

三维机器视觉中摄像机内外方位元素的确定^{*}

胡海峰, 熊银根

(中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 采用 TSAI 算法对立体视觉系统进行校准。该算法利用径向投影的平行原则, 能够快速、方便地计算出摄像机的几何光学参量及其在某一物体参考系中的方位元素。论文针对 752×582 的 CCD 摄像器件在点共面和不共面等情况下进行了内、外方位元素的计算, 获得了 4 组实验数据, 误差结果也一一给出。从实验获得的数据可以看出利用 TSAI 方法可以获得很好的校准结果。

关键词: TSAI 算法; 摄像机校准; 立体视觉

中图分类号: TP205 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 06-0022-04

在三维机器视觉系统中, 摄像机内、外方位元素的确定 (也称摄像机校准) 主要是指确定摄像机内部几何光学特性, 包括有效焦距、摄像镜头的扭曲系数、不确定尺度因子等, 以及确定摄像机相对于某一世界坐标系的三维位置和方向。摄像机校准是机器视觉研究中首要解决的问题, 其目的主要是: ①从图像坐标系获取空间物体的三维信息; ②从物体三维信息推断出其在二维帧存图像中的坐标。

1 摄像机校准的主要问题

当前摄像机进行校准的方法^[1-3]有许多种, 这些方法在某些特定情形下能够获得较好的效果, 精确地计算出摄像机的内外参数, 但一般存在以下几点不足: ①需要初值估计来进行非线性搜索, 并且搜索范围较大, 需要在很长的时间里才能完成; ②摄像镜头的扭曲系数往往不予考虑; ③要附带许多限制条件, 校准过程难以在一般实验条件下实现。Roger 在总结以往的校准方法的基础上, 提出了一种新的校准算法^[4], 该算法利用径向投影的平行原则简化了校准步骤, 而且在求解精度和运算速度上优于传统算法, 更重要的是该算法的通用性, 使得校准过程简易明了。

2 利用 TSAI 方法进行摄像机校准

2.1 针孔摄像机模型结构

图 1 为针孔摄像机模型的基本几何结构, 它反映了任意空间点与对应图像点之间的投影变换关

系。设 (x_w, y_w, z_w) 是物体点 P 在任一世界坐标系中的三维坐标, (x, y, z) 是该点在摄像机坐标系中的三维坐标, (X_u, Y_u) 是 P 点在中心为 O_i 的图像坐标系中的理想坐标, (X_d, Y_d) 是由于透镜变形引起的偏离 (X_u, Y_u) 的 P 点实际图像坐标。摄像机校准的目的就是要找出空间点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 到对应图像点 $P_d(X_d, Y_d)$ 之间的变换关系。

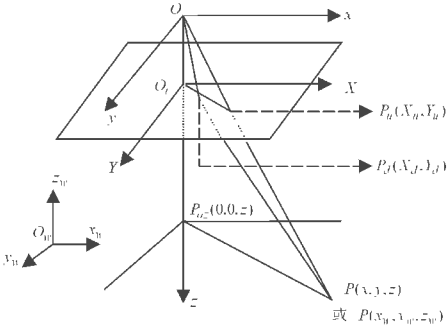


图 1 摄像机模型的基本几何结构
Fig. 1 The basic geometry of the camera model

2.2 由三维世界坐标到计算机图像坐标的变换过程

将物体点的三维坐标 (x_w, y_w, z_w) 变换到图像平面坐标 (X_f, Y_f) 需进行 4 个步骤来完成。

① 三维空间刚体位置变换:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2002-04-22
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (001172)
作者简介: 胡海峰 (1977 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 熊银根; E-mail: isde34@zsu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中 $\mathbf{R}$ 为 3×3 的正交矩阵, $\mathbf{T}$ 为 3×1 的平移矢量。

② 假定 $Z \gg f$, 则由摄像机坐标到理想图像坐标的投影变换:

$$\left. \begin{aligned} X_u &= f \cdot \frac{X}{Z} \\ Y_u &= f \cdot \frac{Y}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

③ 考虑到透镜畸变, 由理想图像坐标到实际图像坐标的变换:

$$\left. \begin{aligned} X_d &= X_u (1 + Kr^2)^{-1} \\ Y_d &= Y_u (1 + Kr^2)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $r^2 = X_u^2 + Y_u^2$, k 为透镜畸变系数。

④ 实际图像坐标到计算机图像 (帧存) 坐标变换:

$$\left. \begin{aligned} X_f &= S_x N_x X_d + X_c \\ Y_f &= N_y Y_d + y_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, (X_c, Y_c) 是计算机图像中心坐标 (即图 1 中 O_i 的坐标), (N_x, N_y) 是图像平面单位距离对应的像素点数, s_x 为不确定尺度因子。

2.3 摄像机需要校准的参数

通过以上几步变换可以看出, 要完整地表述出三维物体的世界坐标与图像坐标的转换关系, 需要确定一些参数, 这就是我们要求的摄像机的内外方位元素。

(1) 外部参数。摄像机外部参数共有 6 个, 它们是相应于旋转矩阵的用欧拉角表示的倾侧角 R_x 、俯仰角 R_y 、旋转角 R_z 以及相应于平移矢量 $\mathbf{T}$ 的 3 个分量 T_x 、 T_y 、 T_z 。

(2) 内部参数。摄像机的内参是与摄像机本身性质有关的参数, 主要包括有效焦距 f 、透镜畸变系数 k 、不确定尺度因子 s_x 、单位距离所对应的像素数 N_x 、 N_y 以及计算机图像中心坐标 X_c 、 Y_c 。

2.4 用 TSAI 方法进行校准

2.4.1 径向投影的平行准则

准则 1 假定通过镜头发生扭曲的只是光线, 因此无论其扭曲的程度如何, $\overline{O_i P_d}$ (见图 1) 的方向不变, 且 $\overline{O_i P_d} // \overline{P_{OZ} P}$ 始终成立。

准则 2 有效焦距 f 的大小不影响 $\overline{O_i P_d}$ 的方向。

准则 3 如果物体世界坐标仅在 x 轴和 y 轴进行旋转和平移, 而在 z 轴进行平移, 则 $\overline{O_i P_d}$ 的方向始终不变。

2.4.2 用投影的平行原则求解摄像机外参
设

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

由式 (1), 得

$$\left. \begin{aligned} x &= r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x \\ y &= r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y \\ z &= r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于 $\overline{O_i P_d} // \overline{P_{OZ} P}$ 平行, 因此有

$$\frac{x}{y} = \frac{X_d}{Y_d} = \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y} \quad (6)$$

上式整理后, 可表示为:

$$\begin{aligned} [x_w Y_d, y_w Y_d, z_w Y_d, Y_d, -x_w X_d, -y_w X_d, -z_w Z_d] \cdot \\ [r_1 T_y, r_2 T_y, r_3 T_y, T_x T_y, r_4 T_y, r_5 T_y, r_6 T_y]^T = X_d \end{aligned} \quad (7)$$

若 $z_w = 0$, 式 (7) 可改写为:

$$\begin{aligned} [x_w Y_d, y_w Y_d, Y_d, -x_w X_d, -y_w X_d] \cdot \\ [r_1 T_y, r_2 T_y, T_x T_y, r_4 T_y, r_5 T_y]^T = X_d \end{aligned} \quad (8)$$

在式 (7) 和式 (8) 中行矢量的数值是已知的, 而列矢量则是要求的, 通常选定 7 个以上的已知点就可以解出 $T_y^{-1} r_1, T_y^{-1} r_2, T_y^{-1} T_x, T_y^{-1} r_4, T_y^{-1} r_5$ 的值。再利用 $\mathbf{R}$ 是正交矩阵的性质, 得出其余外参的数值, 这就是利用径向投影平行原则将外参分离的方法。

2.4.3 TSAI 算法进行校准的计算过程 用 TSAI 算法进行校准通过两个阶段进行。

第 1 阶段: 计算摄像头的方向和位置:

- (1) 计算图像的坐标 (X_d, Y_d) ;
- (2) 计算 $T_y^{-1} r_1, T_y^{-1} r_2, T_y^{-1} T_x, T_y^{-1} r_4, T_y^{-1} r_5$;
- (3) 计算出 $r_1, \dots, r_9, T_x, T_y$ 等参数值。

第 2 阶段: 计算有效焦距长度 f , 摄像镜头扭曲系数 k 和摄像头的 z 方向位置 T_z

(4) 忽略 k , 利用线性方程计算出 f 和 T_z 的近似值;

(5) 计算 k, f 和 T_z 的精确解: 设定 $k = 0$, 将上面求出的 f 和 T_z 的解作为估计值, 利用 Levenberg-Marquardt 最优算法求出 k, f 和 T_z 的精确值。

上面的两个阶段就是利用 TSAI 算法进行校准的基本步骤, 可以看出利用该算法可以快速简便地求出摄像机的内外参数。

3 三维视觉校准实验

我们采用了 752×582 的 CCD 摄像器件来获取图像 (见图 2), 摄像的基本配置可参见图 3, 将同一平面的空间点平移 3 次就可以得到非共面点, 利

用这些已知点，论文进行了共面点 3 个参数优化校准、共面点全参数优化校准、不共面点 3 个参数优化校准和不共面点全参数优化校准等 4 组实验。

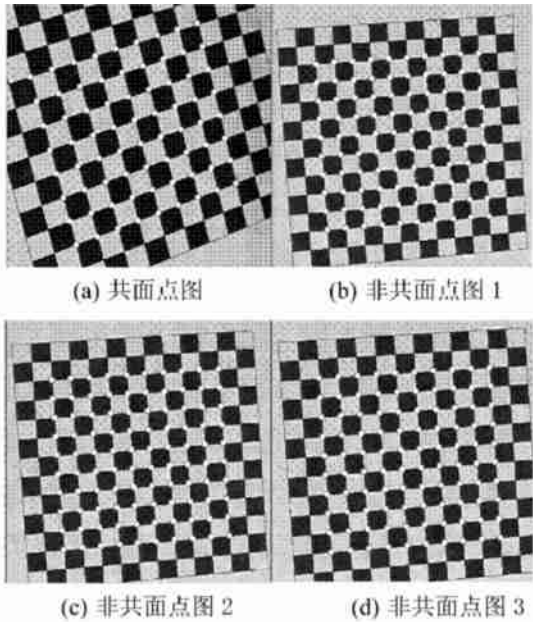


图 2 实验图像
Fig 2 The expeimental images

实际校准过程中，把图像中的部分角点(图 2 (a)–(d)中已用圆圈标出)抽取出来，求出它们在图像平面的坐标，并利用已知的空间三维坐标，构造校准数据。实验中，方格角点间的实际距离为 $a=10\text{ mm}$ 。在非共面校准中，棋盘的平移距离为 $d=16\text{ mm}$ 。校准得到的实验结果如表 1 所示。

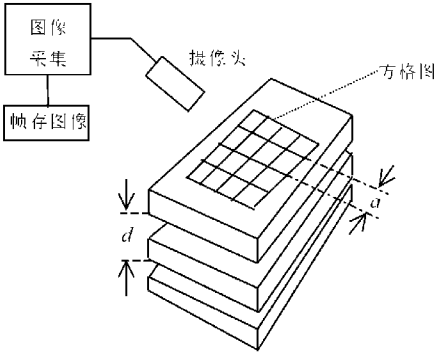


图 3 利用多个非共面点进行摄像机校准的设置图
Fig 3 The diagram of expeimental setup for camera calibration using non-coplanar set of points

表 1 摄像机校准实验结果

Tab 1 Experimental results of camera calibration

参 数	共面校准		非共面校准	
	三参数校准	全参数校准	三参数校准	全参数校准
f/mm	16.997790	16.908984	19.921739	16.227655
k	$-8.021834\text{ e-}4$	$9.81724\text{ e-}5$	$-5.156001\text{ e-}3$	$-1.423\text{ e-}4$
T_x/mm	-44.005505	-50.800477	-70.893706	-72.054639
T_y/mm	81.443533	42.147786	83.734144	84.644936
T_z/mm	542.742122	546.529689	876.346340	710.972150
$R_x/(\text{^\circ})$	-169.826894	-165.274183	-177.926131	-177.299429
$R_y/(\text{^\circ})$	-26.132205	-25.082958	-7.858353	-8.075532
$R_z/(\text{^\circ})$	-19.256885	-21.182796	-4.224142	-4.225359
C_x/pix	256.000000	287.737255	256.000000	264.327561
C_y/pix	256.000000	446.920929	256.000000	252.695651
s_x	1.000000	1.000000	1.017233	1.017193
T_z/f	31.930158	32.321852	43.989449	43.812408
校准误差	1.031872	0.103	4.192648	0.496267

4 结 论

本文在传统的针孔摄像机模型基础上，介绍了利用 TSAI 法进行摄像机校准的基本方法，并根据实际情形对 752×582 的 CCD 摄像器件在共面和不共面等四种情况下进行了内、外方位元素的计算，从实验结果可以看出利用 TSAI 法进行校准可以简便快速得到实验结果。相对于传统的繁复的校准算法，TSAI 法可以在一定精度范围内取而代之。

参考文献:

[1] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry[J] . Proc Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1971; 1–18.

[2] FAUGERAS O D, TOSCANI G. Camera calibration for 3D computer vision[J] . Proc. International Workshop on Industrial Application of Machine Vision and Machine Intelligence, 1987; 240–247.

[3] ZHANG Z. A Flexible new technique for camera calibration [J] . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.

[4] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J] . IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323–344.

The Determination of the Intrinsic and
Extrinsic Parameters of Camera for 3D Machine Vision

HU Hai feng, XIONG Yin gen

(Department of Electronics and Communication Engineering,
Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: TSAI algorithm is adopted to calibrate a stereo vision system. Based on parallelism of the radial projection, the optical characteristics (intrinsic parameters) and/or the 3D position and orientation of the camera frame relative to a certain world coordinate system (extrinsic parameters) can be quickly and efficiently calculated. A 752×582 CCD camera is calibrated in the coplanar situation and non coplanar situation and four group data is acquired. The error are also presented. It is proved through the experiment data and error results that the TSAI algorithm is correct and reliable.

Key words: TSAI algorithm; camera calibration; stereo vision

· 简 讯 ·

中山大学获国家基金再上新台阶

据 2002 年度国家自然科学基金项目评审结果的公布, 中山大学获准 114 项, 资助金额 2 548. 5 万元, 其中面上项目 107 项, 经费 1 935. 5 万元; 主持重点项目 3 项; 经费 430 万元, 另外参加重点项目 3 项; 国家杰出青年科学基金 2 项, 经费 135 万元; 重大研究计划 2 项, 经费 48 万元。在全国资助单位排名榜上位居第七。

在获准项目中, 理科获准 68 项, 资助金额 1 635. 5 万元, 其中面上项目 62 项, 经费 1 102. 5 万元, 主持重点项目 3 项, 经费 430 万元; 另外参加重点项目 3 项; 国家杰出青年科学基金 1 项, 经费 55 万元; 重大研究计划 2 项, 经费 48 万元。

2002 年中山大学理科获准的面上项目比 2001 年(最高年份)的 53 项增加 9 项, 经费增长 20%。

在中山大学理科获准资助单位中, 生命科学学院获准 16 项, 资助金额 241 万元, 居全校第一; 其次是理工学院, 获准 12 项, 资助金额 237 万元。

(本刊通讯员)