

高精度摄像机标定模板的设计及识别算法

梁力¹, 尹东斐², 王川²

(1. 西安交通大学软件学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对目前摄像机标定模板——黑白棋盘格识别精度低导致标定精度降低的问题, 提出了一种以渐变圆形为特征的摄像机标定模板以及相应的检测算法. 新的摄像机标定模板以渐变圆形作为图元代替以前的棋盘格交点, 从而可以使摄像机更精确地对其位置进行识别, 得到更精确的摄像机标定结果, 并保留了黑白棋盘格作为标定模板, 具有制作简易, 成本低廉的优势, 并且针对这种标定模板, 提出了精确的检测算法. 实验结果表明, 在相同的摄像机和相同的环境下, 新标定模板和检测算法标定的投影误差比黑白棋盘格的标定结果减少了 20%.

关键词: 摄像机标定; 标定模板; 检测算法

中图分类号: TN391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0082-04

Design and Detection Methods for Accurate Camera Calibration Targets

LIANG Li¹, YIN Dongfei², WANG Chuan²

(1. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new camera calibration target and its detection method are presented to improve the low accuracy of existing common checkerboard detection methods. The new calibration target uses gradient circle as its primitive element, and thus has easy to make, cheap and more accurate features compared with the checkerboard. It is easy and accurate to detect the new designed camera calibration target since the new calibration target contains more information than common checkerboard. A more accurate detection method is provided for the new calibration target. Experimental results and comparisons with the checkerboard show that the new target with the detection method reduces the projection error by 20%.

Keywords: camera calibration; calibration target; detection method

随着机器视觉技术在机器人技术中的广泛应用, 对摄像机的标定精度提出了更高的要求. 在众多的摄像机标定方法中, 基于平面模板的摄像机标定由于其标定模板制作简单, 精度也满足要求, 应用范围越来越广. 这种方法要求绘制一个具有精确定位点阵的模板, 然后使模板和摄像机做相互运动, 获得 3 个(或 3 个以上)不同方位的模板图像, 最后通过确定图像和模板上点的匹配, 计算出图像和模板之间的单应性矩阵, 并利用该单应性矩阵解出摄像机内的参数^[1-3].

通常使用黑白棋盘格作为标定模板, 由于其制

作简单, 标定精度较高, 符合办公、家庭使用的标定要求, 已经获得了广泛的应用, 但在机器人视觉应用中, 其标定精度略显不足. 因此, 本文设计了一种新的标定模板, 不仅继承了黑白棋盘格模板的各种优点, 而且提高了标定精度. 目前, 该方法已经被用于标定富士施乐公司生产线上机器人手臂的视觉系统, 并获得了精确的结果.

1 标定的基本原理

本文使用针孔摄像机模型, 也就是将一幅图通过透视变换将三维空间中的点投影到图像平面^[4].

标定的目的是为了得到摄像机的内参数. 设 $(X, Y, Z)^T$ 是一个点的世界坐标, $(u, v)^T$ 是点投影在图像平面的坐标, 以像素为单位, 则摄像机矩阵(或称内参数矩阵)为

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (c_x, c_y) 是基准点(通常在图像的中心); f_x, f_y 是以像素为单位的焦距. 透视投影变换等价于下面的形式($z \neq 0$)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= x/z \\ y' &= y/z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= f_x x' + c_x \\ v &= f_y y' + c_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为世界坐标系到摄像机坐标系的坐标变换(外参数); $\mathbf{t}$ 为平移变换. 真正的镜头通常有一些形变, 主要的形变为径向形变, 也会有轻微的切向形变^[5-7], 所以上面的模型可以扩展为

$$\left. \begin{aligned} x'' &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + 2p_1 x'y' + p_2(r_2 + 2x'^2)) \\ y'' &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + 2p_2 x'y' + p_1(r_2 + 2y'^2)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $r^2 = x'^2 + y'^2$; k_1, k_2 为径向形变系数; p_1, p_2 为切向形变系数. 式(4)可写为

$$\left. \begin{aligned} u &= f_x x'' + c_x \\ v &= f_y y'' + c_y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通常情况下, 因为镜头的形变而导致对标定模板的监测精度下降. 式(5)为镜头的形变模型, 忽略了高阶的形变. 本文讨论的算法就是用于更精确地检测镜头形变.

2 标定模板的设计

由于直线的信息含量较小, 容易受到镜头形变的干扰, 为了降低镜头形变对标定模板的影响, 即让标定模板含有更多的信息量, 圆形渐变的图形成为最佳选择, 如图 1 所示.

在相同镜头形变的情况下, 圆形的渐变由于面积小、像素集中, 因此受到镜头形变的影响小, 而且相对于黑白棋盘格只有边缘存在有用信息, 圆形渐变信息含量更高, 所以检测精度会得到提高. 对于圆形渐变图形的渐变系数, 通过使用不同灰度分布

的圆形渐变模板确定(如图 1 所示), 经过多次实验发现, 由于环境灯光的影响, 线性的渐变会被干扰, 变成非线性渐变, 使得分布如 $z=kr$ 的渐变圆形在经过环境影响后得到最优标定结果($z=kr$ 的分布在实际环境用摄像机捕获的图像分布近似于 $z=kr^2$). 在捕获到的图形中, 渐变圆形的灰度分布如图 2 所示. 由于 $z=kr$ 的线性渐变圆形精度高, 制作简单, 因此本文中实验都采用线性渐变模板, 实验采用的模板如图 3 所示.

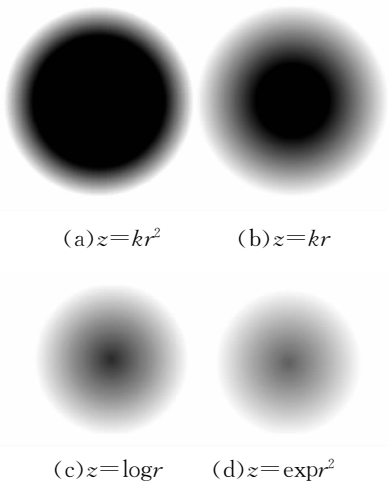


图 1 不同的渐变圆形的灰度分布

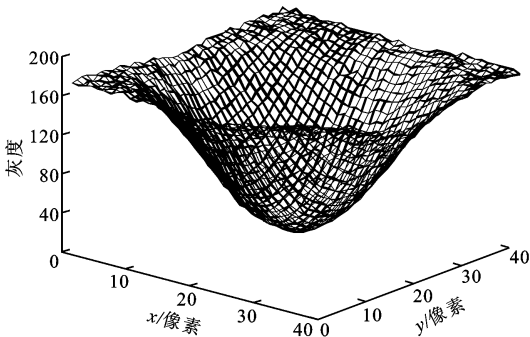


图 2 圆形渐变模板的灰度分布

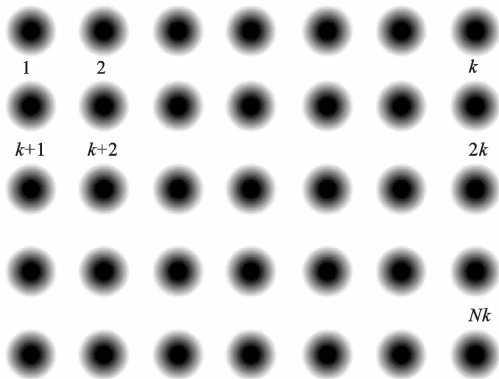


图 3 本文用于摄像机标定的模板

图 4 为对 3 种分布的圆形在理想状况下进行测试后的结果,从图中可以看出,分布为 kr 的圆形最容易受到角度的影响,而 $I(x,y)=x^2+y^2$ 的圆形较为稳定, $I(x,y)=\exp(x^2+y^2)$ 的圆形可检测范围最大,但是由于 $I(x,y)=\exp(x^2+y^2)$ 的圆形较 $I(x,y)=x^2+y^2$ 的圆形难以构造,所以本文采用 $I(x,y)=x^2+y^2$ 的圆形作为渐变圆形的灰度分布.实验还指出,分布为 $I(x,y)=(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}$ 的圆形通过打印机输出后,再通过摄像机捕获到的图像,其圆形的灰度分布为近似 $I(x,y)=x^2+y^2$.

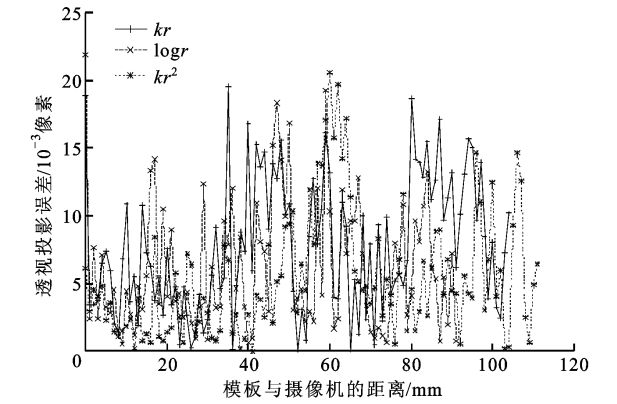


图 4 不同分布的渐变圆形模板绕 y 轴旋转的投影误差

3 渐变圆形检测算法

通过摄像机捕获到多幅有圆形渐变模板的图像后,用下面介绍的检测圆形渐变模板的方法,精确检测圆形渐变模板的位置,最后使用文献[8-10]介绍的算法,计算摄像头参数.

首先,对形变后的圆形渐变图形进行数学建模.由于在图像边缘处的镜头形变较大,因而圆形渐变图形被扭曲成椭圆,而从图 2 可以看出,图像的灰度分布从小到大以指数增加.一个形变后的渐变圆形可表示为

$$z = \exp(a(x-u)^2 + 2b(x-u)(y-v) + c(y-v)^2 + d) \tag{7}$$

式中: a,b,c,d,u,v 为椭圆参数; x,y 为图像中像素点的坐标; z 为图像在 (x,y) 处的灰度值.

对于检测到的轮廓集合 E ,设 V 为轮廓 E 围成的区域所包含点的集合,对 $(x,y) \in V$,以式(7)为函数曲面(指数位上是椭圆方程)进行拟合,其中 a,b,c,d,u,v 为待拟合的参数, (u,v) 为拟合后的中心.

将式(7)变形为

$$\log z = \mathbf{X}\mathbf{R} \tag{8}$$

式中: $\mathbf{R}=[a, c, b, -2(au+bv), -2(bu+cv),$

$$au^2+bu^2+cv^2+d]^T; \mathbf{X}=[x^2,y^2,xy,x,y,1].$$

将式(8)变形为

$$\mathbf{R} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \log z \tag{9}$$

式中: $\mathbf{X}^{-1}$ 为 $\mathbf{X}$ 的逆矩阵.

将 $v \in V$ 代入式(9),求得拟合参数 (u,v) 就是渐变椭圆的中心.实验表明,本文方法也能适应摄像机镜头的非线性渐变引起的误差,计算精度最高.图 5 为采用本文方法对图 2 进行拟合后的曲面.

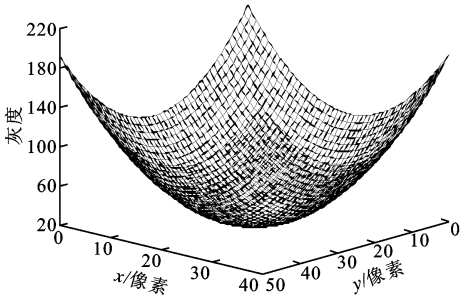


图 5 采用本文方法对图 2 进行拟合后的曲面

4 标定模板中渐变圆形的排序算法

由于在检测到图像中所有渐变圆形的中心后,失去了模板中渐变圆形的排列顺序,所以需要对渐变圆形的中心点进行排序,排序的规则是以模板最左上角的圆形为起点,最右下角的渐变圆形为终点,依次进行排序.排序算法的步骤如下:

- (1)先求得所有计算得到的渐变圆形的总数,如果总数不等于标定模板中实际渐变圆形的总数,则放弃本次获取的图像,重新获取图像进行检测;
- (2)计算所有渐变圆形中心点组成的点集的最小矩形包围盒,以确定模板矩形的方向;
- (3)沿 2 个方向对渐变圆形计数,以获取模板矩形的长边和短边,沿长边方向,以最左上角的渐变圆形为起点,对渐变圆形沿长边进行排序.

使用上述排序算法,排序得到的点集结果和棋盘格结果完全相同,直接进行下一步计算,无需修改算法.

5 实验结果及分析

OpenCV 为 Intel 开发的关于计算机视觉的 C 语言库,本文中的实验都是基于 OpenCV 而进行的.摄像头采用 Point Grey Research, Inc. 的 Flea 2 型摄像机. OpenCV 提供了基于棋盘格模板的摄像机标定方法,采用文献[10]的标定算法,本文比较了棋盘格和圆形渐变模板的标定精度,并比较

了在圆形渐变模板下,各种算法的精度.表 1 为对不同标定模板进行实验后取得的透视投影误差的数据.

表 1 棋盘格、圆形渐变、非渐变模板的投影误差比较

模板与摄像机 的距离/mm	平均透视投影误差/像素		
	棋盘格模板	圆形非渐变模板	圆形渐变模板
200	0.144 135	0.093 555	0.092 204
190	0.221 039	0.201 508	0.185 023
180	0.225 281	0.222 601	0.187 224
170	0.257 507	0.226 802	0.202 737
160	0.314 362	0.258 892	0.212 325
150	0.379 700	0.238 360	0.221 123
140	0.382 813	0.268 318	0.245 038
130	0.400 177	0.349 177	0.261 356
120	0.414 703	0.340 378	0.261 945
110	0.514 709	0.428 204	0.386 729

图 6 为 3 种标定模板的精度比较.从图 6 可以看出,圆形渐变模板比普通的棋盘格模板在标定精度上有所提高,平均情况下,误差减少 20%.圆形渐变模板所对应的曲面拟合算法的标定精度最高,但是其计算量大,计算速度慢.圆形非渐变模板所对应的多边形重心算法精度最低.

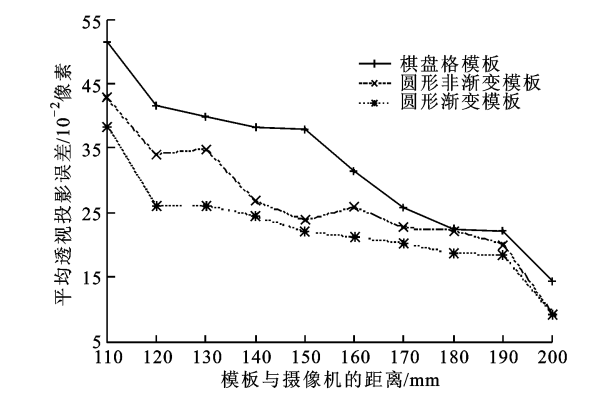


图 6 3 种标定模板的精度比较

本文在实现圆形渐变模板的检测算法后,和非渐变圆形模板的检测精度进行了对比,从图 6 中可以看出,采用渐变模板的投影误差较非渐变模板小.由于圆形渐变模板中加入了更多的位置信息,从而可以更好地测定标定模板的位置,可以使摄像机标定得到更好的结果.

参考文献:

[1] YU Minglang, WEI Zhenzhong, SUN Junhu. On-spot camera calibration method based on flexible planar target [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics

and Astronautics, 2009, 35(3):347-350.

[2] KIM W S, ANSAR A I, STEELE R D. Rover mast calibration, exact camera pointing, and camera handoff for visual target tracking [C]//Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2005: 384-391.

[3] CHEN Dazhi, WANG Ying, ZHANG Guangjun. A new sub-pixel detector for grid target points in camera calibration [C]//Proc SPIE Int Soc Opt Eng. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2006: 675-680.

[4] AHN S J, RAUH W, KIM S I I. Circular coded target for automation of optical 3D-measurement and camera calibration [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 15(6): 905-919.

[5] 王忠石 徐心和. 棋盘格模板角点的自动识别与定位 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4):618-622.

WANG Zhongshi, XU Xinhe. Auto-recognition and auto-location of the checkerboard pattern corners [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(4):618-622.

[6] 倪争技 张永康. 亚像素理论在图像边界处理中的应用研究[J]. 光学仪器, 2006, 28(3):46-51.

NI Zhengji, ZHANG Yongkang. Application of sub-pixel theory in improving image edge detection [J]. Optical Instruments, 2006, 28(3):46-51.

[7] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4):323-344.

[8] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1997: 1106-1112.

[9] ZHANG Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]//Proceedings of Seventh International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 666-673.

[10] STURM P F, MAYBANK S J. On plane-based camera calibration: a general algorithm, singularities, applications [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1999: 432-437.

(编辑 刘杨)