

锂电池涂布在线测量中的线阵相机标定方法

刘怀广*, 王迪**, 杨金堂, 刘源洞

武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081

摘要 提出了一种锂电池涂布在线测量中的线阵相机标定方法。分析了锂电池涂布生产系统,建立了基于线阵相机视觉测量系统方案;研究了线阵相机的标定技术,根据涂布生产特点和检测需求采取了单维度标定法,简化了标定方法,提高了标定精度。在此基础上,对相应的软件系统进行了开发,并应用于现场实践。实践结果表明,该标定方法满足实际生产中涂布测量需求。

关键词 机器视觉; 相机标定; 锂电池生产; 视觉测量; 线阵相机

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.111501

Calibration of Linear Camera for Online Measurement of Lithium Battery Coating

Liu Huaiguang*, Wang Di**, Yang Jintang, Liu Yuanjiong

Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract We propose a calibration method of the linear cameras used for measuring lithium battery coatings (LBC). First, we analyzed the LBC production system and established a vision measurement system using linear cameras. We then studied the linear camera calibration technology and developed a single-dimensional calibration method based on the LBC production characteristics and the detection requirements. We hence simplified the calibration method and improved the calibration precision. Finally, we developed a corresponding software system based on the technology in use and applied the system for the production practices. The practice results demonstrate that the proposed calibration method meets the LBC measurement requirements in an actual production environment.

Key words machine vision; camera calibration; lithium battery production; vision measurement; linear array camera

OCIS codes 150.0155; 120.3180

1 引言

锂电池行业是目前国家重点扶植的新能源行业,作为我国 863 计划的重点项目,其在汽车、数码和电动车等行业都有广阔的应用前景,国家已出台 30 多项政策促进并保证锂电池行业的健康发展。2017 年,中国生产锂电池已占全球 40% 以上,锂电池生产企业也多达上千家^[1]。但是,锂电池生产工

艺比较复杂(一般需要搅拌、涂布和对辊等十余道工序),并且对环境要求高,锂电池的质量容易受影响。随着人们对锂电池质量关注度的日益增高,生产企业也对锂电池生产的过程控制更加重视。

锂电池通常由正极、负极、隔膜、电解液和外壳组成。电池工作时,通过锂离子在正/负极之间的迁移来完成充放电^[2]。电池极片作为锂电池的基础,其涂布质量影响电池性能。目前,尽管中国已经成

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2018-12-20; 录用日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51874217)、湖北省技术创新重大项目专项(2017ACA180)、湖北省自然科学基金(2017CFC830,2018CFC795)

* E-mail: lhg81219@163.com; ** E-mail: wangdi335566@163.com

为锂电池的生产大国,但大多数企业生产的电池品质并不理想。如韩日巨头的产品不合格率仅有 10^{-6} ,即每生产一百万只电芯,不合格电芯仅一只甚至没有;而中国企业的电芯产品合格率勉强达到90%^[3]。因此,为进一步保证电池品质,提高电池极片涂布质量和产品合格率、精度成了当务之急。

为了提高锂电池涂布的产品合格率及其精度、减少误差造成的材料损耗,锂电池涂布生产过程需要在线检测、及时调控。传统检测利用工具进行肉眼检测,对工人技术要求较高,劳动强度大,存在较大误差。为降低锂电池涂布生产过程中的测量误差、提高检测精度和工作效率,现引入带有线阵相机的视觉测量系统,其中线阵相机的标定是视觉系统中最复杂、最重要的环节。因此,本文对锂电池涂布宽度在线测量中的线阵相机标定技术进行了研究,根据线阵相机的特点和锂电池涂布的检测需求,简化了标定技术,在此基础上对相应的软件系统进行开发,并应用于现场实践。

2 基本原理

2.1 锂电池涂布在线视觉测量系统设计

锂电池涂布在线视觉测量系统如图1所示。因为要检测上下表面,该系统由2组光源和相机组成,每组有2个相机(相机数量可根据精度和产品规格进行设置),其布置方式按与运行方向垂直布置。图2为1出4涂布图像检测模型,横线为相机扫描方向, $B_1 \sim B_5$ 为主要待检尺寸,其中 B_1 、 B_3 、 B_5 为基材留白尺寸, B_2 、 B_4 为涂布尺寸。从图2可以看出,由于扫描方向与涂布边界垂直,其尺寸检测主要是边界点 u 方向的定位。

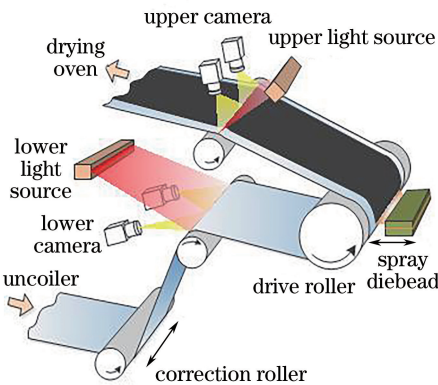


图1 1出4涂布在线检测方案示意图

Fig. 1 Schematic of coating online inspection scheme

2.2 线阵相机的标定及畸变校正

线阵相机精度高、速度快、抗干扰能力强,适用

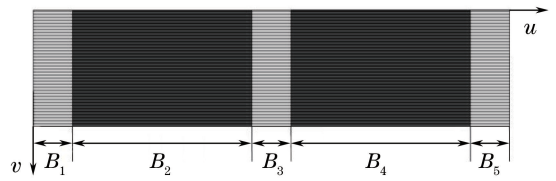


图2 涂布检测模型图

Fig. 2 Diagram of coating inspection model

于连续性产品的在线检测。要获得产品边界的精确坐标,需对检测目标进行图像坐标系 $u-v$ 到世界坐标系 $x-y-z$ 的转化^[4-6],如图3所示。图中左右相机的视野范围分别用 W_1 和 W_r 表示,两相机的视野重合量为 s 。

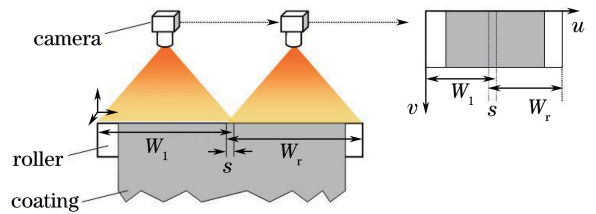


图3 相机成像分布示意图

Fig. 3 Diagram of camera imaging distribution

2.3 线阵相机的单维度标定法

目前,相机标定主要有Tsai标定法和张氏标定法^[7],这两种方法需要拍摄若干角度的标定板图像,然后按照(1)式的转换矩阵求相机的内参和外参。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: Z_c 为物体到相机光心的距离; $\{f_x, f_y, u_0, v_0\}$ 为相机内参; $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, t\}$ 分别为绕 x 、 y 、 z 轴的旋转向量以及平移向量; $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 为标定点的三维坐标。

但是,根据(1)式求解相机参数对标定图像的要求较高,标定点的差异性要求比较高。而线阵相机成像时需要拍摄物有相对运动,高精度的标定板很难保证运动速度与采集速度的统一,标定板图像的采集困难。目前,对线阵相机的标定方法主要有构建标定面法^[8]和虚拟靶标方法^[9]。但这两种方法都需要通过构建标定面或辅助面,需要通过两个维度的空间坐标来确定标定参数。其实,涂布检测需求和线阵相机的特点更关注一个维度(u 方向)的尺寸,无需求取空间点,这极大地简化了标定方法。因此,采用更为简洁的单维度标定法。

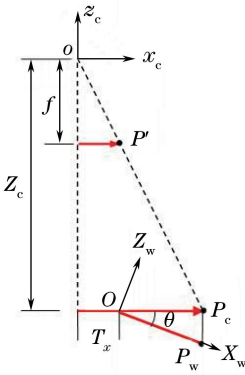


图4 相机单维度成像模型图

Fig. 4 Diagram of camera single-dimensional imaging model

如图4所示,在空间坐标系 $O-X_wZ_w$ 沿 X_w 方向的一点 P_w ,经过旋转和平移后转化为相机坐标系 $o-x_cz_c$ 中的点 P_c ,再经小孔成像模型投影到图像坐标系 $u-v$ (未在图中标出) 的一点 P' , T_x 为相机外参。若只考虑 x_c 方向的数据,结合(1)式,可得单维度像素坐标投影公式

$$u = \frac{f}{d_x \cdot Z_c} \cdot (X_w \cos \theta + T_x) + u_0, \quad (2)$$

式中: d_x 为相机成像单元的宽度; f 为相机焦距。对于安装好的相机,涂布与相机的距离、焦距和 d_x 均不变,可令

$$g_x = \frac{f}{d_x \cdot Z_c}, \quad (3)$$

式中: g_x 为 x 方向上单位空间尺寸在相机坐标系中的度量值,表达了空间坐标系与相机坐标系的转化关系。另外,相机与涂布的夹角很小(可以通过安装进行调平),可以忽略。因此,(2)式可以简化为

$$u = g_x \cdot (X_w + T_x) + u_0, \quad (4)$$

式中: T_x 为相机外参,对应相机物理坐标的平移量; u_0 为图像坐标系原点,需多幅标定图来确定。本文主要讨论涂布宽度即坐标差,因此 u_0 不影响最终测量结果。为简化标定过程,设 u_0 为图像的中心处坐标,即 $u_0 = 4096$ 。因此,(4)式可以进一步简化为

$$u = g_x X_w + t_x, \quad (5)$$

$$t_x = g_x T_x + 4096, \quad (6)$$

式中: t_x 为空间坐标系原点在图像坐标系中的值,则(5)式实际含有2个待定参数 $\{g_x, T_x\}$,理论上通过单幅标定图的2个点即可求出,但考虑到实际求取特征点存在误差,本文利用最小二乘法求解。

若找到的特征点数为 $n (n > 2)$,则其测量值的最小二乘方程为

$$Q(g_x, t_x) = \sum_{i=1}^n (u_i - \hat{u}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (u_i - g_x X_{wi} - t_x)^2, \quad (7)$$

式中: i 为标定点的序号; X_{wi} 为标定点在 $O-X_wZ_w$ 空间中的物理坐标; u_i 为图像中的特征点坐标; \hat{u}_i 为(4)式的估计值。若求 Q 的最小值,对(7)式求偏导,并令其为0,则

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial g_x} = \sum_{i=1}^n u_i - g_x \sum_{i=0}^n X_{wi} - n t_x = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t_x} = \sum_{i=1}^n u_i X_{wi} - g_x \sum_{i=0}^n (X_{wi})^2 - t_x \sum_{i=0}^n X_{wi} = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

(8)式为线性方程,可直接求解得

$$\begin{cases} g_x = \frac{n \sum_{i=0}^n u_i X_{wi} - \sum_{i=0}^n u_i \sum_{i=0}^n X_{wi}}{n \sum_{i=0}^n (X_{wi})^2 - \left(\sum_{i=0}^n X_{wi} \right)^2} \\ t_x = \frac{\sum_{i=0}^n u_i - g_x \sum_{i=0}^n X_{wi}}{n} \end{cases}. \quad (9)$$

2.4 线阵相机畸变校正

图4相机模型是依据小孔成像的模型,但当相机单纯用小孔成像时,由于光线入射量较少,曝光很慢。现代相机都是通过镜头提高光通量,加快曝光速度,但由于镜头晶体结构和加工精度的原因,远离光轴的光线经过镜头后发生偏折,给图像带来了畸变。图像畸变使得目标成像位置发生偏移,造成测量失真。为保证测量的准确性,一般需要对采集的图像坐标作校正,校正方程为

$$u = \hat{u} + \delta_u, \quad (10)$$

式中: u 为真实坐标; \hat{u} 为图像坐标; δ_u 为畸变误差。

镜头的畸变误差主要由径向畸变和切向畸变组成^[10]。径向畸变指矢量端沿着射线方向发生的长度变化,即矢径变化;切向畸变是理想点沿着切线方向发生的变化,也可以理解为角度方向上的变化。由于实际应用过程中,切向畸变的影响较小,一般只考虑径向畸变^[11]。径向畸变通常用多项式表示, $\{k_1, k_2\}$ 为径向畸变系数,忽略掉高阶项的径向畸变方程为^[12]

$$\begin{cases} \delta_u = \Delta \hat{u}_0 [k_1 (\Delta \hat{u}_0^2 + \Delta \hat{v}_0^2) + k_2 (\Delta \hat{u}_0^2 + \Delta \hat{v}_0^2)^2] \\ \delta_v = \Delta \hat{v}_0 [k_1 (\Delta \hat{u}_0^2 + \Delta \hat{v}_0^2) + k_2 (\Delta \hat{u}_0^2 + \Delta \hat{v}_0^2)^2] \end{cases}, \quad (11)$$

式中： $\Delta\hat{u}_0 = \hat{u} - u_0$ ； $\Delta\hat{v}_0 = \hat{v} - v_0$ 为图像坐标与真实坐标间的误差。

尽管很多文献把线阵相机看成面阵 CCD 的一个特例^[13]，但实际上其成像原理有很大不同。在畸变形式上，面阵相机在 v 方向的畸变是独立的，但线阵相机在 v 方向的畸变与扫描运动有关。结合图 2，主要进行扫描方向的宽度测量，仅考虑 u 方向的镜头畸变，因此对(11)式进行简化，得

$$\delta_u = k_1 \Delta\hat{u}_0^3 + k_2 \Delta\hat{u}_0^5 = k_1 (\hat{u} - u_0)^3 + k_2 (\hat{u} - u_0)^5, \quad (12)$$

$$u = \hat{u} + k_1 (\hat{u} - u_0)^3 + k_2 (\hat{u} - u_0)^5, \quad (13)$$

式中含有三个未知量 $\{k_1, k_2, u_0\}$ ，实际求解时，通过对关键点采用 Levenberg- Marquardt(LM 算法)迭代算法求解^[14]。

3 实验结果

相机标定时，将一张黑白格子软尺(标定尺单位为 0.005 m，误差为 0.00001 m)贴在涂布上随带运行，从而抓取标定图像。求得标定点如图 5 所示(红色标记点所在位置)，选择其中一行标定点标定^[15]。

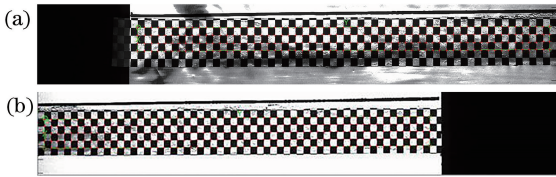


图 5 标定图像。(a)左相机标定点；(b)右相机标定点
Fig. 5 Image calibration. (a) Left camera calibration point; (b) right camera calibration point

以 u 方向坐标为标定值， X_{wi} 按照给定的块宽度(0.005 m)进行标定，即 $X_{wi} = 5i$ 。代入(9)式再结合(6)式，可求得相机待定参数(表 1)。

表 1 相机标定结果

Table 1 Camera calibration results

Calibration parameter	Left camera	Right camera
g_x	20.3687	20.3627
t_x	1970.5537	101.457
T_x	-104.3465	-196.16979
Calibration error	0.6428	1.4497

从表 1 可以看出，标定后的相机并不能完全拟合数据，存在一定误差，因此还需要对镜头畸变进行校正。把 X_{wi} 代入标定后的(5)式得到标定坐标。结合(13)式，用 LM 算法对 $\{k_1, k_2, u_0\}$ 求解，初始值分别为 $\{0, 0, 4096\}$ ，经过 2000 次的训练，误差曲

线如图 6 所示，其中纵坐标为经对数 ln 变换后的训练误差，横坐标为训练次数，获得校正结果如表 2 所示。

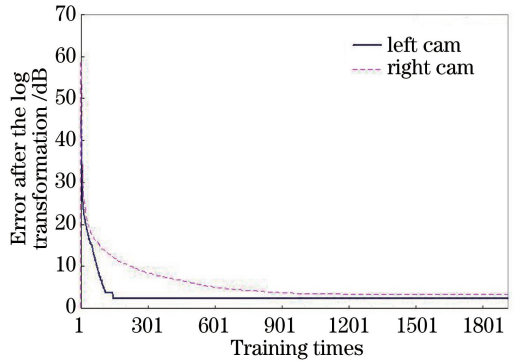


图 6 LM 训练曲线图

Fig. 6 LM training curves

表 2 相机校正结果

Table 2 Camera calibration results

Calibration parameter	Left camera	Right camera
k_1	-2.0786×10^{-10}	-4.2328×10^{-11}
k_2	2.9220×10^{-17}	1.5027×10^{-18}
u_0	5181.8	6302
Coordinate error after correction	0.1794	0.3985

对比表 1 和表 2 可以看出，通过畸变校正后，数据点误差明显改善，为下一步测量打下了基础。为验证该方法，对比了张氏标定法^[7]和所提方法。张氏法标定时采用了 3 幅标定图像，每幅图像选择 29 个特征点，其中一幅的特征点坐标如表 3 所示。因为线阵相机在 y 方向上与触发信号频率(本文采用了编码器)有关，只验证在 x 方向的标定误差，其结果如图 7 所示。

因为张氏标定法考虑了 2 个方向的坐标变换和畸变，在进行求解时， y 方向运动变化造成的特征点位置波动使标定误差出现较大变化，特别是在标定图像较少的情况下。所提标定方法根据线阵相机成像的特点，只考虑单向坐标变换和畸变，因此标定结果更稳定。

在以上算法的基础上，编写了涂布尺寸检测系统，并进行了现场测试。随机抽取 4 段 1 出 6 的涂布进行测量，共 28 个数据。其测量结果如表 4 所示。

表 4 中，每段实际值为线阵相机的实测值，从测量误差的均值可以看出，标定算法能够达到比较稳定的效果(最大误差为 0.0001 m 以内)，满足现场测量需求，现场应用情况如图 8 所示。

表3 特征点 u 方向坐标

Table 3 Characteristic point u -direction coordinates

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
X_w/mm	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$u/pixel$	10	242	474	706	938	1170	1403	1636	1868	2103	2337	2570	2804	3038	3272
Number	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
X_w/mm	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	
$u/pixel$	3507	3741	3977	4211	4447	4681	4917	5152	5388	5623	5859	6094	6330	6566	

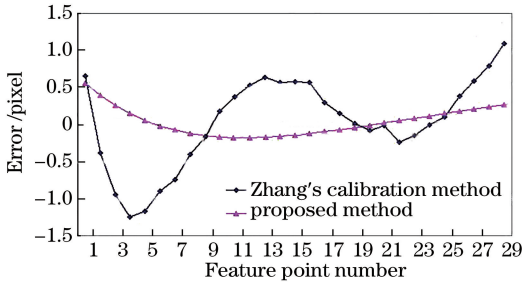


图7 标定误差对比曲线

Fig. 7 Contrast of calibration errors

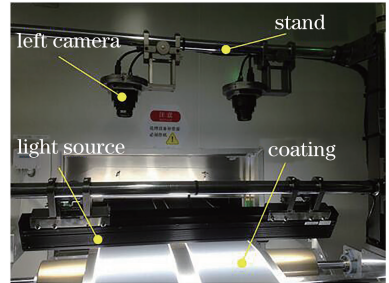


图8 现场应用情况

Fig. 8 Field applications

表4 现场测试数据

Table 4 Field test data

Section No.	Item	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	mm
1	Actual value	15.036	172.358	28.742	172.768	30.197	171.92	15.154	
	Measurement error	0.038	0.087	-0.078	0.001	-0.048	-0.068	0.019	
2	Actual value	15.088	172.317	28.799	172.727	30.241	171.88	15.115	
	Measurement error	0.035	0.072	-0.031	-0.059	-0.043	-0.028	0.009	
3	Actual value	15.017	172.427	28.672	172.832	30.148	171.98	15.1	
	Measurement error	0.057	0.018	-0.057	-0.063	0.001	-0.079	0.073	
4	Actual value	15.076	172.322	28.775	172.727	30.241	171.9	15.162	
	Measurement error	-0.002	-0.075	-0.061	-0.007	-0.043	-0.048	0.011	

4 结 论

锂电池极片作为锂电池的基础,其涂布质量影响锂电池性能。针对锂电池涂布宽度在线测量中的标定技术进行研究,建立了线阵相机的畸变模型。根据实际需求和线阵相机的本身特点,提出了单维度标定法,在原生产系统的基础上提出了基于线阵相机的视觉在线检测系统,从而克服了人工检测问题,显著提高了锂电池涂布的质量和合格率。实践结果证明了该方法的有效性和可靠性,满足实际生产需求。

参 考 文 献

[1] Lang F R. Development status and application research of lithium battery [J]. Statistics and Management, 2015(8): 92-93.
郎丰饶. 锂电池发展现状及应用研究[J]. 统计与管

理, 2015(8): 92-93.

[2] Schnell J, Reinhart G. Quality management for battery production: a quality gate concept [J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 568-573.
[3] Yang D J, Lou J A. Review of lithium ion battery and its online testing technologies [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(9): 1402-1403, 1419.
杨冬进, 娄建安. 锂离子电池及其在线检测前沿与发展综述 [J]. 电源技术, 2018, 42(9): 1402-1403, 1419.
[4] Yang J H, Liu W, Liu Y, et al. Calibration of binocular vision measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 300-308.
杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
[5] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, et al. Binocular camera calibration based on collinear vector and plane

- homography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1115006.
- 邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1115006.
- [6] Yang D S, Bi S S, Cai Y R, *et al.* Wide-area monocular plane measurement based on calibration on a parallel plane using multiple targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1015001.
杨东升, 毕树生, 蔡月日, 等. 基于平行面多靶标标定的单目大视场平面测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1015001.
- [7] Zhao M D, Zhang Z J, Cheng C Q, *et al.* A method for single image distortion correction using a straight line feature[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 60-66.
赵漫丹, 张振杰, 程传奇, 等. 利用直线特征进行单幅图像畸变校正方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(1): 60-66.
- [8] Draréni J, Roy S, Sturm P. Plane-based calibration for linear cameras [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 91(2): 146-156.
- [9] Wang Z C, Dai M, Li G, *et al.* Calibration and analysis of line-scan camera based on virtual stereo pattern[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 902-907.
王子辰, 戴明, 李刚, 等. 基于虚拟立体靶标的线阵相机标定与分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 902-907.
- [10] Xu C, Huang D Z, Yang T L, *et al.* Camera internal-parameters calibration of accuracy of analysis based on planar target [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 30(1): 41-46.
徐潺, 黄东兆, 杨天龙, 等. 基于平面靶标的相机内部参数标定精度分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(1): 41-46.
- [11] Zhou F Q, Cui Y, Gao H, *et al.* Line-based camera calibration with lens distortion correction from a single image[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(12): 1332-1343.
- [12] Tian X, Lei Z Y, Wang Z M. Linear CCD camera lens of distortion calibration method [J]. *Audio Engineering*, 2014, 38(4): 62-66.
田雪, 雷志勇, 王泽民. 线阵 CCD 相机镜头畸变标定方法[J]. *电声技术*, 2014, 38(4): 62-66.
- [13] Fang S P, Xia X H, Xiao Y, *et al.* Lens distortion calibration method for linear array cameras [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(1): 11-14.
方素平, 夏晓华, 肖燕, 等. 一种线阵相机镜头畸变的标定方法[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(1): 11-14.
- [14] Wang Z H, Guo L. Camera calibration research based on improved LM algorithm [J]. *Industrial Control Computer*, 2014, 27(10): 94-96.
王子豪, 郭玲. 基于改进 LM 算法的摄像机标定研究[J]. *工业控制计算机*, 2014, 27(10): 94-96.
- [15] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.