

# 基于全景相机的3D坐标测量方法\*

王启超 张维光 任永平

(西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

**摘要:** 全景相机通过一次成像获取其周围360°场景,是一种大视场快速图像采集装置。研究了应用双鱼眼全景相机获取三维空间点的方法,研究了单鱼眼镜头成像模型,双鱼眼全景相机成像模型及图像变换原理。研究了鱼眼镜头成像畸变等校模型参数的标定方法,实现了对鱼眼畸变图像的矫正。提出了由全景图像数据解算任意方向等效鱼眼镜头成像数据的数学模型。最后应用平行光轴双目立体视觉技术,获得了被测场景的3D坐标数据。研究表明,应用这种方法在4 m×3 m×3 m的测量范围内精度可达13 mm。

**关键词:** 全景视觉;鱼眼镜头;分离参数标定;立体视觉

**中图分类号:** TP391.41   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## 3D coordinate measurement method based on panoramic camera

Wang Qichao Zhang Weiguang Ren Yongping

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** A panoramic camera is a large field of view fast image acquisition device which uses the once imaging technique to obtain a 360 degree scene around it. In this paper, the single fisheye lens imaging model, the double fisheye panoramic camera model and the image transformation principle are studied respectively. The method of calibration of the parameters of fisheye lens imaging distortion is studied, and the correction of fish image distortion is realized. We study the method of obtaining three-dimensional space points by the double fisheye panoramic camera. Moreover, the mathematical model of the equivalent fisheye lens imaging data in either direction is proposed by the panoramic image data. Finally, the 3D coordinate data of the measured scenes are obtained by using the parallel axis binocular stereo vision technology. The results show that the accuracy of this method can reach 13 mm within the measurement range of 4 m×3 m×3 m.

**Keywords:** panoramic vision; fisheye lens; separation parameter calibration; stereoscopic vision

## 0 引言

由于传统视觉感知系统的视场比较有限,获得的信息有限,常规相机成像视角仅有40°~50°,使用广角镜头也只有60°~130°,在许多应用场合受到了很大的限制<sup>[1]</sup>。随着全景视觉技术的发展,鱼眼镜头的发展应用也越来越广泛。鱼眼镜头<sup>[2]</sup>由于其独特设计,可以获得185°甚至270°的视场角,采用了双鱼眼镜头的相机,通过一次拍摄便可以获取整个空间的信息。但由于全景视觉<sup>[3]</sup>是将三维信息投影到二维平面的过程,其中损失了景深信息,而立体视觉<sup>[4]</sup>虽然可以通过视觉差来计算深度,但是由于其重叠信息较少,在某些场合有了很大的限制。我们将全景视觉和立体视觉结合起来,既弥补全景视觉缺少景深信息的缺点又增加了立体信息重叠范围增大的优点。

鱼眼镜头虽然能够带来较大的视场,但是其成像会产生很严重的畸变,首先对单鱼眼镜头成像模型<sup>[5]</sup>进行研究,然后对双鱼眼全景相机模型进行分析并且获取其任意方向的图像,探究鱼眼成像规律及标定方法<sup>[6]</sup>并且对图像进行矫正。通过加入立体视觉技术,使用平行光轴双目立体视觉<sup>[7]</sup>将获取的图像进行矫正,并且完成对建筑物空间内部的三维数据信息的解算,并且存储在数据库中,为后续项目工程奠定基础。

## 1 单鱼眼成像模型

首先对鱼眼成像模型进行研究,鱼眼镜头成像即将三维空间内一点经坐标变换,投影到二维成像面上的过程<sup>[8]</sup>。鱼眼成像模型如图1所示。

该系统模型包含5个坐标系:世界坐标系( $X_w, Y_w,$

收稿日期:2017-06

\* 基金项目:陕西省科技厅自然科学基金项目(2016JM6041)资助

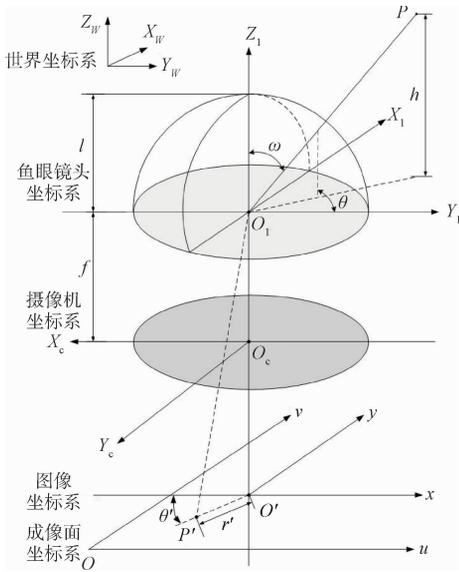


图 1 鱼眼成像模型

$Z_w$ )、鱼眼镜头坐标系  $(X_L, Y_L, Z_L)$ 、摄像机坐标系  $(X_C, Y_C, Z_C)$ 、图像坐标系  $(x, y)$  和成像面坐标系  $(u, v)$ 。世界坐标系中任一点  $P$  在鱼眼镜头坐标系下的入射角为  $\omega$ ，该点在镜头坐标系的投影的偏移角为  $\theta$ 。成像面坐标系为图像坐标系的平移，图像坐标系的圆心  $O'$  在成像面坐标系下坐标为  $(u_0, v_0)$ 。在图像坐标系中，光轴的投影为圆心  $O'$ ，点  $P$  的投影为  $P'$ ， $O'P'$  的径向长度为  $r'$ ，与  $O'x$  轴负方向夹角为  $\theta'$ 。因此，根据图像坐标系下成像点  $P'$  对应的  $r'$ 、 $\theta'$  值，拟合得到鱼眼镜头坐标系下入射光线  $O_1P$ ，记为  $O_1P(\omega, \theta)$ 。

市场上绝大部分鱼眼镜头都是使用等距投影模型<sup>[9]</sup>来设计，如图 2 所示“等距投影”表示视场角  $\omega$  相等的物点在像面上具有等径向距离  $r'$ ，如式(1)所示。

$$r' = k\omega \tag{1}$$

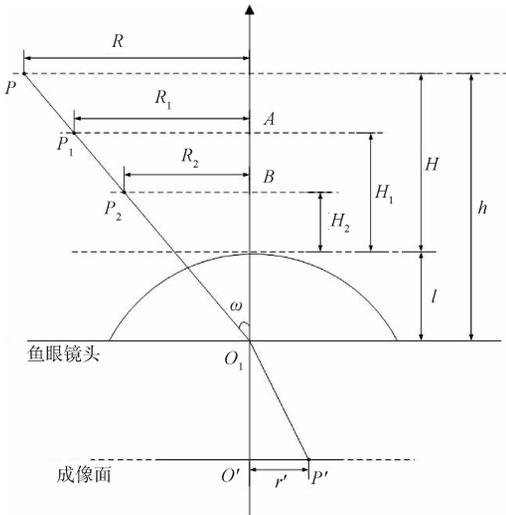


图 2 等距投影模型

经分析， $r'$  与  $\omega$  之间的对应关系决定鱼眼镜头成像几何关系。

## 2 双鱼眼全景相机模型分析

系统采集装置如图 3 所示，采集图片的分辨率为  $5\ 376 \times 2\ 688$ 。将相机固定于三脚架之上，进行图像的采集。双鱼眼全景成像模型如图 4 所示，双鱼眼相机采集图像就是将空间信息点  $P$  投影到到中间的球体  $P'$  上一点的过程，然后将球体展开成为矩形图像，采集的图像如图 5 所示。



图 3 系统采集装置

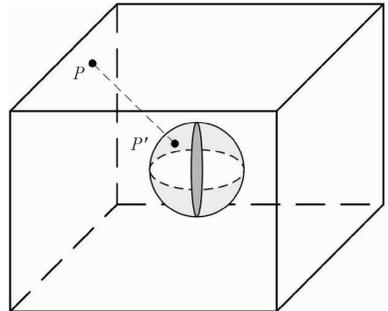


图 4 全景相机成像模型

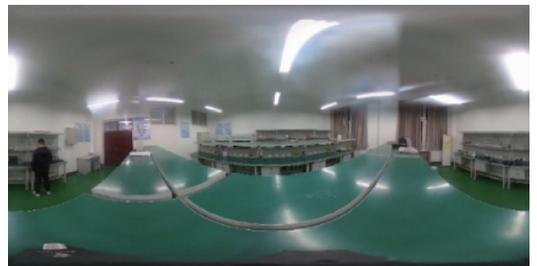


图 5 相机采集的图像(分辨率  $5\ 376 \times 2\ 688$ )

## 3 任意方向等效鱼眼镜头成像数学模型

由于现有的鱼眼畸变校正模型都是建立在单鱼眼成像

的模型上,需要对采集到的图像进行旋转投影,将空间信息投影到半球上面。并且通过设定的旋转角度来获取任意方向的等效图像,等效转化模型如图6所示。

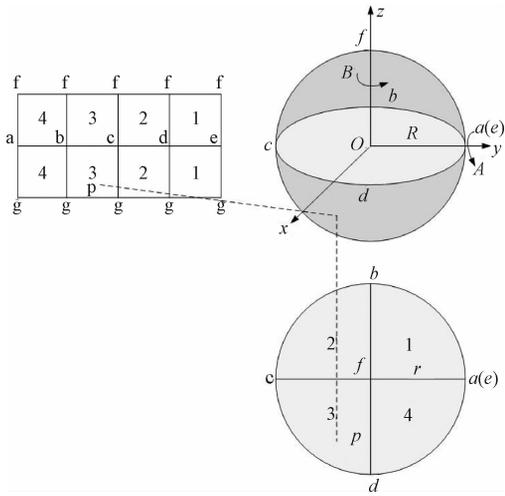
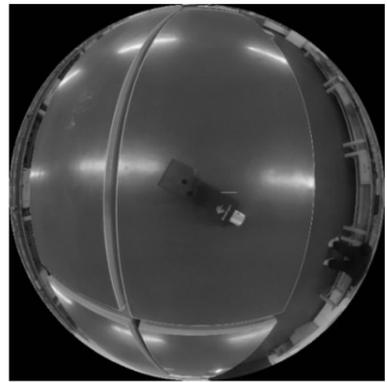


图6 图像等效转化模型

经过等效转化后的图像如图7所示。由转化结果可以得知,虽然半球只能显示空间一半的信息,但是可以通过设置参数来获取更多方向的空间信息,图像的分辨率为 $2\ 688 \times 2\ 688$ 。



(c)垂直: 90° 水平: 90°

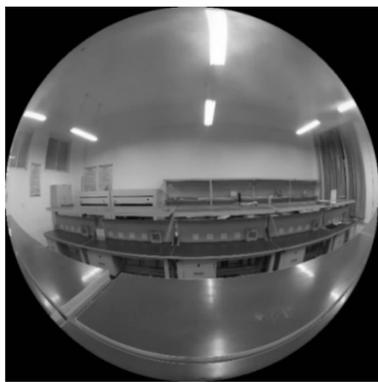


(d)垂直: 0° 水平: 90°

图7 任意方向的等效鱼眼图像



(a)垂直: 90° 水平: 0°



(b)垂直: 90° 水平: 180°

## 4 鱼镜头成像等效参数标定

### 4.1 标定思想与方法

通常对相机进行标定的方法有:直线性变换标定方法(DLT)<sup>[10]</sup>、Tsai 两步法<sup>[11]</sup>、张正友标定法<sup>[12]</sup>等方法,这些方法也仅仅符合针孔成像的常规视觉模型,类似鱼镜头这种大视场的相机并不适用。虽然针对于鱼眼图像畸变矫正的算法<sup>[13]</sup>进行的大量的研究,但是不同光学结构的镜头适合于不同的校正模型,而且算法复杂,运算量也比较大。所以采用了基于分离参数的标定方法来获取对应像素点之间的关系并完成校正,此方法简便,并且运算量也较为小。基于物理参数分离的思想就是将鱼镜头视觉系统中的各个参数赋予实际的物理意义,为每个物理参数设计专门的标定方法。

由等距投影模型以及式(1)可以知道视场角相等的点在像面上有等径向距离 $r'$ 。在实际成像过程中, $k$ 值会因为图像存在的畸变而改变。从成像模型和等距投影模型可以推导出式(2)、(3)。鱼眼图像存在3种畸变:径向畸变、切向畸变、薄棱镜畸变,由于径向畸变为主要畸变,其他两种的影响相对较小,在这里只针对径向畸变进行矫正。

$$\omega = K[r', r'^2, r'^3, r'^4, r'^5]^T \quad (2)$$

$$r = J[\omega'^1, \omega'^2, \omega'^3, \omega'^4, \omega'^5]^T \quad (3)$$

其中  $\omega$  可以根据图 2 几何关系来得出, 计算公式为:

$$\omega = \arctan\left(\frac{R}{H+L}\right) \quad (4)$$

其中  $L$  为鱼镜头头的虚拟成像距离, 从等距投影模型中可以得知:

$$L = \frac{H_1 R_1 - H_2 R_2}{R_2 - R_1} \quad (5)$$

#### 4.2 虚拟距离 $L$ 的标定

由上述各参数的关系, 需要设计标定实验来获取这些数据。首先需要设计靶标, 靶标由等间隔为 10 mm 的同心圆组成, 同时间隔  $30^\circ$  的直线将同心圆分为 8 块, 其次, 将相机和靶标置于光学导轨上, 同时将相机镜头中心与靶标中心对齐, 然后移动相机, 改变相机到靶标的距离  $H$ , 记录同一射线与多组同心圆交点对应的  $H$ 、 $R$  值, 图像数据如图 8 所示。根据式(5)可以计算多组  $L$  的值, 如表 1 所示。求得  $L$  的平均值为 13 mm。

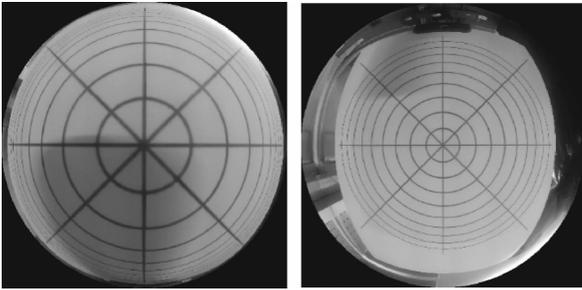


图 8 移动不同距离获取的图像

表 1 实验数据 (mm)

变量	1	2	3
R	20.0	50.0	70.0
H	33	63	83

#### 4.3 等效参数求解

首先选取采集的 1 幅图像, 图像尽可能的将靶标边缘显示分辨清晰。沿同心圆向外采集 5~6 组同心圆与直线交点的坐标, 每组数据包含同心圆上的 8 个交点。其次, 改变不同的  $R$  值, 并根据式(4)可以计算得出不同  $r'$  对应的  $\omega$  值。根据等距投影原理, 视场角相等的物点在像面上具有等径向距离  $r'$ , 由多组  $\omega$ 、 $r'$  值拟合得到径向畸变系数  $K$ 、 $J$ 。根据拟合结果得到:

$$K = [512.2184, 153.5557, -338.0524, 565.9025, -191.3863]$$

$$J = [0.0017, 2.1485 \times 10^{-6}, -1.0460 \times 10^{-8}, 1.5436 \times 10^{-11}, -8.1837 \times 10^{-15}]$$

#### 4.4 图像畸变校正结果

由标定实验计算得出了畸变系数  $K$ 、 $J$ , 再由其对应关系建立起物点和像点对应系, 形成映射关系。完成矫正, 矫正结果如图 9 所示。

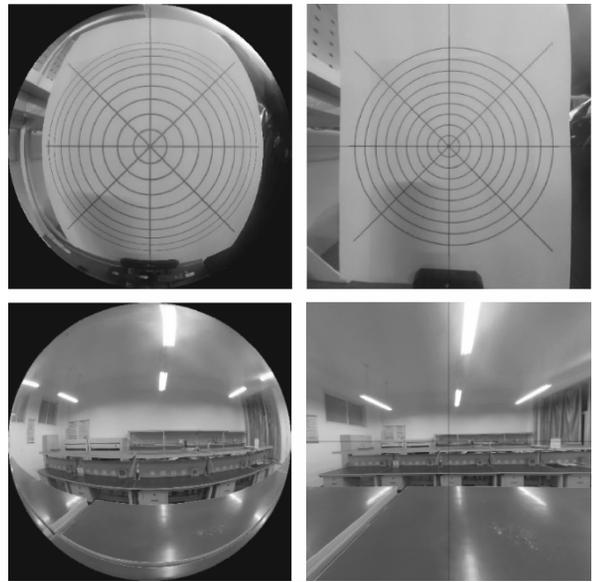


图 9 畸变矫正结果(分辨率  $2688 \times 2688$ )

### 5 3D 空间数据坐标解算

#### 5.1 立体视觉测量原理

立体视觉的测量<sup>[14]</sup>是从多个角度观察同一场景, 再根据视差原理<sup>[15]</sup>计算出空间点的位置信息, 双目立体视觉原理图如图 10 所示。使用单个相机经过移动一定距离采集图像来等效双目立体视觉, 这样只需要对一个相机进行标定求解参数。

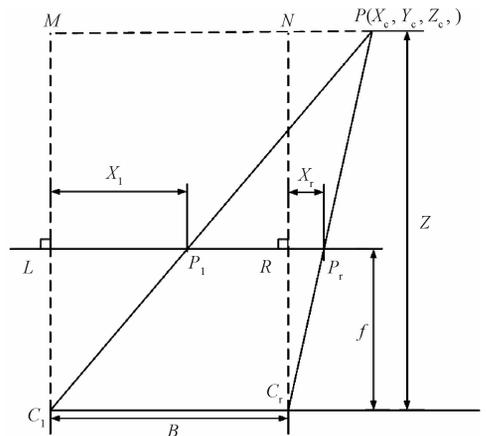


图 10 双目立体视觉原理

如图 11 所示, 两摄像机  $C_L$  和  $C_R$  在不同位置观测空间物体的同一特征点  $P$ , 分别在两幅图像中的坐标为  $P_L(X_{left}, Y_{left})$ ,  $P_R(X_{right}, Y_{right})$ 。B 是两摄像机投影中心连线的距离。。假定两摄像机的图像在同一平面上, 则特征点  $P$  带的图像的  $Y$  坐标相同, 即  $Y_{left} = Y_{right} = Y$ , 由三角几何关系得到:

$$\begin{cases} X_{left} = f \frac{x_c}{z_c} \\ X_{left} = f \frac{(x_c - B)}{z_c} \\ Y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (6)$$

则视差为  $Disparity = X_{left} - X_{right}$ 。由此可计算出特征点  $P$  在摄像机坐标系下的三维坐标为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{B \cdot X_{left}}{Disparity} \\ y_c = \frac{B \cdot Y}{Disparity} \\ z_c = \frac{B \cdot f}{Disparity} \end{cases} \quad (7)$$

5.2 图像采集

相机采集两幅图像,并且经过旋转投影并选取合适的视角,经过图像畸变矫正后如图11所示。在移动相机的过程中,需要尽量的使相机光轴保持不变。

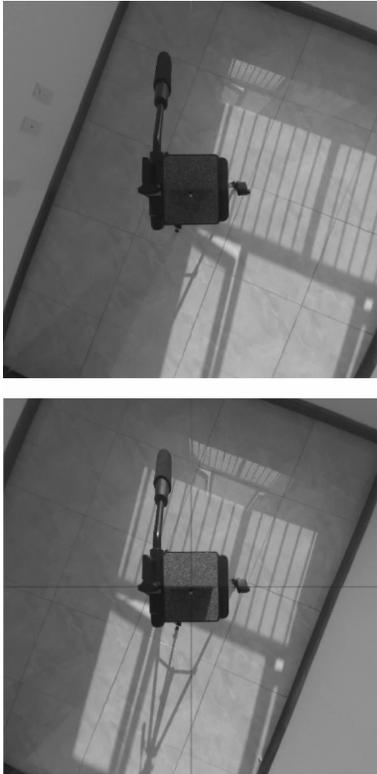


图11 双目立体视觉测量图像

5.3 仿射变换

由于图像特征点匹配算法复杂,相对比较繁琐,由于两副图像只进行了平行移动变换。采取仿射变换,通过建立坐标系,给每个像素点一个坐标,当移动图像后,图像的坐标点会发生变化,跟根据图像变换原理,得到变换前后的坐标映射关系。这样便可以通过仿射变换<sup>[16]</sup>获取特征点。

假定左图像的像素坐标为  $(x, y)$ , 经过移动之后右图

像的坐标为  $(x', y')$ , 其仿射变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

求得系数为:

$$a_{11} = 0.9717; a_{12} = -0.01; a_{21} = -0.011; a_{22} = 0.9867; t_x = -542.2388; t_y = -201.5672。$$

表2 仿射变换坐标结果

序号	左图坐标	右图坐标	测量坐标
1	(941,1 661)	(347,1 455)	(355,1 427)
2	(2 133,2 169)	(1 517,1 898)	(1 508,1 915)
3	(2 634,927)	(2 000,701)	(2 008,684)
4	(1 396,477)	(818,236)	(809,250)
5	(1 519,1 902)	(935,1 661)	(914,1 658)
6	(2 003,695)	(1 401,477)	(1 397,462)
7	(697,2 271)	(118,2 026)	(112,2 031)

由于选取坐标时可能存在误差,但是从实验数据分析来看,此方法误差较小,在合理范围以内,数据分析如图12所示。

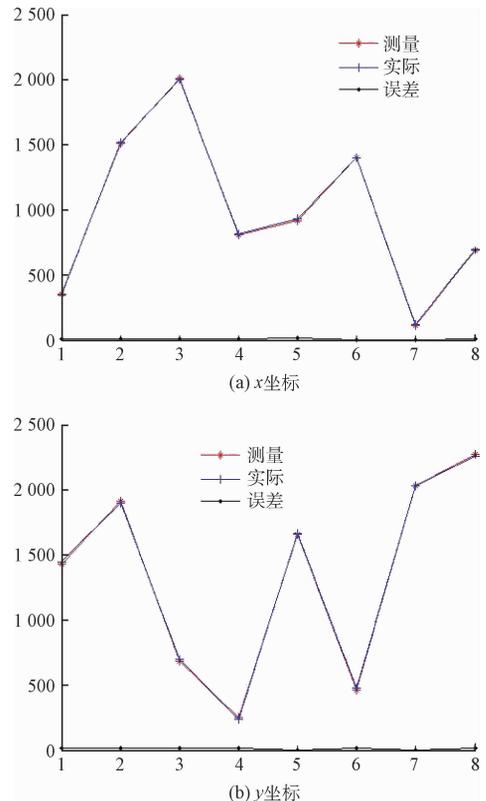


图12 坐标误差结果对比

5.4 三维坐标数据结果

通过对地面地板进行测量,获取其三维坐标及其距离相机的距离。其坐标是相对于相机所在位置而对应的坐

标。其中相机两次移动间隔为 800 mm, 相机距离地面 100 mm。

由表 3 可知, 距离测量误差在 13 mm 以内, 对于建筑物三维数据信息来说可以达到要求。

表 3 立体视觉测量结果

序号	三维坐标	距离地面距离/mm	误差/mm
1	(1 191, 2 102, 1 105)	1105	5
2	(2 535, 2 578, 1 088)	1088	12
3	(3 130, 1 102, 1 092)	1092	8
4	(1 783, 609, 1 113)	1113	13

## 6 结 论

本文将全景视觉和立体视觉相结合, 在满足实现更大视场的观测范围的同时获取到景深信息。通过对双鱼眼全景相机的分析, 提出了由全景图像数据解算任意方向等效鱼眼镜头成像数据模型, 并且对单鱼眼模型进行研究, 通过畸变矫正模型设计标定算法, 完成图像的矫正。从结果来看, 可以获取任意方向的鱼眼图像和矫正图像。通过矫正的图像和双目立体视觉原理, 进行空间三维数据解算, 解算数据结果在 13 mm 的误差范围以内。但空间越大, 测量的精度也同样可以下降, 可以经过测量数据迭代处理, 实现大范围的空间三维信息的高精度测量。根据本文提出的方法, 可以应用到导航定位、智能机器人、三维重建等应用。

## 参考文献

- [1] 闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 188-191.
- [2] MOREAU J, AMBELLOUIS S, RUICHEK Y. 3D reconstruction of urban environments based on fisheye stereovision[C]. 2012 Eighth International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems (SITIS), 2012: 36-41.
- [3] 王健, 张振海, 李科杰, 等. 全景视觉系统发展与应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(6): 1664-1666.
- [4] 高洁. 无人车平台立体视觉技术的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2016(3): 26-29.

- [5] 苑光明, 丁承君, 俞学波. 基于鱼眼镜头的全方位视觉系统建模[J]. 天津工业大学学报, 2010, 29(3): 47-49.
- [6] 朱均超, 葛磊, 韩芳芳, 等. 基于分离参数标定的鱼眼镜头成像模型研究[J]. 传感技术学报, 2013(7): 975-980.
- [7] 沈彤, 刘文波, 王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 52-54.
- [8] RYBERG A, LENNARTSON B, CHRISTIANSSON A K, et al. Analysis and evaluation of a general camera model [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(11): 1503-1515.
- [9] 李崇辉, 杜兰, 韩建, 等. 圆形目标的鱼眼相机成像模型推导[J]. 河南科学, 2013, 31(7): 975-979.
- [10] 杨帆, 刘巍, 张洋, 等. 结合四角共线约束的大视场双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2016(7): 178-187.
- [11] 李健, 陈长明. 基于 OpenCV 的改进两步法摄像机标定[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(3): 104-106, 109.
- [12] 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(6): 565-570.
- [13] 王迅. 基于鱼眼相机的立体图像校正和图像拼接[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [14] 汪婷, 方帅, 于磊. 基于立体视觉分析的显著性区域检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 399-407.
- [15] 丁莹, 范静涛, 宋天喻. 双目立体视觉检测系统正向最优化设计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 650-657.
- [16] KAJI S, OCHIAI H. A concise parametrization of affine transformation[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2016, 9(3): 1355-1373.

## 作者简介

王启超, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式图像处理。

张维光, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为智能化光电检测、光电信息处理技术及机器视觉技术。

E-mail: 372590320@qq.com