

文章编号 1004-924X(2000)01-0096-05

CCD 摄像机快速标定技术

周富强, 郝继贵, 杨学友, 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在视觉检测系统中, 针对视觉传感器数量多, 且每个摄像机需标定的内部参数及外部参数较多的特点, 提出了一种新的简单的快速摄像机标定方法。分析了摄像机的各个关键参数, 采用了全线性标定方法和矢量分析法, 逐步求出 CCD 摄像机的参数。该方法具有标定速度快、精度较高、实用和算法性能分析容易等优点, 适用于一般视觉检测系统的摄像机参数的标定, 尤其是大型视觉检测系统中多视觉传感器的摄像机参数的标定。实际结果表明, 摄像机标定误差优于 0.05mm。

关键词: 摄像机标定; 摄像机参数; 矢量分析法

中图分类号: TN 948.41 **文献标识码:** A

1 引言

视觉检测具有非接触、动态响应快、量程大、可直接与计算机联接等优点, 广泛地应用于工件的完整性、表面平整度的测量; 微电子器件(IC 芯片、PC 板、BGA) 等的自动检测; 软质、易脆零部件的检测; 各种模具三维形状的检测; 机器人的视觉导引; 以及大型工件(如白车身) 空间三维尺寸的自动检测等。视觉检测的基本任务就是要实现物体几何尺寸的精确检测或对物体完成精确定位。这其中涉及到一个基本问题, 即摄像机标定, 包括摄像机模型的建立, 模型中各参数的精确确定。本文提出了一种用于白车身视觉检测系统中简单的摄像机标定方法。考虑到该测量系统中摄像机较多(多于 60 个 CCD 摄像机), 且用于测量大尺寸(测量范围为 6m 左右)。采用了全线性标定方法, 这种方法只利用线性方程(组)和矩阵计算方法, 分解各参数, 一次不求较多的未知参数, 这样可以使算法更快、更实用, 算法性能分析较易进行。

2 摄像机模型及需要标定参数

2.1 小孔摄像机模型

假定摄像机模型为理想的针孔透视变换模型, 不考虑透镜的畸变, 采用较好的光学镜头, 获得的精度足以满足像白车身检测一类的大型尺寸检测系统。建立如图 1 所示的摄像机模型。

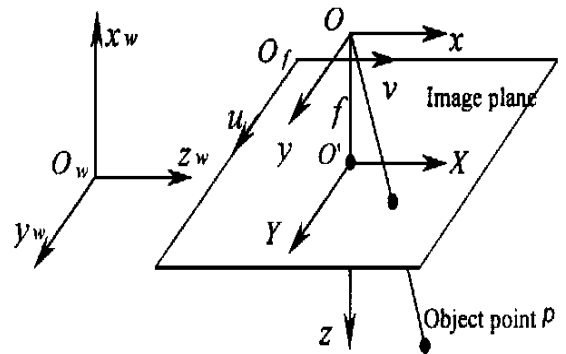


Fig. 1 Ideal pinhole camera model

设 (x_w, y_w, z_w) 是三维世界坐标系中物体点 P 的三维坐标, (x, y, z) 是同一点 P 在摄像机坐标系(定义如图 1)中的三维坐标, 摄像机坐标系定义为: 中心在 O 点(光学中心), Z 轴与光轴重合。 OXY 是中心在 O 点(光轴 Z 与图像平面的交点)平行于 x, y 轴的图像坐标系。定义 OXY 平面为参考像面, 则物空间点与参考像面间构成理想的透视对应。 f 为以参考像平面构成的理想成像系统的焦距。图像在计算机中的坐标系 O_{fuv} 的单位是像素 (pixels), 设 (u_0, v_0) 为计算机图像中心坐标(即 O 点的帧存坐标)。则 $Oxyz$ 空间点到参考像面的透视变换为:

$$\rho = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

设 $O_w x_w y_w z_w$ 与 $O_x y z$ 间位置关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

参考像面坐标到计算机图像坐标变换:

$$\begin{cases} u = N_x X + u_0 \\ v = N_y Y + v_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fN_x r_1 + r_7 u_0 & fN_x r_2 + r_8 u_0 & fN_x r_3 + r_9 u_0 & fN_x t_x + t_z u_0 \\ fN_y r_4 + r_7 v_0 & fN_y r_5 + r_8 v_0 & fN_y r_6 + r_9 v_0 & fN_y t_y + t_z v_0 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 需要标定参数

图 1 中物体点从世界坐标系到摄像机三维坐标系(见式(2))的平移坐标和旋转变换的参数为外部参数,共 12 个,因旋转矩阵必须满足 6 个正交约束条件,实际上仅 6 个外部参数需标定。

因为摄像机的透镜可以被转动和拆卸,所以 CCD 面阵安装并不能保证与透镜的光轴为中心,且图像采集数字化的窗口的中心不一定与光学中心重合,这些因素造成了实际中心与图像帧存中心不重合。所以对三维视觉来说,必须精确标定摄像机的光学中心。CCD 驱动信号经采集卡采样,水平像元的等效间距也要发生变化,所以需要标定图像的纵横比。由式(4)可知,实际要标定的内部参数为有效焦距 f , x 方向比例系数 N_x 、图像平面原点的计算机坐标 (u_0, v_0) 其四个内部参数。 y 方向的比例系数 N_y 已知,由硬件厂商给出。

$$\left. \begin{aligned} N_x (r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + t_x) f + (r_7 x_w + r_8 x_w + r_9 z_w + t_z) u_0 &= u (r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z) \\ N_y (r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + t_y) f + (r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z) v_0 &= v (r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + t_z) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

如有 m 组对应点,利用式(5)可构成 $2m$ 个关于 f, u_0, v_0 的线性方程。通过线性方程求解可得 f, u_0, v_0 。

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_5 & d_6 & d_7 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1 + r_7 u_0)/q & (r_2 + r_8 u_0)/q & (r_3 + r_9 u_0)/q & (t_x + t_z u_0)/q \\ (r_4 + r_7 v_0)/q & (r_5 + r_8 v_0)/q & (r_6 + r_9 v_0)/q & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由(5)可得:

$$\begin{bmatrix} v x_w & v y_w & v z_w & v & -u v_w & -u y_w & -u z_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_7 \end{bmatrix} = u \quad (7)$$

其中 (N_x, N_y) 为图像平面上单位距离上的像素点数。

由式(1)~(3)可得世界坐标系中点到计算机图像坐标的透视变换关系为

3 参数标定

对 CCD 面阵摄像机而言,CCD 面阵上相邻两行像元的间距已知,但 x 方向的比例系数受时序及采样的影响,将是不确定的,但一经标定,又是不易变化。因焦距同时在 X 和 Y 方向上放缩图像,假定 $N_y = 1$,则此时 N_x 代表图像的纵横比。因此,垂直拍摄一个圆环,然后计算水平方向和垂直方向上的直径比,就可求得 N_x 。实际 X 方向的比例系数为 N_x 与 Y 方向实际比例系数的乘积。

下面标定其他参数时分如下两种情况: 1 $O_x y z$ 与 $O_w x_w y_w z_w$ 间关系已知。2 $O_x y z$ 与 $O_w x_w y_w z_w$ 间关系未知。下面分别讨论。

3.1 情形一: $O_x y z$ 与 $O_w x_w y_w z_w$ 间关系已知

由(4)可得

3.2 情形二: $O_x y z$ 与 $O_w x_w y_w z_w$ 间关系未知

令 $t_y + t_z v_0 = q, u_0 = u_0/(fN_x), v_0 = v_0/(fN_y)$, 且当 $q \neq 0$ 时,引入矩阵 D 。

由 N 对对应点可得 N 个线性方程, 解此线性方程组, 求得 $d_1 \sim d_7$

由旋转矩阵的单位正交性, $r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 = 1$, $r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 = 1$, $r_7^2 + r_8^2 + r_9^2 = 1$, $r_1 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_6 = 0$, $r_1 r_7 + r_2 r_8 + r_3 r_9 = 0$, $r_4 r_7 + r_5 r_8 + r_6 r_9 = 0$, 由式(5)可得

$$\left. \begin{aligned} A &= d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 = (1 + u_0^2)/q^2 \\ B &= d_5^2 + d_6^2 + d_7^2 = (1 + v_0^2)/q^2 \\ C &= d_1 d_5 + d_2 d_6 + d_3 d_7 = u_0 v_0 / q^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$\left(\frac{1}{q}\right)^2 - (A + B) \frac{1}{q^2} + AB - C^2 = 0 \quad (9)$$

$$A + B > \sqrt{(A - B)^2 + 4C^2}, \text{ 且 } \frac{1}{q^2} = \frac{A + B}{2}, \text{ 则 } \frac{1}{q^2} = \frac{A + B - \sqrt{(A - B)^2 + 4C^2}}{2}. \text{ 由于 } f > 0,$$

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot d_1 \cdot q & f \cdot d_2 \cdot q & f \cdot d_3 \cdot q & f \cdot d_4 \cdot q \\ f \cdot d_5 \cdot q & f \cdot d_6 \cdot q & f \cdot d_7 \cdot q & f \cdot q \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于 $d_1 \sim d_7, q, r_7, r_8, r_9$ 已知, 利用 N 对点可得关于 f, t_z 的线性方程组, 解方程可得 f, t_z 。如果 $f < 0$ 或 $t_z < 0$, 则让 $u_0 < 0$ 重新求 r_7, r_8, r_9 。

由此全部求得 $r_1 \sim r_9, t_x, t_y, t_z$, 及 f, u_0, v_0 。

$$\begin{aligned} r_1 &= d_1 \cdot q - u_0 \cdot r_7, r_2 = d_2 \cdot q - u_0 \cdot r_8, \\ r_3 &= d_3 \cdot q - u_0 \cdot r_9, t_x = d_4 \cdot q - u_0 \cdot r_z, \\ r_4 &= d_5 \cdot q - v_0 \cdot r_7, r_5 = d_6 \cdot q - v_0 \cdot r_8, \\ r_6 &= d_7 \cdot q - v_0 \cdot r_9, t_y = q - v_0 \cdot t_z, \\ u_0 &= u_0 \cdot f N_x, v_0 = v_0 \cdot f N_y \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_i &= (r_1 \cdot x_{wi} + r_2 \cdot y_{wi} + r_3 \cdot z_{wi} + t_x) - \frac{(u - u_0)}{N_x f} \cdot (r_7 \cdot x_{wi} + r_8 \cdot y_{wi} + r_9 \cdot z_{wi} + t_z) \\ \Delta y_i &= (r_4 \cdot x_{wi} + r_5 \cdot y_{wi} + r_6 \cdot z_{wi} + t_y) - \frac{(v - v_0)}{N_y f} \cdot (r_7 \cdot x_{wi} + r_8 \cdot y_{wi} + r_9 \cdot z_{wi} + t_z) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

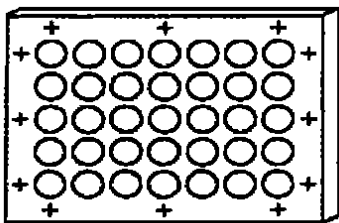


Fig 2 Target for calibration

实验是利用双目视觉传感器进行的。首先利用上述标定方法获取左右两台摄像机的各个参数, 然后经坐标变换获得两摄像机之间的位置关系, 最后测量孔靶上的多个孔的位置并求得两孔

$z > 0$ 满足, 则 $(d_1/q) \cdot x_w + (d_2/q) \cdot y_w + (d_3/q) \cdot z_w + (d_4/q)$ 与 u 的符号一致, 可确定 q 的符号。

$$\text{由(8)式可得 } u_0 = \pm \sqrt{A q^2 - 1}, v_0 = \pm \sqrt{B q^2 - 1}$$

令 $\overline{R_1} = (r_1 \ r_2 \ r_3), \overline{R_2} = (r_4 \ r_5 \ r_6), \overline{R_3} = (r_7 \ r_8 \ r_9), \overline{D_1} = (d_1 \ d_2 \ d_3), \overline{D_2} = (d_5 \ d_6 \ d_7)$, 则有: $\overline{D_1} \cdot \overline{R_3} = d_1 r_7 + d_2 r_8 + d_3 r_9 = u_0/q, \overline{D_2} \cdot \overline{R_3} = d_5 r_7 + d_6 r_8 + d_7 r_9 = v_0/q, (\overline{D_1} \times \overline{D_2}) \cdot \overline{R_3} = (d_2 d_7 - d_3 d_6) r_7 - (d_1 d_7 - d_3 d_5) r_8 + (d_1 d_6 - d_2 d_5) r_9 = 1/q^2$ 。假定 $u_0 > 0$, 解此三元一次方程组可得 r_7, r_8, r_9 (满足 $\overline{D_1} \times \overline{D_2} \cdot \overline{R_3} = 1/q^2$)。有解)。

利用(5)、(6)得

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot d_1 \cdot q & f \cdot d_2 \cdot q & f \cdot d_3 \cdot q & f \cdot d_4 \cdot q \\ f \cdot d_5 \cdot q & f \cdot d_6 \cdot q & f \cdot d_7 \cdot q & f \cdot q \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 实验结果

实验所用为 512 像素 \times 512 像素的 CCD 摄像机 (M TV -1881CB) 和 25mm 的 COM PU TAR TV 镜头。标定点列由一个平面孔靶和一个一维工作台产生。标定靶标如图 2 所示。

定义标定误差为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_i &= (r_1 \cdot x_{wi} + r_2 \cdot y_{wi} + r_3 \cdot z_{wi} + t_x) - \frac{(u - u_0)}{N_x f} \cdot (r_7 \cdot x_{wi} + r_8 \cdot y_{wi} + r_9 \cdot z_{wi} + t_z) \\ \Delta y_i &= (r_4 \cdot x_{wi} + r_5 \cdot y_{wi} + r_6 \cdot z_{wi} + t_y) - \frac{(v - v_0)}{N_y f} \cdot (r_7 \cdot x_{wi} + r_8 \cdot y_{wi} + r_9 \cdot z_{wi} + t_z) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

之间的距离与实际值进行比较。

左右两台摄像机的标定点列由同一坐标系的点组成, 各取 180 点, 其标定结果如下:

Table 1 Calibration error		unit: mm		
item	$ \Delta x_i _{av}$	$ \Delta y_i _{av}$	$ \Delta x_i _{max}$	$ \Delta y_i _{max}$
Left camera	0.019	0.023	0.037	0.048
Right camera	0.015	0.026	0.045	0.036

标定后双目传感器测量孔靶上多个孔心坐标, 然后求出孔间距离并与实际值相比较。测量比对结果如表 2。

Table 2 Measurement results for binocular vision sensor

No. points	Coordinate x	Coordinate y	Coordinate z	Distance to point 1	Real distance	error	
I	1	- 0 010	10 951	418 844	0 000	0 000	0 000
	2	- 8 825	10 826	420 792	9 028	9 000	0 028
	3	- 17 639	10 716	422 539	18 014	18 000	0 014
	4	- 26 387	10 593	424 576	26 995	27 000	- 0 005
II	1	- 0 052	3 001	418 631	0 000	0 000	0 000
	2	- 8 778	2 839	420 694	8 967	9 000	- 0 034
	3	- 17 616	2 734	422 653	18 019	18 000	0 019
	4	- 26 389	2 597	424 701	27 030	27 000	0 030
III	1	- 0 090	- 5 009	418 621	0 000	0 000	0 010
	2	- 8 823	- 5 244	420 590	8 956	9 000	- 0 044
	3	- 17 677	- 5 264	422 571	18 026	18 000	0 026
	4	- 26 485	- 5 387	424 494	27 043	27 000	0 043

实验结果表明, 本文所述标定方法可以获得较高精度摄像机参数, 足以满足大型视觉检测系统所要求的精度。同时也适应于一般精度要求不高且标定任务较多的场合。

5 结 论

通过与其它考虑光学系统畸变, 采用非线性

搜索法^[1,2]、线性与非线性相结合的方法^[3,4]等摄像机标定相比较, 当畸变很小的时候, 本文所述方法同 Tsai^[5]的“两级”法精度相当, 但 Tsai 的非共面标定方法中少用了旋转矩阵的一个正交约束条件, 所求旋转矩阵不正交。而且该方法的算法更快、更实用, 算法性能分析特别适合于大型视觉检测系统中多个摄像机的快速标定。

参考文献:

- [1] Faig W. Calibration of close-range photogrammetry system: mathematical formulation [J]. Photometric Eng Remote Sensing, 1975, 41(12): 1479-1486
- [2] Sobel I. Calibrating computer controlled cameras for perceiving 3D scenes[J]. Artificial Intelligence, 1974, 5: 185-198
- [3] 段发阶, 张健新, 叶声华. CCD 摄像机参数标定新技术[J]. 计量学报, 1997, 18(4): 296-299
- [4] Grosky W I, Tamburino L A. A unified approach to linear camera calibration problem [J]. IEEE Trans, On PAM F-12, 1990, 663-671.
- [5] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[A]. In proc IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. Miami Beach, FL: 1986: 364-374

A high speed CCD camera calibration technique

ZHOU Fu-qiang, ZHU Ji-gui, YANG Xue-you, YE Sheng-hua

(State Key Lab of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University 300072, China)

Abstract A new, simple and high speed CCD camera calibration procedure intended for a vision inspection application, where many intrinsic and extrinsic parameters of every CCD camera are to be determined, is presented. The key parameters of CCD camera are gradually derived by linear algorithm and vector analysis. This camera calibration technique is proved to be accurate and high

speed. It is practical and simple for algorithm analysis, and is applied to camera parameters calibrating for many CCD cameras in normal vision inspection system, especially for multi-vision sensors in large-sized vision inspection system. The calibration error is better than 0.05 mm.

Key words: camera calibration; camera parameters; vector analysis method

作者简介: 周富强(1972-), 男, 四川省南江县人。1994年毕业于天津大学精密仪器系, 获学士学位。1997年获天津大学工学硕士学位, 现在天津大学测试计量技术及仪器专业攻读博士学位。从事实时视觉检测技术的研究。

郝继贵(1970-), 男, 安徽省无为县人。工学博士, 副教授。主要从事视觉检测技术的研究。

杨学友(1949-), 男, 江西省南昌人。教授。主要从事现场计算机控制及视觉检测技术的研究。

叶声华(1934-), 男, 湖北省沙市人。教授, 博士生导师。主要从事激光及光电检测及机器视觉检测技术的研究。曾获4项国家级奖和16项部委级奖, 国家“五·一劳动奖章”, “宝钢优秀教师特等奖”等多项奖励。