

直线型激光测量系统中摄像机的标定方法

刘江, 孙观宏, 李忠涛
(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对用于逆向工程的直线型激光测量系统, 提出一种新的 CCD 摄像机标定方法。该方法首先调整摄像机镜头角度, 使摄像机坐标系平行于世界坐标系, 从而简化标定过程, 然后对测量系统中的参数进行标定。

关键词: 参数标定; 摄像机坐标系; 世界坐标系; 物象放大系数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Camera Calibration Technique for Linear-laser Measurement System

LIU Jiang, SUN Guan-hong, LI Zhong-tao
(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presents a new method for camera calibration in linear-laser measurement system for reverse engineering. In the method the angle of the camera lens are adjusted to make coordinate of the camera parallel to that of the world in order to simplify the process of calibration, and then the parameters of the measurement system are calibrated.

Key words: parameter calibration; camera coordinate; world coordinate; scale factor

1 引言

在基于机器视觉的三维测量系统中, 测量效果的好坏很大程度上取决于对于测量系统中摄像机标定的准确性。所以长期以来, 摄像机的调整及其参数的标定成为三维机器视觉测量系统中最为关注的问题。广义上摄像机标定方法可分为3种: 传统标定法、基于主动视觉标定法和自标定法。传统的 Tsai 两级标定法, 相对于另外两种方法, 可以获得较高的精度, 更好地满足三维测量中摄像机标定的要求, 但是, 要通过建立标定板上特征点的三维坐标与其图像点的对应关系作为标定的基础数据(输入条件), 进而计算摄像机的内外参数, 所以标定过程费时费力。20世纪90年代初, Faugeras, Luong, Maybank 等首先提出了自标定的概念。摄像机自标定方法不依赖于标定参照物, 其利用获得的多帧图像

信息综合分析而得到摄像机的内外参数。这种方法标定过程复杂, 不宜用于实时性要求较高的场合, 并且其最大的不足是鲁棒性不足^[1]。

本文针对用于逆向工程的直线型激光测量系统, 提出一种新的 CCD 摄像机标定方法。该方法简单可行, 可以应用于各种机器视觉测量系统中。

2 测量系统

本文涉及的机器视觉测量系统如图1所示。测量系统由水平测量机构、垂直测量机构和基准转台组成, 水平和垂直机构中均包括一个 CCD 摄像头和一个直线型激光器。测量时, 将被测物体置于转台上, 转台旋转, 激光器 1, 2 分别向物体顶面、侧面投

作者简介: 刘江, 男, 教授, 长期从事模具设计和逆向工程方面的研究。

收稿日期: 2007-10-06

射直线型激光,摄像机1、2分别采集相应的图像。提取图像中的激光线形,根据线形的变形情况最终得到被测物体表面数据。

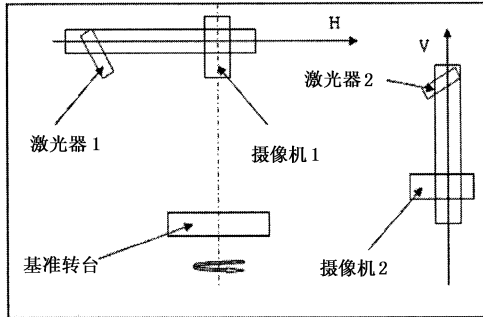


图1 测量系统示意图

3 摄像机标定的数学模型

3.1 测量参数

测量系统正常工作的前提是对系统进行正确标定。标定的目的就是找到一个数学模型,建立起世界坐标和图像点坐标的函数映射关系。而影响这一映射的参数可以分成三类:①外部参数,这些参数描述了机坐标系与世界坐标系的关系,包含平移矢量和旋转矢量;②内部参数,是一些摄像机特有的属性,包含沿图像横纵坐标方向的放大量 S_x, S_y ,图像中心的坐标 C_x, C_y ;③畸变参数,它反映了摄像机非线性的程度^[2-3]。

3.2 标定几何模型

图2给出了摄像机成像过程的几何模型^[4],其中 XYZ 为世界坐标系, xyz 为摄像机坐标系。摄像机与世界坐标系的坐标原点的位置偏差记为矢量 D ,从其分量分别为 D_x, D_y, D_z 。角度偏差可以用刚体转动的3个欧拉角来表示,如图3所示。其中 XY 平面与 xy 平面的交线 AB 称为节线, AB 与 x 轴的夹角 θ 称为自转角; AB 与 X 轴的夹角 ψ 称为进动角(也称倾斜角); Z 轴与 z 轴的夹角 ϕ 称为章动角(也称俯仰角)^[5]。

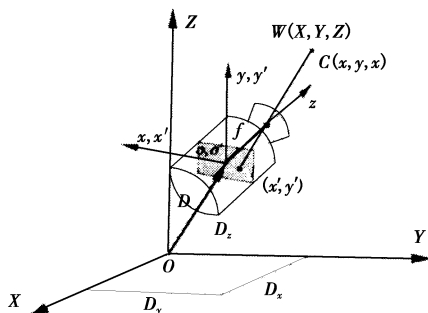


图2 摄像机成像过程示意图

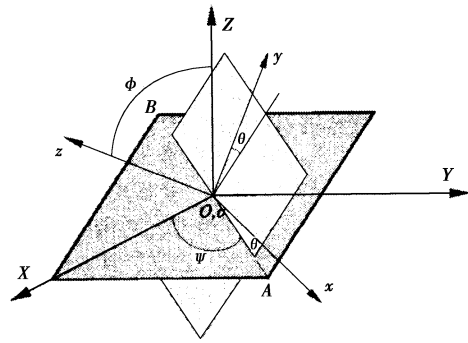


图3 欧拉角示意图

世界坐标系中的点 $W(X, Y, Z)$ 在摄像机坐标系中对应的坐标为 $C(x, y, z)$,它们的齐次坐标^[6]形式分别为: $W' = [X, Y, Z, 1]^T$ 和 $C' = [x, y, z, 1]^T$,它们之间的关系是:

$$C' = TRW' \quad (1)$$

其中, $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_x \\ 0 & 1 & 0 & D_y \\ 0 & 0 & 1 & D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为坐标系间平移矩阵;

R 为旋转矩阵, $R = R_x R_y R_z$, 有:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过以上的坐标变换,可以将世界坐标系下的点 $W(X, Y, Z)$ 变换为摄像机坐标系中的 $C(x, y, z)$ 。再经过一次透视变换:

$$E' = HTRW' \quad (2)$$

其中, $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/f & 1 \end{bmatrix}$ 为透视变换矩阵; f 为

摄像机焦距。

从而可以得到像平面内点的坐标为:

$$\begin{cases} x' = f \frac{(\cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi)X + (\sin\theta\cos\psi - \cos\theta\sin\phi\sin\psi)Y + (\cos\phi\sin\psi)Z + D_x}{(\sin\psi\cos\theta - \cos\psi\sin\phi\sin\theta)X + (\sin\psi\sin\theta + \cos\psi\sin\phi\cos\theta)Y - (\cos\psi\cos\phi)Z - D_z + f} \\ y' = f \frac{(-\sin\theta\cos\phi)X + (\cos\theta\cos\phi)Y + (\sin\phi)Z + D_y}{(\sin\psi\cos\theta - \cos\psi\sin\phi\sin\theta)X + (\sin\psi\sin\theta + \cos\psi\sin\phi\cos\theta)Y - (\cos\psi\cos\phi)Z - D_z + f} \end{cases} \quad (3)$$

现假设不存在镜头畸变,像平面原点在计算机图像坐标系中对应的坐标为 (c_x, c_y) ,水平和垂直方向的比例因子分别为 S_x, S_y ,则像平面内的坐标 (x', y') 和与之对应的计算机图像坐标系中的坐标 (x_f, y_f) 的关系为:

$$\begin{cases} x_f = S_x x' + c_x \\ y_f = S_y y' + c_y \end{cases} \quad (4)$$

4 测量系统参数标定

4.1 摄像机镜头调整

在上面讨论的通用摄像机模型中,摄像机坐标与世界坐标之间存在位置偏差和角度偏差。尤其是角度偏差,使得物像之间的变换变得异常复杂。如果能找到一种调整方法使世界坐标与摄像机坐标之间只存在位置偏差,不存在角度偏差,那么就可以使物像之间的转换变得简单而快速。

为了达到以上目的,选择一块正方形校准板(板厚可忽略不计)置于基准平面上^[7],校准板如图4所示。令世界坐标系的 X, Y 轴分别平行于校准板的 a, b 边。校准板四个顶点的坐标分别为 P_1, P_2, P_3, P_4 ,则它们之间的坐标关系满足:

$$X_1 = X_2, X_3 = X_4, Y_1 = Y_4, Y_2 = Y_3$$

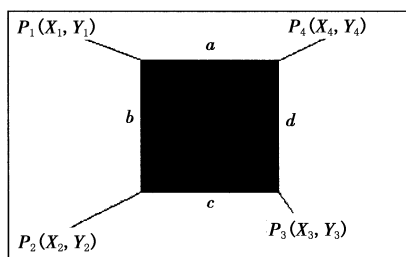


图4 校准板

将摄像机装在位于校准板正上方的支架上,如图1中CCD1所示,摄像机的三个转动角可调。校准板的四个顶点 P_1, P_2, P_3, P_4 通过摄像机拍摄,经过图像处理得到在计算机中的像素坐标分别为:

$$(x_{1f}, y_{1f}), (x_{2f}, y_{2f}), (x_{3f}, y_{3f}), (x_{4f}, y_{4f})$$

如果令 $y_{1f} = y_{4f}$,将式(3)、(4)代入化简可得:

$$-D_y \cos\psi \sin\phi \sin\theta + f \sin\theta \cos\phi - D_z \sin\theta \cos\phi + D_y \cos\theta \sin\psi + Y_1 \sin\psi \cos\phi = 0 \quad (5)$$

同样令 $y_{2f} = y_{3f}$,可得:

$$-D_y \cos\psi \sin\phi \sin\theta + f \sin\theta \cos\phi - D_z \sin\theta \cos\phi + D_y \cos\theta \sin\psi + Y_2 \sin\psi \cos\phi = 0 \quad (6)$$

将式(6)减去式(5)可得:

$$(Y_2 - Y_1) \sin\psi \cos\phi = 0 \quad (7)$$

式(7)中由于 Y_1 不等于 Y_2 ,所以 $\sin\psi \cos\phi = 0$,而 ϕ 为俯仰角,若为 $\frac{\pi}{2}$,摄像机的光轴平行于校准板,图像中将看不到校准板的四个顶点。因此,若使式(7)为零,只能 $\psi = 0$,也即倾斜角为零。

以同样的思路,令 $x_{1f} = x_{2f}$ 和 $x_{3f} = x_{4f}$ 将式(3)、(4)代入化简得:

$$D_z (\sin\theta \cos\psi - \cos\theta \sin\phi \sin\psi) + D_x (\sin\theta \sin\psi + \cos\theta \sin\phi \cos\psi) + f (\cos\theta \sin\phi \sin\psi - \sin\theta \cos\psi) + X_1 \sin\phi = 0 \quad (8)$$

$$D_z (\sin\theta \cos\psi - \cos\theta \sin\phi \sin\psi) + D_x (\sin\theta \sin\psi + \cos\theta \sin\phi \cos\psi) + f (\cos\theta \sin\phi \sin\psi - \sin\theta \cos\psi) + X_3 \sin\phi = 0 \quad (9)$$

将式(8)减去式(9)可得:

$$(X_3 - X_1) \sin\phi = 0 \quad (10)$$

由于 X_1 不等于 X_3 ,所以 $\sin\phi = 0$,进而 $\phi = 0$,也即俯仰角为零。

将 $\psi = 0$ 和 $\phi = 0$ 代入式(5)可得:

$$\left(1 - \frac{D_z}{f}\right) \sin\theta = 0 \quad (11)$$

通常, Z 方向的平移分量 D_z 远远大于焦距 f ,即 $D_z \gg f$,所以可得 $\theta = 0$,也即自转角为零。

由上面的公式推导可知只要调整摄像机的角度,使计算机图像中提取到的正方形的各顶点的像素坐标值满足: $y_{1f} = y_{4f}, y_{2f} = y_{3f}, x_{1f} = x_{2f}, x_{3f} = x_{4f}$ 就可以使世界坐标系和摄像机坐标系之间不存在角度的偏差,只存在位移偏差,从而完成摄像机的调整。

4.2 确定标定参数

通过调整摄像机的位置角度,使其坐标系平行于世界坐标系,简化了世界坐标与图像坐标的变换,可以得到:

$$\begin{cases} X = (x_f - c_x) \frac{f - D_z}{S_x f} - D_x \\ Y = (y_f - c_y) \frac{f - D_z}{S_y f} - D_y \end{cases} \quad (12)$$

若要得到 X, Y 就要标定出参数 $c_x, c_y, S_x, S_y, f, D_x, D_y, D_z$, 其中 c_x, c_y, S_x, S_y, f 为摄像机的内部参数, 是不变的, 而 D_x, D_y, D_z 是外部参数, 是变化的。在计算世界坐标 X, Y 时, 若能够直接求出 $\frac{f-D_z}{S_x f}$ 和 $\frac{f-D_z}{S_y f}$, 则不必分别求出 S_x, S_y, f, D_z 。根据式(12)可以得到:

$$\frac{X_3 - X_2}{x_{3f} - x_{2f}} = \frac{(x_{3f} - c_x) \frac{f-D_z}{S_x f} - (x_{2f} - c_x) \frac{f-D_z}{S_x f}}{x_{3f} - x_{1f}} = \frac{f-D_z}{S_x f} = m_x \quad (13)$$

$$\frac{Y_2 - Y_1}{y_{2f} - y_{1f}} = \frac{(y_{2f} - c_y) \frac{f-D_z}{S_y f} - (y_{1f} - c_y) \frac{f-D_z}{S_y f}}{y_{2f} - y_{1f}} = \frac{f-D_z}{S_y f} = m_y \quad (14)$$

从而得到测量系统中图像的 X, Y 方向物像放大系数 m_x, m_y , 即图像上 X, Y 方向上一个像素所对应实物的实际长度值。

由于测量系统所摄取的图像是平面图像, 也就是只有 X, Y 方向的信息, 对 Z 方向的物像放大系数作如下定义: 假设点式激光倾斜照射于平板上, 交点为 A , 倾斜角为 θ ; 然后将实物放置于平板上, 实物高度为 h , 此时激光倾斜照射于实物上, 交点为 B , AB 的水平投影在摄像机中反映的长度为 L 个像素, 令

$$m_z = \frac{h}{L} \quad (15)$$

称 m_z 为 Z 方向物像放大系数。由上面的定义, 利用已知厚度的校准块, 可以方便地标定出 X, Y, Z 三个方向的物像放大系数, 最终完成系统参数标定, 如图5所示。

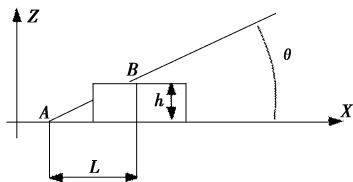


图5 Z方向的放大系数

4.3 实验结果

应用上文介绍的方法对测量系统进行调整和标定。实验用到的摄像机型号为 DIS-880C, 图像采集卡为微视图像的 v130 分辨率为 768×576 。使用正方形校准板, 边长为 80mm。对水平机构摄像机进行标定, 通过图像处理^[8]后得到校准板上四个顶

点在计算机图像中的像素坐标 $P_{1f}(250, 371)$, $P_{2f}(250, 230)$, $P_{3f}(391, 230)$, $P_{4f}(391, 371)$ 由公式(13)和公式(14)可得: $m_x \approx 0.567$, $m_y \approx 0.567$ 。得到 m_x, m_y 后再标定 m_z , 实验得到的图像如图6所示: 标定物块高 35mm, 图中激光线断点的像素坐标为 $C_1(343, 255)$, $C_2(395, 255)$, $C_3(343, 178)$, $C_4(395, 178)$ 。通过式(15)可得: $m_z \approx 0.673$ 。

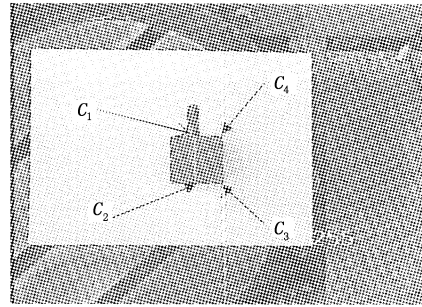


图6 标定 m_z 图像

5 结论

摄像机位置的调整及参数的标定是基于机器视觉测量方法的基础。本文针对逆向工程中机器视觉测量系统, 提出了一种摄像机空间位置调整及参数标定新方法, 该方法具有速度快精度好等特点, 并从理论上验证其正确性。

参考文献:

- [1] 雷成, 吴福朝, 等. Kruppa 方程与摄像机标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 621-630.
- [2] 林家明. 面阵 CCD 摄像机光学镜头参数及其相互关系[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 183-185.
- [3] 胡海峰. 三维机器视觉中摄像机内外方位元素的确定[J]. 中山大学学报, 2002, 41: 15-18.
- [4] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] Luong Q T, Faugeras O. Selfcalibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices[J]. The International Journal of Computer Vision, 1997, 22(3): 261-289.
- [7] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. London: Cambridge University Press, 2000: 568-582.
- [8] 贺忠海, 王宝光. 理想边缘产生方法的研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 55-61.