

文章编号 1004-924X(2004)06-0626-06

一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法

陈 刚,车仁生,叶 东,黄庆成

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:给出了一种基于立体标定模板的双目视觉摄像机内、外部参数现场标定方法。该方法采用理想小孔模型忽略摄像机镜头的非线性畸变,把透视变换矩阵中的元素作为未知数,在已知一组三维空间特征点坐标及其对应的图像点坐标时,利用线性算法求解出透视变换矩阵中的各个元素,进而得到所需的参数。最后采用立体标定模板对该标定算法进行了实验验证,用标定完成的立体视觉传感器对已知长度进行测量,相对精度达到了 0.02%,取得了较为理想的结果。结果表明:该方法由于无需迭代,因此计算速度快,在测量现场只需摆放一次标定模板即可完成标定,可高精度地实现摄像机内、外部参数的现场标定。

关键词:立体视觉;摄像机标定;立体模板;坐标测量

中图分类号:TP212.14 **文献标识码:**A

Stereo vision sensor field calibration method based on volume template

CHEN Gang ,CHE Ren-sheng ,YE Dong , HUANG Qing-cheng

(*Department of Automatic Measurement and Control ,
Harbin University of Technology , Harbin 150001 , China*)

Abstract : A volume template-based method is proposed for the field calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of stereo vision sensor , which adopts an ideal pin-hole model that ignores the nonlinear distortion of the cameras. Taking the transform matrix elements as unknown , when the group of 3-D target points coordinates and their image coordinates are known , they can be used in a linear algorithm to work out the unknown elements and the parameters needed. In the end , a volume calibration template is used to calibrate a stereo vision sensor , which measures a known length. The relative precision is up to 0.02 % . Experimental results show that method needs no iteration and has a high operation speed , which needs to put the template only once for the field calibration , cameras ' intrinsic and extrinsic parameters could be calibrated with high precision.

Key words : stereo vision ; camera calibration ; volume template ; coordinates measurement

收稿日期 :2004-09-22 ;修订日期 :2004-10-18.

基金项目 :国家自然科学基金资助项目 (No. 50275040)

1 引 言

立体视觉是计算机视觉领域的一个重要课题,它的目的在于重构场景的三维几何信息,其应用包括移动机器人的自主导航系统,航空及遥感测量,物体三维坐标测量,工业自动化系统等^[1]。

摄像机标定是计算机视觉的基础问题之一。摄像机标定,就是通过建立已知物、像点对应模型,计算出精确的模型参数,这些参数确定了一个点的三维坐标与它在摄像机平面上的投影的图像坐标之间的关系。在基于立体视觉原理的测量方法中,还要确定两个摄像机之间的相对位置和方向,以便由 2D 图像信息得出被测目标的 3D 信息,如测量机械零件的尺寸,确定目标的空间位置等^[2]。可见摄像机标定是计算机视觉系统实现的前提和基础,摄像机标定的精度和可靠程度直接影响系统获取信息、处理信息及输出结果的精确程度。

2 摄像机成像几何模型

从三维空间物体表面上的点的几何位置到图像上该点的相应位置的关系,如图 1 所示,由摄像



图 1 理想线性模型下的标定过程
Fig. 1 Process of calibration based on linear model

机成像几何模型所决定,是由以下几步转换而来:

(1) 从世界坐标到摄像机坐标的变换,如公式(1)。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T, \quad (1)$$

其中,如图 2 所示, R 和 T 分别为从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转变换矩阵和平移变换矩阵。

T 为 2 个坐标原点之间的距离

$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

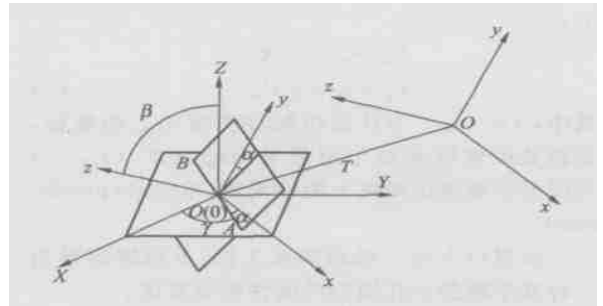


图 2 空间坐标系转换
Fig. 2 Transform of coordinate system

R 可表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(2) 从摄像机坐标到物理图像坐标的变换

像机坐标系 $X_c Y_c Z_c$ 原点为摄像机的镜头光心, Z_c 轴与光轴重合, $X_w Y_w Z_w$ 是世界坐标系, $X_u Y_u$ 为图像物理坐标系,坐标原点在光轴与图像平面的交点,其 X_u, Y_u 轴分别平行于摄像机坐标系的 $X_c Y_c$ 轴。 f 为镜头焦距,可知:

$$\begin{aligned} X_u &= f \frac{X_c}{Z_c} \\ Y_u &= f \frac{Y_c}{Z_c}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, (X_c, Y_c, Z_c) 是 P 点在摄像机坐标系下的三维坐标,而 (X_u, Y_u) 是理想小孔模型下空间点的物理图像坐标。

(3) 从物理图像坐标到计算机图像坐标变换

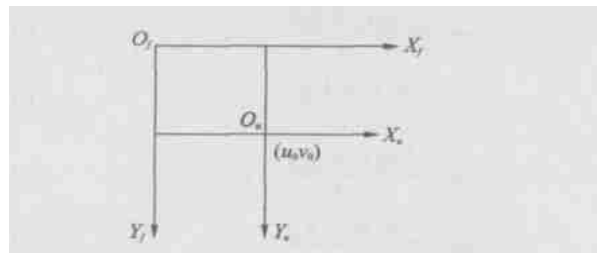


图 3 图像坐标系

Fig. 3 Image coordinate system

如图 3 所示,在图像左上角上定义直角坐标系 $X_f O_f Y_f$, 每一个像素的坐标 (X_f, Y_f) 分别是该像素在计算机帧存数组中的列数和行数。

所以, (X_f, Y_f) 是以像素为单位的图像坐标系的坐标,它与物理图像坐标 (X_u, Y_u) 的关系如下:

$$\begin{aligned} X_f &= u_0 + s_x X_u \\ Y_f &= v_0 + s_y Y_u \end{aligned} \quad (5)$$

其中, (u_0, v_0) 为计算机帧存图像中心的坐标, 也就是摄像机光轴与图像平面的交点, (s_x, s_y) 为图像平面单位距离上的像素数, 单位是 (pixels/mm)。

经过以上的一系列准备工作, 下面将推导出一种基于理想小孔模型的线性标定算法。

3 由摄像机模型建立线性方程组

由以上各式可得到摄像机成像模型:

$$\begin{aligned} X_f &= u_0 + s_x f \frac{r_1 X_w + r_2 Y_w + r_3 Z_w + t_x}{r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + t_z} \\ Y_f &= v_0 + s_y f \frac{r_4 X_w + r_5 Y_w + r_6 Z_w + t_y}{r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + t_z} \end{aligned} \quad (6)$$

分别通分, 合并化简, 得:

$$X_f = \frac{m_{x_1} X_w + m_{y_1} Y_w + m_{z_1} Z_w + m_1}{m_{x_3} X_w + m_{y_3} Y_w + m_{z_3} Z_w + 1} \quad (7)$$

同理, 可得:

$$Y_f = \frac{m_{x_2} X_w + m_{y_2} Y_w + m_{z_2} Z_w + m_2}{m_{x_3} X_w + m_{y_3} Y_w + m_{z_3} Z_w + 1} \quad (8)$$

令

$$\begin{aligned} k_x &= f s_x \\ k_y &= f s_y \end{aligned} \quad (9)$$

则有:

$$m_{x_1} = \frac{u_0 r_7 + k_x r_1}{t_z} \quad (10)$$

$$m_{y_1} = \frac{u_0 r_8 + k_x r_2}{t_z} \quad (11)$$

$$m_{z_1} = \frac{u_0 r_9 + k_x r_3}{t_z} \quad (12)$$

$$m_1 = \frac{u_0 t_z + k_x t_x}{t_z} \quad (13)$$

$$m_{x_2} = \frac{v_0 r_7 + k_y r_4}{t_z} \quad (14)$$

$$m_{y_2} = \frac{v_0 r_8 + k_y r_5}{t_z} \quad (15)$$

$$m_{z_2} = \frac{v_0 r_9 + k_y r_6}{t_z} \quad (16)$$

$$m_2 = \frac{v_0 t_z + k_y t_y}{t_z} \quad (17)$$

$$m_{x_3} = \frac{r_7}{t_z} \quad (18)$$

$$m_{y_3} = \frac{r_8}{t_z} \quad (19)$$

$$m_{z_3} = \frac{r_9}{t_z} \quad (20)$$

经过整合后, 共有 m_{x_1} 等如上 11 个未知参数需求解, 其中隐含摄像机的内、外部参数。

在标定过程中, 选择 6 个 (不共面) 已知世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的点, 经过图像处理得到各点对应的图像坐标 (X_f, Y_f) , 即可得到 12 个方程, 大于未知参数的个数, 则可求出各个未知参数。为减少误差, 在实际求解过程中, 需选择多于 6 个空间点, 使用了坐标精确测定的空间 9 个球作为标定参考点。

4 求解未知参数及参数分解

(1) 求解未知参数将各点世界坐标和图像坐标代入式 (7), (8) 中, 得到一个线性方程组, 应用最小二乘法可以求出各个整合参数 $m_{x_1} \sim m_{z_3}$ 。

(2) 利用 R 为单位正交矩阵的性质, 可以分解出各个内、外部参数利用旋转矩阵 R 的正交性, 有如下的分解方法:

$$\begin{aligned} \text{由 } m_{x_3}^2 + m_{y_3}^2 + m_{z_3}^2 &= \frac{r_7^2 + r_8^2 + r_9^2}{t_z^2} = \frac{1}{t_z^2} \\ \Rightarrow t_z &= \pm \sqrt{\frac{1}{m_{x_3}^2 + m_{y_3}^2 + m_{z_3}^2}} \end{aligned} \quad (21)$$

t_z 一般取正号。

$$\begin{aligned} \text{由 } m_{x_1} m_{x_3} + m_{y_1} m_{y_3} + m_{z_1} m_{z_3} \\ &= \frac{1}{t_z^2} [u_0 (r_7^2 + r_8^2 + r_9^2) + k_x (r_1 r_7 + r_2 r_8 + r_3 r_9)] \\ &= \frac{u_0}{t_z^2}, \text{ 可以推出:} \end{aligned}$$

$$u_0 = t_z^2 (m_{x_1} m_{x_3} + m_{y_1} m_{y_3} + m_{z_1} m_{z_3}) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{由 } m_{x_1}^2 + m_{y_1}^2 + m_{z_1}^2 \\ &= \frac{1}{t_z^2} [u_0^2 (r_7^2 + r_8^2 + r_9^2) + 2k_x u_0 (r_1 r_7 + r_2 r_8 + r_3 r_9) + \\ &\quad k_x^2 (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2)] \\ &= \frac{1}{t_z^2} (u_0^2 + k_x^2), \text{ 可以推出:} \end{aligned}$$

$$k_x = \pm \sqrt{t_z^2 (m_{x_1}^2 + m_{y_1}^2 + m_{z_1}^2) - u_0^2} \quad (23)$$

k_x 取为正

将求得的 t_z 代入 $m_{x_3}, m_{y_3}, m_{z_3}$ 中, 得到

$$\begin{aligned} r_7 &= m_{x_3} t_z \\ r_8 &= m_{y_3} t_z \\ r_9 &= m_{z_3} t_z \end{aligned} \quad (24)$$

再将 t_z, u_0, k_x 及 r_7, r_8, r_9 代入 $m_{x_1}, m_{y_1}, m_{z_1}$ 中,得到

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{m_{x_1} t_z - u_0 r_7}{k_x} \\ r_2 &= \frac{m_{y_1} t_z - u_0 r_8}{k_x} \\ r_3 &= \frac{m_{z_1} t_z - u_0 r_9}{k_x}, \end{aligned} \tag{25}$$

由 R 为单位正交矩阵,易得

$$\begin{aligned} r_4 &= r_3 r_8 - r_2 r_9 \\ r_5 &= r_1 r_9 - r_3 r_7 \\ r_6 &= r_2 r_7 - r_1 r_8, \end{aligned} \tag{26}$$

从而得到旋转矩阵 R 。

由 $m_{x_2}, m_{y_2}, m_{z_2}$ 的表达式,可得

$$\begin{cases} m_{x_2} t_z = k_y r_4 + v_0 r_7 \\ m_{y_2} t_z = k_y r_5 + v_0 r_8 \\ m_{z_2} t_z = k_y r_6 + v_0 r_9 \end{cases}$$

解得

$$v_0 = \frac{(m_{x_2} r_5 - m_{y_2} r_4) t_z}{r_7 r_5 - r_8 r_4}, \tag{27}$$

$$k_y = \frac{(m_{y_2} r_9 - m_{z_2} r_8) t_z}{r_5 r_9 - r_6 r_8}. \tag{28}$$

将 t_z, u_0, k_x 代入 m_1 中,得

$$t_x = \frac{m_1 t_z - u_0 t_z}{k_x}, \tag{29}$$

同理,将 t_z, v_0, k_y 代入 m_2 中,得

$$t_y = \frac{m_2 t_z - v_0 t_z}{k_y}, \tag{30}$$

由已知 s_x, s_y , 则有

$$f = \frac{k_x}{s_x}, \tag{31}$$

多数情况下,在进一步处理时,如计算深度时,将直接用到 k_x, k_y ,无需分解出 f 。

综上所述,由空间 6 个以上不共面的已知点及其对应的图像坐标,可以求出 11 个整合参数,并可按照式(25)至式(31)的顺序依次分解出全部内、外参数。

5 双目立体视觉摄像机标定

在双目视觉中需要通过标定来确定双摄像机之间的相对位置。通常的标定方法是先采用单摄像机的标定方法,分别得到两个摄像机的内、外参

数,再通过同一世界坐标系中一组标定来建立两个摄像机之间的位置关系。

如果两个摄像机 C_1, C_2 的外参数分别用 R_1, T_1 和 R_2, T_2 表示,这些外参数分别表示两个摄像机与世界坐标系之间的相对位置。对任意一点 P ,设它在世界坐标系, C_1 坐标系和 C_2 坐标系下的坐标分别为 X_w, X_{c_1}, X_{c_2} , 则有:

$$\begin{aligned} X_{c_1} &= R_1 X_w + T_1 \\ X_{c_2} &= R_2 X_w + T_2, \end{aligned} \tag{32}$$

消去 X_w 后得:

$$X_{c_1} = R_1 R_2^{-1} X_{c_2} + T_1 - R_2^{-1} T_2, \tag{33}$$

可以看出,两摄像机之间的几何位置关系可用 R, T 表示:

$$\begin{aligned} R &= R_1 R_2^{-1} \\ T &= T_1 - R_2^{-1} T_2, \end{aligned} \tag{34}$$

所以,首先对两个摄像机分别标定,得到 R_1, T_1 和 R_2, T_2 ,则它们的相对几何位置关系 R 和 T 可以由式(34)计算。基线长度 B 可由式(35)计算:

$$B = \sqrt{t_x^2 + t_y^2 + t_z^2}, \tag{35}$$

而两摄像机光轴夹角可由 R 计算,有:

$$\begin{aligned} &= -\arcsin r_3 \\ &= \arcsin \frac{r_6}{r_9} \\ &= \arcsin \frac{r_2}{r_1}, \end{aligned} \tag{36}$$

6 实验验证及精度

本文采用如图 4 所示的立体标定架对前述标定方法进行了实验验证。

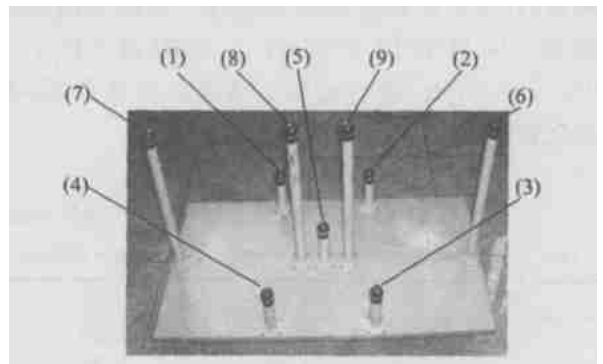


图 4 立体标定架
Fig. 4 Volume calibration templet

首先通过三坐标测量机精确标定标定架上的每个特征点的三维世界坐标,特征点的世界坐标系是以球 5 为原点,即球 5 的三维世界坐标为 $(0,0,0)$ 。其中 1,2,3,4 四个球确定 XY 平面,其 X 坐标轴沿着球 1 和球 2 相对于世界坐标系的中垂线的方向, Y 坐标轴沿着球 7 的方向, Z 轴垂直于平板。将需要标定的两个摄像机分别固定在两个三脚架上,他们之间有一定的角度和距离,通过图像采集卡将其与两台计算机相连。标定架放在像机的视场内,实验装置如图 5 所示。为了对标定算法的稳定性和标定精度进行验证,在该实验中共进行了 5 次独立标定,其标定结果如表

1 所示。结果显示,各次标定的基线 B 距离最大偏差为 0.108 mm。

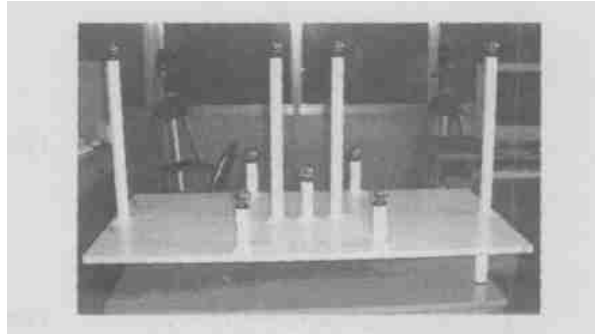


图 5 标定模板与像机摆放位置

Fig. 5 Position of volume template and cameras

表 1 摄像机外参数

Tab. 1 Outside parameter of the camera

单位: mm

次数	1	2	3	4	5
r_1	0.478 9	0.478 6	0.478 4	0.478 6	0.478 1
r_2	- 0.862 2	- 0.862 5	- 0.862 5	- 0.862 5	- 0.862 7
r_3	- 0.069 5	- 0.069 3	- 0.069 4	- 0.069 2	- 0.069 2
r_4	0.872 1	0.872 3	0.872 4	0.872 4	0.872 5
r_5	0.488 7	0.488 4	0.488 3	0.488 3	0.488 0
r_6	0.151 4	0.150 9	0.151 5	0.150 6	0.151 5
r_7	- 0.100 2	- 0.099 8	- 0.100 4	- 0.099 7	- 0.100 5
r_8	0.133 1	0.132 6	0.133 0	0.132 5	0.132 8
r_9	0.986 0	0.986 1	0.986 0	0.986 2	0.986 0
T_x (mm)	1 762.351	1 762.267	1 762.335	1 762.203	1 762.322
T_y (mm)	5.776	5.891	5.698	5.883	5.658
T_z (mm)	1 041.252	1 041.202	1 041.242	1 041.164	1 041.234
B (mm)	2 046.978	2 046.881	2 046.959	2 046.806	2 046.944

为了验证标定结果的正确性,利用标定完成的双目立体视觉传感器对立体标定架上的球进行测量,计算出标定架上的 6 点与 7 点的空间直线距离,并与它们之间的已知距离 ($D_{6,7} = 937.096 2$ mm) 进行比较。结果如表 2 所示,其最大误差为 0.23 mm。

表 2 空间距离反推结果 单位: mm

Tab. 2 Resault deduced reversally from space distance

次数	$D_{6,7}$	误差
1	937.31	0.21
2	936.94	0.16
3	936.89	0.21
4	937.33	0.23
5	937.29	0.19
平均值	937.15	0.20

7 结 论

通过实验验证,使用该方法标定后的双目视觉传感器的测量相对精度达到了 0.02%,证明了该算法的正确性。该方法无需迭代,因此运算速度较快。标定过程中固定好像机位置后,只需在两个 CCD 像机的共同视野中摆放一次立体标定模板即可完成立体视觉传感器的标定。该标定方法已经用于大空间视觉坐标测量系统中双目立体视觉传感器的标定,取得了良好的效果,在工业生产、检测领域中需要进行快速标定的场合下具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 张宗华,彭翔.实物表面三维相位图定标的研究[J].仪器仪表学报,2000,21(5):539-541.
ZHANG Z H, PENG X. The research on calibration of the object's 3D phase map[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2000, 21(5):539-541. (in Chinese)
- [2] 贾云得.机器视觉[M].北京:科学出版社,2000:164-166.
JIA Y D. *Robot vision*[M]. Beijing: Science Press, 2000:164-166. (in Chinese)
- [3] CHEN G, YU ZH J, CHE R SH, et al. A novel method of measurement for large space 3-D coordinate by binocular code matching[J]. *SPIE*, 2002, 4921:20-27.
- [4] CHEN G, YU ZH J, CHE R SH, et al. Novel Measurement of target point based on binocular code matching[R]. 2nd International Symposium on Instrumentation Science and Technology. 2-293-2-297, 2002.
- [5] HUNG Y Y, LIN L, SHANG H M, et al. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement[J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(1):143-149.
- [6] 姜凯,陈海霞.基于模板抽样的快速图像匹配算法[J].光学精密工程,2004,12(3):311-315.
JIANG K, CHEN H X. Fast image matching algorithm based on template sampling[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3):311-315. (in Chinese)
- [7] 曹万鹏,车仁生,陈刚.基于特征点双目视觉三维运动估计方法[J].光学精密工程,2003,11(4).
CAO W P, CHE R SH, CHEN G. Binocular vision 3D motion estimation methods based on featuring points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4):. (in Chinese)
- [8] 周富强,郝继贵,杨学友. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1):96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y. A high speed CCD camera calibration technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(1):96-100. (in Chinese)
- [9] 张业鹏,何涛,文昌俊.机器视觉在工业测量中的应用与研究[J].光学精密工程,2001,9(4):324-329.
ZHANG Y P, HE T, WEN CH J. Applications of machine vision in industry inspection and its research[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4):324-329. (in Chinese)

作者简介:陈刚(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学讲师,攻读博士学位,主要研究方向为视觉坐标测量。