

相机标定关键设备对标定精度的影响分析

郑冬梅, 宋文爱

(中北大学软件学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 相机和标定板是相机标定过程中的关键设备, 针对二者对相机标定精度影响的问题, 进行了一系列分组对比标定实验。首先, 制作了棋盘格尺寸大小不等的 A2、A3、A4 3 块平面标定板, 选择不同类型的 4 款数码相机, 分组采集了 240 张棋盘格标定板图像; 然后, 依据相机针孔模型原理, 采用 MATLAB 相机标定工具进行了相机的标定实验。研究结果表明: 对于任一相机, 使用棋盘格尺寸大小不等的标定板, 相机的标定精度差别很大, 其中 A3 标定板对分辨率最小的 CCD 相机标定精度最优, 重投影横纵坐标误差的平均值均小于 0.1 像素。实验结果对计算机视觉研究中相机和标定板的选择具有参考价值。

关 键 词: 计算机视觉; 相机标定; 相机针孔模型; MATLAB 相机标定工具箱

中图分类号: TN 911.73; TP 391.4 **DOI:** 10.11996/JGj.2095-302X.2017020236

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2017)02-0236-05

Influence Analysis of Key Equipments for Camera Calibration Accuracy

ZHENG Dongmei, SONG Wenai

(Software School, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: This article introduces a group of experiments of grouping contrast calibration that intends to show how camera and calibration board, the two key equipments of camera calibration, impact the accuracy of camera calibration. In these experiments, first, we made three plane calibration boards, which were sized A2, A3, A4, respectively. Second, we chose four different types of digital camera and collected 240 pieces of checkerboard calibration plate images by using it. Last, according to the principal (or theory) of camera pinhole model, we conducted the camera calibration experiments by using the MATLAB camera calibration tool. The results of these experiments show that the camera calibration accuracy is very different while using different sizes of calibration board. From the results, we can see that the A3 calibration board is the best method for calibrating CCD camera which has the smallest resolution since the error of the average values were less than 0.1 pixel. The results of these experiments have important value for choosing camera and calibration board in computer vision research.

Keywords: computer vision; camera calibration; camera pinhole model; MATLAB camera calibration toolbox

相机标定是计算机视觉的第一步, 其重要性不言而喻。相机和标定板是标定过程中的关键设备,

对相机标定精度起着决定性的作用, 因此, 如何选择相机和标定板, 是计算机视觉系统首先需要解决

收稿日期: 2016-08-15; 定稿日期: 2016-10-24

基金项目: 山西省留学回国人员资助项目(2014-053)

第一作者: 郑冬梅(1967-), 女, 山西太原人, 讲师, 博士。主要研究方向为计算机视觉、图形图像处理。E-mail: dmzheng@163.com

的问题。目前,在标定技术研究和应用过程中,大多数研究者采用张正友平面标定法^[1],选择黑白棋盘格作为标定靶标。针对这种标定物,人们研究了影响标定精度的因子:标定图片数量、特征点的测量精度、棋盘格尺寸。文献[2-4]讨论了标定图片数量对标定精度的影响,指出相机标定过程中使用18~22张标定图片较为合适,可以使标定结果收敛。其中文献[2]讨论了标定板上特征点的测量精度对标定精度的影响,指出特征点的测量误差和图像中相对角点的提取误差与相机标定的误差成正相关性;文献[4]讨论了标定靶标中棋盘格尺寸对标定精度的影响,指出选择棋盘格尺寸较小的靶标,相机的标定误差较小。而对于标定的另一个关键设备——相机在标定过程中的影响因素,尚未见到相关的实验研究。

针对相机标定的关键设备,本文使用不同类型的CCD数码相机,再次分组拍摄了不同尺寸棋盘格标定板,对标定结果以重投影误差作为评价指标来评价,实验结论与上述文献不完全相同,可以为相机标定关键设备的选择提供参考。

1 相机标定的原理和方法

相机标定是指建立相机图像像素位置与现实世界场景点位置之间的关系,其途径是根据相机针孔模型,由已知特征点的图像坐标和世界坐标求解相机的模型参数。相机标定过程中,用到4个坐标系:

(1) 图像坐标系(o, u, v)。计算机内的图像由一系列排列有序的像素点组成,原点选择图像左上角顶点,水平向右是 u 轴,垂直向下是 v 轴,图像坐标(u, v)表示像素点在图像中的行列位置,单位是个数。

(2) 成像坐标系(o, x, y)。其是图像的物理坐标系。原点选择图像的中心点,水平向右为 y 轴,垂直向上为 x 轴,坐标(x, y)表示像点在图像中的物理位置,单位为mm。

(3) 相机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)。选择相机的光心作为原点,相机的光轴为 Z_c 、 X_c 和 Y_c 轴平行于成像坐标系的 x 和 y 轴。

(4) 世界坐标系(O_w, X_w, Y_w, Z_w)。世界坐标系主要用来描述相机的位置,可选择实际场景中的

任意点作为原点。4个坐标系的相互关系如图1所示。

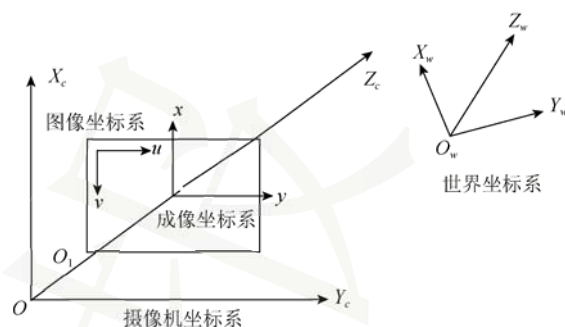


图1 4个坐标系

场景中物点 P 与相机拍摄图像中对应像点 P' 的关系通过坐标系的变换实现。物点 P 的世界坐标(X_w, Y_w, Z_w)和该物点的相机坐标(X_c, Y_c, Z_c)之间的转换可以通过相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 表示

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

相机坐标系中任一物点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 对应成像坐标系中像点 $P'(x, y)$,二者关系可由相机针孔成像模型的相似三角形表示

$$x = \frac{fX_c}{Z_c}, \quad y = \frac{fY_c}{Z_c} \quad (2)$$

其中, f 为相机的焦距。

成像坐标系中像点 $P'(x, y)$ 在图像坐标系中的坐标 $P'(u, v)$ 可表示

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & s & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, d_x, d_y 为单个像素在 x 和 y 方向的物理尺寸,单位为mm; s 为相机理想 y 轴与实际 y 轴的不垂直因子,也称扭曲系数; u_0, v_0 为成像坐标系原点在图像坐标系中的坐标。

根据式(1)~(3)得到针孔相机模型的数学表达式

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = HM \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{H}$ 矩阵中相机焦距 f 、图像主点坐标 u_0 和 v_0 、单个像素尺寸 d_x 和 d_y 均由相机内部结构决定，称为相机内部参数；而旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{T}$ 是由相机坐标系相对于世界坐标系位置决定的，称为外部参数。

由式(4)可知，如果已知多个物点的图像坐标和世界坐标，就可以求解出相机的内外参数，这就是相机的标定。

2 实验及结果分析

2.1 材料

(1) 标定板。使用 MATLAB 相机标定工具箱(camera calibration toolbox)自带的 9×7 黑白棋盘格图像，分别打印在 A2、A3、A4 图纸上，制作 3 块平面标定板，其中 A2、A3、A4 标定板棋盘格

尺寸分别为 58 mm×58 mm、40 mm×40 mm、28 mm×28 mm。3 块标定板实物如图 2 所示。

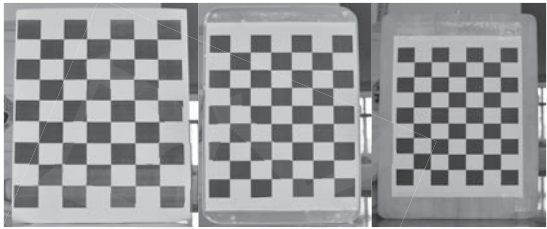


图 2 A2、A3、A4 标定板

(2) 相机。本文使用 4 款数码成像设备：单反数码相机 Nikon D610、便携式数码相机 Canon IXUS870IS、便携式数码相机 Canon IXUS1000HS 和华为手机 Mate7。相机参数见表 1。

表 1 4 款相机主要参数

相机型号	传感器类型	传感器尺寸(mm)	有效像素(万)	焦距(mm)	光圈	图像分辨率(pixel)
Nikon D610	CMOS	35.9×24.0	2 426	28–300	F3.5–F38	6016×4016
Canon IXUS1000HS	CMOS	1/2.3"	1 000	6.3–63	F3.4–F5.6	3648×2048
Canon IXUS870IS	CCD	1/2.3"	1 000	5.0–20.0	F2.8–F5.8	1600×1200
华为手机 Mate7	CMOS	1/3.06"	1 300	28	F2.0	2336×4160

2.2 图像采集

在光线均匀明亮的环境中，依次使用 3 款 CCD 数码相机，分别拍摄 A2、A3、A4 3 块标定板不同姿势的图像各 20 张。相机使用自动调焦拍摄，根据不同相机 CCD 的大小，采用相机的最佳分辨率，将标定板置于画面中央，占图像三分之一以上，共拍摄 240 张画面清晰的标定板图像。4 款相机拍摄图像格式均为.jpg 文件。

2.3 相机标定

本文使用 MATLAB 工具箱中相机标定工具(camera calibration toolbox)进行标定实验。将 240 张棋盘格图像分为 12 组，每组 20 张图像对应同一款相机和同一块标定板的 20 个不同姿势，12 组图像进行 12 次相机标定，每款相机分别使用 A2、A3、A4 的标定板图像进行 3 次标定。每次标定过程分为 5 个步骤。

预备。将一组 20 张标定板图像拷贝到 toolbox_calib 目录中，并重命名图像为 Image1~Image20。

步骤 1. 启动相机标定软件。在 MATLAB 环境

下运行标定程序 calib_gui.m，显示标定模式选择窗口界面如图 3 所示。



图 3 标定模式选择界面

点击“standard”控件，选择将一组 20 张标定图像全部装入内存，然后显示标定工具箱操作界面(图 4)。



图 4 标定工具箱操作界面

步骤 2. 指定每组图像的基本名和图像格式。点击“Image names”控件，输入一组图像的基本名

“Image”和图像格式“j”。

步骤 3. 提取角点。点击“Extract grid corners”控件，显示一幅标定图像的图形窗口，利用鼠标依次点击 4 个角点，设定棋盘格的选择区域，第一个位置为世界坐标系的原点。如图 5 所示，一幅图像提取 48 个角点。顺序完成 20 幅标定图像的角点提取。



图 5 角点提取界面

步骤 4. 参数标定。点击“Calibration”控件，完成相机内参数标定。即求出相机模型中 H 矩阵的各

参数，其中 s 的默认值为 0。

步骤 5. 误差分析。求出相机内参数后，点击“Project on image”控件，将 20 幅标定板所有角点反投影到各对应图像(图 6)，输出图像反投影角点和真实角点坐标误差的标准方差。

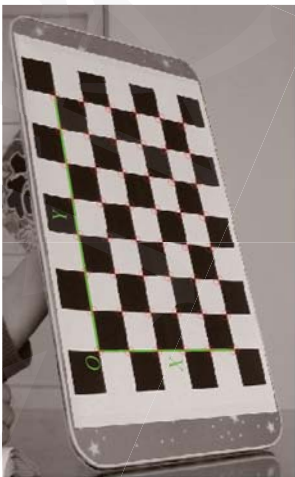


图 6 角点反投影界面

对 12 组标定图像，进行 12 次相机标定实验，同时求出每一次标定所有角点反投影的标准方差。4 款相机对应于 A2、A3、A4 标定板的 12 次标定结果误差见表 2。

表 2 相机标定误差

标定板	误差			
	Nikon D610	Canon IXUS1000HS	Canon IXUS870IS	华为手机 Mate7
A2(58 mm×58 mm)	1.945 4, 1.306 20	0.437 54, 1.440 73	0.279 58, 0.516 86	2.040 32, 1.298 38
A3(40 mm×40 mm)	0.333 6, 0.345 27	0.243 11, 0.222 54	0.095 98, 0.099 87	0.963 12, 0.903 46
A4(28 mm×28 mm)	0.349 5, 0.437 54	0.301 21, 0.330 86	0.124 04, 0.105 28	1.768 80, 1.161 10

2.4 结果分析

相机标定精度使用反投影误差方法评价。标定获得相机参数后，将标定板各角点的世界坐标，通过相机针孔模型计算出对应的图像坐标系中反投影坐标，然后计算投影结果和对应点坐标之间的距离。12 组标定误差如表 2 所示。

对于同一相机，使用棋盘格大小不同的标定板，相机的标定精度差异较大。对任一相机，A3 标定板的标定误差均小于 A2 和 A4 标定板，且误差递增顺序为 A3<A4<A2。将每一列(u, v)坐标误差值分别除以同一列 A3 的坐标数据，得出标定板 A2 和 A4 相对于 A3 的误差递增倍数见表 3。

表 3 标定板的误差递增倍数

标定板	误差			
	Nikon D610	Canon IXUS1000HS	Canon IXUS870IS	华为手机 Mate7
A2(58 mm×58 mm)	5.83, 3.78	1.80, 6.47	2.91, 5.18	2.12, 1.44
A3(40 mm×40 mm)	1.00, 1.00	1.00, 1.00	1.00, 1.00	1.00, 1.00
A4(28 mm×28 mm)	1.05, 1.27	1.24, 1.49	1.29, 1.05	1.84, 1.29

对于尺寸较小的标定板 A4 的物理测量误差相对变大,即式(4)中 X_w 、 Y_w 、 Z_w 的误差相对增大;而对于尺寸较大的标定板 A2,物理测量误差将导致式(4)中各角点的 X_w 、 Y_w 、 Z_w 的计算误差被放大,所以标定板 A3 实验误差最小。

对于同一标定板,不同相机的标定精度差异较大。对于任一标定板,Canon IXUS870IS 相机的标定误差均小于其他 3 款相机,且误差递增顺序为 Canon IXUS870IS<Canon IXUS1000HS<Nikon D610<华为手机 Mate7。将每一行(u , v)坐标误差值

分别除以同一行 Canon IXUS870IS 的坐标数据,得出其他 3 款相机相对于 Canon IXUS870IS 相机误差的递增倍数见表 4。

在相机的标定过程中,角点的精确提取至关重要,且和图像质量密切相关。从表 1 可以看出,Canon IXUS870IS 相机的感光元件是 CCD 传感器,其他 3 款相机是 CMOS 传感器。由于两类传感器的成像原理和制造技术不同,CCD 图像锐利度和清晰度明显优于 CMOS 图像,CMOS 图像非常容易出现杂点,导致角点提取的准确度下降,相机标定误差增大。

表 4 相机误差递增倍数

标定板	误差			
	Nikon D610	Canon IXUS1000HS	Canon IXUS870IS	华为手机 Mate7
A2(58 mm×58 mm)	6.96, 2.53	1.56, 2.79	1, 1	7.30, 2.51
A3(40 mm×40 mm)	3.48, 3.46	2.53, 2.23	1, 1	10.03, 9.05
A4(28 mm×28 mm)	2.82, 4.16	2.43, 3.14	1, 1	14.26, 11.03

3 结 论

相机标定是计算机视觉的关键步骤,视觉设备以及标定板的选择决定了标定精度,对整个计算机视觉系统的性能起着重要作用。

本文制作了特征点数相同(9 行×7 列)、棋盘格尺寸不同(A2、A3、A4)的 3 块标定板,分别使用 4 款数码成像设备,拍摄每一块标定板不同姿势的图像各 20 张,分组进行了相机标定对比实验。结果表明:

(1) 标定板中棋盘格尺寸的选择很重要,40 mm×40 mm 的标定板实验误差最小,所以并非黑白格尺寸越小,标定结果越好。

(2) 相机的成像质量对标定精度起决定性作用,画面清晰,信噪比低的 CCD 图像的标定误差

小于 CMOS 图像。

上述实验结果可以为计算机视觉系统研究和应用中成像设备和标定板的选择提供参考,得到高精度的测量和重建结果。

参 考 文 献

[1] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[2] 尹洪涛,刘成,李一兵,等. 相机标定误差因素分析[J]. 信息通信, 2012(1): 28-30.

[3] 袁铭,苏显渝,刘晓青. 影响摄像机标定精度的因素分析[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(4): 18-21.

[4] 支健辉,董新民,孔新炜,等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 286-291.