

文章编号: 1001-9081(2006)06Z-0035-03

三维视觉测量系统标定技术

王金涛^{1,2}, 曲道奎¹, 徐方¹

(1 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

(jintao@sia.cn)

摘要: 在机器人视觉测量系统中, 手眼标定问题一直是一个很重要也很难解决的问题。结合一个具体的实际系统, 提出了一种将摄像机外参数矩阵和手眼矩阵合在一起标定的新方法, 免去了传统的摄像机外参数标定和手眼标定的麻烦, 并因此减小了误差, 提高了测量精度。

关键词: 结构光测量; 手眼标定; 视觉测量

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 随着先进制造技术的发展, 为了获得加工工件的模型, 自由曲面的三维测量技术得到越来越多的重视。自由曲面的三维测量大致分为接触式和非接触式两种, 非接触式测量具有无磨损、速度快等优点。基于视觉的结构光测量技术就是非接触式测量的一种, 很多学者对此进行了研究。

在结构光测量系统的标定中, 有几个主要问题需要解决, 一是用于测量的摄像机标定和光平面标定, 另一个是采用机器人驱动时的手眼标定。文献 [1] 应用线结构光和单目 CCD 摄像机构成了自由曲面三维测量系统, 但由于该系统没有采用机器人作为载体, 所以没有手眼标定。对手眼标定, 已经有大量的研究, 但多数的研究都单独考虑机器人的手眼标定, 而且将转动部分和平动部分解耦开来, 先求出空间旋转, 再求平移部分, 采用不同的手段表示和测量空间旋转和平移。文献 [2~8] 分别用不同的方法求解旋转和平移变换, 文献 [9] 在上述研究的基础上, 考虑已知任意两组旋转轴不平行的空间刚体运动求机器人手眼转换矩阵的方法, 首先通过矩阵直积推导出机器人手眼转换的线性方程, 并将两组旋转的线性方程堆叠成方程组; 进一步分析线性方程组的解与系数矩阵特征向量之间的关系, 提出了对旋转矩阵和平移矢量各元素同时求解的方法; 然后正交化所求得的旋转部分以消除测量噪声的影响。文献 [10] 充分利用了双目摄像机之间以及摄像机与机器人手爪之间的约束关系进行机器人手眼标定, 大大提高了抗干扰的能力。

本文根据我们的实际应用, 将手眼标定和摄像机内外参数的标定与整个测量系统结合起来, 提出了一种将手眼转换矩阵与摄像机外参数矩阵合为一体进行标定的新方法。在本方法中, 不再需要进行摄像机内外参数的标定, 也不再需要手眼标定, 利用各坐标架之间的闭环位置关系, 通过一个简单的转换就可以实现测量系统的标定。

1 测量系统的组成及工作原理

测量系统采用的是结构光测量法, 硬件构成主要有激光器、单 CCD 摄像机、高精度框架式 5 轴机器人, 激光器和单 CCD 摄像机固定在机器人末端手爪上, 如图 1 所示。测量原理与文献 [1] 中所述方法相同。

如图 2 所示, 激光器发出的球面光经柱状透镜变为窄缝光以一个空间平面的形式投射出去, 在空间截切被测物体, 于

被测物体表面形成一条激光亮条, 该亮条被 CCD 摄像机所摄取并成像。亮条上任一点 P , 其在图像上所成的 P' 必在摄像机光心 O 与点 P 的连线上, 又在激光平面上。如果摄像机和激光平面以及它们的空间相对位置已预先标定好, 求得摄像机光心 O 与点 P 连线与激光平面的交点, 即得到点 P 在工件坐标系 C_o 中的坐标。然后根据测量系统的世界坐标系与机器人基坐标系之间的关系, 即可求出被测点在机器人基坐标系下的坐标, 完成测量过程。

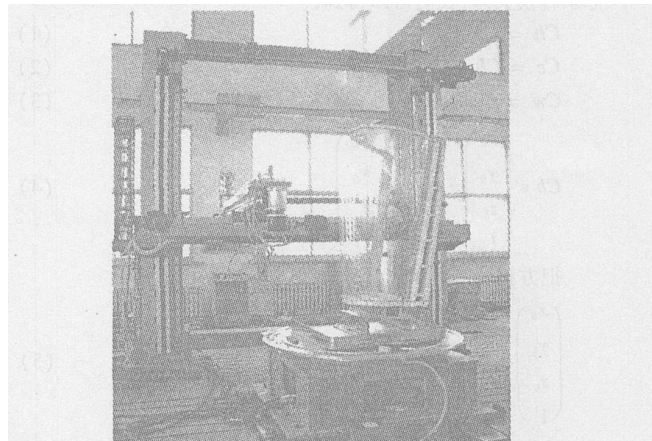


图 1 测量系统总图

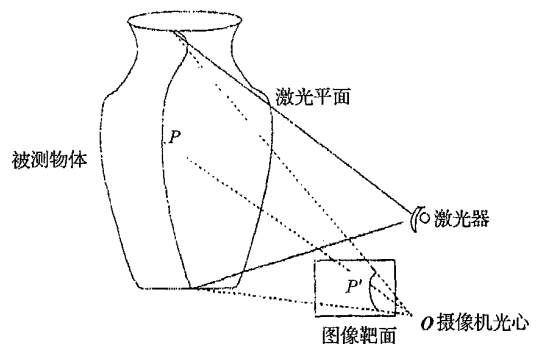


图 2 测量原理图

2 测量系统的标定

2.1 混合标定方法的原理

图 3 中, C_b 是机器人基坐标系, C_h 是机器人末端手爪坐标系, C_c 是摄像机坐标系, C_w 是世界坐标系。A, X, B 分别是 C_b 到 C_h , C_h 到 C_c , C_c 到 C_w 的坐标转换矩阵。A 也是机

收稿日期: 2005-09-06 修订日期: 2005-11-25 基金项目: 中国科学院重大项目 (KGCX-SW-15)

作者简介: 王金涛 (1980-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要研究方向: 机器人、三维建模; 曲道奎 (1961-), 男, 山东青州人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 智能控制、机器人学; 徐方 (1962-), 男, 浙江杭州人, 研究员, 主要研究方向: 智能控制、机器人学。

机器人的运动学模型。

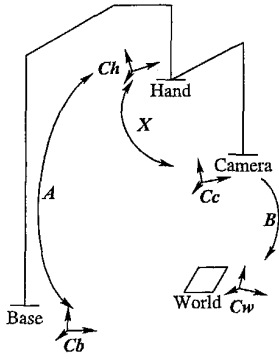


图 3 坐标系位置关系

通过摄像机标定,可以得到摄像机外参数,然后通过机器视觉的方法,可以得到测量点在世界坐标系下的齐次坐标 $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 。本文中,我们假定摄像机标定方法有效且精度很高,所以我们的研究从齐次坐标 $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 开始。在整个测量过程中,世界坐标系是运动的,因此,我们需要将世界坐标系下的坐标转换为固定的机器人基坐标系下的坐标。设 $(x_b, y_b, z_b, 1)^T$ 为测量点在机器人基坐标系下的坐标,根据图 1 中的坐标系转换关系,我们可以得到:

$$Ch = Cb^* A \tag{1}$$

$$Cc = Ch^* X \tag{2}$$

$$Cw = Cc^* B \tag{3}$$

$$Cb^* \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{pmatrix} = Cw^* \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

把方程 (1), (2), (3) 代入 (4) 得:

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{pmatrix} = A^* X^* B \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

从公式 (5) 可以看出,问题的关键在于求出 A, X, B 三者的乘积。其中, A 是机器人运动学矩阵,可以从机器人控制器读出。按照传统方法,矩阵 X, B 是分别通过手眼标定和摄像机外参数标定得到的。但是从公式 (5) 我们可以看出,对于这种视觉测量方法,我们只需要求出它们的乘积,即 $W = X^* B$ 。

在整个测量过程中,机器人手爪坐标系、摄像机坐标系以及世界坐标系都是移动的,但它们之间是相对静止的,所以 X 和 B 都是常矩阵,因而 W 也是常矩阵。因此,我们只需要一次性标定 W ,而不再需要分别标定 X 和 B 。

2.2 矩阵 W 的标定

我们采用一种闭环形式的方法进行 W 的标定,矩阵之间的闭环转换关系如图 4 所示。

$$Ch = Cb^* A_0 \tag{6}$$

$$Cc = Ch^* W \tag{7}$$

$$Cw = Cc^* C \tag{8}$$

把方程 (6), (7) 代入方程 (8) 得:

$$A_0^* W = C \tag{9}$$

其中, A_0 是标定过程中的机器人基坐标系到机器人手爪坐标系的坐标转换矩阵。 A_0 可以在标定过程中从机器人控制器中读出; 又因为 A_0 是齐次变换矩阵,所以它是可逆的,因此可以从公式 (9) 得到:

$$W = A_0^{-1} * C \tag{10}$$

从公式 (10) 可以看出从机器人基坐标系到标定时世界坐标系的转换矩阵 C 是求解 W 的关键。

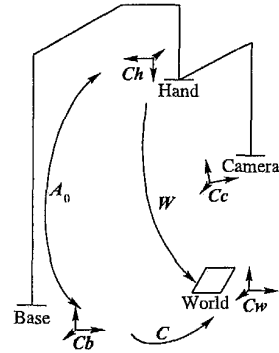


图 4 标定时的坐标系位置关系

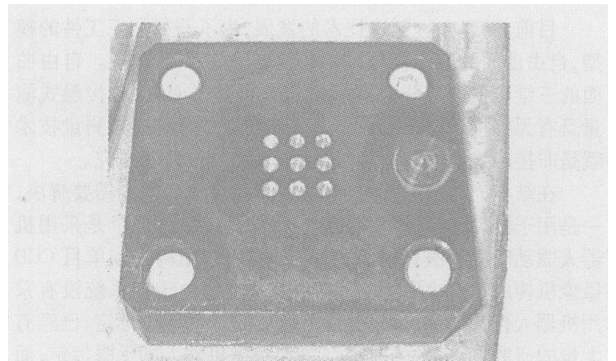


图 5 标定块

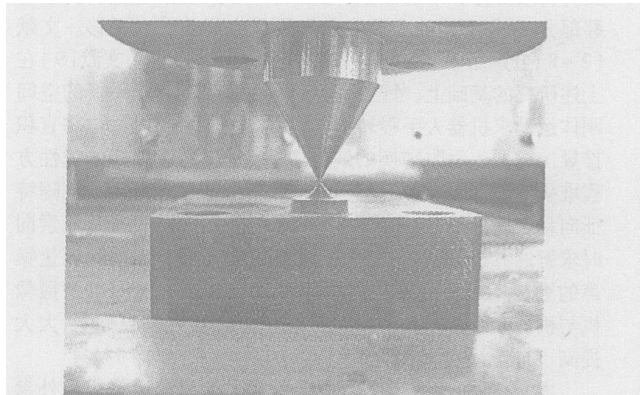


图 6 对尖过程

由于我们关心的是测量点在机器人基坐标下的坐标,世界坐标系的位置与姿态的选择对于测量来讲并不重要,但世界坐标系位姿的选择对于摄像机标定和矩阵 C 的求取非常重要,因此,以方便摄像机的标定和矩阵 C 的求取为准则选取世界坐标系的位姿。

为了方便摄像机标定,在标定过程中,将世界坐标系选在标定块上;为了便于求取矩阵 C ,令世界坐标系的姿态与机器人基坐标系相同。如图 5 所示,在标定块上,我们加工了一个锐利的尖,同时,在机器人手臂上安装一个带尖的工具。当两个尖垂直地碰在一起时,通过机器人前向运动学,可以很容易地求出标定块上尖点的坐标。

设 $\begin{pmatrix} ox_b \\ oy_b \\ oz_b \end{pmatrix}$ 为世界坐标系下的原点在机器人基坐标系下的坐标,那么矩阵 C 就可以描述为:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_b \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将矩阵 C 代入方程 (10), 得:

$$W = A_0^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_b \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过机器人前向动力学可以得到 A_0 , 因此, 根据公式 (11), 就可以求出矩阵 W 。在分别需要 X 和 B 的情况下, 我们可以通过对摄像机标定矩阵的分解获得矩阵 B , 然后, 根据 $X = W^* B^{-1}$ 就可以求出 X (如果 B 可逆)。

2.3 误差源分析

从标定过程和公式 (11) 中, 可以看出影响结果的有三个主要因素。第一个因素是转换矩阵 A_0 , 也就是标定时机器人前向运动学矩阵, 如果 A_0 含有很大误差, 那整个标定结果就很不准确, 因此机器人的精度很重要。第二个因素是标定时世界坐标系和机器人基坐标系的平行关系。因为我们假定这两个坐标系是平行的, 如果在标定中这个平行性不能保证, 标定结果就会有很大误差, 因此, 应用该方法时, 标定块的加工和安放必须很精确。第三个因素是 $(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$, 从该因素的获取过程可以知道该因素也是由机器人精度决定的。因此, 从以上分析可以看出, 如果机器人有很高的精度, 标定结果的精度就会很高。

2.4 混合标定的优缺点分析

从上述分析可以看出混合标定有如下优点: 1) 简洁性。通过将摄像机外参数矩阵和手眼矩阵作为一个矩阵进行标定, 一次标定就完成了测量系统的标定工作, 避免了复杂的分步单独标定。2) 精确性。一次标定不仅减少了带来误差的机会, 同时避开了求解 $A^* X = X^* B$ 的困难, 从而消除了求解该矩阵带来的误差。

但是, 相对于摄像机标定和手眼标定来说, 混合标定也具有其局限性。首先, 一些应用场合不仅需要这个混合矩阵, 还单独需要摄像机外参数矩阵和机器人手眼矩阵, 因此, 该标定方法的应用没有分布单独标定广泛。再次, 该标定方法对于机器人精度要求很高, 因此增加了机械加工装配的难度。

3 实验验证

该视觉测量的标定方法已经在我们的研磨抛光机器人系统中实现, 为了测试该方法的可行性和效果, 设计如下实验:

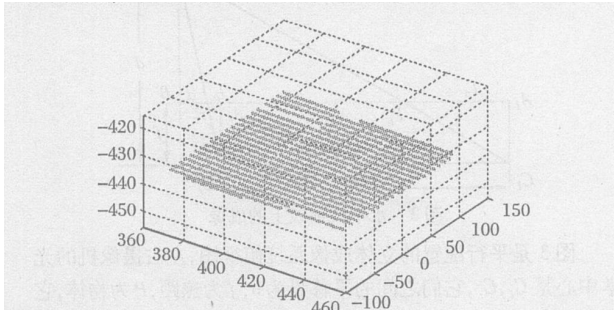


图 7 平板上测量获得的点

用标定好的系统测量一随意放置的平板, 在平板上测量 1360 个点。将所测得的点进行平面拟合, 然后求测点与该平面的偏差和均方差。实验结果如图 7, 图 8 所示。机器人的精度为 0.02mm, 测量的均值误差为 -4.6270×10^{-6} mm, 均方差

为 0.0449mm。

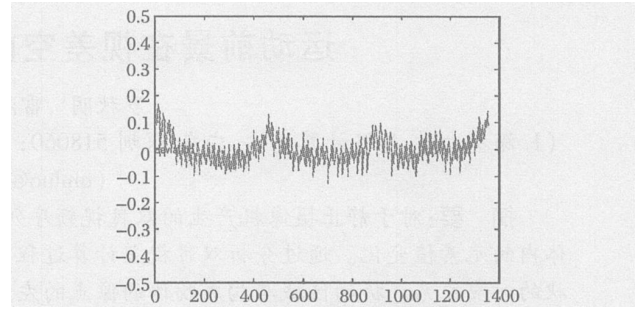


图 8 测量点与拟合平面的偏差

为了进一步验证该测量系统的精度, 我们应用该系统测量了一个平板的厚度。首先在平板两表面各测一些点, 拟合两个平面, 求得两平面平均距离为 19.96mm, 而通过游标卡尺对该平面的测量结果为 19.98mm, 测量误差为 0.02mm。

我们同时做了曲面测量的实验, 图 9, 图 10 分别给出了 CAD 曲面和测量曲面。

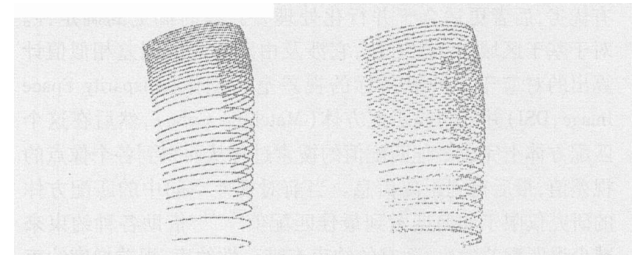


图 9 CAD 曲面

图 10 测量结果

4 结语

针对机器人视觉测量系统的标定, 本文提出了一种新的标定方法。该标定新方法将摄像机外参数标定和手眼标定合在一起, 从而免除了求解复杂的矩阵方程 $AX = XB$ 。通过合理选择标定过程中的世界坐标系, 该方法不需要机器人的旋转, 从而消除了由于机器人旋转而带来的误差。但目前该标定方法中仍有对机械加工装配要求高的缺点。

参考文献:

- [1] 刘伟军, 刘鹏, 齐越. 一种基于视觉的三维测量系统 [J]. 小型微型计算机系统, 2003, 12(24): 2170-2173
- [2] TSAIRY, LENZ RK. A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand-eye Calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 345-358
- [3] DAN IL D B K. Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions [J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(3): 286-298
- [4] JACK C, CHOU K, KAMEL M. Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions [J]. International Journal of Robotics Research, 1991, 10(3): 240-254
- [5] MA SD. A Self-calibration Technique for Active Vision System [J]. IEEE Transactions on Robot Automation, 1996, 12(1): 114-120
- [6] MALM H, HEYDEN A. A New Approach to Hand-Eye Calibration [A]. Proceedings of International Conference on Pattern Recognition [C], 2000, 525-529
- [7] ANDREFF N, HORAUD R, ESPAN B. Robot Hand-Eye Calibration Using Structure from Motion [J]. International Journal of Robotics and Research, 2001, 20(3): 228-248
- [8] HORAUD R, DORNKA F. Hand-Eye Calibration [J]. International Journal of Robotics Research, 1995, 14(3): 195-210
- [9] 郭剑英, 吕恬生. 机器人手眼矩阵求解算法 [J]. 计量技术, 2003, (4): 3-6
- [10] 刘宏建, 石繁槐, 刘允才, 等. 机器人手眼标定的仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2541-2543