

文章编号: 1001-0920(2009)06-0882-04

# 一种用于机器人三维表面扫描系统的手眼标定算法

李爱国, 马 孜, 张 旭, 吴德烽

(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 将线结构光测头安装在机器人末端, 构成自由曲面非接触测量系统. 利用齐次坐标变换理论建立测量系统的数学模型. 针对该模型中的手眼标定问题, 使用平面作为参考物, 控制机器人以特定的位姿测量该平面, 建立关于手眼关系的约束方程, 并给出手眼参数的封闭解. 通过对实际系统进行标定实验, 验证了算法的有效性.

**关键词:** 线结构光测头; 机器人; 平面标靶; 手眼标定

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

## Hand-eye calibration for robot 3D surface scanning system

LI Aiguo, MA Zi, ZHANG Xu, WU Defeng

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: MA Zi, E-mail: zima@newmail.dlmu.edu.cn)

**Abstract:** A platform composed of a structured light vision sensor and an industrial robot is established for noncontact freedom surface measurement. A mathematic model for measuring system is constructed by using homogenous coordinate transform principle. A reference plane with unknown orientation and position information is utilized to calibrate the hand-eye transformation. In this method, the equations about the hand-eye parameters are established by measuring the reference plane at special robot hand poses. Test results of real experiments show the effectiveness of the method.

**Key words:** Line structured light sensor; Robot; Planar calibration target; Hand-eye calibration

### 1 引 言

随着制造业设计和加工水平的不断发展, 机械零部件的结构复杂度和加工精度越来越高. 特别是在航空、汽车、船舶等领域, 由复杂曲面组成的零部件扮演着非常重要的角色. 它们的加工精度要求很高, 型面复杂不规范. 传统的接触式检测设备已无法满足这类复杂形面的三维表面检测的需求. 随着计算机视觉技术的不断发展, 基于电荷耦合器 (CCD) 或激光测量原理的非接触式测量技术开始高速发展. 作为非接触测量的结构光主动视觉测量技术, 因其精度高且测量速度快的优点, 在三维物体重建<sup>[1,2]</sup>、工业视觉检测<sup>[3]</sup>、机器人激光导引等领域获得了越来越广泛的应用. 在工业检测领域, 结构光传感器通常安装在三坐标测量机上用于检测产品的质量. 该模式虽具有很高的测量精度, 但由于其受三维运动导轨的限制, 难以真正实现大型构件的现场在线三维坐标测量.

为了实现加工过程的在线测量, 文献[4]提出了一种三维表面检测机器人系统, 该系统由六自由度机器人和结构光测头组成. 由于六自由度机器人具有三维移动平台无可比拟的灵活性, 在其手腕上配备线结构光测头, 即可在加工现场当被测部件不离加工夹具的情况下完成检测任务. 线结构光传感器利用激光三角法原理, 输出的数据是光平面上的被测物体的二维数据<sup>[5]</sup>. 要实现三维测量, 必须将这些二维数据转换为三维数据. 如果测量时机器人手腕的移动方向和光平面保持垂直, 则只需将手腕的位移作为第三维信息即可恢复被测工件的形貌. 然而一般情况下, 对于一个复杂的工件需要在多个视角进行测量. 要实现这一功能, 机器人末端连杆坐标系与传感器坐标系之间的关系需要事先标定, 此问题称为机器人手眼标定. 机器人手眼标定的核心是建立机器人末端(手)与传感器(眼)之间的转换关系.

收稿日期: 2008-05-27; 修回日期: 2008-08-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50575029).

作者简介: 李爱国(1978), 男, 天津宝坻人, 讲师, 博士生, 从事视觉测量技术的研究; 马孜(1955), 女, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与控制、非接触测量等研究.

机器人手眼标定的传统方法有: 1) 利用高精度的三坐标测量仪对传感器夹持工具进行测量; 2) 针对摄像机的手眼标定方法<sup>[68]</sup>; 3) 传感器为激光测距仪, 利用测距仪旋转、平移<sup>[9]</sup>以及采用定点变位姿进行手眼标定<sup>[10]</sup>.

上述方法均不适用于在末端安装有二维结构光传感器的机器人的手眼标定. 对此, 本文利用平面标靶, 建立适合于二维传感器的手眼标定算法. 首先建立基于二维测量数据的标定模型; 然后发现手眼关系的位移部分与激光平面和标靶交线的截距有关; 进而发现手腕纯平移运动时, 激光平面和标靶交线的斜率保持不变, 手眼关系中的旋转部分与交线的斜率有关.

## 2 测量系统的数学模型

工业机器人一般是开环运动结构, 通过角度测量装置可以确定每根轴的角度值. 在每根轴上建立相应的齐次方程, 进而构建机器人的运动模型, 便可确定机器人的末端位置和姿态. 确定机器人每根轴的齐次变换矩阵, 需要知道连杆长  $a$ , 连杆偏置  $d$ , 连杆扭角  $A$  以及轴的转角  $H$  四个参数. 通过将这些齐次矩阵联乘, 便可确定机器人末端的位姿. 设机器人相邻关节之间的齐次变换矩阵为  $A_i$ , 传感器坐标系相对于机器人手腕坐标系的位姿矩阵为  $H$ , 则传感器坐标系相对于机器人基坐标系的位姿为

$$T_{N+1} = A_1 \cdot A_N H. \quad (1)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos H & -\sin H \cos A & \sin H \sin A & a_i \cos H \\ 0 & \cos H \cos A & -\cos H \sin A & a_i \sin H \\ 0 & \sin A & \cos A & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$N$  为机器人的自由度.

传感器坐标系下的二维数据在机器人基坐标系下的齐次坐标为

$$pc = A_1 \cdot A_N H p, \quad (2)$$

其中  $p$  和  $pc$  分别代表测量点在传感器坐标系和机器人基坐标系下的齐次坐标. 将上式中的齐次矩阵分解成旋转部分和位移部分, 得到

$$x_b = R_w(R_x x_s + t) + t_w. \quad (3)$$

其中:  $x_b$  和  $x_s$  对应测量点在基坐标系和传感器坐标系的坐标,  $R_w$  和  $t_w$  是齐次矩阵  $A_1 \cdot A_N$  的旋转算子和平移算子,  $R_x$  和  $t$  是齐次矩阵  $H$  的旋转算子和平移算子.

## 3 手眼关系的求解

设传感器坐标系  $O_g 2X_g 2Y_g 2Z_g$  下测量点的坐标

为  $x_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ , 该测量点在手腕坐标系  $O_g 2X_g 2Y_g 2Z_g$  下的坐标为  $x_g = [x_g, y_g, z_g]^T$ , 则

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = R_x \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + t = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于传感器坐标系的原点在光平面上, 令  $z_s = 0$ , 得到光平面上的点在手腕系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} + t. \quad (5)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_4 & r_7 \\ r_2 & r_5 & r_8 \end{bmatrix}^T, \quad t = [t_x, t_y, t_z]^T.$$

### 3.1 求解矩阵 $R$

设初始位置手腕坐标系记为  $O_{g1} 2X_{g1} 2Y_{g1} 2Z_{g1}$ , 在该系下标靶平面的方程为

$$n_1^T x_{g1} + b_1 = 0, \quad (6)$$

其中  $n_1 = [n_{1x}, n_{1y}, n_{1z}]^T$  为标靶平面在  $O_{g1} 2X_{g1} 2Y_{g1} 2Z_{g1}$  坐标系下的单位法向量.

手腕运动到位置  $j$  时坐标系记为  $O_{gj} 2X_{gj} 2Y_{gj} 2Z_{gj}$ , 此时在该系下标靶平面的方程为

$$n_j^T x_{gj} + b_j = 0. \quad (7)$$

设  $x_{gj} = R_{j1} x_{g1} + t_{j1}$ , 代入式(6)得

$$n_1^T (R_{j1} x_{g1} + t_{j1}) + b_1 = 0. \quad (8)$$

比较式(7)和(8)得到

$$n_j^T = n_1^T R_{j1}, \quad b_j = n_1^T t_{j1} + b_1. \quad (9)$$

设第  $j$  位置测量标靶上一点得到的数据为  $x_{sj}$ , 则

$$n_j^T (R x_{sj} + t) + b_j = 0. \quad (10)$$

将式(9)代入(10)得

$$(n_1^T R_{j1} R) x_{sj} + (n_1^T R_{j1}) t + n_1^T t_{j1} + b_1 = 0. \quad (11)$$

如果手腕的运动为纯平移, 即  $R_{j1} = I$ , 则式(11)变为

$$(n_1^T R) x_{sj} + n_1^T t + n_1^T t_{j1} + b_1 = 0. \quad (12)$$

用第  $j$  位置的方程(12)减去初始位置的方程  $(n_1^T R) x_{s1} + n_1^T t + b_1 = 0$ , 得到

$$n_1^T R (x_{sj} - x_{s1}) + n_1^T t_{j1} = 0. \quad (13)$$

式(13)是关于  $n_1$  和  $R$  的方程, 则有以下结论存在:

- 1) 如果手腕作至少 3 次纯平移运动, 并且这 3 次运动不共面, 则  $n_1$  唯一确定;
- 2) 改变标靶方向至少 3 次, 每次重复结论 1) 的

过程, 则  $R$  唯一确定。

假设手腕作了  $n$  次纯平移运动, 取初始位置 1 测得的数据点  $x_{s1} = [x_{s1}^1, y_{s1}^1]^T$ , 取位置  $i$  得到两个数据点  $[x_{si}^1, y_{si}^1]^T, [x_{si}^2, y_{si}^2]^T$ , 则根据式 (13) 在位置  $i$  有如下方程成立:

$$t_{i1}^T n_1 = - [x_{si}^1 - x_{s1}^1, y_{si}^1 - y_{s1}^1] R^T n_1, \quad (14a)$$

$$t_{i1}^T n_1 = - [x_{si}^2 - x_{s1}^2, y_{si}^2 - y_{s1}^2] R^T n_1. \quad (14b)$$

令  $R^T n_1 = [k_1^1, k_2^1]^T$ , 用式 (14b) 减去 (14a) 得到

$$[x_{si}^2 - x_{si}^1, y_{si}^2 - y_{si}^1] \begin{bmatrix} k_1^1 \\ k_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

亦即

$$\frac{k_1^1}{k_2^1} = - \frac{y_{si}^2 - y_{si}^1}{x_{si}^2 - x_{si}^1}. \quad (16)$$

若标靶的方向一定, 则  $R^T n_1 = [k_1^1, k_2^1]^T$  为常数, 即手腕只作平移运动, 测量得到的直线斜率是一致的。

设手腕运动到  $n$  个位置, 得到  $n$  个形如式 (14a) 的方程, 即

$$\begin{bmatrix} t_{21}^T \\ t_{31}^T \\ s \\ t_{n1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{s2}^1 - x_{s1}^1 & y_{s2}^1 - y_{s1}^1 \\ x_{s3}^1 - x_{s1}^1 & y_{s3}^1 - y_{s1}^1 \\ s & s \\ x_{sn}^1 - x_{s1}^1 & y_{sn}^1 - y_{s1}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^1 \\ k_2^1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由  $k_1^1/k_2^1 = -a$  化简方程 (17) 可得

$$\begin{bmatrix} t_{21}^T \\ t_{31}^T \\ s \\ t_{n1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{bmatrix} = - k_2^1 \begin{bmatrix} d_2 - d_1 \\ d_3 - d_1 \\ s \\ d_n - d_1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

如果  $k_1^1$  和  $k_2^1$  已知, 只要  $t_{21}, t_{31}, \dots, t_{n1}$  有 3 个线性无关向量, 则  $n_1$  唯一确定, 即

$$n_1 = - k_2^1 \text{pinv} \begin{bmatrix} t_{21}^T \\ t_{31}^T \\ s \\ t_{n1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 - d_1 \\ d_3 - d_1 \\ s \\ d_n - d_1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中  $\text{pinv}()$  代表矩阵的伪逆。又由约束条件  $n_1^T n_1 = 1$ , 可以唯一确定  $n_1, k_1^1$  和  $k_2^1$ 。

至此, 由  $n_1, k_1^1$  和  $k_2^1$  建立了关于  $R$  的一个约束方程  $R^T n_1 = [k_1^1, k_2^1]^T$ 。仅由一个约束方程不能得到  $R$ , 因此还需要改变标靶的方向或者改变机器人手腕的位姿, 得到关于  $R$  的更多的约束方程。

设标靶的方向改变  $m$  次, 得到了关于  $R$  的  $m$  个约束方程

$$\begin{aligned} R^T n_1 &= [k_1^1, k_2^1]^T, \\ R^T n_2 &= [k_1^2, k_2^2]^T, \\ &\vdots \\ R^T n_m &= [k_1^m, k_2^m]^T. \end{aligned} \quad (20)$$

由此只要  $m \geq 3$  便可唯一地确定  $R$ 。

### 3.2 求解平移向量 $t$

根据方程 (12) 对应一个标靶方向只能得到关于  $t$  和  $b_1$  的一个约束条件, 因此求解  $t$  还需要手腕作旋转运动, 得到若干个形如式 (11) 的方程。

由式 (12) 可得

$$b_1 = - (n_1^T R) x_{si} - n_1^T t - n_1^T t_{i1}, \quad (21)$$

代入式 (11) 得

$$\begin{aligned} (n_1^T - n_1^T R_{j1}) t &= \\ (n_1^T R_{j1} R) x_{sj} - (n_1^T R) x_{si} + n_1^T (t_{j1} - t_{i1}). \end{aligned} \quad (22)$$

这样通过至少 3 次旋转运动便可以确定  $t$ 。

注意,  $(n_1^T R) x_{si}$  和  $(n_1^T R_{j1} R) x_{sj}$  是手腕旋转前后光平面与标靶平面交线的截距。

## 4 实验研究

以 MOTOMAN2HP3 工业机器人为本体, 配备线结构光测头(型号为 ARC2II) 搭建如图 1 所示的实验系统。MOTOMAN2HP3 属于关节式机器人, 该机器人的 6 个关节都是转动关节, 前 3 个关节确定手腕参考点的位置, 后 3 个关节确定手腕方位。

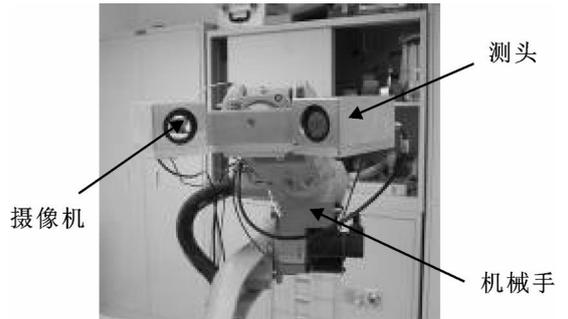


图 1 实验系统

实验中标靶方位改变 7 次, 每次手腕分别作 5 次平移和 5 次旋转。为保证精度, 测量时使光平面和标靶平面的夹角小于  $30^\circ$ , 计算得到手眼关系为

$$R = \begin{bmatrix} 0.0916 & -0.1551 & -0.9836 \\ -0.9633 & -0.2642 & -0.0481 \\ -0.2524 & 0.9519 & 0.1736 \end{bmatrix},$$

$$t = [34.913 \quad 0.147 \quad 199.985]^T.$$

为验证标定精度, 设计了两组实验: 1) 对某固定点进行多次测量, 以验证重复精度(见表 1); 2) 对已知距离的多个固定点进行测量, 以验证绝对精度(见表 2)。

表 2 中, / 真值 0 一列数据由接触式三坐标测量机得到。从以上数据可以看出, 三维世界坐标的重复性测试误差  $3R$  不超过  $0.1 \text{ mm}$ , 具有较好的重复性; 测量两点间绝对距离的 RMS 误差不大于  $0.11 \text{ mm}$ , 对于单点的精度应优于此值。因此, 本文提出的手眼标定方法具有较高的求解精度。

表1 重复精度测试数据

Order	x/mm	y/mm	z/mm
1	750.332	49.029	-120.005
2	750.342	49.022	-119.987
3	750.335	49.013	-119.963
4	750.325	49.023	-119.969
5	750.318	48.962	-119.976
6	750.311	49.026	-119.964
7	750.309	48.998	-119.951
8	750.303	49.021	-119.956
9	750.298	48.996	-119.962
10	750.349	49.025	-120.015
3R	0.052	0.063	0.064

表2 绝对精度测试数据

距离	真值	测量值	误差
d <sub>1</sub>	20.342	20.434	0.092
d <sub>2</sub>	26.573	26.473	-0.100
d <sub>3</sub>	30.375	30.268	-0.107
d <sub>4</sub>	33.457	33.542	0.085
d <sub>5</sub>	40.584	40.681	0.097
d <sub>6</sub>	55.351	55.479	0.128
RMS error			0.1024

## 5 结 论

将线结构光测头安装在六自由度机器人的末端,构成自由曲面非接触测量系统,建立了系统的几何模型.利用平面作为标靶,建立了基于二维测量数据的手眼方程.整个标定过程简单,便于实际应用.实验结果表明,算法具有较高的求解精度.由于测量数据和机器人的末端位姿不可避免地存在偏差,这些误差势必对系统的精度产生影响.如何将这些误差反映到标定过程并加以修正,是下一步有待解决的问题.

## 参考文献(References)

[1] Yang R, Cheng S, Yang W, et al. Robust and accurate surface measurement using structured light [J]. IEEE

Trans on Instrumentation and Measurement, 2008, 57 (6): 1272-1280.

[2] Philippe Lavoie, Dan Ionescu, Emil M Petriu. 3D object model recovery from 2D images using structured light [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 437-443.

[3] Michael Demeyere, D o Rurimunzu, Christian Eug ne. Diameter measurement of spherical objects by laser triangulation in an ambulatory context [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 867-872.

[4] Ma Z, Xu H P, Hu Y, et al. Artificial neural network for model reconstruction in reverse engineering [C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: IEEE, 2006: 9073-9078.

[5] Chen C H, Kak A C. Modeling and calibration of a structured light scanner for 3D robot vision [C]. Proc of IEEE Int Conf Robot and Automation. Raleigh: IEEE, 1987: 807-815.

[6] Shiu Y C, Ahmad S. Calibration of wrist mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX = XB$  [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1989, 5(1): 162-177.

[7] Park F, Martin B. Robot sensor calibration: Solving  $AX = XB$  on the Euclidean group [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 717-721.

[8] Wang C C. Extrinsic calibration of a robot sensor mounted on a robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(4): 161-175.

[9] Wei G Q, Hirzinger G. Active self-calibration of hand mounted laser range finders [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(3): 493-497.

[10] 王胜华, 都东, 张文增, 等. 机器人定点变位姿手眼标定方法 [J]. 清华大学学报, 2007, 47(2): 162-168. (Wang S H, Du D, Zhang W Z, et al. Hand-eye calibration for the robot by measuring a fixed point from different poses [J]. J of Tsinghua University, 2007, 47(2): 162-168.)

(上接第884页)

[9] 马洪江, 赵和义, 潘景铭, 等. 基于实物期权的军品供应商培植柔性决策研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2007, 21(2): 41-45.

(Ma H J, Zhao H Y, Pan J M, et al. A study on the flexibility decision of military supplier implantation based on real option [J]. Military Operations Research and

Systems Engineering, 2007, 21(2): 41-45.)

[10] Dixit A K, Pindyck R S. Investment under uncertainty [M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.

[11] Grenadier S R. The strategic exercise of options: Development cascades and overbuilding in real estate markets [J]. J of Finance, 1996, 51(5): 1653-1679.