

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802119

# 基于虚拟双目视觉的高速摄像机自动标定系统\*

叶坚坚 刘向军

(福州大学 电气工程与自动化学院 福州 350116)

**摘要:** 虚拟双目视觉测试是基于一台高速摄像机和两面平面镜实现物体的三维重建,重点需解决传统双目视觉测试存在的同步性和成本高的问题。摄像机内外部参数的标定是测试精度的重要保证,为解决标定过程需要人工干预、处理过程繁琐等问题,基于虚拟双目视觉原理和张正友标定法,设计了高速摄像机参数自动标定系统,通过外部触发电路控制安装在云台支架上的标定板自动转动,实现不同角度标定板图像的自动拍摄,通过 OpenCV 计算机视觉库对图像进行自动处理,得到高速摄像机的内外部参数,最后验证了高速摄像机自动标定系统的准确性和实用性,为后续三维重建和动态三维测试提供了基础。

**关键词:** 高速摄像机;自动标定;内外部参数;虚拟双目视觉

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Automatic calibration system for high speed camera based on virtual binocular vision

Ye Jianjian Liu Xiangjun

(College of Electrical Engineering &amp; Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** The virtual binocular vision test is based on a high-speed camera and two planar mirrors to realize the 3D reconstruction of objects, and it solves the problems of synchronization and high cost in traditional binocular vision test. The internal and external parameters of camera calibration are an important guarantee of test precision. In order to solve the issue of human intervention and the complicated process during the calibration, a kind of automatic calibration system of high-speed camera parameter is designed based on the virtual binocular vision and Zhang's calibration method. The external trigger circuit is designed to control the automatic rotation of the calibration board mounted on the platform bracket so as to realize automatic image shooting of different angle calibration board. The internal and external parameters of the high speed camera are obtained through the automatic processing of images by the open source computer vision library. Finally, the accuracy and practicability of the automatic calibration system of high speed camera are verified, It could provide the basis for subsequent 3D reconstruction and dynamic 3D testing.

**Keywords:** high speed camera; automatic calibration; internal parameters and external parameters; virtual binocular vision

## 0 引言

双目视觉测试是基于视差原理,利用两台摄像机,从两个视点观察同一物体,由三角测量原理计算图像像素间的视差来获取物体的三维信息<sup>[1-2]</sup>。双目视觉测试应用广泛,文献[3]利用双目视觉系统对机械高速运动的异常动作进行检测,并利用立体视觉算法,对异常物体进行三维轨迹追踪;文献[4]将双目视觉技术应用到对运动目标的跟踪定位上,有利于机器人对运动目标的精确抓取。虚拟双目视觉

测试,即仅利用一台摄像机,从一个视点观察,经两面平面镜反射形成两个像点,避免了传统双目视觉测试中两台摄像机拍摄的一致性要求与高成本问题。在电气工程领域中,基于虚拟双目视觉原理,通过高速摄像机连续拍摄电动作机构运动过程的多幅图像,通过三维重建还原电器的三维真实动作过程,因此被应用于电器动态特性三维测试等实用场合<sup>[5-7]</sup>。

通过高速摄像机的标定得到内外部参数是实现三维测试的重要前提,也是三维测试精度的重要保证。高速摄像

收稿日期:2018-09-18

\* 基金项目:福州市科技项目“电器产品动态特性测试与性能评估”(2017-G-87)资助

机的标定是根据摄像机模型,确定摄像机的位置、属性参数和建立成像几何模型,从而求解得到内部参数  $K$  和外部参数  $R$ 、 $T$ 。目前,摄像机参数标定的方法有很多,张正友法是广泛应用于双目视觉领域的一种标定方法,利用由平面方格点组成的平面标定物在摄像机前任意摆放,通过对采集到的不同角度的多张标定板图像进行处理来确定摄像机的内外部参数,具有标定精度高的优点<sup>[8-9]</sup>。但在实际操作过程中存在标定板需要人工转动、图像处理过程人工干预多、处理过程繁琐等问题。针对这些问题,文献[10]通过控制鱼眼相机水平旋转和垂直旋转以自动采集不同视角的标定板图像,实现对鱼眼相机存在的畸变进行矫正同时标定得到相机的内、外部参数,但未涉及标定板图像自动处理以及相机参数的自动计算过程。文献[11]通过拍摄不同位置的标定板,利用 OpenCV 对图像进行自动处理,计算了摄像机的内部参数,没有涉及世界坐标系下的外部参数的标定,适用于单目测量时单相机的标定。

本文设计了基于虚拟双目视觉的高速摄像机自动标定系统,通过标定板图像的自动采集和处理,实现高速摄像机参数标定过程的去人工化,在保证精度的前提下减少人工干预带来的不确定性,简化标定过程,为后续三维测试奠定了基础。

## 1 系统设计

### 1.1 虚拟双目视觉原理

虚拟双目视觉原理是基于一台高速摄像机、两面成一定角度的平面镜,实现被测物体的三维重建。将被测物体  $P$  置于高速摄像机前方,两面平面镜置于被测物体后方,被测物体在两面平面镜成像,当摄像机对被测物体进行拍摄时,相当于两台摄像机(左、右虚拟摄像机)同时对被测物体进行拍摄,如图1所示。

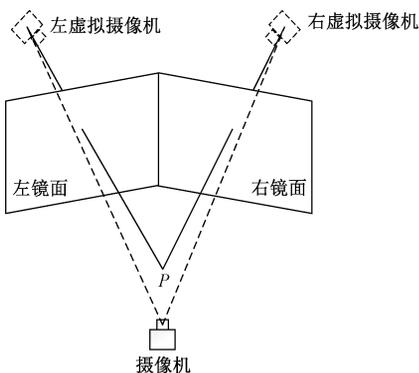


图1 虚拟双目视觉测试系统

对高速摄像机的参数标定实际上是对左虚拟摄像机和右虚拟摄像机内外部参数的标定,建立图像坐标与世界坐标系的联系,为后期的三维重建奠定基础。

### 1.2 系统组成

基于虚拟双目视觉原理的高速摄像机参数标定系统包

括了高速摄像机、平面镜成像系统、图像采集系统、单片机控制模块和图像处理系统等。标定系统如图2所示。

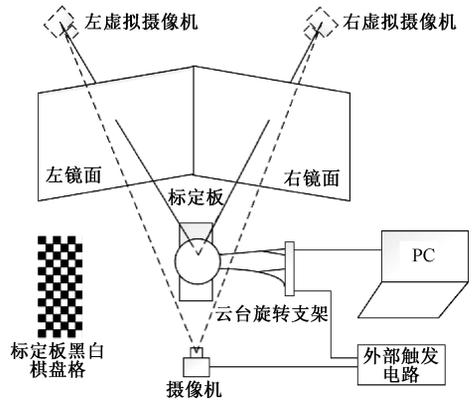


图2 标定系统

#### 1) 高速摄像机

采用 pco.1200S 型号的高速摄像机,其分辨率为  $1\,280 \times 1\,024$ ,最高成像记录速度达到  $820\text{ MB/s}$ ,系统采用  $130$  万像素 CMOS,保证了图像的清晰度和低噪音。高速摄像机通过 IEEE1394 或千兆网线与计算机相连来观察记录数据,并支持软件外部触发。

#### 2) 平面镜成像系统

平面镜成像系统由两面呈一定角度的平面镜组成,通过调节两面平面镜的角度,使被测物体在平面镜中能够清晰成像并位于同一水平线上,以保证左虚拟摄像机和右虚拟摄像机拍摄的一致性。

#### 3) 图像采集系统

图像采集系统由高速摄像机、平面镜成像系统、标定板、云台旋转支架、单片机控制模块、数据传输线、PC 等组成。标定板由一定数量的黑白棋盘格组成,将标定板固定在云台旋转支架上。云台每转动某一个角度,高速摄像机拍摄一张图片。

#### 4) 单片机控制模块

单片机控制模块包括了电源模块、云台旋转支架控制模块、通信模块等。单片机控制云台旋转和高速摄像机工作,云台带动标定板转动,高速摄像机对标定板进行拍摄。

采用 PIC16F877 A 单片机实现电路的控制功能,整体控制框图如图3所示。

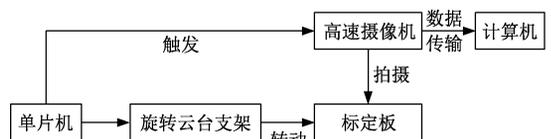


图3 控制框图

高速摄像机触发模块如图4所示。单片机通过控制光耦 PC817 给高速摄像机一个触发信号,从而控制高速摄像机拍摄。

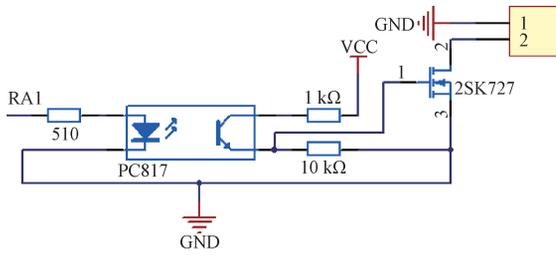


图 4 高速摄像机触发模块

云台通信模块如图 5 所示。单片机通过 485 模块输出信号使云台支架转动,云台带动标定板转动。

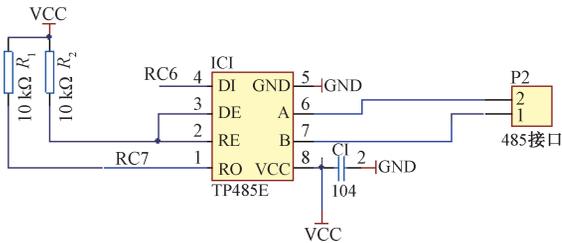


图 5 云台通信模块

5) 图像处理系统

图像处理系统利用 OpenCV 计算机视觉库中的函数,在 Visual Studio 编程环境中对采集到的图片进行标定处理,编程计算得到高速摄像机的内外部参数。标定系统实物如图 6 所示。

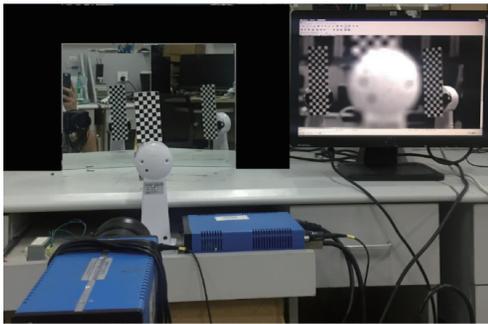


图 6 标定系统实物

2 标定板图像的自动采集

一般地,只需采集 3 张标定板图像便可进行摄像机参数的标定,但为了提高精度,通常需要采集数十张图像,因而在图像采集的过程中需要使标定板转动不同角度,拍摄多张不同角度下的标定板图像。为了确定图像平面与世界坐标系之间的关系,还应拍摄一张处于世界坐标系下的图像,采集过程如下。

先将两面呈一定角度的平面镜放置在标定板后方,摄像机放置在标定板前方,标定板固定在云台旋转支架上,摄

像机光轴、标定板、平面镜的中线应保持一条水平线上,同时保证左右两个镜面的图像能够清晰,使标定板转动时仍能在镜面中完整成像。

拍摄时,先将标定板竖直放置,拍摄一张图像作为世界坐标系,如图 7 所示。

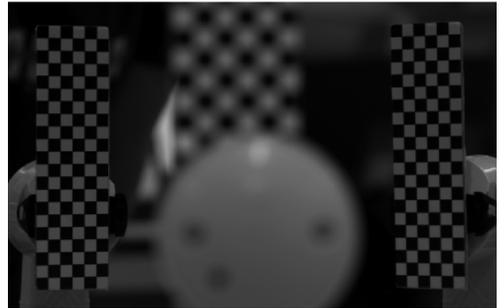


图 7 世界坐标系图像

然后通过计算机控制外部触发电路使云台旋转支架自动转动不同角度,并通过外部触发电路控制摄像机对标定板在平面镜中的虚像进行拍摄,图 8 所示为转动某个角度拍得的标定板图像。

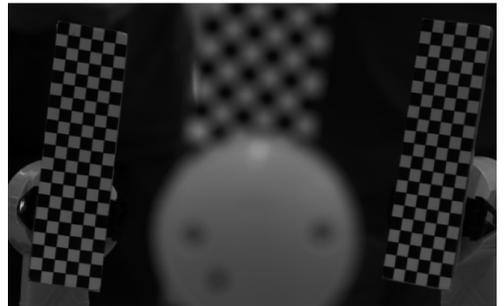


图 8 转动某角度标定板图像

在摄像机的拍摄过程中,PC 鼠标光标会实时显示当前坐标点的位置,通过定义一个坐标范围,记录下标定板转动过程中标定板的坐标范围变化,将拍摄到的所有图像统一存储在图像处理的文件夹内。

3 基于 OpenCV 的标定板图像自动处理

3.1 高速摄像机的参数

令图像平面某点的二维坐标为  $m = [u \ v]^T$ , 三维坐标表示为  $M = [x_w \ y_w \ z_w]^T$ , 根据张正友标定法,世界坐标系的三维点投影到成像坐标系中的二维点的公式为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \ T] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s$  为任意非零尺度因子; $K$  为摄像机的内部参数,只与摄像机内部结构有关,其值定义为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $f_x$  和  $f_y$  为高速摄像机焦距在水平和垂直两个方向上的分量;  $u_0$  和  $v_0$  为图像中心坐标;  $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$  为摄像机的外部参数, 由摄像机相对世界坐标系的方位决定, 其中  $\mathbf{R}$  为旋转矩阵, 由  $3 \times 3$  的矩阵组成;  $\mathbf{T}$  为平移向量, 由  $3 \times 1$  的列向量组成。

在针孔模型<sup>[12]</sup>下, 式(1)可以等价变换为:

$$\begin{cases} u = f_x x' + u_0 \\ v = f_y y' + v_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $x', y'$  为归一化的结果。

由于针孔模型只是实际摄像机模型的一个近似, 而实际摄像机模型还存在各种镜头畸变和变形, 所以实际摄像机的成像要考虑含有镜头畸变的非线性成像模型<sup>[13-14]</sup>。镜头的畸变主要有由镜头形状缺陷造成的径向畸变和由光学系统的光学中心和几何中心不一致造成的离心畸变。径向畸变可表示为:

$$\begin{cases} x = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ y = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (4)$$

切向畸变可表示为:

$$\begin{cases} x = x' + [2p_1 y' + p_2(r^2 + 2x'^2)] \\ y = y' + [2p_1(r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x'] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $(x', y')$  为成像点在归一化成像平面上无畸变的理想坐标;  $(x, y)$  为在归一化成像平面上的实际坐标;  $r^2 = x'^2 + y'^2$ 。由式(4)和(5)可知, 畸变参数是一个  $1 \times 5$  的行向量  $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ 。由于实际摄像机存在着径向畸变和轻微的切向畸变, 所以式(3)需要拓展为:

$$\begin{cases} u = f_x x'' + u_0 \\ v = f_y y'' + v_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2(r^2 + 2x'^2) \\ y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{cases} \quad (7)$$

### 3.2 基于 OpenCV 的图像处理与参数计算

为了使标定的结果能够体现高速摄像机实际状态, 文中考虑畸变量对高速摄像机成像的影响。因此, 标定图像的处理过程也就是内部参数矩阵  $\mathbf{K}$ 、畸变参数  $\mathbf{D}(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$  以及旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 、平移向量  $\mathbf{T}$  的求解过程。OpenCV 是一个基于开源发行的跨平台计算机视觉库, 具有图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法。文中通过 OpenCV 中的函数对图像进行标定处理。将摄像机拍摄得到的平面镜中标定板的左、右虚像视为左、右虚拟摄像机的拍摄图像, 通过对转动不同角度获得的多张标定板图像进行处理和计算, 得到摄像机的内部参数和畸变参数; 通过对

世界坐标系下的图像进行处理, 得到摄像机的外部参数。图像处理过程的整体流程如图 9 所示。

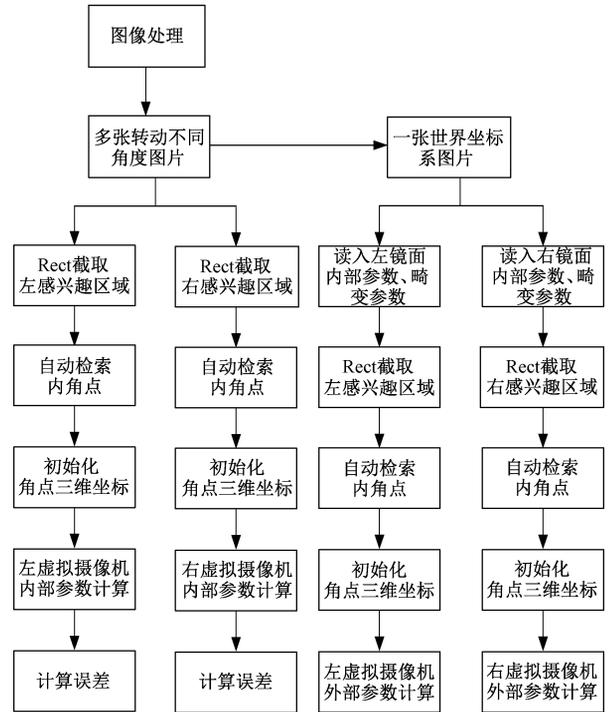


图9 图像处理总流程

在图像处理过程中, 为避免检测标定板的黑白棋盘角点时左右两个镜面图像相互影响, 对两个图像分别处理, 以左镜面图像为例说明图像处理过程。

依次读入多张转动标定板的图像, 初始化标定板的角点数量和图像的尺寸大小, 通过 Rect 命令设定矩形的左上角坐标和矩形的长宽, 截取感兴趣区域 ROI, 即对左镜面图像的部分单独处理<sup>[15-16]</sup>。

由式(1)可知, 要求得摄像机的参数, 必须获取二维图像坐标  $m$  和三维空间坐标  $M$  的数值。图像坐标  $m$  可由棋盘图的角点检测获取得到。由于角点检测时棋盘图像必须为灰度图像, 因而通过 cvtcolor() 函数对 ROI 图像进行灰度化处理, 实现 RGB 颜色向灰度图像的转换, 设置每张灰度图像中棋盘格内角点的数量, 利用 findChessboardCorners 函数自动检索标定板内角点的图像坐标, 按从下往上, 从左至右的顺序一一排列。为了使提取到的角点坐标更加精确, 利用 find4QuadCornerSubpix 函数精确提取亚像素角点, 记录下精确提取的角点坐标信息, 并利用 drawChessboardCorners 函数将内角点依序标识于图像中, 如图 10 所示。

令摄像机坐标系的  $xy$  平面位于标定板平面位置, 即摄像机坐标系的  $z$  轴为 0, 初始化三维空间坐标  $M$ 。以标定板左上角第一个角点为原点, 按照标定板每个方格的大小按从下往上, 从左至右的顺序依次初始化三维空间点的坐标。标定板的图像角点坐标与其空间三维坐标的转换关

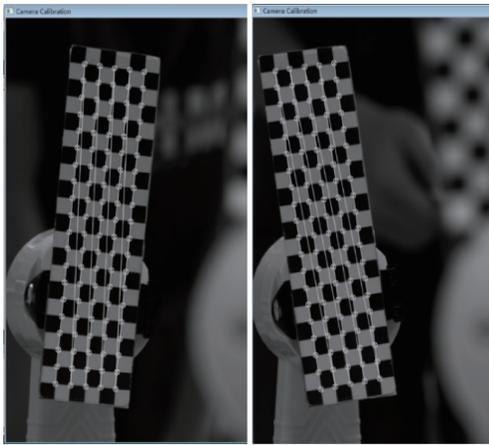


图 10 标定板角点信息获取

系就是通过摄像机的参数实现的。由于内部参数只与摄像机内部结构有关,而不随标定板的转动而发生变化,在考虑畸变参数的模型下,根据式(6)提取每一张标定板图像中每一个内角点的图像坐标和世界坐标系下的空间三维坐标,使用 calibrateCamera 函数求解高速摄像机的内部参数和畸变参数。

在获取左虚拟摄像机内部参数和畸变参数的基础上,即可根据式(1),对拍摄到的处于世界坐标系下的标定板图像单独处理得到摄像机的外部参数。同样地,截取左感兴趣区域 ROI,获取图像棋盘图内角点图像坐标和空间三维坐标,利用 cvFindExtrinsicCameraParams2 函数对图像进行处理,得到左虚拟摄像机在世界坐标系下的旋转向量和平移矩阵。右镜面的图像处理和左镜面图像处理过程类似。

利用 OpenCV 实现对拍摄图像自动处理,通过编程实现对摄像机内外部参数的计算,得到的参数存储在图像处理的文件夹内方便读取。某次标定得到的左虚拟摄像机和右虚拟摄像机内部参数  $K$ 、畸变参数  $D$  和外部参数  $R$ 、 $T$  如下所示:

$$K_{left} = \begin{bmatrix} 4156.03 & 0 & 633.08 \\ 0 & 4196.84 & 176.11 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{left} = [1.0971 \quad -3.1192 \quad -0.0059 \quad -0.0071 \quad 0.000]$$

$$R_{left} = \begin{bmatrix} -0.00746 & 0.818 & -0.574 \\ -0.997 & 0.0345 & 0.0621 \\ 0.0707 & 0.573 & 0.816 \end{bmatrix}$$

$$T_{left} = \begin{bmatrix} -128.80 \\ 142.04 \\ 1212.91 \end{bmatrix}$$

$$K_{right} = \begin{bmatrix} 4216.12 & 0 & 649.13 \\ 0 & 4313.75 & 208.25 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{right} = [1.0875 \quad -3.4993 \quad -0.0015 \quad -0.0012 \quad 0.000]$$

$$R_{right} = \begin{bmatrix} 0.0174 & 0.827 & 0.561 \\ -0.998 & -0.0142 & 0.0520 \\ 0.0510 & -0.562 & 0.825 \end{bmatrix}$$

$$T_{right} = \begin{bmatrix} 116.18 \\ 133.16 \\ 1264.37 \end{bmatrix}$$

#### 4 实验验证

为了验证标定系统的准确性,对尺寸已知的小型继电器进行三维测试,图 11 所示为继电器在平面镜中的成像。根据上述基于 OpenCV 的标定方法得到的摄像机参数,在此基础上分别对继电器 6 个顶点进行三维重建,并计算各边边长,和实际边长进行对比,结果如表 1 所示。

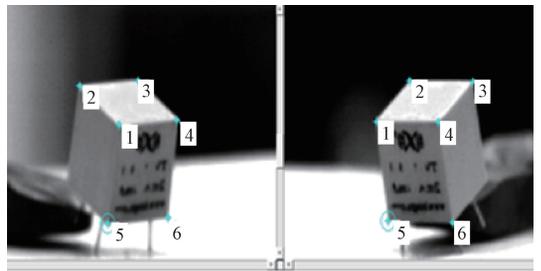


图 11 继电器在平面镜中的成像

表 1 结果对比

线段	实际长度/mm	重建长度/mm	相对误差/%
1~2	15.02	14.913	0.57
2~3	10.00	10.091	0.91
3~4	15.02	14.883	0.77
4~1	10.00	10.069	0.69
5~6	10.00	10.013	0.13
5~1	15.02	15.391	2.60
4~6	15.02	15.479	3.19

从表 1 结果可以看出,重建得到的各边长相对误差最小为 0.13%,最大为 3.19%,能够保证一定的测试精度,表明了基于虚拟双目视觉的高速摄像机自动标定系统的准确性。

#### 5 结 论

基于虚拟双目视觉原理,设计了高速摄像机参数标定的一体化系统,实现了标定各过程的自动化处理。搭建标定系统,通过单片机控制云台支架使标定板自动转动,并触发高速摄像机拍摄,减少了人工干预带来的不确定性;利用 OpenCV 函数库对图像进行处理,减少了传统手动标定中人工寻找角点的繁琐过程,大大加快了图像处理的速度。经验证,该系统具有可行性且能保证一定的精度,自动处理流程也为后续三维重建提供了极大的便利。

## 参考文献

- [1] 韩云生. 基于双目立体视觉的移动机器人目标定位[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [2] 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.
- [3] 王耀东, 余祖俊, 石井抱. 高速立体视觉与机械运动异常动作三维检测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2161-2169.
- [4] 李鹏飞, 田瑜, 张蕾, 等. 双目视觉运动目标跟踪定位系统的设计[J]. 测控技术, 2018, 37(4): 72-77.
- [5] 林碧华, 张开淋, 刘向军. 基于虚拟双目视觉的电器电弧弧根三维运动特性的研究方法[J]. 电器与能效管理技术, 2017(23): 1-5, 22.
- [6] 邱才元, 许雄, 刘向军. 中压断路器触头系统的三维动态测试[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 33-38.
- [7] 陈德为, 庄煜祺, 张培铭, 等. 基于单目视觉技术的智能交流接触器三维动态测试与分析技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1931-1937.
- [8] 徐芳, 刘晶红, 王宣. 基于标定的 CCD 图像畸变校正方法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 633-640.
- [9] 胡小平, 谢珂, 彭涛. 一种新的双目固定式机器人三维视觉定位方法[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 10-15.
- [10] 许会, 洪峰, 张智福, 等. 一种鱼眼相机快速标定装置及标定方法[P]. 湖南: CN107610185A, 2018-01-19.
- [11] 王平, 薛开, 何波贤, 等. 一种基于 OpenCV 摄像头标定的 3D 输入方法[P]. 黑龙江: CN103399652A, 2013-11-20.
- [12] 高如新, 朱烜甫. 基于 ORB 算法的双目视觉定位[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 142-145.
- [13] 徐嵩, 孙秀霞, 刘树光, 等. 摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 231-242.
- [14] 涂波, 刘璐, 刘一会, 等. 一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法[J]. 动化学报, 2014, 40(4): 653-659.
- [15] KAEHLER A, BRADSKI G. Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library[M]. O'Reilly Media, Inc, 2016.
- [16] 毛星云. OpenCV3 编程入门[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

## 作者简介

叶坚坚, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电器智能测试技术。

E-mail: yjjfzu@163.com

刘向军(通信作者), 1970 年出生, 博士、副教授、硕士生导师, 主要研究方向为电器智能测试技术、电接触理论及材料应用。

E-mail: liuxj@fzu.edu.cn