

# 摄像机定标及其误差分析

许志祥 卢宏 沈剑

(上海科技大学无线电系, 201800)

**关键词:** 摄像机定标, 计算机视觉.

在计算机视觉系统中,经常使用电视摄像机作为视觉传感器对物体进行识别和测量.因此必须对摄像机进行定标即精确求出摄像机的内外部参数.在 Tsai 的两步定标法<sup>[1]</sup>中必须已知 CCD 成像面垂直方向及水平方向相邻光敏元之间距离等参数.本文在 CCD 成像面水平方向相邻光敏元间距离未知时,亦能求出摄像机内外部参数的精确解.

图 1 为摄像机模型,  $(x_c, y_c, z_c)$  为摄像机坐标系,  $XOY$  为摄像机成像面,  $X_f O_f Y_f$  为用象素标度的帧存图象坐标,  $C_x$  及  $C_y$  为对应于  $O$  点的图象帧存坐标,  $(x_w, y_w, z_w)$  为世界坐标系.用世界坐标系表示的空间一点  $P$  经旋转和平移变换后可映射为用摄像机坐标系表示

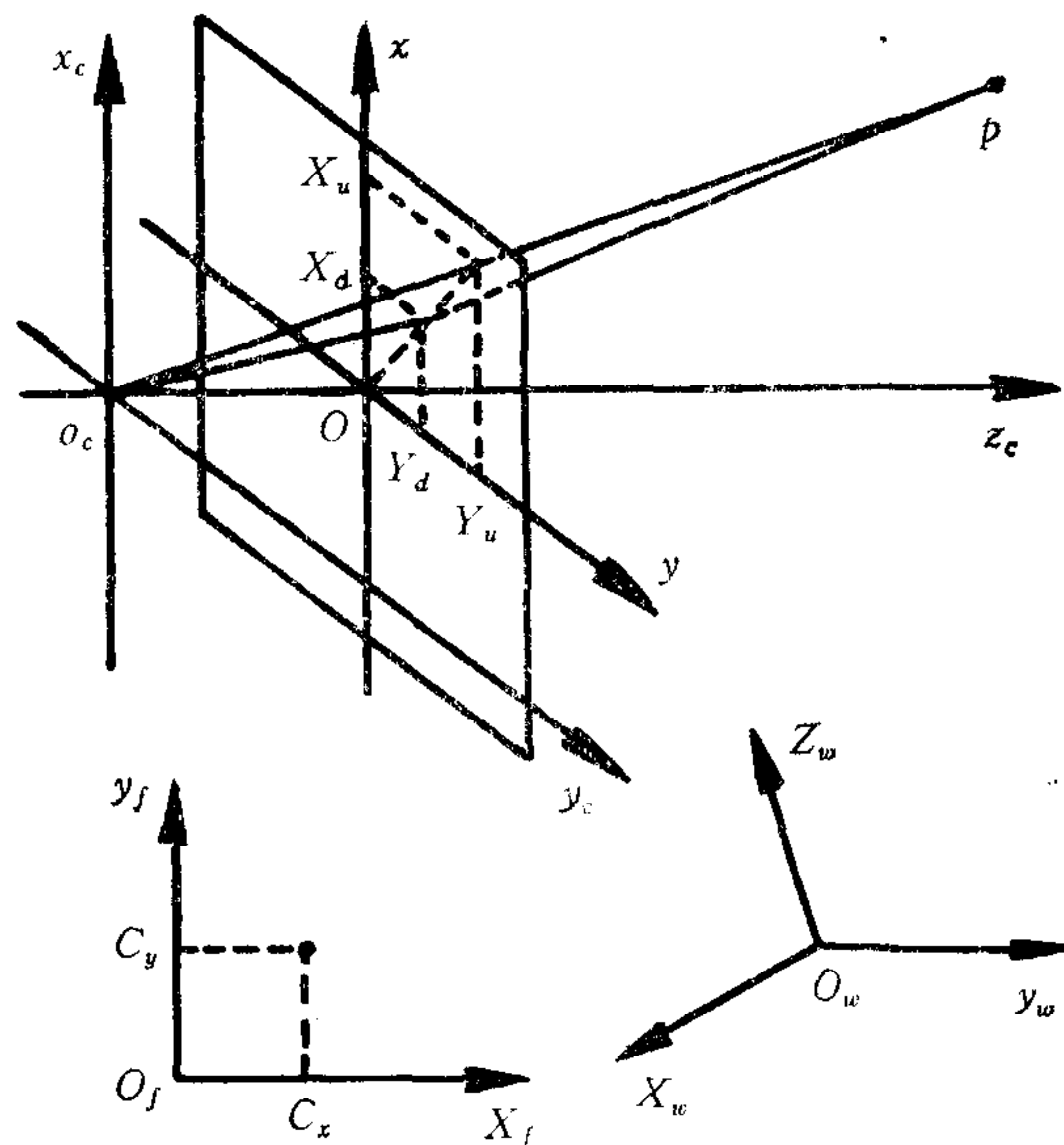


图 1 摄像机模型

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + t = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中旋转矩阵  $R$  为标准正交矩阵,  $t$  为平移矢量。若透镜无失真, 则  $P$  点在光敏成像面上的投影可由透视变换求得

$$\begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \end{bmatrix} = \frac{f}{z_c} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $f$  为透镜的等效焦距。若只考虑透镜的径向失真, 则失真后  $P$  点的投影坐标可表示为

$$X_d = X_u / (1 + k_1 r^2), \quad (3)$$

$$Y_d = Y_u / (1 + k_1 r^2). \quad (4)$$

式中  $k_1$  为失真系数, 且  $r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$ 。经取样量化后  $P$  点的帧存坐标为

$$X_f = s_x X_d + C_x, \quad (5)$$

$$Y_f = s_y Y_d + C_y, \quad (6)$$

式中  $s_x$  及  $s_y$  为  $X$  及  $Y$  方向上的标度因子。

要精确求出上述参数, 必须要制作一只已知三维世界坐标的定标模型。本文采用高度分成三层的 25 个长方柱作为定标模型, 每个长方柱的顶面有四个角点作为定标点, 故共有 100 个定标点。用图象处理方法精确求出此 100 个定标点在帧存中的图象坐标。利用这两组数据可精确求出摄像机的内外部参数。本文先利用上述各式关系及标准正交矩阵的性质, 在  $s_y$  已知时求出  $s_x, t_x, t_y, r_1 \sim r_9$  等参数。然后进一步求解  $f, k_1$  及  $t_z$ 。由(1), (2)及(4)式得

$$Y_d(1 + k_1 r^2) = f \frac{y_c}{z_c} = f \frac{r_4 x_\omega + r_5 y_\omega + r_6 z_\omega + t_y}{r_7 x_\omega + r_8 y_\omega + r_9 z_\omega + t_z}. \quad (7)$$

这是一个非线性方程, 可用广义牛顿法求出它的最优解。为此先求出  $f, k_1$  及  $t_z$  的初始值, 然后再进行迭代运算。在方程中只有三个未知数, 用三个定标点即可求解, 但若初始值偏离过大, 则可能使迭代结果有较大误差或迭代不收敛。本文采用 100 个点同时进行迭代, 每一次迭代运算可用最小二乘法或伪逆法进行求解。这样就把广义牛顿法与伪逆算法结合起来了。

首先用三维定标模型对摄像机进行定标, 然后利用已求出的摄像机内外部参数对帧存中每一个图象坐标点反投影求出视线, 将定标模型上的世界坐标点和相应的视线距离的平均值  $\Delta D$  作为摄像机的定标误差。本文对 S9321 型 CCD 摄像机进行定标, 隔行扫描时已知成像面垂直标度因子  $s_y = 128.205$  象素/毫米, 所采用的透镜的额定焦距为 16 毫米, 并设  $C_x = C_y = 256.5$ , 经定标计算得摄像机主要内外部参数为  $s_x = 95.102$  象素/毫米,  $f = 16.171$  毫米,  $k_1 = 0.001574$ ,  $t_x = -144.76$  毫米,  $t_y = -159.49$  毫米及  $t_z = 904.70$  毫米。并可求得摄像机定标误差为 0.111 毫米。

要减小摄像机定标误差, 除了要保证定标模型各定标点三维世界坐标的测量精度外, 定标图象的检测精度及某些摄像机已知参数的精度均会影响定标精度。本文使用计算机模拟方法假设一个和实际摄像机参数相近的理想摄像机模型及理想定标模型, 然后分析各种因素对摄像机定标误差的影响。

将均值为零、幅度最大偏移为  $\pm \Delta p$  (象素) 的均匀分布的独立随机噪声叠加在上述理

想的定标图象上后，定标误差与均匀分布噪声最大偏移成正比变化。如要求定标误差小于 0.1 毫米，则定标点图象检测误差应在  $\pm 0.25$  象素之内。计算表明， $s_y$  的误差会影响摄像机定标参数  $f$  及  $s_x$ ， $f$  与  $s_y$  的变化成反比，而  $s_x$  与  $s_y$  的变化成正比，但  $s_y$  的误差不会改变摄像机定标误差。当  $C_x$  及  $C_y$  偏离中心值时定标误差逐渐变大，当  $C_x$  及  $C_y$  均偏离  $\pm 11$  个象素时定标误差增加到近 0.05 毫米，这一误差和  $t_z$  比较是很小的，故对一般 CCD 摄像机  $C_x$  及  $C_y$  取帧存中心值不会引起明显的定标误差。

### 参 考 文 献

- [1] Tsai, R. Y., A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3 (1987), 4, 323—344.

## CAMERA CALIBRATION AND ITS ERROR ANALYSIS

XU ZHIXIANG LU HONG SHEN JIAN

(Shanghai University of Science and Technology, 201800)

**Key words:** Camera Calibration; Computer Vision.