特征点在图像中的实际坐标与重投影后的坐标均方差为目标函数。

## 4 实验与结果分析

在实验中, 采用  $7 \times 9$  的棋盘格靶标, 特征点间距为 25 mm。所用的鱼镜头拥有大约  $180^\circ$  的视场角, 像素分辨率为  $576 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$ 。在鱼镜头视场内的不同区域内拍摄 6 幅图像, 每幅图像提取  $5 \times 7$  的特征点。

其步骤如下:

1) 在鱼镜头视场内依次把靶标以不同的角度摆放 6 个位置, 拍下 6 幅图像。为保证标定的准确性, 应使 6 次靶标摆放的位置在鱼眼视场内大致均匀分布, 其具体的位置和方向并无严格要求。

2) 任意选取一副所拍下的鱼眼图像, 在图像边缘部分提取靶标上处于同一条直线上的几个特征点, 初步估计鱼镜头的内部参数, 然后求出每幅图像中靶标的外部参数的估计值。

3) 利用非线性优化算法, 优化鱼眼相机的内、外部参数和畸变系数, 得到精确解。实验图像如图 2 所示。

表 1 为初始估计鱼镜头的内部参数。

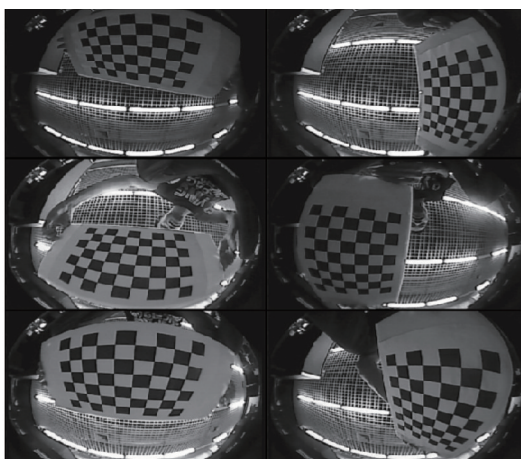


图2 鱼眼图像

Fig.2 Fisheye images

表1 鱼眼镜头的内部参数初始值

Table 1 Internal parameters initial values of fisheye lens

$u_{0-est}$	$v_{0-est}$	$f_{x-est}$	$f_{y-est}$
360	280	400.4935	400.4935

$(u_{0-est}, v_{0-est})$  为鱼眼镜头的光学成像中心的估计值,  $f_{x-est}$  和  $f_{y-est}$  为两个方向的等效焦距的估计值。经过非线性优化, 得到鱼眼镜头参数的精确解, 如表2所示。

表2 鱼眼镜头参数和重投影均方差

Table 2 Fisheye lens parameters and reprojection root-mean-square error

$u_0$	$v_0$	$f_x$	$f_y$	$k_0$	$k_1$	RMSE
351.5112	284.2607	244.8081	260.6688	0.0349	-0.0276	0.3460

$(u_0, v_0)$  为鱼眼镜头的光学成像中心,  $f_1$  和  $f_2$  为两个方向的等效焦距,  $k_0$  和  $k_1$  为其径向畸变系数, 均方根误差 (RMSE) 为特征点在图像中的实际坐标与重投影后的坐标均方差, 单位为 pixel。

靶标特征点在图像上的重投影点如图3所示。红色点为靶标特征点在图像上的重投影点。



图3 重投影点与实际成像点对照

Fig.3 Reprojection points and the actual image points

从图3可以看出, 重投影点和图像角点能够一一对应, 其RMSE值只有0.3460像素值, 说明标定结果具有较高的精度。

根据以上标定结果, 将所拍摄的鱼眼图像进行校正, 转化成符合人们视觉习惯的透视投影图像, 如图4所示。由图4两组鱼眼图像和校正后的透视图像对比可以看出, 空间直线在鱼眼图像中投影成曲线, 经过校正, 在透视图像中都还原成直线了。



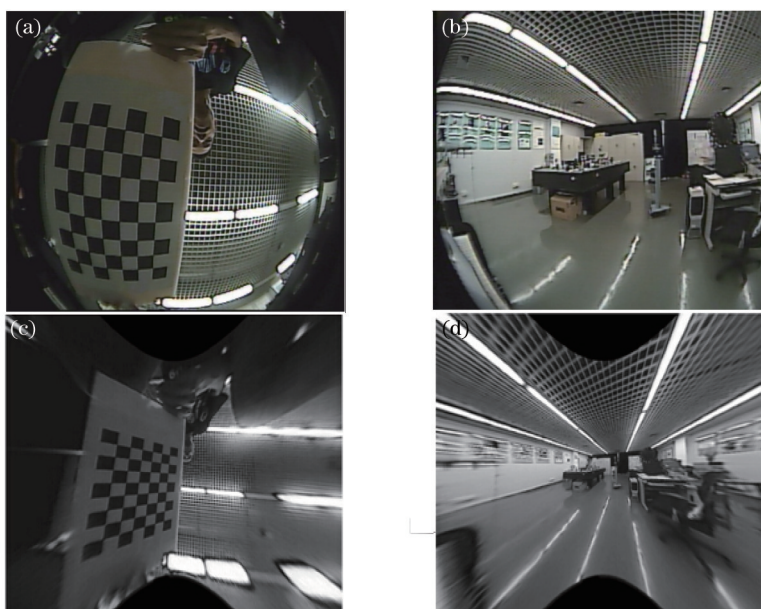


图4 (a)靶标图像 (b)室内鱼眼图像 (c)校正后的靶标图像 (d)校正后的室内图像

Fig.4 (a) Calibration target image; (b) indoor fisheye image; (c) calibration target image after correction; (d) indoor fisheye image after correction

## 5 结 论

提出了一种新的基于2D靶标的球面模型鱼镜头标定方法,只需将靶标在鱼眼视场内以不同的角度摆放几次即可获得鱼镜头的内、外参数,其位置分布大致均匀即可,对靶标摆放的具体位置没有严格要求。该方法操作简单,标定速度快,非常适合现场标定。实验结果表明,其标定结果精度较高,完全能够满足实际应用的需要。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Jia Yunde, Lü Hongjing, Xu An, *et al.*. Fish-eye lens camera calibration for stereo vision system[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1215-1219.  
贾云得, 吕宏静, 徐岸, 等. 一种鱼镜头成像立体视觉系统的标定方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1215-1219.
- 3 Zhang Wei. Research on Fish-Eye Image Correction Algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011: 1-5.  
张伟. 鱼眼图像校正算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011: 1-5.
- 4 Zhang Kun, Wang Cuirong. Corection algorithm of fish-eye lens image distortion based on the circle segmentation[J]. Journal of Northeastern University Natural Science, 2011, 32(9): 1240-1243.  
张琨, 王翠荣. 基于圆分割的鱼镜头图像畸变校正算法[J]. 东北大学学报, 2011, 32(9): 1240-1243.
- 5 Sun Xue. Research on Mobile Robot Landmark Fix Technology based on Omin-Directional Vision[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2009: 1-9.  
孙雪. 基于全方位视觉的移动机器人陆标定位技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2009: 1-9.
- 6 C B Burchardt, K Voss. A new algorithm to correct fish-eye and strong wide-angle-lens distortion from single images[C]. Image Processing, Thessaloniki, IEEE, 2001: 225-228.
- 7 Liu Xukun. Study on the Key Technologies of Serious Image Distortion Rectification[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008: 1-12.  
刘旭坤. 大畸变图像校正关键技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2008: 1-12.
- 8 M Julien, A Sebastien, R Yassine. 3D reconstruction of urban environments based on fisheye stereo vision[C]. 8th International

- Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems, 2012: 36-41.
- 9 Su Xinkang, Man Jiaju, Cheng Yuanyuan. A method transforming fisheye image to perspective image and simple navigation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2007, 29(2): 119-122.  
苏新康, 满家巨, 成媛媛. 鱼眼图像到透视投影图像的还原和简单漫游[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2007, 29(2): 119-122.
- 10 Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, *et al.*. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222001.  
张宝龙, 李 丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222001.
- 11 Zhu Haijiang, Xu Xiaobo, Zhou Jinglin. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215001.  
祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215001.
- 12 Ying Xianghua, Hu Zhanyi. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1702-1707.  
英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头矫正方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1702-1707.
- 13 C Mei. Laser-Augmented Omnidirectional Vision for 3D Localisation and Mapping[D]. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007: 10-22.
- 14 Fu Yanjun, Yang Kuntao, Zou Wendong, *et al.*. image mosaic based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Laser Journal, 2007, 28(5): 46-48.  
伏燕军, 杨坤涛, 邹文栋, 等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的图像拼接[J]. 激光杂志, 2007, 28(5): 46-48.
- 15 Zhang Hongyan, Geng Zheng. Novel interpretation for Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(19): 5-8.  
张鸿燕, 耿 征. Levenberg-Marquardt 算法的一种新解释[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 5-8.

栏目编辑: 苏 岑