

# CCD 摄像机图像中心两种标定方法的应用研究\*

王 锋<sup>1,2</sup> 周仁魁<sup>1</sup> 杨小许<sup>1,2</sup> 陈 敏<sup>1,2</sup> 邹永星<sup>1,2</sup>

罗秀娟<sup>1</sup> 曹剑中<sup>1</sup> 周泗忠<sup>1</sup> 聂浩之<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 应用两种方法对 CCD 摄像机的图像中心进行标定;其中直接光学方法根据因镜头畸变造成的像素点在像面水平和垂直两个方向上分布的对称性得到图像中心;基于镜头畸变的透视投影方法利用具有精确定位点阵的平面模板及其在不同方位所成图像,标定出摄像机的内外参量,其中包含图像中心. 标定过程考虑了两种主要的镜头畸变. 针对某型摄像机及镜头,试验得出关于两种方法的适用性和优缺点,并验证了后一种方法的强收敛性.

**关键词** 图像中心;摄像机标定;摄像机参量;镜头畸变

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## 0 引言

摄像机标定是机器视觉中的基本问题<sup>[1]</sup>. 在三维机器视觉场合,摄像机标定就是确定摄像机本身的几何和光学特征(内参量),以及摄像机在确定的世界坐标系下的位置和方向(外参量). 为此,需要建立成像模型,而图像中心是其中的重要参量,图像中心位置的准确性决定所建模型的准确程度. 传统意义认为图像中心是摄像镜头主光轴和成像面的交叉点;而主光轴定义为通过摄像镜头各光学曲面中心点的“直线”;对实际的摄像镜头,由于轴偏误差和镜头畸变等因素的影响,并没有一个理想的主光轴,因此,图像中心不存在绝对意义上的所谓“真值”<sup>[2]</sup>. 当前确定图像中心的主要方法有基于成像特征的方法和非基于成像特征的方法. 文献<sup>[2]</sup>分类总结了多种不同意义下的图像中心及其标定方法,读者可参阅.

本文提出一种在某工程项目中得到应用的确定图像中心的数学方法,它属于基于非成像特征的方法;介绍另一种简便实用的基于镜头畸变的透视投影方法,此方法考虑成像特征,为摄像机建立成像模型. 本文用此方法确定了图像中心,并在实现过程中对原方法中的部分内容做了改进,从不同角度检验了算法的收敛性. 试验结果显示,用这种方法标定图像中心,与直接光学方法比较,有对试验装置要求低、操作简便、易实现自动化等优点;算法收敛性强,且能建立起完整的摄像机模型;但处理结果的重复性不如前者,这是需要继续研究改进之处.

## 1 两种图像中心标定方法原理

### 1.1 直接光学方法

试验装置如图 1, CCD 摄像机放置于可在水平和垂直面内转动的精密转台上,转台带动摄像机在水平面和垂直面内旋转的角度可由轴角编码器精确读出.

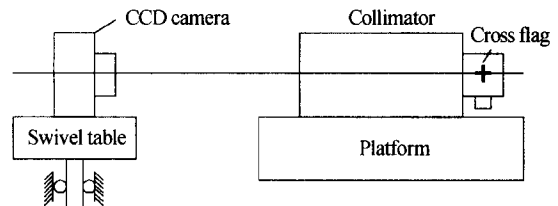


图 1 直接光学方法确定图像中心  
Fig. 1 Direct optic method's principle

平行光管位于摄像机前方的平台上,其焦平面上有带十字丝的透明分划板,通过光源照明,十字丝标志成像在摄像机的像面上.

试验步骤如下

1) 调节 CCD 摄像机和平行光管的相对位置,尽量使十字丝中心成像在摄像机像面的几何中心位置,记下轴角编码器的读数  $A_0$ 、 $E_0$ ;开启摄像机工作,标定出十字丝在图像上的像素坐标  $(X_0, Y_0)$ ; 2) 控制摄像机在水平面内沿顺时针和逆时针方向各转动  $\alpha$  角,得到十字丝在像面成像点的坐标  $X_1$  和  $X_2$ ; 3) 根据畸变理论,以像面中心为原点,离开原点距离同为  $r$  的两个像点畸变量应相同. 因此,如果  $X_0$  是理想的图像中心的话,应有

$$|X_1 - X_0| = |X_2 - X_0| \quad (1)$$

若两边值不等,表明图像中心偏离  $X_0$ ;为此改变摄像机的初始位置,重复步骤 1~3,直至等式(1)成立为止. 最终得到的坐标  $X_0$  即可作为图像中心的横

\* 中科院知识创新基金资助

Tel: 029-88470766 Email: wfmail@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-04-14

坐标;4)同理,让摄像机在垂直平面内转动,重复步骤 1~3,最终得到图像中心的纵坐标  $Y_0$ ;5)改变  $\alpha$  角,得到多组  $(X_0, Y_0)$  值,取统计平均,作为最终的图像中心坐标。

这种方法单纯考虑图像中心,而未考虑其它摄像机参量。因此,标定出的图像中心与摄像机成像模型无关。

## 1.2 考虑镜头畸变的透视投影方法

### 1.2.1 成像模型

一般情况下,摄像机模型可以看作一个针孔模型。但在需要准确度比较高的场合,必须考虑镜头畸变,对针孔模型下的成像点进行畸变修正。考虑镜头畸变的摄像机透视投影模型如图 2;图中  $(x_w, y_w, z_w)$  为世界坐标系,  $(x_c, y_c, z_c)$  为摄像机坐标系,  $(O', u, v)$  为像平面几何坐标系,  $O'$  为像平面的中心(由于镜头畸变等误差因素,  $O'$  未必与像平面的几何中心重合)。  $(r, c)$  表示像平面像素坐标系,以图像左上角为原点,像素为坐标单位。图像中心  $O'$  的坐标表示为  $(r_0, c_0)$ 。图中空间点  $M$  的理想成像点为  $m_0$ ,其坐标设为  $(u, v)$ ,实际的成像点为  $m$ ,设其坐标为  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 。

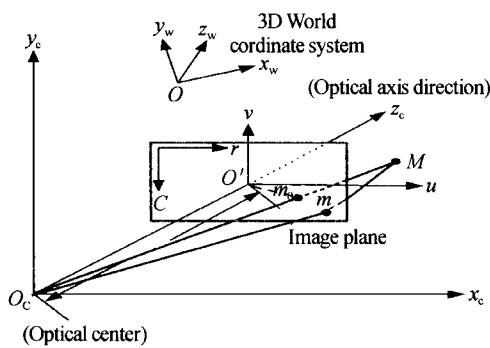


图 2 带畸变的透视投影模型  
Fig. 2 Perspective projection model

设空间某点  $M$  在摄像机坐标系下的坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ ,由针孔模型,它在图像平面上理想投影点  $m_0$  坐标为

$$\begin{aligned} u &= f x_c / z_c \\ v &= f y_c / z_c \end{aligned}$$

式中  $f$  为摄像机焦距。

本文考虑两种主要的畸变:径向畸变(Radial distortion)和偏心畸变(Decentering distortion)。这里直接写出两种畸变在像平面的  $u, v$  轴上产生的畸变量,具体推导可参考有关应用光学书籍。

$$\begin{aligned} \delta_{ur} &= \tilde{u}(k_1 \rho^2 + k_2 \rho^4) \\ \delta_{vr} &= \tilde{v}(k_1 \rho^2 + k_2 \rho^4) \\ \delta_{ud} &= 2k_3 \tilde{u}\tilde{v} + k_4(\rho^2 + 2\tilde{u}^2) \\ \delta_{vd} &= k_3(\rho^2 + 2\tilde{v}^2) + 2k_4 \tilde{u}\tilde{v} \end{aligned}$$

式中  $\delta_{ur}, \delta_{vr}$  表示径向畸变,  $\delta_{ud}, \delta_{vd}$  表示偏心畸变,  $k_i$  为畸变因子,  $\rho = \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}$ 。实际运算时,可用点  $m_0$  的坐标代替点  $m$  的坐标计算  $\rho$  的值<sup>[4]</sup>,即  $\rho =$

$$\sqrt{u^2 + v^2}.$$

$$\tilde{u} = u + \delta_{ur} + \delta_{ud}$$

$$\tilde{v} = v + \delta_{vr} + \delta_{vd}$$

转换为像素坐标表示为

$$\begin{bmatrix} r \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & r_0 \\ 0 & f_v & c_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中为摄像机的内部参量矩阵,其中  $f_u, f_v$  分别为  $u$  和  $v$  方向的等效焦距,  $\gamma$  是描述像面两坐标轴倾斜度的参量。

### 1.2.2 本文采用的标定方法

传统的标定方法<sup>[4,5]</sup>往往需要建立复杂的标定系统,需精确测量标定块上目标点的三维坐标以及摄像机和标定块之间的位置关系。文献[3]提出了一种用平面模板代替传统标定块的标定方法,此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,获得三个以上不同方位的模板图像,最后通过确定图像和模板上的点的匹配,计算出图像和模板之间的单应性(homography)矩阵,并利用该单应性矩阵线性解出摄像机内外参量,然后对这些参量进行非线性的迭代优化,得到最终的内外参量值。

本文基于这种方法,对某型摄像机的图像中心进行标定,并在标定过程中对原算法中的部分内容做了一定的改进。下面简单介绍这种方法的原理。

设 3D 目标点  $M = [x_w, y_w, z_w]^T$ ,其对应的 2D 图像点  $m = [r, c]^T$ 。它们对应的齐次坐标分别记为  $\tilde{m} = [r, c, 1]^T$  和  $\tilde{M} = [x_w, y_w, z_w, 1]^T$ ,则

$$s \tilde{m} = A [R \ t] \tilde{M} \quad (2)$$

式中  $s$  是比例因子,  $[R \ t]$  是摄像机的外部参量,表征摄像机光轴在世界坐标系中的空间位置,  $R$  是旋转矩阵,  $t$  为平移向量。

设标定板在世界坐标系的  $z_w = 0$  处,则由式(2)得

$$s \begin{bmatrix} r \\ c \\ 1 \end{bmatrix} = A [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A [r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

于是  $\tilde{M} = [x_w, y_w, 1]^T$ ,令  $H = A [r_1 \ r_2 \ t]$ ,则式(2)表示为

$$s m = H M \quad (4)$$

称  $H$  为单应性矩阵. 令  $H=[h_1, h_2, h_3]$ , 则

$$[h_1, h_2, h_3]=A[r_1 \ r_2 \ t]$$

$R$  是正交矩阵, 则  $r_1^T r_2 = 0$  和  $r_1^T r_1 = r_2^T r_2$ , 由此得到内参的两个约束条件为

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $A^{-T}=(A^{-1})^T$  或  $(A^T)^{-1}$ .

$$\text{令 } B=A^{-T} A^{-1}=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$B$  是对称矩阵, 定义六维向量了

$$b=[B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]$$

再令  $H$  矩阵的第  $i$  列向量为:  $h_i=[h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ , 得到

$$h_i^T B h_j = v_{ij} b \quad (6)$$

式中

$$v_{ij}=[h_{i1} h_{j1}, h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_{i2} h_{j2}, h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_{i3} h_{j3}]^T$$

于是式(6)表达为

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (7)$$

对应每幅图像都有如式(7)的方程. 设有  $m$  幅图像, 联立所有图像对应方程可得

$$Vb=0 \quad (8)$$

式中,  $V$  是  $2m \times 6$  矩阵, 它反应各图像与标定模板之间的对应关系.

设  $x=[\bar{h}_1^T, \bar{h}_2^T, \bar{h}_3^T]^T$ , 式中  $\bar{h}_i$  是矩阵  $H$  的第  $i$  行向量. 则可将式(4)改写为

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}^T & 0^T & -r \tilde{M}^T \\ 0^T & \tilde{M}^T & -c \tilde{M}^T \end{bmatrix} x = 0$$

设原式中  $s=(h_3 \tilde{M}^T)^{-1}$ . 如有  $n$  个特征点, 则有  $n$  个如上式的方程, 将这些方程联立, 得

$$Lx=0 \quad (9)$$

式中  $L$  是  $2n \times 9$  矩阵.

通过求解向量  $x$ , 进而得单应性矩阵  $H$  的解. 解方程(8), 求得矩阵  $B$ , 由  $B$  求得  $A$ , 再由式  $[h_1, h_2, h_3]=A[r_1 \ r_2 \ t]$  得

$$\begin{aligned} r_1 &= \lambda A^{-1} h_1 & r_2 &= \lambda A^{-1} h_2 & r_3 &= r_1 \times r_2 \\ t &= \lambda A^{-1} h_3 \end{aligned}$$

设有  $p$  幅图像, 标定板上共有  $q$  个标定点. 构造如下的最大似然函数

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \| m_{ij} - m(A, R_i, t_i, k_1, k_2, k_3, k_4, M_j) \|^2$$

式中  $m_{ij}$  是图像中提取的实际的像点,  $m(A, R_i, t_i, k_1, k_2, k_3, k_4, M_j)$  是 1.2.1 节描述的经投影模型计

算得到的投影点, 其中  $R_i, t_i$  的初值由前面介绍的方法得到, 设  $k_i (i=1 \sim 4)$  的初值为 0,  $A$  中  $\gamma$  的初值为 0, 图像中心的初值取由直接光学方法得到的结果,  $f_u, f_v$  的初值利用图像中消失点的正交特性得到. 这是一个非线性最小化的问题, 用 Levenberg-Marquardt 算法求解, 最终得到优化后的图像中心坐标以及其它内外参量.

本文在标定过程中对单应性矩阵的初始估计以及后来对摄像机内外参量的非线性优化使用了文献[2]中的方法, 以下部分做了有改动: 1) 用基于灰度图像方向导数的 Harris 方法对图像的角点进行亚像素提取, 提取准确度达到 0.1 像素; 2) 没有用单应性矩阵  $H$  对内参量进行估计, 而是利用模板图像中消失点的正交特性对  $f_u, f_v$  进行估计, 图像中心的初值取由本文介绍的直接光学方法得到的结果,  $\gamma$  的初值设为 0; 3) 考虑了镜头的偏心畸变, 因此多出两个畸变参量  $k_3$  和  $k_4$ ; 4) 没有对畸变参量  $k_i (i=1 \sim 4)$  进行初始估计, 而是设其初值为 0.

## 2 试验结果

本文分别用两种方法对某 CCD 摄像机及 50 mm (标称值, 非精确值) 镜头进行了标定试验, 摄像机图像分辨率是  $1280 \times 1020$ .

用直接光学方法重复做了多次试验, 得到的图像中心在 (558.0, 491.2) (像素) 附近, 取 5 次试验结果统计得到的均方误差为 0.74. 这说明该方法得到的图像中心稳定, 可重复性好.

透视投影方法试验中保持摄像机位置不变, 得到了多幅标定板 (正方形黑白方格板, 方格尺寸  $20 \times 20$  mm) 在不同位置的图像. 选取其中的 12 幅图像, 得到图像中心坐标: (543.75, 517.20) (像素); 还得到摄像机其它内外参量的标定结果 (外参量不再列出)

$$[f_u, f_v] = [4390.22, 4363.57], [k_1, k_2, k_3, k_4] = [0.072, 2.6852, 0.006, -0.01], \gamma = -0.00038.$$

由内外参量, 可以建立完整的摄像机模型.

试验中, 还将图像中心的初值设为图像的几何中心, 经非线性优化后, 得到了与上述结果极为接近的数值. 利用文献[2]中的方法对包含畸变参量在内的摄像机内参量作初值估计, 得到的结果作为下一步迭代优化的初值, 也能得到与上述结果接近的量值. 这说明原方法中利用单应矩阵对内参量进行初值估计的步骤实际中是不必要的, 算法具有强收敛性.

研究发现, 使用的图像数目不同, 或使用相同数量的两组不同图像时, 图像中心的标定结果也不尽

相同. 表 1 给出了一部分试验结果.

表 1 透视投影方法标定图像中心的部分试验结果

图像数	7	8	9	10	11	12	12	13	均值	均方差
$r_0$ (pels)	538.37	529.61	492.30	484.43	492.79	543.75	523.39	543.53	518.52	24.83
$c_0$ (pels)	541.34	540.09	544.82	541.29	544.18	517.20	521.13	495.89	530.74	17.65

由表 1 可见, 各次测量结果的均方误差达到数十个像素. 这说明试验结果的重复性比较差. 造成此结果的因素很多, 如图像处理过程中的角点提取误差等. 从原理上分析, 此方法得到的图像中心, 是和摄像机的其它内、外参量一起综合考虑, 进行非线性优化的结果, 其根本目的是为摄像机建立一个考虑主要畸变因素的成像模型, 而非单纯标定图像中心, 虽然每次得到图像中心各不相同, 但如果和得到的其它参量综合考虑, 能够达到根据图像建立成像模型的目的. 但另一方面, 多次测量结果的差别过大, 是不能令人满意的.

### 3 结论

本文用两种方法对图像中心进行了标定. 由它们得到的图像中心意义是不同的, 直接光学方法从物理角度考虑问题, 得到的图像中心是一种“厚透镜摄像机模型”的参量; 而透视投影方法关注的是为摄像机建立合理的成像模型, 更多的是从数学建模角度考虑问题. 计算机视觉任务中, 如果仅仅需要大致确定图形中心的位置, 用两种方法都是可行的. 但若涉及到根据图像进行精密测量等计算机视觉任务, 则需要使用透视投影方法得到图像中心, 并和其它参量一起, 建立完整的摄像机成像模型.

直接光学方法得到图像中心稳定, 可重复性好, 但所需装置复杂, 工作量大. 基于畸变的透视投影方法对试验装置要求低、操作简便、易实现自动化, 但结果的重复性不如前者; 这是需要进一步研究改进的问题.

#### 参考文献

- 1 Wong K K, Mendonca P R S, Cipolla R. Camera calibration from surfaces of revolution. *IEEE Transactions on PAMI*, 2003, **25**(2): 147~161
- 2 Willson R G, Shafer S A. What is the center of the image? *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**(11): 1994; 2946~2955
- 3 Zhang Z Y. Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations. ICCV' 99, Corfu, Greece, 1999. 666~673
- 4 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE J Robotics Automat*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 5 Weng J Y, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on PAMI*, 1992, **14**(10): 965~980
- 6 吴建华, 刘瑞根, 刘大敏, 等. 闪光照相中的定量测量方法研究. *光子学报*, 2002, **31**(Z2): 193~196  
Wu J H, Liu R G, Liu D M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(Z2): 193~196
- 7 孟坛魁, 华成英. 一种改进的灰度图像角点检测算法. *计算机应用研究*, 2005, **22**(4): 258~260  
Meng Q K, Hua C Y. *Journal of Computer Applications*, 2005, **22**(4): 258~260
- 8 Becker S C, Bove V M. Semiautomatic 3D model extraction from uncalibrated 2D camera views. *Proc of SPIE*, 1995, **2410**: 447~461
- 9 苏小华, 赵继广, 李建峰. 一种基于平面标定物体的摄像机标定方法. *装备指挥技术学院学报*, 2004, **15**(3): 110~112  
Su X H, Zhao J G, Li J F. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2004, **15**(3): 110~112
- 10 杨静, 丘江, 王岩飞, 等. 基于线性不变矩的特征图象配准算法研究. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1114~1117  
Yang J, Qiu J, Wang Y F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1114~1117
- 11 陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量. *光子学报*, 2004, **33**(8): 986~988  
Chen L, Gao Zh S, He Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 986~988

## Applications of Two Types of Calibration Method to CCD Camera's Image Center Measurement

Wang Feng<sup>1,2</sup>, Zhou Renkui<sup>1</sup>, Yang Xiaoxu<sup>1,2</sup>, Chen Min<sup>1,2</sup>, Zou Yongxing<sup>1,2</sup>,

Luo Xiujuan<sup>1</sup>, Cao Jianzhong<sup>1</sup>, Zhou Sizhong<sup>1</sup>, Nie Haozhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-04-14

**Abstract** The practical applications of two types of calibration method to CCD camera's image center measurement were researched. With regard to image center, pixels' distribution on image plane is still symmetrical even under the influence of lens distortion. Based on this, in direct optical method, the image center is judged by the symmetry of pixels' position in vertical and horizontal directions on image plane. In lens distortion based perspective projection method, a complete imaging model could be constructed and image center is one of the parameters in the model. Two kinds of main lens distortion are considered in the model. Tests were done and the comparison was made for two methods. The second method's strong convergence property was confirmed.

**Keywords** Image center; Camera calibration; Camera parameters; Lens distortion



**Wang Feng** was born on June 10, 1974, in Kaifeng, Henan Province. He received his B. S. and M. S. degrees from Zhouzhou University in 1996 and 2003. Now he is working for his Doctor's degree. His interests are camera calibration and 3D pose measurement of flying object.