

基于优化的鱼眼镜头成像模型的空间点定位

李海滨¹ 褚光宇¹ 张 强^{1,2*} 张文明¹ 李雅倩¹

¹燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

²东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 针对应用高阶奇次多项式法和光学折射模型定位误差大、局限性强的问题,提出一种优化的鱼眼镜头成像定位算法。根据镜头的偏心畸变推导出新的畸变模型,进而在此畸变和光学折射模型的基础上建立优化的成像模型,并标定模型参数;对该成像模型进行反投影推导,得到三维点坐标,实现空间目标的精确定位。实验结果表明,当被测物分别处于鱼眼图像中心区域和边缘区域时,该算法的相对定位误差远远小于高阶奇次多项式法和光学折射模型的方法,减小了图像畸变对测量精度的影响,解决了使用光学折射模型定位局限性强的问题。

关键词 机器视觉; 鱼眼双目定位; 优化成像模型; 偏心畸变; 摄像机标定

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0715003

Space Point Positioning Based on Optimization of Fisheye Lens Imaging Model

Li Haibin¹ Chu Guangyu¹ Zhang Qiang^{1,2} Zhang Wenming¹ Li Yaqian¹

¹Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract Due to the big position error and strong limitations by using high odd polynomial method and optical refraction model, an optimization of fisheye lens imaging position algorithm is proposed. A new distortion model is derived according to the decentering distortion of the lens and optimized imaging model is established based on the distortion model and optical refraction model. After calibrating the imaging model parameters, a back projection model is derived and then three dimensional point coordinates are obtained. Space targets are precisely positioned. Experimental results show that the proposed algorithm has far less relative positioning error than the method which using high odd polynomial and optical refraction when the measured object respectively in fisheye image center and edge areas. Compared with previous method, the image distortion of proposed algorithm obviously has less influence on measurement precision and it effectively improves the positioning accuracy.

Key words machine vision; fisheye binocular positioning; optimized imaging model; decentering distortion; camera calibration

OCIS codes 150.0155; 010.1290; 330.7326

1 引言

双目立体视觉是计算机视觉重要的研究方向之一,该技术被广泛的应用在航空测绘、建筑测量、机器人定位以及三维重建等领域^[1-3]。摄像机是立体视觉获取外部信息的一个重要途径,然而,传统摄像机的视场角有限,在不加旋转平台等辅助设施的情况下,很难满足大范围导航、定位以及三维重建的要求^[4]。

鱼眼摄像机的出现解决了普通相机视场范围小的问题。鱼眼镜头是一种超广角镜头,其视场范围可达

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-17

基金项目: 河北省自然科学基金(D2014203153)、河北省自然科学基金(D2015203310)、国家留学基金(留金法[2012]5031)

作者简介: 李海滨(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail:hbli@ysu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: jhtzq@ysu.edu.cn

180°,有的甚至270°。然而,鱼眼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。针对此问题,Duane^[5]、张景国等^[6]在传统的针孔成像模型上加入高阶畸变来描述广角镜头成像,但该方法并没有从根本上解决鱼眼镜头成像的问题,且具有局限性,不适用于视场大于180°的鱼眼镜头。文献[7-9]提出采用高阶奇次多项式法近似的估计鱼眼镜头模型,文献[7]还给出了一种含14个参数的畸变模型。在一般情况下,该方法能够较好的描述鱼眼镜头的成像过程,但模型中引入的未知参数尤其是畸变参数过多,容易引起解的不稳定;另一方面,使用该模型进行空间点定位时,反推三维空间所需工作量比较大,容易产生较大的定位误差。文献[10]提出一种光学折射模型,以鱼眼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,且模型只有两个参数,复杂度小,但并未考虑镜头的畸变,当被测物在鱼眼图像变形较大的边缘区域时,该方法无法正确的修正畸变引起的成像误差。

针对以上问题,本文提出一种基于光学折射模型优化的鱼眼镜头成像定位算法。根据偏心畸变的思想,提出一种新的畸变模型,并与光学折射模型相结合,由此建立优化的鱼眼镜头成像模型;并推导其反投影过程,据此给出了鱼眼双目视觉的目标精确定位方法。

2 鱼眼镜头成像系统

2.1 光学折射模型

一般鱼眼镜头的内部由多组镜片组成^[11],入射光线经过每个镜片时都会产生一定的折射,因此可以通过入射角和折射角之间的关系建立鱼眼镜头的成像公式。如图1所示, θ 为光线经过第一个镜片时的入射角, θ_i 为对应的折射角, θ_{i-1} 为光线经过第*i*个镜片的入射角, θ_i 为对应第*i*个镜片的出射角。由折射定律得到

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdots n_i = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_i}, \quad (1)$$

式中 n_i 为第 i 个镜片的折射率, n 为所有镜片折射率的乘积。

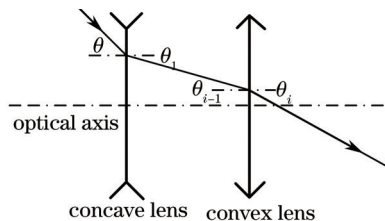


图1 光学折射原理图

Fig.1 Schematic of optical refraction

图2为鱼眼镜头成像原理图, P 为空间点,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 , θ 为入射角,且 $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, θ_i 为最后一个镜片对应的出射角, O_c 为鱼眼镜头的光心, o 为对应图像平面的中心, O_c 与 o 的距离为 a 。由 $\Delta O_c op$ 三角函数关系和(1)式求得光学折射模型

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

式中 a 和 n^2 为常数。

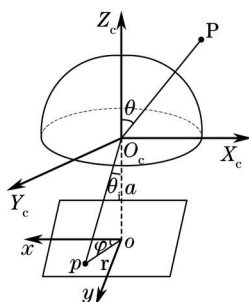


图2 鱼眼镜头成像原理图

Fig.2 Schematic of imaging by fisheye lens

2.2 建立优化的成像模型

鱼镜头在实际成像过程中产生的畸变较为严重,光学折射模型由于其结构较为简单,无法弥补偏心畸变所带来的像差。根据偏心畸变的原理以及(2)式的特点,推导关于 θ 和 φ 的畸变模型,以此建立优化的成像模型。

偏心畸变是由镜头光学系统的光心与几何中心不一致造成的,即内部镜片发生了倾斜,该畸变在图像平面上分布不均匀^[12]。以切向方向的偏心畸变为例,存在一个过图像中心点的轴,该轴上的切向畸变为0,同时也存在另一个与之正交的轴,该轴上的切向畸变最大,其余轴上的畸变介于两者之间。如图3所示,图像中任意一点 $p=(x,y)^T$,与图像中心 o 的距离为 r ,与 x 轴夹角为 φ ,虚线 AB 为图像上的最小畸变轴,虚线 CD 为图像上的最大畸变轴,最大畸变轴与 x 轴夹角为 φ_0 ,曲线 $C'D'$ 为最大畸变轴 CD 对应的最大切向畸变,该畸变大小为 $P(r)$,与径向 r 成正比。由文献[12]可以得到图像上任意一点 p 的切向畸变 Δt 与最大切向畸变 $P(r)$ 的几何关系

$$\Delta t = P(r)\cos(\varphi - \varphi_0). \quad (3)$$

Duane^[5]证明了大视场镜头的 $P(r)$ 是关于 r 的余弦函数,因此鱼镜头的 $P(r)$ 应为高阶多项式 $j_1 r^2 + j_2 r^4 + \dots$ 。同理可以得到任意一点的径向畸变与最大径向畸变的几何关系

$$\Delta r = 3P(r)\sin(\varphi - \varphi_0). \quad (4)$$

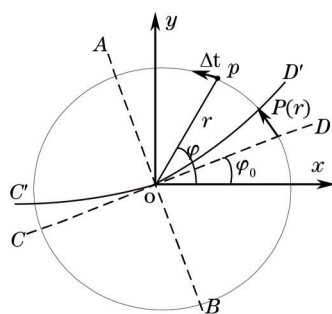


图3 切向畸变的几何关系

Fig.3 Geometric relationship of tangential distortion

鱼镜头都有固定的最大畸变轴,因此 φ_0 为常数。对(3)式、(4)式进行适当的变换,并取 $P(r)$ 的前两项。通过以下变换

$$\begin{cases} m_1 = \cos \varphi_0 \\ m_2 = \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (5)$$

求得畸变模型

$$\begin{cases} \Delta r = 3(i_1 r^2 + i_2 r^4)(m_1 \sin \varphi - m_2 \cos \varphi) \\ \Delta t = (j_1 r^2 + j_2 r^4)(m_1 \cos \varphi + m_2 \sin \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

式中 r 为(2)式关于 θ 的函数, i_1 、 i_2 、 j_1 、 j_2 、 m_1 、 m_2 为畸变模型参数。

综上,建立优化的成像模型:

1) 世界坐标系转化到摄像机坐标系

$$X_c = R X_w + t, \quad (7)$$

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, R 为旋转矩阵, t 为平移向量。

2) 摄像机坐标系投影到物理成像平面

$$\begin{cases} x = r \cos \phi \\ y = r \sin \phi \end{cases} \quad (8)$$

式中 $(x,y)^T$ 为图像的物理坐标。

3) 修正镜头畸变

$$\begin{cases} x_d = (r + \Delta r)\cos \phi - \Delta t \sin \phi \\ y_d = (r + \Delta r)\sin \phi + \Delta t \cos \phi \end{cases} \quad (9)$$

式中 $(x_d, y_d)^T$ 为加入畸变后的图像坐标。

4) 将加入畸变后的图像物理坐标系下的像点转化到像素坐标系

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_u & 0 \\ 0 & m_v \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中 $(u, v)^T$ 为图像的像素坐标, m_u 、 m_v 、 u_0 、 v_0 为镜头内部参数。

5) 通过最小化实际像点与模型求取像点之间的距离, 建立目标函数

$$E = \min \sum_{i=1}^M [d(\bar{m}_i, \hat{m}_i)]^2, \quad (11)$$

式中 M 为选取标定点的个数, \bar{m}_i 为图像上实际读取第 i 个标定点的坐标, $\bar{m} = (u, v)^T$, \hat{m}_i 为第 i 个标定经优化的成像模型计算得到的坐标。

2.3 鱼镜头畸变模型的反投影

对畸变模型的反投影过程进行分析, 将加入畸变后图像的物理坐标 $(x_d, y_d)^T$ 反推到加入畸变前的物理坐标 $(x, y)^T$, 并最终求得三维坐标点, 从而实现空间点定位^[13]。

(9)式可以转换为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} - \Delta(\theta, \varphi), \quad (12)$$

式中 $(x, y)^T$ 为加入畸变前图像的物理坐标, $\Delta(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \Delta r \cos \varphi - \Delta t \sin \varphi \\ \Delta r \sin \varphi + \Delta t \cos \varphi \end{pmatrix}$ 是关于 θ 和 φ 的畸变公式。由(2)式和(8)式可以得到 (θ, φ) 与 (x, y) 的变换关系, 记为 $(x, y) = X(\theta, \varphi)$, 则 $\Delta(\theta, \varphi) = (\Delta \circ X^{-1})(x, y)$ 。为求出 $\Delta(\theta, \varphi)$ 的值, 将 $(\Delta \circ X^{-1})(x, y)$ 围绕 $(x, y) = (x_d, y_d)$ 点一阶泰勒展开并求其近似值, 计算得到

$$(\Delta \circ X^{-1})(x, y) = (\Delta \circ X^{-1})(x_d, y_d) + \frac{\partial(\Delta \circ X^{-1})}{\partial(x, y)}(x_d, y_d) \left[\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} \right] = \Delta(\theta_d, \varphi_d) + \frac{\partial \Delta}{\partial(\theta, \varphi)}(\theta_d, \varphi_d) \left[\frac{\partial X}{\partial(\theta, \varphi)}(\theta_d, \varphi_d) \right]^{-1} \Delta(\theta, \varphi), \quad (13)$$

由 $\Delta(\theta, \varphi) = (\Delta \circ X^{-1})(x, y)$ 求得:

$$\Delta(\theta, \varphi) = \left\{ I + \frac{\partial \Delta}{\partial(\theta, \varphi)}(\theta_d, \varphi_d) \left[\frac{\partial X}{\partial(\theta, \varphi)}(\theta_d, \varphi_d) \right]^{-1} \right\}^{-1} \Delta(\theta_d, \varphi_d), \quad (14)$$

式中 $\frac{\partial \Delta}{\partial(\theta, \varphi)}$ 为 $\begin{pmatrix} \Delta r \cos \varphi - \Delta t \sin \varphi \\ \Delta r \sin \varphi + \Delta t \cos \varphi \end{pmatrix}$ 对 θ 和 φ 的偏导数, $\frac{\partial X}{\partial(\theta, \varphi)}$ 为(8)式对 θ 和 φ 的偏导数, $\varphi_d = \tan(y_d/x_d)$, θ_d

可由 $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 代入(2)式求得。最后将 $\Delta(\theta, \varphi)$ 代入(12)式可以得到加入畸变前的物理坐标点 $(x, y)^T$ 。

2.4 空间点定位

图4为鱼眼双目视觉的基本模型, 图中左鱼眼摄像机坐标系 $O_l - X_l Y_l Z_l$ 与世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 相互重合, 右鱼眼摄像机坐标系为 $O_r - X_r Y_r Z_r$, 两相机之间的位置关系固定不变, P 为空间上一点, 与左右两单位球面交点分别为 P_l 和 P_r , 则两相机的变换关系为

$$P_r = R_r R_l^{-1} P_l + t_r - R_r R_l^{-1} t_l, \quad (15)$$

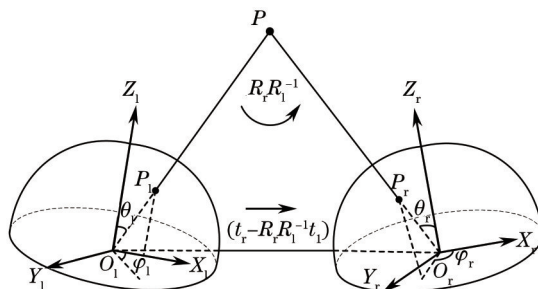


图4 鱼眼双目视觉基本模型

Fig.4 Basic model of binocular vision based on fisheye lens

式中 $P_l = \lambda_l(x_l, y_l, z_l)^T$, $P_r = \lambda_r(x_r, y_r, z_r)^T$, $(x_l, y_l, z_l)^T$ 和 $(x_r, y_r, z_r)^T$ 为单位坐标, λ_l 、 λ_r 为系数, R_l 、 t_l 和 R_r 、 t_r 分别

为左、右摄像机相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。对于左摄像机坐标系 $O_l - X_l Y_l Z_l$, 有关系式

$$(x_l, y_l, z_l)^T = (\sin \theta_l \cos \varphi_l, \sin \theta_l \sin \varphi_l, \cos \theta_l)^T, \quad (16)$$

式中 θ_l 和 φ_l 由左鱼眼相机通过(2)、(8)、(12)式计算得到, 同理有

$$(x_r, y_r, z_r)^T = (\sin \theta_r \cos \varphi_r, \sin \theta_r \sin \varphi_r, \cos \theta_r)^T, \quad (17)$$

由(15)式可求出 λ_l 和 λ_r , 最终求得空间点坐标为 $X_w = P_l = \lambda_l(x_l, y_l, z_l)^T$ 。

3 实验分析

3.1 实验设备

使用如图5所示的实验平台, 具体硬件设备有: NM33-F型鱼眼摄像头两台, 焦距 $f=1.27$ mm, 并遵循等立体角投影; 双目视觉支架台; 420 mm × 594 mm 规格的标定板; Intel Core 2处理器的计算机。

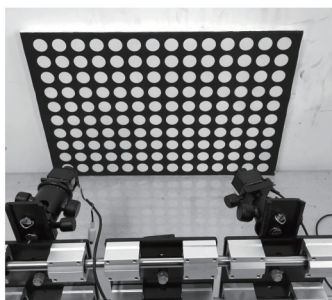


图5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

3.2 实验及数据结果

实验在 Matlab 2010a 环境下运行。首先对两鱼眼相机内、外参数进行标定。利用圆形标志板获取对应的空间点和图像点坐标, 主要步骤如下:

1) 鱼眼镜头成像模型内、外参数初值的求取。

光学折射模型中的参数 a 和 n^2 的初值可由所选取镜头遵循的投影原理求得, 采用遵循等立体角投影原理的鱼眼镜头, 理想公式为 $r = 2f \sin(\theta/2)$; 其他内、外参数初值的求取参考文献[14-15]。

2) 标定优化鱼眼镜头模型参数。

通过(11)式建立的目标函数对模型内、外参数以及畸变参数进行优化, 并标定得到(15)式中两相机之间的外参数。标定结果如表1所示。

表1 参数标定结果

Table 1 Parameter calibration results

	Left camera	Right camera
(a, n^2)	(1.3170, 1.7901)	(1.3197, 1.7918)
(m_u, m_v)	(131.8356, 131.8261)	(131.8274, 131.8306)
(u_0, v_0)	(318.7006, 241.2444)	(318.7071, 241.2398)
(i_1, i_2)	(0.0055, -0.0265)	(-0.0064, -0.0207)
(j_1, j_2)	(-0.1704, -0.0203)	(-0.1709, -0.0241)
(m_1, m_2)	(-0.0126, -0.0015)	(-0.0119, -0.0015)
$R = R_l R_r^{-1}$	(0.9252, -0.0021, 0.3795; -0.0011, 1.0000, 0.0083; -0.3795, -0.0081, 0.9252)	
$t = t_l - R_l R_r^{-1} t_r$	(-11.8438; -1.7763; 10.3549)	

实验被测物为标定板, 如图6所示, 图6(a)、(b)分别为左、右相机拍摄的图像, 对图像上 A 、 B 两圆心点和 C 、 D 两圆心点分别进行定位实验, 两点之间距离均为 120 mm。第一组实验对图像的中心位置(畸变较小) A 、 B 两点进行定位; 第二组实验对图像的边缘位置(畸变较大) C 、 D 两点进行定位。以上两组实验分别用三种方法对 A 、 B 两点和 C 、 D 两点进行定位。1) 使用文献[7]的高阶奇次多项式法(方法1); 2) 使用文献[10]的光学折射模型进行定位法(方法2); 3) 优化的成像模型定位算法(方法3)。定位 A 、 B 两点和 C 、 D 两点的空间坐标并计算长度值, 数据结果如表2和表3所示。

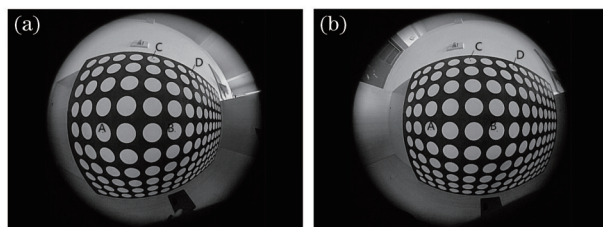


图 6 鱼眼图像。(a) 左图像; (b) 右图像

Fig.6 Fisheye image. (a) Left image; (b) right image

表 2 A、B 两点长度测量数据

Table 2 Measurement data of the length between point A and B

Experiment 1	Point A	Point B	Measurement length /mm	Actual length /mm	Relative positioning /%
Left camera pixel	(207.45;267.30)	(362.26;264.97)			
Right camera pixel	(255.10;261.00)	(397.22;264.95)			
Algorithm 1	(-88.88;23.37;79.00)	(38.99;22.10;96.70)	129.10	120.00	7.58
Algorithm 2	(-73.40;16.31;70.15)	(37.52;19.12;108.02)	117.24	120.00	2.30
Algorithm 3	(-74.47;17.27;70.44)	(37.82;20.56;108.94)	118.75	120.00	1.04

表 3 C、D 两点长度测量数据

Table 3 Measurement data of the length between point C and D

Experiment 2	Point C	Point D	Measurement length /mm	Actual length /mm	Relative positioning /%
Left camera pixel	(316.07;109.63)	(401.91;139.53)			
Right camera pixel	(339.92;112.98)	(433.42;127.38)			
Algorithm 1	(0.13;-173.12;115.21)	(93.71;-106.07;91.32)	117.57	120.00	2.03
Algorithm 2	(-2.83;-144.92;104.20)	(106.93;-129.99;124.60)	112.63	120.00	6.14
Algorithm 3	(-3.02;-142.41;103.47)	(111.70;-134.80;130.77)	118.17	120.00	0.85

3.3 实验数据分析

由表 2 和表 3 所示的实验结果可知,当分别测量图像中心区域的 AB 长度(畸变较小)和边缘区域的 CD 长度(畸变较大)时,应用高阶奇次多项式法得到的相对定位误差为 7.58% 和 2.03%,直接使用光学折射模型进行定位得到的相对定位误差为 2.30% 和 6.14%,而本文方法的相对定位误差仅为 1.04% 和 0.85%。在这两种情况下,本文方法优于其他两种方法,具有更高的测量精度。从同一方法不同测量区域的角度来看,当从测量鱼眼图像畸变小的区域转变为测量畸变较大的区域时,高阶奇次多项式法的定位精度有所提高,但仍然存在一定的相对定位误差,直接使用光学折射模型的相对定位误差明显增大,而本文方法的误差仍然保持在 1% 左右,受图像变形的影响较小,可以有效弥补采用光学折射模型进行定位的局限性。

本文方法具有良好的空间定位精度,但仍然存在微小的定位误差,其主要原因是:为推导鱼眼镜头畸变模型的反投影过程并减少计算的复杂度,采用一阶泰勒展开式对该过程进行近似计算,有一定的计算偏差;除此之外,标定板本身存在的制作误差也会影响模型参数的标定精度,产生定位误差。

4 结 论

对鱼眼双目视觉系统成像的相关问题进行了研究,提出了基于光学折射模型的眼镜头成像系统的优化方案,并给出基于该成像系统的空间点定位的理论方法。实验结果表明,提出的畸变模型可以减少鱼眼镜头畸变所带来的成像误差,基于此畸变模型的成像模型的定位方法具有较高的测量精度,很好地解决了高阶奇次多项式法定位误差大以及光学折射模型的定位局限性强的问题,为鱼眼双目视觉定位提供了可靠的参量依据。

参 考 文 献

1 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement[J]. Acta Optica Sinica,

- 2012, 32(9): 0915001.
杨博文, 张丽艳, 叶 南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0915001.
- 2 Herrera C, Kannala J, Heikkilä J. Joint depth and color camera calibration with distortion correction[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 2058–2064.
- 3 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.
- 4 Feng Weijia. Study on Omnidirectional Vision and Panoramic Stereo Sphere Vision Based on Fish-Eye Lens[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 4–12.
冯为嘉. 基于鱼镜头的全方位视觉及全景立体球视觉研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 4–12.
- 5 Duane C B. Close-range camera calibration[J]. Photogramm Eng, 1971, 37: 855–866.
- 6 Zhang Jingguo, Jiang Dagang, Li Xiaofeng. Barrel distortion correction of wide-angle lens based on a duality quadratic polynomial[J]. Optical Technique, 2010, 36(4): 500–504.
张景国, 蒋大纲, 李晓峰. 广角镜头桶形畸变的二元二次多项式修正法[J]. 光学技术, 2010, 36(4): 500–504.
- 7 Kannala J, Heikkilä J, Brandt S S. Geometric camera calibration[J]. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, 2008: 1–20.
- 8 Nakano M, Li S, Chiba N. Calibrating fisheye camera by stripe pattern based upon spherical model[J]. IEICE Trans. Information and Systems, 2007, 89: 73–82.
- 9 Okutsu R, Terabayashi K, Aragaki Y, *et al.*. Generation of overhead view images by estimating intrinsic and extrinsic camera parameters of multiple fish-eye cameras[C]. Machine Vision Applications. 2009: 447–450.
- 10 Zhu H, Wang X, Zhou J, *et al.*. Approximate model of fisheye camera based on the optical refraction[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 73(3): 1445–1457.
- 11 Zhong Xing, Zhang Yuan, Jin Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322004.
钟 兴, 张 元, 金 光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322004.
- 12 Brown D C. Decentering distortion of lenses[J]. Photometric Engineering, 1966, 32(3): 444–462.
- 13 Zhang Wenming, Wang Xin, Zhang Qiang, *et al.*. Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system based on particle swarm optimization calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0515001.
张文明, 王 鑫, 张 强, 等. 基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0515001.
- 14 Kannala J, Brandt S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335–1340.
- 15 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.

栏目编辑: 苏 岑