

# 一种基于平面靶标的全自动标定方法

卜鹏辉 赵 宏 谷飞飞 马跃洋 李欢欢

(西安交通大学机械工程学院机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 摄像机的快速高精度标定一直是视觉测量中亟需解决的主要问题, 目前针对不同的摄像机成像模型有多种标定方法。提出了一种基于圆形标记点以及极径、极角的棋盘格角点排序算法, 实现了单目和多目摄像机的高精度全自动标定。通过实验验证了该算法对于不同位姿标定图像的有效性和稳健性, 实验结果表明改进后的标定方法既保证了摄像机的标定精度, 又提高了标定的自动化程度, 可以广泛应用于机器视觉中的单目和双目摄像机的标定。

**关键词** 测量; 立体视觉; 摄像机标定; 自动化; 棋盘格; 标记点

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1015004

## A Fully Automatic Camera Calibration Method Based on Planar Target

Bu Penghui Zhao Hong Gu Feifei Ma Yueyang Li Huanhuan

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** How to calibrate cameras rapidly and precisely is always a pressing problem in the visual measurement. Now there are many calibration methods for different camera imaging models. A sorting algorithm for chess-board nodes based on the round marker, polar radius and polar angle is proposed, so that realize fully automatic calibration for single and binocular camera high-precision automatic calibration. Experiments verify the effective and robust of the algorithm for different pose calibration images. Results show that the improved calibration ensures the calibration accuracy of the camera and improves the level of automation calibration, so it can be widely used in the calibration of single and binocular camera.

**Key words** measurement; stereo vision; camera calibration; automatic; chess-board pattern; marker point

**OCIS codes** 150.0155; 150.1488; 150.1135

## 1 引 言

基于计算机视觉的空间定位与测量技术在工业现场得到广泛的应用, 摄像机的标定是实现空间定位的基础, 也是影响测量精度的关键因素<sup>[1-2]</sup>。摄像机标定即确定摄像机内外参数的过程, 这些参数描述了空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对对应点之间的相互关系。

摄像机标定按照标定物可以分为基于零维靶

标<sup>[3-4]</sup>(摄像机自标定)、基于一维靶标<sup>[5-7]</sup>、基于二维靶标<sup>[8-10]</sup>以及基于三维靶标<sup>[11]</sup>的标定。其中Bouguet<sup>[8]</sup>的基于平面方格点的标定工具箱—Camera Calibration Toolbox, 靶标的制作简单, 摄像机和平面靶标均可以自由地移动, 不需要知道运动参数。但是, Bouguet的标定工具箱需要采用人机交互的方式, 即通过用鼠标按照一定的顺序点击最外围的4个角点给出角点坐标的范围, 然后通过

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-02-16

基金项目: 国家973计划(2011CB706800-G)、国家自然科学基金(50975228)

作者简介: 卜鹏辉(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事机器视觉和光电测量方面的研究。

E-mail: bph19891027@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 赵 宏(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测、实时在线测试、生物组织成像以及机器视觉等方面的研究。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

计算机进行角点的识别与定位,这种方法难以实现标定过程的自动化。以 Dousko 等<sup>[10]</sup>为代表的研究者基于传统方法提出了一些自动化的标定算法,减少了人工参与,提高了标定效率和应用的灵活性。但这些改进的标定方法主要针对单个摄像机的标定,提出的特征点无法实现唯一排序,导致了在进行两个或更多摄像机的立体标定时,左右摄像机角点的排序方式不一致,从而导致标定失效。

本文结合了 Bouguet<sup>[8]</sup>和 Dousko 等<sup>[10]</sup>标定方法的优点,提出了一种基于平面靶标的全自动化的标定方法。该标定方法在精确提取平面靶标特征点的基础上,根据靶标上标志点的位置建立靶标坐标系,根据靶标坐标系的方向对角点重新进行排序使不同视角的图像上角点的排序方式完全一致,从而实现多目摄像机的立体标定。通过实验对标定方法进行了验证,并对比了 Bouguet 标定工具箱、Dousko 标定方法和标定方法的标定精度,证明了标定方法的有效性。

## 2 基于极径、极角的特征点排序算法

仍采用传统的平面棋盘格作为标定板,平面棋盘格上设置圆形标志点,如图 1 所示。根据图像中封闭区域的圆度率即可定位圆形标志点,作为建立靶标坐标系的参考点。

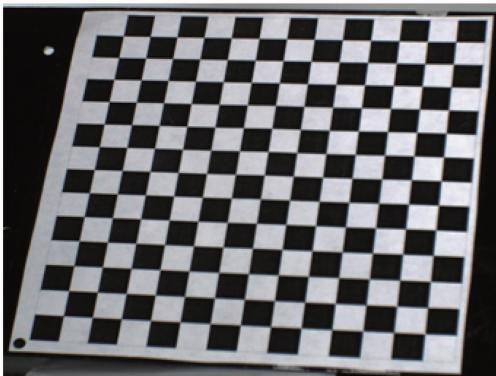


图 1 带有圆形标志点的棋盘格靶标

Fig. 1 Chess-board pattern target with round marker

### 2.1 提取角点坐标

采用 Harris 角点探测器<sup>[12]</sup>对整幅灰度图进行角点探测,得到精度为像素级的角点坐标,然后利用 Bouguet<sup>[8]</sup>提出的亚像素级角点提取算法对角点坐标进行重新定位得到亚像素级的角点坐标。由于对整幅图像都采用了 Harris 角点探测器来提取角点,场景中的一些角点也被当作特征点提取出来,应采用相应的算法剔除掉这些杂散点。

## 2.2 剔除杂散点并排序

### 2.2.1 确定两个主方向

求取所有角点坐标的中心  $M(x_m, y_m)$ , 点  $M(x_m, y_m)$  一般情况下比较靠近标定板的中心,将最靠近点  $M(x_m, y_m)$  的角点作为基准点  $A$ 。按照到基准点  $A$  的距离对基准点周围  $1/3$  图像大小的内的角点坐标进行排序,基准点与最近的角点构成直线  $l$ ,判断以直线  $l$  中点为 midpoint、长度为  $l$  一半的直线段两边灰度值的差值,若差值大于 3 倍图像灰度值的标准差,则认为是主方向(沿方格的某一条边)。若不是,则依次对基准点周围的其他 7 个点进行类似的操作。如果还不能确定主方向,将离基准点最近的角点作为基准点继续寻找靶标的主方向,直到确定了靶标平面方格点的两个主方向,如图 2 所示。

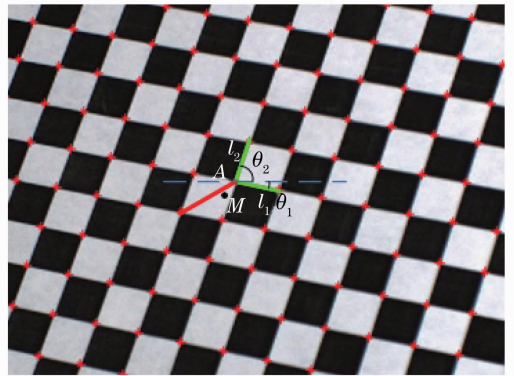


图 2 确定棋盘格的主方向

Fig. 2 Find principal direction of chess-board

### 2.2.2 剔除杂散点

将主方向与  $x$  轴夹角小的方向定义为行,与  $x$  轴夹角大的方向定义为列。由基准点、行的方向及线段  $l$  的长度,可以由下式计算出下一个角点坐标的估计值。

$$\begin{cases} x_n = x_b + l \cos \theta \\ y_n = y_b + l \sin \theta \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $(x_b, y_b)$  为基准点的坐标,  $(x_n, y_n)$  是下一个角点坐标的估计值,  $l$  是方格边直线段的长度(单位为像素),  $\theta$  是主方向与  $x$  轴的夹角。

由于图像存在畸变,直接利用上式计算出来的角点坐标一般会存在误差,需要在以上述估计值为中心的一定大小的区域内重新进行角点定位,得到准确的角点坐标。沿行方向进行角点提取的步骤如下:

- 1) 由基准点  $A$ 、主方向  $\theta_1$ 、方格长度  $l_1$ ,求得沿主方向基准点前后两个点的坐标估计值  $B$ 、 $C$ ;
- 2) 在以  $B$ 、 $C$  为中心,  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  大小的区

域内精确定位角点  $B'$ 、 $C'$ ；

3) 判断直线  $B'A$ 、 $A'C$  的夹角是否小于给定的阈值,若小于,则认为  $B'$ 、 $C'$  是方格角点;

4) 更新  $\theta_1$ 、 $l_1$ ,将新的角点作为下一次搜索的基准点继续进行搜索;沿同一方向搜索两次均没有角点,则认为沿此方向搜索完毕;

5) 重新以  $A$  为基准点,沿反方向进行搜索,重复步骤 1) ~ 4),完成沿某一行的搜索;

6) 由  $A$ 、 $\theta_2$ 、 $l_2$  计算出下一行基准点所在的位置,重复步骤 1) ~ 5),完成沿行方向的搜索;

7) 根据每一行与  $y$  轴的交点对行进行排序。

分别按行和列方向完成角点的搜索后,可将由 Harris 角点探测器提取的环境中的角点剔除掉,但在行或者列方向上仍可能存在无用的特征点。对按行方向提取出来的角点坐标,在按列方向提取的角点坐标中寻找其对应点,若存在对应点则认为是平面棋盘格的角点坐标,否则认为是杂散点剔除掉。通过上面两种方法可将图像中的杂散点剔除掉,只保留方格的角点坐标。

### 2.2.3 角点排序

按每一行所在的直线与  $y$  轴的交点对行进行排序,每一列所在的直线与  $x$  轴的交点对列进行排序。由角点所在的行和列对角点进行排序,如第一行、第一列  $P(1,1)$  为第一个角点;第一行、第二列  $P(1,2)$  为第二个角点,依次排序。

去掉靶标上边沿方格点的角点坐标,用剩余的角点坐标进行摄像机的标定。

## 3 靶标坐标系的建立

靶标坐标系是以离圆形标志点最近的角点为原点,顺时针方向为  $x$  轴的坐标系,要建立靶标坐标系首先要确定角点的顺时针方向。

### 3.1 建立参考坐标系

以方格角点坐标的中心点为坐标原点,中心点到圆形标志点中心方向为  $y$  轴建立参考坐标系,如图 3 所示。

$XOY$  是平移后的图像坐标系, $X'OY'$  是参考坐标系, $X''O''Y''$  是最终建立的靶标坐标系, $\theta$  是  $Y$  和  $Y'$  轴的夹角, $\theta$  可由下式得到

$$\theta = \arccos \left[ \frac{P_1 - P_2}{|P_1 - P_2|} \cdot (1, 0, 0) \right], \quad (3)$$

式中  $P_1$  是圆形标志点的中心坐标, $P_2$  是方格角点中心的坐标。

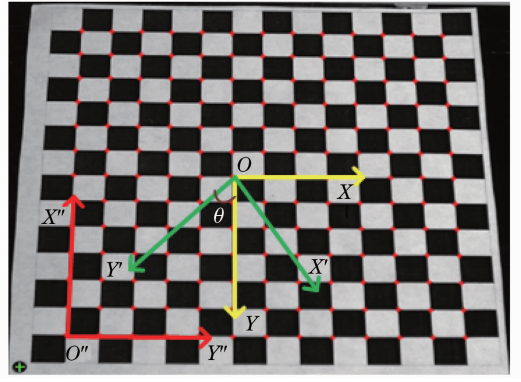


图 3 三个坐标系之间的关系

Fig. 3 Relationship of the three coordinate systems

### 3.2 建立靶标坐标系

确定离圆形标志点最近的角点所在的行和列,将对应行和列的中心角点的坐标按下式转化参考坐标系下

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $(x, y)$  是图像中离圆形标志点最近的角点所对应的行或者列的中心角点的坐标, $(x', y')$  对应参考坐标系下的坐标值, $\theta$  为参考坐标系和图像坐标系的夹角。

若中心点转化到参考坐标系下所对应的坐标的  $x'$  小于零,认为角点所对应的行或者列为靶标坐标系的  $x$  轴方向,另一个中心点所在的行或者列为靶标坐标系的  $y$  轴方向。建立靶标坐标系后就可以按坐标轴的方向以及角点所在的行和列对方格角点坐标重新排序,以保证左右摄像机的标定图像中角点的排序方式均一致,从而可以实现立体标定。

## 4 实验及结果

### 4.1 角点提取实验

本实验中摄像机采用的是德国 AVT 公司的 Guppy F-146C,摄像机的分辨率为  $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ ,像素单元尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ ,通过 1394 接口采集数据。为了验证角点提取算法的稳健性和定位精度,实验过程中在不同位姿拍摄了多幅标定图像进行实验。

对标定图像进行预处理以后,提取亚像素级角点坐标,剔除图像中的杂散点,然后根据参考坐标系建立靶标坐标系,并对特征点进行排序,通过使重投影误差最小<sup>[13-14]</sup>实现单个摄像机的标定。标定过程中,先不考虑镜头畸变求出摄像机参数的初始值,然后在摄像机参数的非线性优化过程中,根据摄像



机的非线性模型标定摄像机的畸变系数。图 4 给出了标定板处于不同位姿时角点提取的结果,实验结果表明靶标处于不同的位姿时均能够实现角点的定位,根据标志点的位置建立靶标坐标系,保证左右摄像机图像中用于摄像机标定的角点坐标一一匹配,从而实现立体标定,避免了 Dousko 标定方法的缺陷。

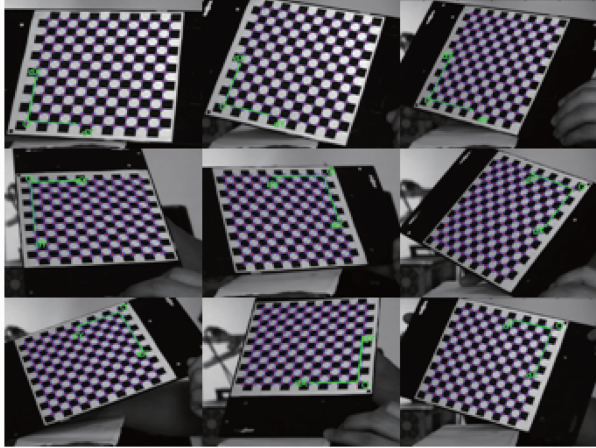


图 4 不同位置时的角点坐标提取

Fig. 4 Corner coordinate extraction under different poses

为了检验提出的角点提取算法的角点定位精度,将改进的标定方法提取的左右摄像机角点坐标与张正友的标定方法角点坐标进行对比。对不同位姿的标定图像进行角点提取实验,以张正友标定方法提取的角点坐标为参考,左摄像机的角点定位的差值在 0.1 pixel 以内,右相机的角点定位差值在 0.15 pixel 以内,说明改进后的算法能够准确的定位角点的坐标。图 5 给出了第 10 幅图像的角点提取误差。

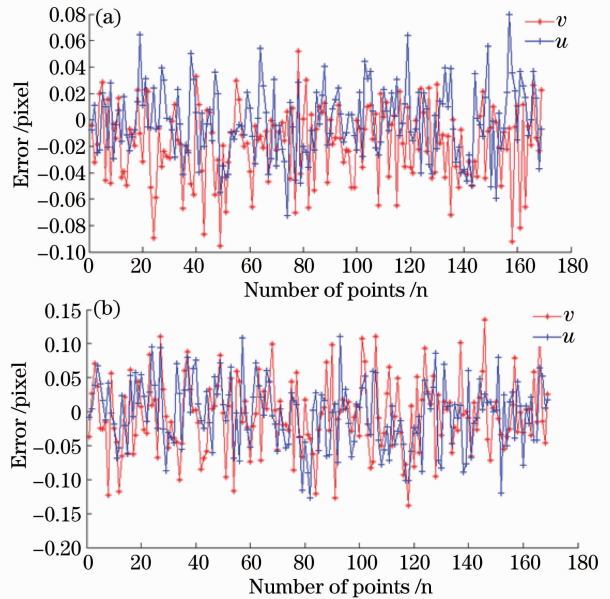


图 5  $u, v$  方向角点定位误差。(a)左摄像机  $u, v$  方向角点定位误差; (b)右摄像机  $u, v$  方向角点定位误差

Fig. 5 Location error of corner nodes in  $u$  and  $v$ . (a) Location error of corner nodes in  $u$  and  $v$  for left camera; (b) location error of corner nodes in  $u$  and  $v$  for right camera

#### 4.2 单个摄像机的标定

Bouguet 标定工具箱是基于平面棋盘格的经典的摄像机标定方法,广泛应用在视觉测量领域。V. Dousko 的 fauccal 标定工具箱是自动化程度较高的,基于消失点的新型摄像机标定方法。这里用 30 幅图像(1280 pixel $\times$ 960 pixel)进行摄像机的标定实验,对比改进后的标定方法、Bouguet 工具箱和 V. Dousko 的 fauccal 标定工具箱的标定精度(其中 9 幅图像如图 4 所示)。三种标定方法的标定结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

Parameter	Improved algorithm	Bouguet's toolbox	V. Dousko's toolbox
$c_x$ /pixel	3612.37 $\pm$ 11.82	3613.77 $\pm$ 11.78	3615.82 $\pm$ 15.81
$c_y$ /pixel	3635.76 $\pm$ 12.22	3637.06 $\pm$ 12.16	3631.61 $\pm$ 11.97
$x_0$ /pixel	635.47 $\pm$ 0.51	633.95 $\pm$ 0.48	634.01 $\pm$ 0.27
$y_0$ /pixel	476.52 $\pm$ 0.34	477.64 $\pm$ 0.15	473.13 $\pm$ 0.18
$k_1/10^{-3}$	-9.88 $\pm$ 0.13	-11.70 $\pm$ 0.27	-12.09 $\pm$ 0.16
$k_2$	-7.20 $\pm$ 0.24	-7.14 $\pm$ 0.10	-3.86 $\pm$ 0.41
$p_1/10^{-3}$	-5.34 $\pm$ 0.27	-5.40 $\pm$ 0.18	4.72 $\pm$ 0.15
$p_2/10^{-3}$	3.10 $\pm$ 0.16	3.06 $\pm$ 0.31	4.17 $\pm$ 0.25
$\sigma$	0.48	0.48	0.49

由表 1 中的标定结果可以看出,三种标定方法的标定出的摄像机的内参基本相同,焦距( $c_x, c_y$ )的

相对误差在 5 pixel 左右,摄像机主点定位的相对误差小于 4 pixel,径向畸变系数( $k_1, k_2$ )和切向畸变系

数( $p_1, p_2$ )基本一样,且前两种标定方法有相同的重投影误差。从上面的分析可知,改进后的摄像机标定方法可以达到 Bouguet 工具箱和 faucal 标定工具箱的标定精度。

## 5 结 论

在 Bouguet 工具箱和 Dousko 标定方法的基础上,提出了一种基于圆形标志点及极径极角的角点排序算法,实现了摄像机的自动化标定。该算法不需要人工参与,自动化程度高,克服了 Bouguet 标定工具箱需要人工提取标定图像外围的 4 个角点坐标的缺陷,同时实现了特征点的排序不随棋盘格摆放位置的不同而变化,可实现摄像机的立体标定。实验结果表明改进后的摄像机标定方法既保证了标定精度,又提高了标定的自动化程度,可以应用于机器视觉中的单目和双目摄像机的标定。

## 参 考 文 献

- 1 Gu Feifei, Zhao Hong, Bu Penghui, *et al.*. Analysis and correction of projection error of camera calibration ball [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1215001.  
谷飞飞, 赵宏, 卜鹏辉. 用于相机标定的球靶标投影误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1215001.
- 2 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512007.  
王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512007.
- 3 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming, *et al.*. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J].

*Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 465-472.

霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 465-472.

- 4 Q T Luong, O D Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(3): 261-289.
- 5 Yang Zhen, Sun Junhua, Wu Ziyang, *et al.*. A new camera calibration method based on two 1-D targets [J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2010, 21(3): 411-414.  
杨珍, 孙军华, 吴子彦. 基于单一维靶标的摄像机标定方法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(3): 411-414.
- 6 Z Zhang. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(7): 892-899.
- 7 L Wang, F Wu, Z Hu. Multi-camera calibration with one-dimensional object under general motions [C]. 11th IEEE International Conference on Computer Vision, 2007. 1-7.
- 8 J Y Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab [OL]. 2004. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).
- 9 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 10 V Douskos, I Kalisperakis, G Karras, *et al.*. Fully automatic camera calibration using regular planar patterns [J]. *Int Arch Photogram Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2008, 37(B5): 21-26.
- 11 J Heikkila, O Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997. 1106-1112.
- 12 R C Gonzalez, E Richard. Woods, *Digital Image Processing* [M]. New Jersey: Prentice Hall Press, 2002.
- 13 Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
张广军. *机器视觉*[M]: 北京: 科学出版社, 2005.
- 14 R Hartley, A Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

栏目编辑: 张浩佳