

# 计算机视觉测量中 CCD 摄像机参数的校正

王丰元<sup>①</sup> 周一鸣 孙壮志  
(车辆工程学院) (山东工程学院)

**摘要** 在分析摄像测量坐标系的基础上,根据坐标变换的基本原理,建立了立体视觉中使用的 CCD 摄像机几何模型,确定了校正系数和像距的分析与测量方法;并通过试验测得了校正系数,强调了影响校正系数测量的主要参数。

**关键词** 计算机视觉;摄像机;参数;校正

**中图分类号** U492.8

## Calibration of CCD Camera Used in Computer Vision Measurement

Wang Fengyuan Zhou Yiming Sun Zhuangzhi  
(College of Vehicle Engineering, CAU) (Shandong Institute of Technology)

**Abstract** Based on the analysis of photogrammetric coordinate system and the principles of coordinate transformation, the photogrammetric model of CCD camera used in the computer vision system is established. The method to determine the calibration coefficient and focus length is analysed theoretically. The calibration coefficient is measured with high accuracy. The main parameters influencing the measurement of calibration coefficient is emphasized.

**Key words** computer vision; CCD camera; parameter; calibration

随着计算机科学技术及视觉理论的发展,计算机视觉技术在农业工程中逐步得到了广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。随着集成技术的发展,CCD(charge-coupled device 电荷耦合器件)摄像机的性能大大提高,已成为各种视觉应用场合的基本的图像输入工具。为了获得精确的测量结果,使非量测摄像机达到高分辨率摄像机的测量效果,在测量分析前,首先要对摄像机的几何参数进行校正,以提高测量分析的精度与可靠性。

笔者分析了在立体视觉测量中摄像机的几何变换模型,提出了校正系数  $K$  的确定方法,通过这一校正过程,可测得摄像机的像距及 CCD 成像平面到空间物体点间的精确尺寸,并得到了利用外部参数精确测量 CCD 纵向分辨率的方法。

收稿日期:1996-03-21

①王丰元,北京清华东路 17 号中国农业大学(东校区)213 信箱,100083

# 1 摄像机几何模型

为了建立成像模型,首先要确定摄像机几何坐标系。如图 1 所示,系统由以下 4 个坐标系构成:1)像平面坐标系  $o-xy$ ,以 CCD 成像中心或像主点  $o$  为原点,主纵轴线为  $y$  轴,主横轴线为  $x$  轴;2)像空间坐标系  $S-xyz$ ,以摄像站点  $S$  为原点,摄像机的主光轴  $So$  为  $z$  轴,其  $x, y$  轴与成像平面坐标系的  $x, y$  轴平行;3)图像空间辅助坐标系  $S-XYZ$ ,以摄像站点  $S$  为原点,铅垂方向为  $z$  轴,在易于控制的水平面内建立右手坐标系;4)外部空间坐标系  $O_e-X_eY_eZ_e$ ,一般取地面上具有明显标志的某一点为原点,建立便于描述物体特征和位置的右手坐标系。

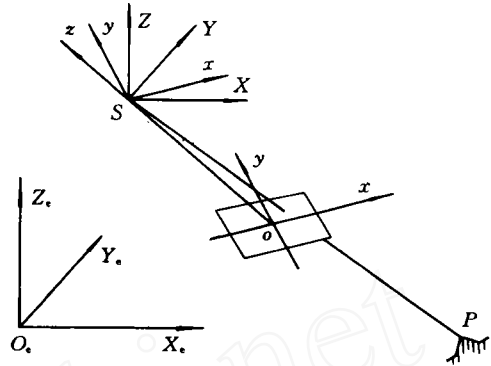


图 1 摄像测量坐标系简图

为了确定空间坐标系中坐标为  $(X, Y, Z)$  的空间点  $P$  在图像平面上的成像  $P'(x, y)$ ,需通过坐标变换来得到它们之间的变换关系<sup>[4]</sup>。首先将点  $P$  从外部空间坐标系平移到图像空间辅助坐标系,其齐次坐标变换矩阵为

$$R_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中  $[X_0, Y_0, Z_0]$  是外部空间坐标系原点  $O_e$  到图像空间辅助坐标系原点  $S$  的矢量  $\overline{O_eS}$  的三维分量;然后进行坐标系的旋转变换,即将坐标系  $S-XYZ$  旋转到与坐标系  $S-xyz$  重合,一般考虑 3 个方向的旋转变换,即绕  $X$  轴旋转角  $\theta$  的变换、绕  $Y$  轴旋转角  $\varphi$  的变换和绕  $Z$  轴旋转角  $\gamma$  的变换。若旋转的顺序为先绕  $X$  轴,再绕  $Y$  轴,最后绕  $Z$  轴旋转,则其变换关系为

$$A_1 = R(\gamma)R(\varphi)R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从图像空间辅助坐标系到像平面坐标系,点的变换为比例投影变换

$$R_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/p' & 1 \end{bmatrix}$$

其中  $p'$  为成像系统的像距。将以上变换联系在一起,得到空间点  $P$  在图像平面上的投影点  $P'$ ,从而,由  $P$  到  $P'$  的变换关系为  $A = R_c A_1 R_p$ ,即

$$[kx, ky, kz, k]^T = [A][X, Y, Z, 1]^T$$

式中: $k$ 为矩阵变换常数; $T$ 表示矩阵转置在成像平面上, $z=0$ 。

为了确定图像点与空间点的变换关系,需要确定变换矩阵  $A$ ,建立摄像机的几何模型<sup>[5]</sup>,校正通过已知的投影点和空间点的坐标,确定矩阵  $A$  中的各有关参数。投影点的坐标是将监视器上的像素坐标通过变换得到的,它以 CCD 面阵上的坐标尺寸表示。从像素坐标到 CCD 面阵坐标的变换,由于两者分辨率不同,易引起图像变形,所以应引入校正系数(即用来表示摄像机输入分辨率与图像分辨率显示关系的系数),以消除由于分辨率(尤其是水平分辨率)不同而引起的图像畸变。为此,首先需校正变换系数  $K$ (参见式(1))。这里主要讨论如何确定对视觉摄测影响较大的校正系数  $K$  和像距  $p'$ ,并进而得出 CCD 纵向分辨率的确定方法。

## 2 校正系数及像距的确定

采用摄像机获得的图像是外部空间物体及背景在 CCD 平面上的投影成像,操作者通过显示器对以像素表示的数字图像进行分析,得到有关的技术参数。

为了通过图像分析获得外部空间点的位置、形状信息,首先应确定 CCD 面阵的有关几何参数,而此参数有时是未知的或不准确的。考虑到此参数对图像输入输出关系影响较大,因而分析时首先要确定 CCD 面阵与图像监视器显示或图像帧存间的关系,以修正由于水平方向分辨率不同而产生的变形,而纵向分辨率在图像格式一定时,一般认为是一致的。很明显,使用不同摄像机与不同图像处理系统的组合,其变换系数  $K$  是不同的,因而,使用时都应该首先进行校正。

如果 CCD 单元间距(即每个像素所表示的实际尺寸)在水平方向为  $x''/\text{mm}$ ,在垂直方向为  $y''/\text{mm}$ ,图像监视器显示分辨率(帧存图像数字化分辨率)为  $x_r, y_r$ ,如屏幕坐标原点定义在左上角,则其中心的坐标为  $(x_r/2, y_r/2)$ (近似为像主点坐标)。空间点  $(X, Y, Z)$  在图像监视器上的坐标为  $(x_s, y_s)$ ,对应于 CCD 成像平面上的点的坐标为  $(x, y)$ ,其中坐标原点在平面中心(参见图 1),则有如下关系:

$$x = x_c K = (x_s - x_r/2) x'' K \quad (1)$$

$$y = y_c = (y_s - y_r/2) y'' \quad (2)$$

式中  $x_c, y_c$  是不考虑分辨率差异时屏幕点在 CCD 面阵上的对应点的坐标值。

由图 1 可见,当成像平面与外部坐标平面( $XOY$  面)平行且两平面中心重合时,由透视关系可得

$$\left. \begin{aligned} p'_x/x &= Z/(X-x) \\ p'_y/y &= Z/(Y-y) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

及

式中: $Z$ 为矢量 $\overline{PP}$ 在 $SO$ 方向上的投影长度; $p'_x, p'_y$ 分别为根据水平和垂直像素关系所求得的像距,对于同一台摄像机,有  $p'_x = p'_y$ ,从而有

$$x/(X-x) = y/(Y-y) = p'/Z \quad (4)$$

由式(1),(2),(4)可得

$$K = yX/x_c Y \quad (5)$$

且可求得

$$\text{及 } \left. \begin{aligned} p'_x &= \frac{x_c K}{X - x_c K} Z \\ p'_y &= \frac{y_c K}{Y - y_c K} Z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在实际计算中可取  $p' = (p'_x + p'_y)/2$ , 以提高测试精度。

在采用一般 CCD 摄像机进行图像分析测量时, 因 CCD 面阵在机壳内, 所以有时难以得到摄像机的准确像距, 无法采用式(3)进行计算来获得物体精确的外部坐标  $Z$ , 而采用式(5)求  $p'_x$  和  $p'_y$  时, 由于  $p'/z$  成比例关系, 用一幅图像上获得的点与外部尺寸间的关系, 无法解出这些参数; 因此, 笔者利用一种易于获得精确尺寸的方法进行  $p'$  值的测量, 并进而求得准确的  $Z$  值。

由式(3)可得

$$p'_x/Z = x_c K / (X - x_c K) \quad (7)$$

设  $\gamma_x = p'_x/Z, \gamma_y = p'_y/Z$ , 若校正图像开始处于距 CCD 面阵  $Z_1$  位置, 则  $\gamma_{x1} = p'_{x1}/Z_1$ , 若在距 CCD 面阵  $Z_2$  位置 ( $Z_1 - Z_2 = \Delta L$ ) 处, 另有一校正图像, 则  $\gamma_{x2} = p'_{x2}/Z_2$ 。由于是用 1 幅图像获得 2 个标定位置的目标, 或用同一拍摄参数获得 2 幅图像, 故有  $p'_{x1} = p'_{x2}$ , 从而可得  $Z_1 = [\gamma_{x2}/(\gamma_{x2} - \gamma_{x1})]\Delta L$ , 代入式(6)得

$$Z_1 = \frac{y_2(y_1 - Y_1)}{y_1 Y_2 - y_2 Y_1} \Delta L \quad (8)$$

同理可得

$$Z_2 = \frac{y_1(y_2 - Y_2)}{y_1 Y_2 - y_2 Y_1} \Delta L \quad (9)$$

式中  $y_i (i=1, 2)$  为第  $i$  位置时, 屏幕中心为坐标原点给出的外部测量点对应的屏幕纵坐标值, 即  $y_i = y_{si} - y_c/2$ , 而外部坐标点的纵向坐标  $Y_1, Y_2$  和  $\Delta L$  可精确控制; 因此, 可通过精确控制的外部参数和屏幕坐标, 直接利用式(8)和(9)求得相应的  $Z$  值, 进而由式(7)求得像距  $p'$ 。

### 3 试验与分析

试验条件如下:

- 1) 通过水平仪调整, 使摄像机处于水平状态, 使之不对任何坐标轴旋转;
- 2) 外部坐标设在图像平面中心, 从而使外部坐标与图像平面坐标重合且方向一致;
- 3) 将校正用坐标纸放在摄像机正前方, 距离约 900 mm 处固定;
- 4) 使摄像机沿  $X$  轴水平线移动, 置于 5 个不同点, 每点间隔 50 mm, 在每一位置上拍摄一幅校正图像进行分析;

5) 在采集的每张图像上以对称方式取 20 个校正点进行分析;

6) 为测定摄像距离, 将校正用坐标纸沿摄像机主轴方向放置在 2 个设定的位置, 两者的相对位置可以精确

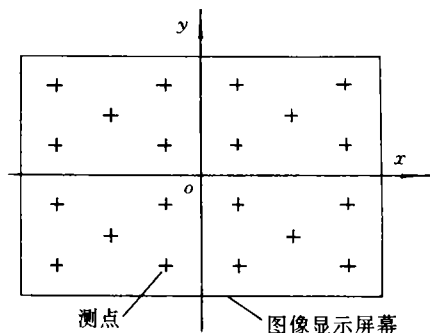


图 2 校正系数测点分布图

得到。

以 X 轴、Y 轴中心对称方式取 4 组 20 个点,点的分布如图 2 所示,通过精确测量获得其外部坐标 X、Y 及 Z 的近似值,通过图像处理得到其对应的屏幕坐标,将数据代入式(5)后求得 20 个 K 值,取其平均值,即作为该图像的校正系数 K 的测量及分析结果。取 5 个位置上得到的 5 幅图像处理结果的平均即得到最终的 K 值。

试验结果列于表 1。可以看出,试验测量校正系数 K 具有较高的精度。从试验过程看,校正的最大误差来源、也是试验较难控制的,是使光轴线与测试平面垂直及与像平面中心重合,只有在保证这一条件的前提下并严格满足其他各项条件,才能得到准确的测试结果。

表 1 校正系数 K 的测试结果

校正纸位置/mm	250	200	150	50	0
20 点平均值	0.684 463 82	0.684 123 89	0.684 899 65	0.684 343 88	0.684 848 8
总体统计参数	$K=0.684\ 536\ 00$ $\nu^2=2.973\ 0\times 10^{-4}$				

①为变异系数。

## 4 结束语

在摄像机摄影模型分析的基础上,分析了校正系数 K、像距  $p'$  的确定方法,试验测量了校正系数 K,并强调了影响试验测量结果的主要因素。本文描述的分析方法及算法已通过 C 语言在微机视觉系统中得到实现及应用。

## 参 考 文 献

- 1 Yonekawa S, Sakai N, Kitani O. Three-dimensional measurement of loam clods using machine vision. Trans of ASAE, 1994, 37(3):1003~1009
- 2 王丰元,周一鸣. 种子形状参数检测的计算机图像处理技术. 农业机械学报, 1995, 26(2):52~57
- 3 Tillet R D. Image analysis for agricultural processes: A review of potential opportunities. J of Agri Engi Res, 1991, 50: 247~258
- 4 金廷赞. 计算机图形学. 杭州:浙江大学出版社, 1988