



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140134

## 基于有序图像序列与可控外部参数的远心镜头标定方法

李林娜, 毕德学, 马 丽

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 以远心镜头放大率、远心度及镜头畸变作为标定参数, 提出一种新型远心镜头标定方法. 该方法通过控制旋转和平移 2 个外部参数矩阵, 利用已知的外部参数对内部参数进行标定, 而不再同时标定外部参数. 通过一维高精度移动平台精确控制标定板到镜头的物距, 获得一系列有序图像, 从而获得可控的高精度外部参数. 实验表明: 该方法可解决目前远心镜头难以标定或标定参数不全、精确度差等问题, 且标定模型简单、快捷, 具有较高的实用性.

**关键词:** 远心镜头; 摄像机标定; 有序图像序列; 可控外部参数

**中图分类号:** TN247      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2015)04-0060-05

## A New Telecentric Lens Calibration Method Based on a Series of Ordered Images and Controllable External Parameters

LI Linna, BI Dexue, MA Li

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** A new telecentric lens calibration method was proposed by using the magnification and distortion degree of telecentric lens as calibration parameters. This calibration method uses the known external parameters to calibrate the internal reference, rather than calibrate external parameters at the same time by controlling the rotation of the two external reference translation matrix. A series of ordered images were obtained by controlling the distance between the calibration plate and the lens with dimensional precision mobile platform, which can help obtain high accuracy external controllable parameters. Experimental results show that this new method can overcome the difficulties in current telecentric lens calibration, such as calibration parameters insufficiency or poor accuracy. The new calibration model is simple and works fast with a great practical value.

**Key words:** telecentric lens; camera calibration; a sequence of ordered images; controllable external reference

随着制造工艺水平的进步, 远心镜头的价格目前可被大多相关使用者所接受, 加之良好的性能, 现在已经越来越多地用于工业测量和生产实践中. 远心镜头主要用于高精测量中, 在一定的物距范围内, 其放大率一致且具有极小的透视畸变, 这些特殊性质使得远心镜头在测量精密零件尺寸中发挥了更好的效果<sup>[1-3]</sup>. 尽管远心镜头畸变很小, 某些镜头的放射性失真度可小于 0.1%, 但在某些高精度测量应用中, 此精度仍不能满足要求, 因此标定必不可少.

针对针孔摄像机模型, 其标定方法很多, 典型的有 Tsai 两步法、非线性标定方法等<sup>[4-8]</sup>. 这些方法均是通过先标定线性模型参数, 后进行非线性优化, 从

而获得非线性模型参数以确定焦距、投影中心、畸变系数等. 而对于远心镜头的标定方法较少, 且多建立在针孔模型类似的基础上. 文献[9]提出了一种标定方法, 其利用物像平行投影关系, 求解出远心镜头的有效放大率, 再利用图像和世界坐标的对应关系求解, 但此方法未标定投影中心点, 且未得到在精度下的有效工作范围与镜头平行度. 文献[10]通过比较变形前后同一平面物体表面的两幅数字图像, 分析了被测物体的离面位移、相机自热和镜头畸变对二维数字图像相关方法位移和应变测量结果的影响, 但没有给出远心镜头的具体模型, 求解的也并非传统意义上的标定参数, 因此不适用于通用的远心镜头标定.

收稿日期: 2014-10-18; 修回日期: 2015-03-23

作者简介: 李林娜 (1990—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生; 通信作者: 毕德学, 教授, dexue@tust.edu.cn.

本文结合文献所述的双远心镜头平行投影关系、控制变量的实验方法以及相机自热等限制条件的影响, 针对实际远心镜头的标定给出一个模型, 提出了一种基于图像序列与可控外部参数的方法. 在实际应用中, 即使测量的平台或环境改变, 利用本文方法得到标定结果仍可以使用.

## 1 远心镜头标定模型

### 1.1 基本模型

工业高精度测量中常用的是双远心镜头, 其简化成像模型如图 1 所示.

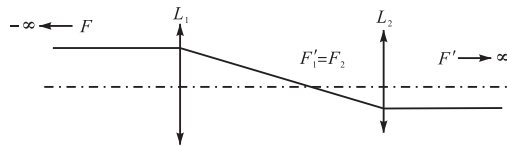


图 1 双远心镜头简化模型

Fig. 1 Simplified model of double telecentric lens

双远心镜头系统由 2 个薄凸透镜组成, 物与像的投影中心均在无穷远处,  $F'_1 = F_2$ , 焦点的位置相同, 这个系统也被称为无焦系统. 而实际的远心镜头结构是, 在孔径光阑后方放置一个透镜, 使其在像平面成像. 因此, 双远心镜头放大率可用  $\beta = -f'_1 / f_2$  表示.

基于上述结构模型的原理, 选择有效放大率、工作范围、远心度和中心点作为标定参数, 建立相应的标定系统模型. 模型中各平面间的关系见图 2.

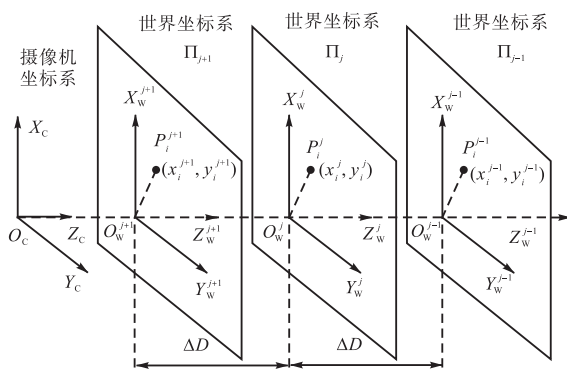


图 2 同一世界坐标系下不同的平面序列

Fig. 2 Different plane sequence in the same world coordinate system

在摄像机的光轴中心建立坐标系,  $Z_c$  轴方向与摄像机光轴  $Z$  轴平行且同向, 以相机到标定板平面的方向为正方向, 并将世界坐标系建立在标定板上,  $Z_w$  轴的方向与  $Z_c$  轴一致. 实际上, 由于平行度无法

达到  $0^\circ$ , 即使在远心镜头的工作范围内, 离摄像机镜头的距离不同, 其放大率不同. 因此, 距离景物点在不同位置处的放大率应分段标定, 以对焦平面为中心平面, 向两边距摄像机某一固定距离的平面上标定. 不同世界坐标系的景物点  $P'_i$  对应不同平面  $\Pi_j$  上的点, 各平面对应的坐标系平行, 且相隔同样的距离  $\Delta D$ .

对于此序列中某一坐标系, 如  $\Pi_1$ , 建立相机模型如图 3 所示.

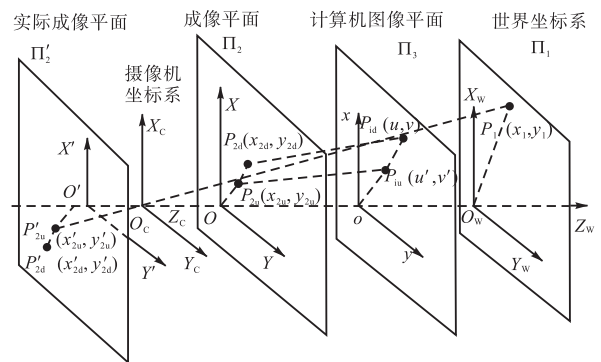


图 3 远心镜头成像模型

Fig. 3 Imaging model of telecentric lens

各个坐标系  $Z$  轴方向均沿相机的主光轴方向, 虽远心镜头理论上是平行投影, 不存在投影中心, 但为了方便计算畸变参数, 仍在成像平面  $\Pi_2$  虚拟出投影中心  $O$ , 此中心是双远心镜头的第 1 个镜片的像方焦点与第 2 个镜片物方焦点的重合点在 CCD 传感器平面的垂直投影, 并以此点为原点建立坐标系.  $O$  在计算机的图像平面  $\Pi_3$  上对应点为  $o(u_0, v_0)$ .  $\Pi_1$  是世界坐标系所在平面,  $P_1(x_1, y_1)$  是世界坐标系中的景物点.  $\Pi'_2$  是实际的成像平面,  $\Pi_2$  是  $\Pi'_2$  经过反转得到的正向成像平面.  $P_{2u}(x_{2u}, y_{2u})$  是无畸变情况下  $P_1$  在成像平面  $\Pi_2$  上相应的理想成像点, 而实际成像点为  $P_{2d}(x_{2d}, y_{2d})$ .  $P_{iu}(u', v')$  是无畸变情况下的理想图像点,  $P_{id}(u, v)$  为实际有畸变的图像坐标点.  $\beta_x$  是  $X_c$  方向的放大率,  $\beta_y$  是  $Y_c$  方向的放大率. 景物点在摄像机坐标下的坐标一般用  $(x_c, y_c, z_c)$  表示. 从景物点到成像点的投影关系如式(1)所示.

$$\begin{bmatrix} x_{2u} \\ y_{2u} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在景物点的世界坐标系坐标与摄像机坐标系坐标转换关系中, 旋转矩阵  $R = I$ , 平移矩阵  $P = [0 \ 0 \ d]^T$ , 其中,  $I$  为  $3 \times 3$  单位矩阵,  $d$  是沿  $Z_c$  轴方向的平移

量. 计算机图像上的点到成像平面上点的关系为

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2u} \\ y_{2u} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $d_x$ 、 $d_y$  分别是 CCD 传感器(成像平面)  $X$  方向与  $Y$  方向的像素尺寸. 根据式(1)、式(2)和世界坐标系到摄像机坐标系之间的旋转平移矩阵联立方程, 计算机图像平面上点到景物点关系如式(3)所示.

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_x/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & \beta_y/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

获得放大率参数后, 就可以就不同物距的放大率进行比较, 从而获得远心度  $\varphi$ : 假设在镜头的工作距离以内沿轴线的某一点为原点, 然后每隔  $\Delta D$  对所在的平面  $\Pi^i$  进行一次标定, 获得  $\beta_x^i/d_x$ 、 $\beta_y^i/d_y$  后, 对不同的  $\beta_x^i$ 、 $\beta_y^i$  与距离坐标的关系拟合, 分别得曲线  $f_x(\beta_x, Z)$ 、 $f_y(\beta_y, Z)$ . 则水平方向的远心度  $\varphi_x = f'_x(\beta_x, Z)$ , 垂直方向的远心度为  $\varphi_y = f'_y(\beta_y, Z)$ . 对于有效景深  $S$ (工作距离), 物体所在平面如超出  $S$  则不在对焦面上, 所得图像较模糊, 其测量精度受之影响较大, 因此有必要在超出厂家给出的工作距离范围沿  $Z$  轴方向, 每隔  $\Delta D$  仍进行标定, 得出  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$ , 计算对应的远心度, 并与需要的远心度范围进行比较, 进一步确定实际的工作距离.

### 1.2 镜头畸变

与普通针孔相机相比, 远心镜头畸变很小, 但仍然存在. 主要畸变有径向畸变、切向畸变、薄棱镜畸变 3 种. 总畸变如式(4)所示.

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y) = & x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] + \\ & [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy] + s_1(x^2 + y^2)\delta_x(x, y) = \\ & y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] + \\ & [p_1(3y^2 + x^2) + 2p_2xy] + s_1(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $k_1$ 、 $k_2$  分别表示一阶、二阶径向畸变系数;  $p_1$ 、 $p_2$  表示一阶、二阶切向畸变系数;  $s_1$  为薄棱镜畸变系数. 假设模型中没有畸变, 将先前求得的参数与设为 0 的畸变参数作为初始值, 来求解整个系统方程, 求解模型中需要标定参数的问题便转化为一非线性优化问题, 优化函数如式(5)所示.

$$F = \sum_{i=1}^N \| P_i - P'_i(\beta_x, \beta_y, k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, u_0, v_0) \|^2 \quad (5)$$

对双远心镜头系统内参数的求解即转化为利用

LM 算法求函数的最小值问题. 利用循环迭代, 设置收敛精度, 每次求解所得结果作为下一次循环初始值, 直到获得各个参数收敛值. 需要注意的是投影中心初始值对收敛结果影响较大, 选择不当易产生离群点, 不利于收敛.

## 2 标定方法与过程

### 2.1 实验过程

(1) 搭建实验平台, 选用高精度的移动平台放置标定平面, 并将摄像头水平固定, 将标定板垂直置于移动平台上, 通过平台的运动控制卡与计算机的连接来控制标定板到摄像头的距离. 选用 PI 公司的 M-605.1DD 型高精度线性平台, 精度为  $0.1 \mu\text{m}$ , 有效工作范围为  $25 \text{ mm}$ , 实验平台如图 4 所示.

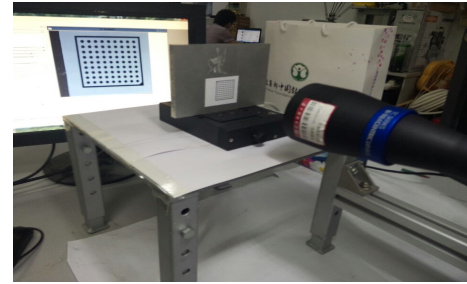


图 4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

考虑相机的自热问题, 在测量之前对相机进行预热, 以减小温度对测量的干扰. 采用实心圆标定板, 尺寸略小于摄像头的视野范围, 光照直接照射即可, 自制标定板参数如下: 标定板尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 标志圆直径为  $1.5 \text{ mm}$ , 标志圆数目为  $9 \times 9$ , 行间距、列间距均为  $3 \text{ mm}$ .

(2) 将标定板安放在线性运动平台上, 摄像头固定在支架上, 保持水平, 使得标定板的图像完全显示在视野范围中, 调整工作台到移动平台工作范围中间处, 让物距在镜头厂商给定的工作距离内, 微调至对焦面远离镜头较近处方向间隔  $12.5 \text{ mm}$  处, 即平台坐标 ( $Z$  轴坐标) 为 0 处, 设为标定板平移的起始位置, 此步骤有助于获取有序的图像序列.

(3) 在相应的位置进行拍摄, 并存储图像, 然后固定平台的位置, 沿摄像头光轴 ( $Z$  轴) 方向从 0 坐标处, 每隔  $\Delta D$  再进行多次拍摄, 直至到达靠近摄像头一端的终点坐标, 即  $Z$  轴坐标值为  $25 \text{ mm}$  处, 获得多组拍摄的标定图像. 此过程应尽量保证摄像机光轴与标定平面垂直.

获取图像后,通过 HALCON 软件提取标志圆中心在图像上的行列坐标,作为标定数据存储在数组中,以便后续处理。

2.2 关键步骤说明

2.2.1 中心点标定

采用 Tsai 两步法思想,使用 Matlab 编写程序:第 1 步,获得外参数  $R、T$ ;第 2 步,考虑含有畸变的情况,采用非线性带约束的最优化函数 fmincon 进行优化。

中心点的标定是根据标定板同行、同列标志点拟合得到的直线在水平和垂直方向为两簇平行线组。对于理想无畸变的点拟合得到的直线方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} x_u - k_u(i)y_u - b_u(i) = 0 \\ x_v - k_v(i)y_v - b_v(i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)作为最优化函数非线性约束条件之一,下标  $u、v$  分别表示标定板的水平方向上点序列与垂直方向点序列,式(6)中坐标和系数与两组平行线相对应。由于 CCD 像元的大小基本相同,所以  $x、y$  方向的放大率相差较小,  $\beta_x、\beta_y$  两者相差不应该太大,因此再增加  $\|\beta_x / \beta_y - 1\| = 0$  的约束条件,对式(5)进行最优化。初始值选定为图像中心点,程序优化后把结果与初始值进行比较,并将其与初值的差的归一化比值设定在 5% 范围内,通过 5 像素的步长增减初始值,在达到规定的比值范围内,减少到 0.5 像素步长进行细化求解,最终得到中心点的坐标。

2.2.2 图像放大率与畸变系数标定

获得中心点后,将中心点作为初始值,去除标志点在直线上约束,选用  $\|\beta_x / \beta_y - 1\| = 0$  和式(6)作为约束,对式(5)进行最优化,获得放大率和畸变系数。进行多组图像的拍摄,以对焦处为中心,向两个方向每隔 0.5 mm 位置拍摄一张图像,标定后获得一系列的放大率参数,最终得到平行度与景深。而经多次标定,畸变中心点最终取值为(1 016, 808)。

3 实验结果与误差分析

实验选用 OPTO 公司生产的 TC23480 型双远心镜头,放大率为  $1.841 \times 10^{-5}$ ;选用 Basler 公司生产的 PIA 摄像头,分辨率为 2 448 像素  $\times$  2 050 像素。利用本文方法对相机进行参数标定,结果见表 1。

表 1 标定的畸变系数

Tab. 1 Calibrated distortion coefficient

$k_1$	$k_2$	$p_1$	$p_2$	$s_1$
$5.21 \times 10^{-6}$	0.031	$8.79 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^{-8}$	$7.40 \times 10^{-7}$

分别使用 HALCON 软件及 Matlab 编程,利用获得的标定参数,对实际尺寸为  $(3 \pm 0.005)$  mm 的标准量块进行测量,表 2 是采用 HALCON 软件编程,对量块在不同方向放置时的测量结果,表 3 是采用 Matlab 编程,分别将量块平行于所在测量平面的  $X_C$  和  $Y_C$  方向放置时的测量结果。

表 2 采用 HALCON 软件对量块在不同方向放置时的测量结果 ( $n = 7$ )

Tab. 2 Results of measurement of the gauge block placed in different direction by using HALCON ( $n = 7$ )

放置方向与 $X_C$ 夹角/(°)	测量值/mm						平均值/mm	标准差/mm	
0	3.001 9	3.010 9	2.991 8	2.993 6	2.997 7	2.991 8	2.992 4	2.996 8	0.006 6
45	3.012 4	3.020 9	3.001 7	3.004 0	3.009 0	3.003 8	3.004 7	3.007 8	0.006 3
90	3.010 4	3.019 3	3.000 2	3.002 3	3.007 0	3.001 5	3.002 3	3.003 7	0.006 4
135	3.009 6	3.018 5	2.999 4	3.001 6	3.006 3	3.000 7	3.001 5	3.005 1	0.006 5

表 3 采用 Matlab 编程对量块在  $X_C、Y_C$  方向放置时的测量结果

Tab. 3 Results of measurement of the width of gauge block placed in  $X_C$  and  $Y_C$  direction by using Matlab

Z 坐标/m	测量平均值/mm		标准差/mm		Z 坐标/m	测量平均值/mm		标准差/mm	
	$X_C$ 方向	$Y_C$ 方向	$X_C$ 方向	$Y_C$ 方向		$X_C$ 方向	$Y_C$ 方向	$X_C$ 方向	$Y_C$ 方向
0.004 5	3.003 1	2.990 3	0.003 8	0.002 8	0.009 0	3.002 0	2.989 7	0.002 9	0.003 0
0.005 0	3.002 3	2.987 2	0.002 8	0.004 2	0.009 5	3.002 4	2.989 1	0.003 3	0.003 3
0.005 5	3.002 6	2.988 5	0.003 9	0.002 9	0.010 0	3.001 1	2.989 4	0.003 5	0.002 8
0.006 0	3.002 4	2.988 9	0.002 7	0.003 3	0.010 5	3.002 0	2.989 2	0.005 7	0.003 6
0.006 5	3.002 3	2.988 1	0.003 9	0.002 9	0.011 0	3.001 2	2.990 2	0.002 2	0.001 9
0.007 0	3.002 4	2.987 8	0.004 5	0.002 5	0.011 5	3.002 1	2.990 7	0.003 6	0.001 9
0.007 5	3.002 7	2.988 7	0.003 1	0.003 8	0.012 0	3.001 7	2.990 8	0.003 5	0.003 2
0.008 0	3.002 4	2.990 4	0.003 3	0.003 3	0.012 5	3.001 6	2.989 1	0.003 3	0.002 8

经拟合,  $X_C$ 、 $Y_C$  方向放大率与  $Z$  轴方向坐标关系如图 5 所示. 平行度为放大率拟合直线的斜率. 经计算,  $X_C$  方向平行度为  $0.000\ 039\ 8^\circ$ ,  $Y_C$  方向平行度为  $0.000\ 106^\circ$ .

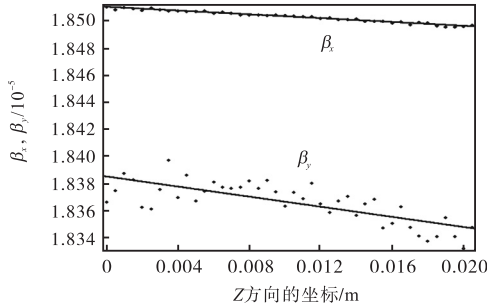


图 5  $X_C$ 、 $Y_C$  方向放大率与  $Z$  坐标的关系

Fig. 5 Magnification of  $X_C$  and  $Y_C$  directions vs  $Z$ -coordinate

工作距离可根据图 6 选取. 从图中可以看出, 精度在  $6\ \mu\text{m}$  以下的范围分别是对焦点前后  $-0.009\ \text{m}$  至  $0.008\ \text{m}$ , 对焦点是距离镜头前方  $0.134\ 6\ \text{m}$ , 可以得到工作距离为  $17\ \text{mm}$ . 在该  $17\ \text{mm}$  工作距离内进行测量时, 可得到  $6\ \mu\text{m}$  以下的测量精度.

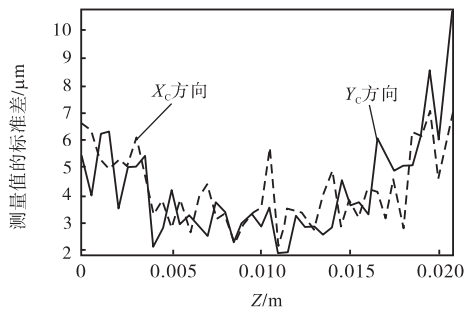


图 6 长度为  $3\ \text{mm}$  的被测物体在  $X_C$ 、 $Y_C$  方向上测量值的标准差与  $Z$  坐标的关系

Fig. 6 The std. value of a  $3\ \text{mm}$  length object on  $X_C$  and  $Y_C$  directions vs  $Z$ -coordinate

#### 4 结 语

本文提出了一种基于图像序列与可控外部参数的方法, 可利用已知的外部参数对内部参数进行标定. 实验表明, 本文方法获得了较好标定结果, 为高精度测量的后续工作提供了保证.

由于设备和人员限制, 标定的精度还有待进一步

提升. 此外, 标定方法对环境的要求较高, 对远心镜头安放要求较高, 且需要采用专用的精密支架, 在具体实践中还需改进.

#### 参考文献:

- [1] Michalski J. What is telecentricity[EB/OL]. [2014-04-04]. <http://www.edmundoptics.com/downloads/telecentricity.pdf>.
- [2] Andrew Wilson. Telecentric lenses make precise measurements[EB/OL]. [2014-09-20]. <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-12/issue-9/features/product-focus/telecentric-lenses-make-precise-measurements.html>.
- [3] Spencer Luster. Using telecentric lenses in inspection systems[EB/OL]. [2013-11-13]. <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-10/issue-1/world-wide-camera-lens-directory/using-telecentric-lenses-in-inspection-systems.html>.
- [4] Faugeras O, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]// Proceeding of the 2nd European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg: Springer, 1992: 321-334.
- [5] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机标定方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004(2): 4-6.
- [7] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA: IEEE, 1986: 364-374.
- [8] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [9] Li Dong, Tian Jindong. An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 538-541.
- [10] 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004-1-0412004-11.

责任编辑: 常涛