

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2018.03.012

## 双目立体视觉分步标定及精度分析

曲 华, 吴朝娜

(天津工业大学 理学院, 天津 300387)

**摘 要:** 在双目立体视觉中, 为了解决传统标定时间长、自标定精度低的问题, 使用一种分步标定方法并从 Harris 角度对影响精度的因素进行了分析. 首先, 利用 OpenCV 通过张氏标定法计算出内部参数和畸变参数; 其次, 利用 Matlab 测算出了摄像机运动参数未知情况下的双目立体参数. 结果表明: 经计算得出总的图像残差均值为 0.158 5 像素, 时间为 200 s; 标定结果比自标定方法精度高, 同时比传统标定方法时间短. 实验结果不仅达到了预期目的, 而且从 Harris 角度分析发现, 光照、标定靶的旋转程度对精度影响很大, 同时摄像机的分辨率越高, 对图片的拍摄条件要求越高. 该方法为机器视觉中的三维测量和重建等工作奠定了良好的基础.

**关键词:** 双目立体视觉; 分步标定; OpenCV; Matlab; 精度分析

**中图分类号:** TP242.62

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-024X(2018)03-0067-05

### Step calibration and accuracy analysis of binocular stereo vision

QU Hua, WU Zhao-na

(School of Science, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In the binocular stereo vision, in order to solve the problem of long time based on traditional calibration and low accuracy based on self-calibration, a step calibration method is used and the factors that influence calibration accuracy are analyzed from Harris's perspective. Firstly, the internal parameters and distortion parameters were calculated by Zhang Z.Y plane calibration method based on OpenCV; secondly, the binocular stereo parameters of the camera with unknown parameters were measured based on Matlab. The results proved that the mean value of the image residual is 0.158 5 pixels and the time is 200 s. The calibration result is that the calibration accuracy is higher than that of self-calibration method and the time is shorter than that of the traditional calibration method. The experimental results not only achieve the intended purpose, but also found that the rotation of the calibration target has a great impact on the accuracy from the Harris's perspective analysis, while the higher the resolution of the camera, the higher the shooting conditions. The method provides a good foundation for the three-dimensional measurement and reconstruction of machine vision.

**Key words:** binocular stereo vision; step calibration; OpenCV; Matlab; accuracy analysis

机器视觉具有广泛的应用前景,也是近年来的研究热点. 摄像机标定是计算机视觉测量系统的基础,高精度的摄像机标定是精确测量物体方位的前提<sup>[1-4]</sup>. 在现实中,摄像机本身不是理想的线性模型,存在各种成像失真和误差,因此有必要在真实环境中研究摄像机的成像模型. 通常把获得摄像机位置及特征参数的过程称为摄像机标定. 摄像机参数包括摄像机内部参数和外部参数: 内部参数是摄像机成像的基本参数,描述空间三维坐标系中的点与图像中像素点的对

应关系. 包括实际焦距、主点(理想地应该是图像的中心)、透镜畸变(主要包括径向畸变和切向畸变)和其他系统误差参数;外部参数是描述摄像机相对于外部世界方向的参数,指空间三维坐标系中的点与摄像机坐标系中对应点的关系,具体指旋转矩阵和平移向量中所描述的参数<sup>[5]</sup>.

目前摄像机的标定方法很多,近年来也提出了许多针对各类摄像机的标定方法,比如文献[6]实现了对交通监控摄像机的标定,文献[7]研究了对水下摄像机

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11304223, 11104201)

通信作者: 曲 华(1967—),女,博士,副教授,主要从事生物医学工程方面的研究. E-mail: Quhua-930@163.com

外壳参数的标定,文献[8]完成了针对低分辨率传感器摄像机的标定,文献[9]实现了对多摄像机的标定等.但总体来说,一般可以分为 3 类:传统摄像机标定、摄像机自标定和主动视觉标定.传统摄像机标定方法需要有特定的定标参照物,然后通过理论计算,得到摄像机内部参数和外部参数.摄像机自标定方法,不需要特殊的定标参照物,它利用了摄像机本身参数之间的约束关系来得到标定结果.摄像机主动视觉标定一般用于摄像机在世界坐标系中运动参数已知的情况下,通常线性求解获得标定结果.

传统的摄像机标定方法适用范围广,标定精度高,但是标定过程复杂.自标定过程相对简单,但是精度低<sup>[10]</sup>.由于机器人是通过摄像机所获得的图像信息来识别物体的,因此基于主动视觉的标定方法更具有实用性.虽然主动视觉的标定方法优于以上 2 种方法,但是它不能用于摄像机运动参数未知情况下的标定.因此,本文采用了一种在传统标定和自标定之间的摄像机分步标定方法,其内部参数仍采用简单的标定方法获得一张正友棋盘格法<sup>[11]</sup>,对于外部参数的获得,使用了一种当摄像机平移和旋转时的标定方法.本分步标定法通过先计算单个摄像机的内参,再计算立体外参,不仅弥补了自标定精度低和传统标定过程复杂的不足,还解决了主动视觉标定无法解决的摄像机运动参数未知情况下的标定问题,与此同时,本文还从 Harris 角度<sup>[12]</sup>对影响标定精度的因素进行了分析.

## 1 基本原理

### 1.1 摄像机模型

摄像机标定模型如图 1 所示.针孔模型是一个简单而实用的摄像机模型,通常用它来处理基本的几何投影射线.根据针孔成像理论,摄像机由 4 个坐标系组成,它们分别是三维世界坐标系( $O_w X_w Y_w Z_w$ )、摄像机坐标系( $O_c X_c Y_c Z_c$ )、成像平面像素坐标系  $O_U V$  和成像平面物理坐标系  $O_i X Y$ .

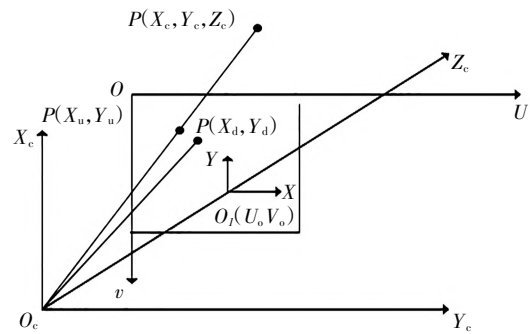
### 1.2 摄像机内参的标定

根据小孔成像摄像机模型,在图像上的点  $m = [U \ V]^T$  和三维空间中的点  $M = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T$  之间的投影关系如下:

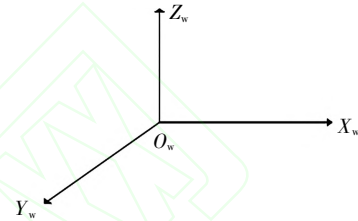
$$\tilde{sm} = A [R \quad t] \tilde{M} \quad (1)$$

式中:  $A$  为摄像机的内参;  $R$  为  $3 \times 3$  的旋转矩阵;  $t$  为  $3 \times 1$  的平移向量.

在三维空间坐标系中,定义 3D 平面  $Z = 0$ , 公式(1)可以写成以下形式:



(a) 针孔模型



(b) 三维世界坐标系

图 1 摄像机标定模型

Fig.1 Camera calibration model

$$[U \ V \ 1]^T = H [X_w \ Y_w \ 1]^T \quad (2)$$

公式(2)描述了空间三维平面到图像二维平面的映射关系.根据公式(2)得出,如果在三维平面和二维平面之间有 4 个相对应的点,那么能够得到这个单应性矩阵  $H$ :

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$$

$$\text{即 } [h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda A [r_1 \ r_2 \ t] \quad (3)$$

由于旋转向量是彼此正交的,从公式(3)可以看出,一幅图像可以提供跟摄像机参数相关的 2 个约束方程.因此,如果要求出摄像机中的 5 个内参,那就需要至少 3 幅图像( $N \geq 3$ ).定义矩阵  $B = A^{-T}A^{-1}$ ,就可以求出  $B$  的值,进而确定摄像机的参数.

### 1.3 透镜畸变的解决

考虑到透镜畸变,参考坐标系从理想投影平面转换为实际投影平面:

$$\begin{cases} X_d = (1 + k_1 \rho^2 + k_2 \rho^4) X_u + p_1 (3X_u^2 + Y_u^2) + 2p_2 X_u Y_u \\ Y_d = (1 + k_1 \rho^2 + k_2 \rho^4) Y_u + 2p_1 X_u Y_u + p_1 (X_u^2 + 3Y_u^2) \end{cases} \quad (4)$$

相机的镜头总是有一定的失真,这使得空间物体的成像不是理想的线性变换.有 2 个透镜畸变类型,即径向畸变和切向畸变.公式(4)表示了理想投影点和实像点之间的关系.其中  $k_1$  和  $k_2$  为径向畸变的系数,  $p_1$  和  $p_2$  为切向畸变的系数,同时  $\rho^2 = X_u^2 + Y_u^2$ .

### 1.4 在立体视觉下的摄像机标定模型

针对双目立体视觉系统的标定,确定 2 个摄像机

之间的相对位置. 首先分别标定其自身的内外参数, 按照内外参数分离法, 再通过它们之间的外部参数关系获得 2 个相机相对位置  $R$  和  $T$ , 标定方程为:

$$\begin{cases} R = R_r R_l^{-1} \\ T = T_r - RT_l \end{cases} \quad (5)$$

由此可见, 只要先标定 2 个摄像机, 就可以得到 2 个摄像机的相对位置关系  $R$  和  $T$ .

## 2 标定实验

本实验结合 OpenCV 库开发了一套摄像机内外参标定程序, 软件环境为 VS2010 开发平台及 OpenCV2.4.1 版本. 在 OpenCV 中, 主要使用 `cvLoadImage()` 读取图像、使用 `cvFindChessboardCorners()` 进行角点提取、使用 `cvFindCornerSubPix()` 对角点进行亚像素求精以及 `cvCalibrateCamera2()` 求取摄像机内外参, 摄像机采用的是工业摄像机, 图像最大分辨率为  $2592 \times 1944$ . 2 个摄像机之间的间距为 192.0 mm, 标定板采用  $5 \times 7$  棋盘, 其角点数为  $4 \times 6$ , 棋盘格边长为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 如图 2 所示.

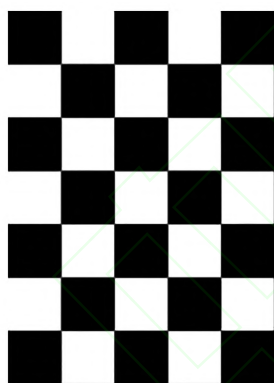


图 2 棋盘格

Fig.2 Chessboard

分步标定实验步骤: ①制作棋盘格; ②分别使用左右摄像机对标定板从 8 个不同角度拍照; ③在 VS2010 开发平台上使用 OpenCV 分别计算出左右摄像机的内参; ④左右摄像机同时对标定板从 5 个不同角度拍照, 左右摄像机各拍出 5 张; ⑤利用 Matlab 计算出双目立体参数.

## 3 实验结果及分析

### 3.1 左摄像机标定结果

实验中用左摄像机单独对标定板从不同的角度拍摄图片, 所拍得的图片如图 3 所示.

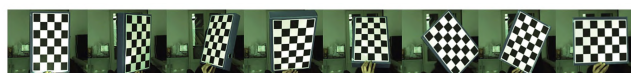


图 3 单独左摄像机拍摄图片

Fig.3 Separate pictures taken by the left camera

左摄像机内参标定结果如下:

左摄像机内参:

$$\begin{bmatrix} 5386.5, & 0, & 1149.27, \\ 0, & 5319.78, & 865.231, \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix}$$

左摄像机畸变系数:

$$[-0.135622, 1.19782, -0.000550347, -0.016772]$$

### 3.2 右摄像机标定结果

实验中用右摄像机单独对标定板从不同的角度拍摄图片, 所拍得的图片如图 4 所示.



图 4 单独右摄像机拍摄图片

Fig.4 Separate pictures taken by the right camera

右摄像机内参标定结果如下:

右摄像机内参:

$$\begin{bmatrix} 5360.6, & 0, & 1130.74, \\ 0, & 5321.47, & 886.885, \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix}$$

右摄像机畸变系数:

$$[0.00116469, -2672.67, -0.00415838, -0.010365]$$

### 3.3 双目摄像机立体参数标定结果

2 个摄像机同时对标定板从不同角度拍摄照片, 分别如图 5 和图 6 所示.



图 5 双目左摄像机拍摄图片

Fig.5 Binocular pictures from the left camera



图 6 双目右摄像机拍摄图片

Fig.6 Binocular pictures from the right camera

使用以上计算出的单个摄像机的内参, 通过 Matlab 得出 5 组外参, 求取这 5 组外参的平均值, 得出 2 个摄像机的相对位置关系  $R$  和  $T$ :

$$R = \begin{bmatrix} 0.9973 & -0.0346 & 0.0649 \\ 0.0317 & 0.9984 & 0.0461 \\ -0.0664 & -0.0439 & 0.9968 \end{bmatrix}$$



$$T = [-190.015 \ 1 \ -25.583 \ 6 \ 9.856 \ 6]$$

### 3.4 标定结果分析

通过以上数据可以得出,2 个摄像机的焦距  $f$  计算值为 11.8 mm,摄像机实际焦距(规格)为 12.0 mm,同时根据 2 个摄像机的立体参数得出其基线长度为 190.0 mm,而实测值为 192.0 mm,因此,这个标定结果是可信的,符合预期的结果。

本文采用的摄像机分步标定法是一种介于摄像机传统标定和自标定之间的一种标定方法. 摄像机传统标定精度高,但计算过程复杂,标定的传统方法主要有双平面法<sup>[13]</sup>、两步法<sup>[14]</sup>、非线性优化法<sup>[15]</sup>等,摄像机自标定灵活性强,但标定精度差,自标定方法主要有基于 Kruppa 方程的自标定方法<sup>[16]</sup>、分层逐步标定方法<sup>[17]</sup>和可变内参数自标定法<sup>[18]</sup>. 使用文献<sup>[19]</sup>提供的方法分别对传统标定、分步标定和自标定结果进行总的图像残差均值  $\bar{E}_d$  的计算,对标定精度进行比较,结果如表 1 所示.

表 1 图像残差均值和  $\bar{E}_d$

Tab.1  $\bar{E}_d$  and the mean value of image residuals

标定方法	双平面法 (传统)	两步法 (传统)	非线性优化 法(传统)	分步标定
X 方向的图像残差 均值/像素	0.120 2	0.123 5	0.126 5	0.122 1
Y 方向的图像残差 均值/像素	0.060 5	0.062 5	0.070 1	0.061 0
$\bar{E}_d$ / 像素	0.127 2	0.138 0	0.148 8	0.158 5
时间/s	230	243	240	200
标定方法	基于 Kruppa 方 程的自标定方法 (自标定)	分层逐步标定 方法(自标定)	可变内参数标定 方法(自标定)	
X 方向的图像残差 均值/像素	0.135 7	0.142 3	0.138 9	
Y 方向的图像残差 均值/像素	0.071 2	0.081 0	0.075 6	
$\bar{E}_d$ / 像素	0.175 0	0.186 0	0.163 0	
时间/s	182	187	193	

通过表 1 可以看出,使用传统标定方法得出的  $\bar{E}_d$  最大 0.148 8,而本文的分步标定法为 0.158 5,使用自标定方法得出的  $\bar{E}_d$  最小为 0.163 0. 同时从表 1 中易得出,自标定运行时间最短,而传统标定时间最长. 可见,本文分步标定法比自标定方法精度高,同时比传统标定方法时间短. 分步标定法不仅克服了自标定方法精度低和传统标定方法过程复杂的缺点,还解决了主动视觉标定中摄像机运动参数未知情况下的标定问题.

## 4 对摄像机标定精度的分析

通过实验得出以下影响摄像机标定精度的几个因素,并对此进行分析.

(1) 在标定实验中,提取角点用的是 OpenCV 中的 cvFindChessboardCorners() 函数,该函数用的是 Harris 算子,因此利用摄像机拍照时,尽量选择光照好的环境. Harris 算子在角点检测时,使用了微分算子对图像进行微分运算,而微分运算对图像密度的升降和对亮度的强弱不敏感(不改变 Harris 响应极值点出现的位置),但是,由于阈值的选择会影响角点检测的数量,导致角点不能检测完全,以致会影响摄像机标定的精度. 摄像机标定过程中必须让标定靶分别在 X、Y、Z 轴上进行一定的旋转(Harris 角点检测算子具有旋转不变性),这样求解摄像机内外参用到的矩阵才不会是病态的,才能准确计算出摄像机内外参.

(2) 实验发现,摄像机的分辨率越高(图片的尺寸越大),对图片的拍摄条件要求越高,检测角点的难度越大,这是因为 Harris 角点检测算子不具有尺度不变性(在同一个检测窗口可能会被检测成边缘或曲线,不易检测出角点或角点检测不完全).

## 5 结 论

本文在双目立体视觉和传统摄像机标定的基础上,提出了分步标定的方法,首先利用 OpenCV 平台,标定出单个摄像机的内外参,然后再利用 Matlab 平台,计算了摄像机运动参数未知情况下的立体参数,完成了摄像机的分步标定. 经计算得出总的图像残差均值为 0.158 5 像素,时间为 200 s. 标定结果比自标定方法精度高,同时比传统标定方法时间短. 实验结果不仅达到了预期目的,而且从 Harris 角度分析发现光照、标定靶的旋转程度对精度影响很大,同时摄像机的分辨率越高,对图片的拍摄条件要求越高. 本分步标定法不仅弥补了自标定精度低和传统标定过程复杂的不足,还解决了主动视觉标定无法解决的摄像机运动参数未知情况下的标定问题. 与此同时,本文还对影响标定精度的因素进行了分析. 摄像机标定作为机器视觉研究的第一步,同时也是最重要的一步,它为后续的三维测量和重建等工作奠定了良好的基础.

### 参考文献:

- [1] LI F, SEKKATI H, DEGLINT J, et al. Simultaneous projector-camera self-calibration for three-dimensional reconstruction and projection mapping [J]. IEEE Transactions on Com-

- putational Imaging, 2017, 3(1):74–83.
- [2] SUN J, HOSSAIN M M, XU C L, et al. A novel calibration method of focused light field camera for 3-D reconstruction of flame temperature[J]. Optics Communications, 2017, 390:7–15.
- [3] LUHMANN T, FRASER C, MAAS H G. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 37–46.
- [4] ALZAROK H, FLETCHER S, LONGSTAFF A P. A new strategy for improving vision based tracking accuracy based on utilization of camera calibration information[C]//Automation and Computing (ICAC), 2016 22nd International Conference on. Colchester, UK: IEEE, 2016:278–283.
- [5] 马颂德,张正友. 计算机视觉:计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- MA S D, ZHANG Z Y. Computer Vision–Calculation Theory and Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1998(in Chinese).
- [6] SOCHOR J, JURÁNEK R, HEROUT A. Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017, 161: 87–98.
- [7] TRAFFELET L, EPPENBERGER T, MILLANE A, et al. Target-based calibration of underwater camera housing parameters[C]//Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2016 IEEE International Symposium on. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2016:201–206.
- [8] GRATER J, STRAUSS T, LAUER M. Photometric laser scanner to camera calibration for low resolution sensors[C]//Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016: 1552–1557.
- [9] CORDOVA-ESPARZA D M, TERVEN J R, JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ H, et al. A multiple camera calibration and point cloud fusion tool for kinect V2[J]. Science of Computer Programming, 2017, 143: 1–8.
- [10] BOUDINE B, KRAMM S, EL AKKAD N, et al. A flexible technique based on fundamental matrix for camera self-calibration with variable intrinsic parameters from two views[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 39: 40–50.
- [11] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330–1334.
- [12] HARRIS C. A combined corner and edge detector [J]. Proc Alvey Vision Conf, 1988(3):147–151.
- [13] 田小超, 李忠科. 双平面法标定的双目视觉三维测量系统[J]. 电光与控制, 2015, 22(3):54–57.
- TIAN X C, LI Z K. Binocular vision three-dimensional measurement system calibrated by double plane method [J]. Electro-Optical and Control, 2015, 22(3):54–57(in Chinese).
- [14] SUSYANTO N, VELDHUIS R N J, SPREEUWERS L J, et al. Two-step calibration method for multi-algorithm score-based face recognition systems by minimizing discrimination loss[C]//International Conference on. Halmstad, Sweden: IEEE, 2016: 1–7.
- [15] WEI Z, CAO Z, ZHANG G. Nonlinear optimization method in camera calibration[C]//International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing: IEEE, 2009: (2)459–(2)461.
- [16] LAO W, CHENG Z, KAM A H, et al. Focal length self-calibration based on degenerated Kruppa's equations: Method and evaluation[C]//International Conference on Image Processing. Singapore: IEEE, 2004:3391–3394.
- [17] GUO Y, LI B Z. Blind image watermarking method based on linear canonical wavelet transform and QR decomposition[J]. I-et Image Processing, 2016, 10(10):773–786.
- [18] RUSSELL D, WEINREB S. Cryogenic self-calibrating noise parameter measurement system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60(5):1456–1467.
- [19] 刘国瑛, 薛月菊, 邹湘军, 等. 基于图像残差的摄像机标定精度比较[J]. 农机化研究, 2010, 32(10):118–121.
- LIU G Y, XUE Y J, ZOU X J, et al. Comparison of camera calibration accuracy based on image residual [J]. Research on Agricultural Mechanization, 2010, 32(10):118–121(in Chinese).

#### 本文引文格式:

曲华,吴朝娜. 双目立体视觉分步标定及精度分析[J]. 天津工业大学学报, 2018, 37(3):67–71.

QU H, WU Z N. Step calibration and accuracy analysis of binocular stereo vision[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2018, 37(3): 67–71(in Chinese).