

文章编号: 1006 - 4729(2011)04 - 0373 - 05

立体视觉系统的参数标定的 Matlab 实现

边后琴, 谭 叶

(上海电力学院 计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要: 研究了基于平面板标定的摄像机标定方法, 详细介绍了摄像机成像原理, 分析了其内外参数, 阐述了平面模板标定方法的基本原理, 并用 MATLAB 编程语言实现了这一标定方法, 给出了实验过程和结果, 为实现标定方法的工程应用提供了依据. 软件可用于实际工程应用.

关键词: 摄像机标定; 角点提取; 立体视觉系统
中图分类号: TN948.41 **文献标志码:** A

Camera Calibration of Stereo Vision System Based on Matlab

BIAN Hou-qin, TAN Ye

(School of Computer and Information Engineering, Shanghai University of
Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The camera calibration algorithm based on plane board is presented. The basic categories of the camera calibration method are firstly given. Their advantages and disadvantages are shown together with the current situation of the traditional camera calibration method, and the active camera calibration method and camera self-calibration method are introduced, too. Then a camera calibration method based on the parameter calibration of the stereo vision system is described and realized with Matlab. The results show that the software can be applied in projects.

Key words: camera calibration; corner extraction; stereo vision system

摄像机标定是计算机视觉研究领域中的一个重要课题, 其主要任务是确定摄像机的内外参数, 其内部参数包括几何和光学特性, 外部参数包括相对世界坐标系的摄像机坐标的一个三维位置和方向. 现有的摄像机标定方法主要可以分为传统的标定方法^[1]、自标定方法^[2]和基于主动视觉的标定方法^[3]3类. 传统的标定方法是基于一个精确测定的物体作为空间参照物的摄像机内标定方法^[4]; 自标定方法不需要借助任何外在的信息, 仅利用图像之间的点对应信息就可以获得摄像机

的内部参数^[5]; 基于主动视觉的标定方法是通过控制摄像机的运动来标定摄像机的内部参数^[6]. 本文研究了基于平面板标定的传统的摄像机标定方法, 利用 MATLAB 编程语言实现了这一标定方法, 并给出了实验过程和结果, 以期对标定方法在工程中的实际应用提供参考.

1 摄像机成像模型

摄像机在拍摄图像的过程中, 涉及 3 个坐标系, 即图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系.

收稿日期: 2010 - 07 - 12

通讯作者简介: 边后琴(1976 -), 女, 博士, 副教授, 湖北仙桃人. 主要研究方向为计算机视觉和机器学习. E-mail: houqinbian@163.com.

图像坐标系有两个:一是以像素为单位的图像坐标系 (u, v) ;二是以物理单位(例如毫米)表示的图像坐标系 (x, y) . 在 (x, y) 坐标系中,原点 O_1 定义在摄像机光轴与图像平面的交点,该点一般位于图像中心处,但由于摄像机制作的原因,也会有些偏离,若原点 O_1 在 (x, y) 坐标系中的坐标为 (u_0, v_0) ,每一个像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸为 $k_u = 1/d_x, k_v = 1/d_y$, x 轴与 y 轴方向的夹角为 θ ,则图像中任意一个像素在两个坐标系中的关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v \csc \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

一般取 $\theta = \pi/2$,图像坐标系关系如图 1 所示. 在这一情况下,式(1)可以简单地表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

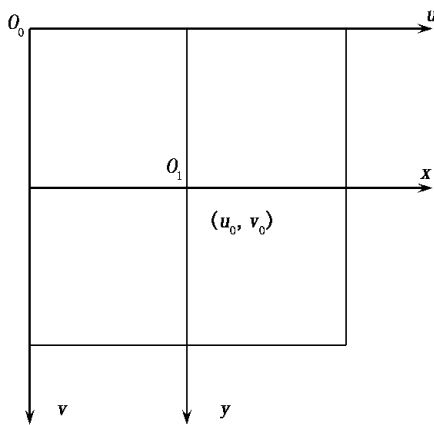


图 1 图像坐标系示意

定义摄像机坐标系为 (X_c, Y_c, Z_c) ,其坐标原点 O 称为摄像机的光心, X_c 轴和 Y_c 轴与图像的 x 轴与 y 轴平行, Z_c 轴为摄像机的光轴,它与图像平面垂直. 光轴与图像平面的交点,即为图像坐标系的原点 O_1 , O_1 为摄像机焦距. 摄像机可安放在环境中的任何位置,在环境中选择一个基准坐标系来描述摄像机的位置,用以描述环境中任何物体的位置,该坐标系称为世界坐标系,它由 X_w, Y_w, Z_w 轴组成. 用 R 和 t 分别表示摄像机坐标系和世界坐标系之间的旋转关系和平移关系. 因此,空间中某一点 X 在世界坐标系与摄像机坐标系

下的齐次坐标如果分别是 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 与 $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$, 则存在的关系为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R —— 3×3 正交单位矩阵;
 t —— 三维平移向量;
 $0^T = [0 \ 0 \ 0]$;
 M_1 —— 4×4 矩阵.

空间的任何一点 X 在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示,如图 2 所示,即任何点 X 在图像上的投影位置 x 为光心 O 与 X 点的连线 OX 和图像平面的交点. 此种关系称为中心射影或透视投影. (x, y) 为 x 点的图像坐标; (X_c, Y_c, Z_c) 为空间点 X 在摄像机坐标系下的坐标.

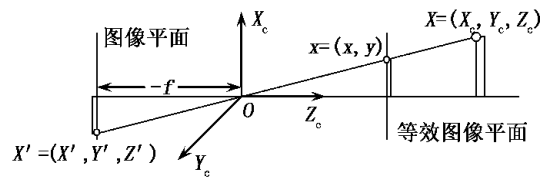


图 2 针孔摄像机模型

根据比例关系,则:

$$Z' = -f, X' = -f \frac{X_c}{Z_c}, Y' = -f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (4)$$

成立,所以:

$$x = -X', y = -Y' \quad (5)$$

那么,摄像机坐标和图像坐标间的变换关系为:

$$(X_c, Y_c, Z_c) \rightarrow (x, y, 1) = \left(f \frac{X_c}{Z_c}, f \frac{Y_c}{Z_c}, 1 \right) \quad (6)$$

由此可见,在成像的过程中丢失了深度信息. 此透视投影关系用齐次坐标与矩阵可以表示为:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

代入式(7),得到以世界坐标系表示的 X 点坐标与其投影点 x 的坐标 (u, v) 的关系为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v \csc \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fk_u & fk_u \cot \theta & u_0 & 0 \\ 0 & fk_v \csc \theta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$KP_1 X = PX \tag{8}$$

式中: P —— 摄像机的投影矩阵, 为 3×4 矩阵;
 K —— 由坐标尺度 k_u 和 k_v , 中心 u_0 和 v_0 , 焦距 f_x 和 y 方向的夹角 θ 确定, 这 5 个参数称为摄像机的内部参数;
 P_1 —— 由摄像机相对于世界坐标系的方位, 即旋转矩阵 R 和平移向量 \mathbf{t} 所对应的 6 个参数确定, 这 6 个参数称为摄像机的外参数。

确定摄像机内外参数的过程, 称为摄像机的标定。双目视觉中摄像机标定的基本方法是, 在固定的摄像机模型下, 基于特定的参照物, 通过对左右两幅图像进行图像处理 and 数学变换计算, 可以得到摄像机模型的内部和外部参数。对于使用日益广泛的非测量摄像机来说, 标定是从二维图像中获取三维信息必不可少的步骤。

2 参数标定方法的实现过程

平面模板标定方法的基本原理为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = K [r_1 \quad r_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中: K —— 摄像机的内部参数矩阵;
 $[X_w \ Y_w \ 1]^T$ —— 模板平面上的齐次坐标;
 $[u \ v \ 1]^T$ —— 模板平面上的点投影到

图像平面上对应点的齐次坐标;

$[r_1 \ r_2 \ r_3] \mathbf{t}$ —— 摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。

需要注意的是, 这里我们假设模板平面是在世界坐标系中 $Z=0$ 的平面上。由于摄像机有 5 个未知内参数, 所以当所拍摄的图像数目大于等于 3 时, 就可以线性唯一求解出 K 。

基于 Matlab 的立体视觉系统的参数标定分为两个阶段: 一是根据给定的图像标定每一台摄像机的内部参数; 二是根据内标定的结果标定立体视觉系统的外部参数。平面标定方法包括以下 5 个步骤:

- (1) 打印一张黑白相间的格子纸, 贴在一个平面上;
- (2) 从不同角度拍摄若干张模板图像;
- (3) 检测出图像中的特征点;
- (4) 求出摄像机的内部和外部参数;
- (5) 求出畸变系数;
- (6) 优化求精。

实验平台如下: 5×8 的黑白相间的棋盘状标定块, 每个栅格的规格为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。打印后固定于塑料泡沫板上。安装两台位置固定的 CCD 摄像机, 从不同角度拍摄若干张模板的图像, 然后用 Matlab 读入图像, 提取标定模板的网格角点, 标定参数, 计算误差, 最后将左右摄像机的标定结果联立得到外部参数矩阵。

整个标定系统的第一个运行界面见图 3。

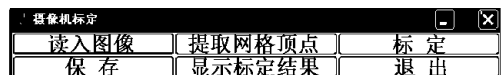


图 3 运行界面

图像是标定方法的直接对象, 读入图像按钮用于读入需要标定的图像, 可以选择图像格式、文件名等, 通过调用子函数 `ima_read_calib` 实现, 该函数可以将目标文件夹下的所有文件列出并读入。运行时先选择文件名, 以左边摄像机文件名为例(左边摄像机所拍摄图片共有 14 幅, 将其依次命名为 `left01`, `left02`, `left03`, ..., `left14`), 输入 `left`, 在 `Image format` 一栏可以发现不同可供选择的图片格式。若所用图片是 `jpg` 格式, 就输入 `j`。其他不同格式的图像对应的字母如下:

```
Image format ( [ ] = 'r' = 'ras' ; 'b' = 'bmp' ; 't' = 'tif' ; 'p' = 'pgm' ; 'j' = 'jpg' ; 'm' = 'ppm' ) >> j
```

```
Loading image 1...2...3...4...5...6...7...8...9...10...11...12...13...14...
```

读入图像后,程序显示结果如图4所示.图4显示了由左边摄像机拍摄的14幅jpg格式的图像的缩略图.一般来说,图片越多,标定精度越高,可以根据实际需要的标定精度选择要标定的图像数量.如果不对数量进行选择,系统会默认是该文件名序列的全部图像(按照标定方法原理,用于标定的图像数量不能小于3).

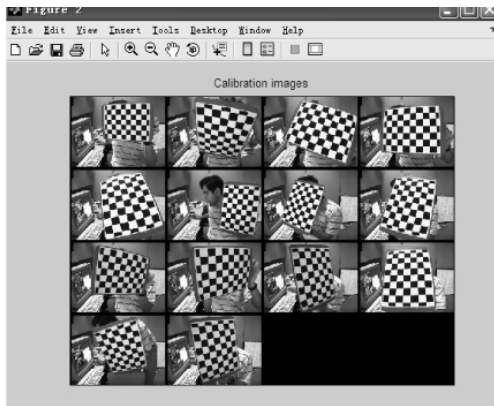


图4 用于标定的图像

提取网格顶点按钮的操作要调用的子函数是 click_calib,此时默认平行于水平面方向为 X 轴,而垂直方向为 Y 轴.如果在上一个过程中图像未被正确读入,则此时会先提示: Cannot extract corners without images! 如果图像被正确读入,则提示需要设置操作界面的坐标系大小,并要求设置栅格的边长.用户在标定模板上用鼠标依次点击图像的4个顶点,次序为左上、右上、右下、左下.根据提示输入每一个方格的长(30 mm)与宽(30 mm).在选取4个顶点时,如果偏移过大,需要输入 X 轴和 Y 轴的栅格数量时,只需要按照实际操作输入即可.选择完毕以后,就可以依次提取网格角点.

网格网点提取过程如下.

标定左摄像机的参数,在标定前,一定要确定有多于3幅图片进行提取角点等操作,因为平面模板的标定方法规定必须要多于3幅图片,如果小于3幅,则会因为求解方程过少而无法得到结果.输出的内部参数有:有效焦距 $f_c = f$,主点(投

影中心) $c_c = (u_0, v_0)$,偏斜角 $\alpha_c = \theta$,畸变系数 $k_c = [k_u, k_v]$,经过优化后可以得到计算的像素误差(Pixel error,单位是像素).

提取网格角点后,就可以计算出摄像机的内部参数,结果如下:

$$f_c = [536.74747 \quad 538.59748] [3.61834 \quad 3.76829]$$

$$c_c = [336.69003 \quad 238.29842] [4.30140 \quad 4.41365]$$

$$\alpha_c = [0.00000 \quad 0.00000] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90.00000 \quad 0.00000 \text{ degrees}$$

$$k_c = [-0.27798 \quad 0.09705 \quad 0.00050 \quad 0.00016 \quad 0.00000] [0.01127 \quad 0.02432 \quad 0.00076 \quad 0.00087 \quad 0.00000]$$

$$\text{err} = [0.56240 \quad 0.23955]$$

同样,读入右摄像机拍摄的图像,对其进行标定.标定方法同上,得到右摄像机标定结果如下.

$$f_c = [536.98262 \quad 536.56938] [1.19786 \quad 1.15677]$$

$$c_c = [326.47209 \quad 249.33257] [1.36588 \quad 1.34252]$$

$$\alpha_c = [0.00000 \quad 0.00000] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90.00000 \quad 0.00000 \text{ degrees}$$

$$k_c = [-0.28936 \quad 0.10677 \quad -0.00078 \quad 0.00020 \quad 0.00000] [0.00488 \quad 0.00866 \quad 0.00027 \quad 0.00062 \quad 0.00000]$$

$$\text{err} = [0.14184 \quad 0.13146]$$

得到两个摄像机的内部参数后,就可以进行由这两个摄像机构成的立体视觉系统的标定,即得到两个摄像机的外部参数.立体视觉系统标定的界面如图5所示.



图5 立体视觉系统标定运行界面

首先需要载入左右摄像机的标定结果,单击该按钮,出现如下提示:

Loading of the individual left and right camera calibration files

```
Name of the left camera claibration file ( [ ] = Calib_Results_left.mat) : >>
```

Name of the right camera claibration file ([] = Calib_Results_right.mat) .

在原先得到左右摄像机内部参数的基础上, 我们得到了该立体视觉系统的外部参数, 即右摄像机相对于左摄像机的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T :

$$R = \begin{bmatrix} 0.00669 & 0.00452 & -0.00350 \\ 0.00270 & 0.00308 & 0.00029 \\ -99.80198 & 1.12443 & 0.05041 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -99.80198 & 1.12443 & 0.05041 \\ 0.14200 & 0.11352 & 0.49773 \end{bmatrix}$$

左右摄像机外部参数示意图 6 和图 7.

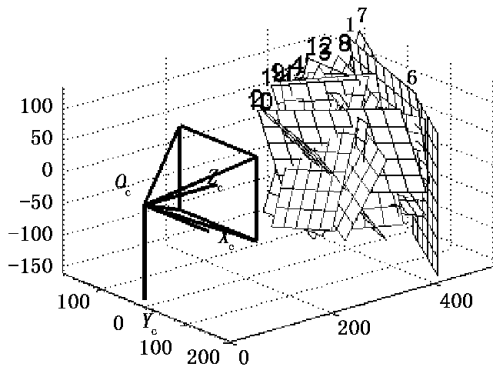


图 6 左摄像机外部参数示意

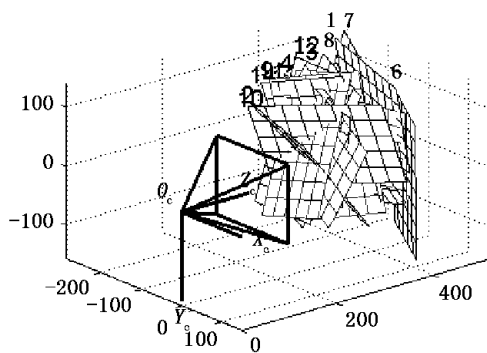


图 7 右摄像机外部参数示意

得到结果后, 选择保存. 该操作调用了 saving_calib 这一函数, 目的是生成 mat 文件, 为了后面操作方便, 将得到的结果 Calib_Results.mat 重命名为后 Calib_Results_left.mat, 以区分随后对右摄像机参数标定的结果.

通过实验可以发现, 这种基于 Matlab 的摄像机标定方法的优缺点很明显: 一方面, 友好的界面

以及简易的操作方法能够被广泛应用到实际工程中; 另一方面这种标定方法的精确性仍有待提高, 在测量左摄像机的内部参数时, 其误差约为 0.6%, 而右摄像机的内部参数误差也有 0.2%, 因此不合适运用于高精度的场合.

3 结 语

本文通过 Matlab 编程实现了一种较为方便的立体视觉系统的标定方法. 采用自标定方法实现摄像机的自标定, 通过编写程序调用 Matlab 的子函数, 可以很方便地实现标定的计算过程. 由于已知模板的每一个栅格大小, 对 14 对图像进行角点提取, 反复迭代, 可以较为精确地得到摄像机的有效焦距等参数. 使用 Matlab 设计的标定程序的操作界面具有更好的交互性和实时性, 我们所需要的只是将左右摄像机标定完的结果作为初始数据, 使用特定的程序计算得到外部参数, 即旋转矩阵和平移矩阵.

通过实验充分证明, 该方法有效且方便, 具有良好的人机交互功能, 便于操作, 能够实时得到结果.

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]//Proceedings of the International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Corfu, Greece, 1999: 666-673.
- [2] HARTLEY R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Santa Margherita Ligure, Italy, 1992: 579-587.
- [3] MA S D. A self-calibration technique for active vision system [J]. IEEE Transactions on Robot Automation, 1996, 12(1): 114-120.
- [4] 祝海江, 吴福朝, 胡占义. 基于两条平行线段的摄像机标定 [J]. 自动化学报, 2005, 31(6): 853-864.
- [5] 傅丹, 周剑, 邱志强, 等. 基于直线的几何不变性标定摄像机内参数 [J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(6): 1 058-1 063.
- [6] 夏艳, 苏中, 吴细宝. 双目视觉测量系统的标定及三维测量 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(7): 1 298-1 302.

(编辑 胡小萍)