

# 机器人手眼标定及其精度分析的研究\*

张洪瑶<sup>1,2</sup>, 李 论<sup>1</sup>, 周 波<sup>1</sup>, 陈松林<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 机器人的手眼关系是建立机器人与视觉传感器之间联系的桥梁, 手眼标定问题是工业机器人自动化程度的重要衡量标准之一。为了能让固定在6-DOF机器人末端3D扫描仪完成复杂工件的扫描工作, 对工业机器人与3D激光扫描仪进行标定, 提出高效易操作的“246”标定方法, 标定过程利用标定球, 通过齐次坐标变换和工业机器人位置变化配合, 完成手眼标定。使用未经优化得到的标定结果进行扫描工件, 发现得到的点云有错位、异常点现象, 分析标定过程可能产生标定误差的因素, 提出若干避免误差的方法, 并通过实验验证, 从而提高标定精度, 达到自动化加工精度要求。

**关键词:** 手眼标定; 工业机器人; 标准球; 精度分析

**中图分类号:** TH166; TG659

**文献标识码:** A

## Research on Hand-eye Calibration of Robots and Its Accuracy Analysis

ZHANG Hong-yao<sup>1,2</sup>, LI Lun<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>1</sup>, CHEN Song-lin<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The hand-eye relationship of robots is a bridge between robots and vision sensors, so it's one of the most important criteria of degree on automation of industrial robots. In order to allow 3D scanner fixed end of the robot to complete the scanning of complex workpieces, robots and 3D laser scanners will be calibrated in the way which are industrial robot displacement and homogeneous coordinate transformation with using calibration ball. The calibration process of “246” is easy to operate and efficient. Point cloud data which scans with raw calibration results is dislocation and abnormal. Through the other factors of calibration process may produce calibration error of analysis, several methods of avoiding errors are proposed, and it verified by experiments, so it improve the calibration accuracy to reach the requirements of automated processing accuracy.

**Key words:** hand-eye calibration; industrial robot; calibration ball; accuracy analysis

## 0 引言

随着工业机器人自动化水平的提高, 工业机器人参与的自动化加工必将成为未来工业发展的主导。工业机器人手眼关系是使机器人走向智能化的一个重要里程碑, 手眼标定相关问题的研究都是智能制造行业不可或缺环节<sup>[1-4]</sup>。

Larsson S<sup>[5]</sup>提出了机器人与3D激光扫描仪联系起来作为解决自动化加工过程中扫描模型的方法, 为3D激光扫描复杂工件提出了一种灵活、高效的解决方案。Feng C<sup>[6]</sup>等将机器人、扫描仪看作为模型进行了一个整体建模, 没有考虑重复机器人手眼标定的误差, 不能达到逆向工程建模的精度要求。一种引入了使用双重四元数的手眼校准算法, 这种方法可以同时确定旋转和平移SVD方法由Zhao Z和Liu Y<sup>[7]</sup>提出。Yin S和Ren Y<sup>[8]</sup>等首次采用标定球

进行手眼标定, 通过改变机器人的位姿变化得到多组数据进行矩阵方程直接求解得到扫描仪坐标系与机器人坐标系的位置关系, 没有对整个标定过程系统误差分析。

机器人自动化磨削加工过程的模型获取、质量评价的研究, 采用机器人末端固定扫描仪对待加工工件进行扫描测量。利用传统方法得到的标定结果, 对工件进行扫描, 发现得到的点云有错位、异常点现象, 扫描结果精度不高且不稳定。本文针对传统标定方法进行了改进, 简化了标定过程, 系统分析了标定误差产生的原因, 并对标定过程进行改进。通过实验, 标定过程精度极大提高, 点云错位、异常点现象消失, 可适用于各种未知复杂零件的扫描。高精度的标定过程为机器人自动化加工过程获取精确地模型、质量评价奠定了基础。

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-05-31

\* 基金项目: 国家科技支撑项目(2015BAF08B01-01); 国家自然科学基金(51605475)

作者简介: 张洪瑶(1991—), 男, 山东微山人, 中国科学院沈阳自动化研究所硕士研究生, 研究方向为复杂曲面机器人自动化加工, (E-mail) zhanghongyao@sia.cn。

## 1 标定过程

手眼标定就是对视觉系统到机器人基坐标的位姿变换矩阵的求解。3D 激光传感器得到模型数据信息是基于传感器坐标系下,在扫描过程中,3D 激光传感器的坐标系会随着扫描过程发生位置变化,并且这种变化是无规律性的,而机器人的基坐标始终保持不变。

如图 1 所示,假设空间点  $Z$  (即标准球的球心坐标),在机器人基坐标系  $\{B\}$  下的位置可表示为  $X_z^b$ ,同样,在视觉坐标系  $\{S\}$  下的位置表示为  $X_z^s$ 。

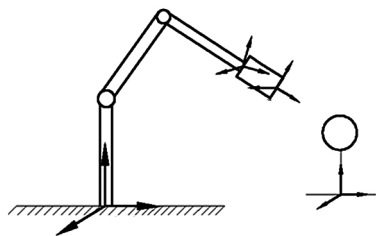


图 1 手眼标定示意图

机器人末端坐标系  $\{E\}$  到机器人基坐标系  $\{B\}$  的位姿坐标变换关系表示为  $R_e^b, T_e^b$ , 视觉坐标系  $\{S\}$  到机器人末端坐标系  $\{E\}$  的位姿坐标变换关系表示为  $R_s^e, T_s^e$ ,  $R_s^e, T_s^e$  是手眼标定求解的矩阵,它们之间的关系可表示:

$$\begin{bmatrix} X_z^b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e^b & T_e^b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s^e & T_s^e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_z^s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

如图 2 所示,根据几何关系求出在  $\{S\}$  圆心位置坐标是  $X_z^s = (x_s, y_s, \pm \sqrt{R^2 - r^2})$ , 这里的  $x_s, y_s$  坐标是拟合圆的圆心坐标。

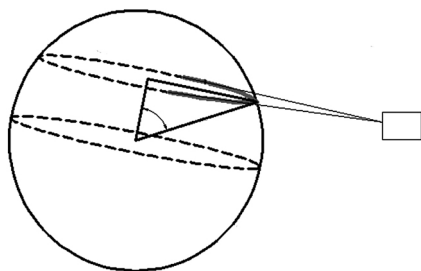


图 2 拟合圆弧与球心几何关系示意图

$R_s^e, T_s^e$  根据式 (1) 利用标定球通过齐次坐标变换和机器人位置变化配合,完成手眼标定。机器人测量过程保持线性移动,姿态角并未发生变化,由式 (1) 得:

$$R_s^e (X_1^s - X_2^s \quad X_1^s - X_3^s \quad \cdots \quad X_1^s - X_n^s) = (R_e^b)^T (T_2^e - T_1^e \quad T_3^e - T_1^e \quad \cdots \quad T_n^e - T_1^e) \quad (2)$$

标定球保持位置不变,改变机器人姿态由式 (1) 得:

$$(R_1^b - R_2^b) T_s^e = X_{z1} - X_{z2} \quad (3)$$

基于以上理论,提出简单、高效、易操作的“246”手眼标定方法,即整个标定过程分为  $R_s^e, T_s^e$  两个求解过程,  $R_s^e$  的求解通过机器人线性移动姿态角不变测 4 组数据,  $T_s^e$  的求解通过机器人位姿变化得到 6 组数据,分别通过式 (2)、式 (3) 求解,完成手眼标定。

## 2 标定精度分析

手眼标定的误差主要是由标定过程、扫描仪的精度、标定球精度和机器人的精度引起的,机器人的重复定位精度、扫描仪的精度和标定球精度都是固定的,因此从整个标定过程分析,分析产生误差的原因,并采取一定措施提高标定精度。

### 2.1 最小二乘法圆的拟合

直接使用最小二乘法并未考虑各样本点实际误差,因而导致参数的有偏估计,特别是对个别误差很大的畸变点,对结果的影响往往是灾难性的<sup>[9]</sup>。在此情况下,本文提出了一种具有较高抗干扰能力的基于最小二乘法运用了随机理论圆拟合算法,有效剔除误差较大的样本点再进行圆拟合,有效提高曲线拟合的精度。算法原理如下:

- (1) 对所有扫描得到的点云编号作为总体样本;
- (2) 从中随机选取 8 个样本点,利用最小二乘法求出圆的半径和圆心,作为一个采样样本;
- (3) 定义一个阈值,遍历总体样本所有点,各个点到拟合圆之间的距离小于阈值,则将该点作为该样本的匹配点,如果大于阈值,不作处理;
- (4) 重复步骤 (2) 和步骤 (3) 10000 次得到 10000 个匹配样本;
- (5) 比较各个匹配样本点的个数,取样本点最多的匹配样本,将该匹配样本所有的点进行最小二乘法拟合得到半径和圆心。

(6) 如果有多个匹配样本中的匹配点数都较多,这时说明应该适当增加阈值,利用这些样本点继续重复上述算法直至有一定区分度。

随机选取样本点进行椭圆拟合是考虑到算法的实时性和准确性。如果考虑所有的可能性,譬如总样本空间有 300 个点,选取 8 个不同的样本点一共有  $C_{300}^8 \approx 1.48 \times 10^{15}$  种可能,遍历所有可能性不现实,而且也没有必要。因此该算法步骤我们执行 10000 次,基本可以排除对拟合结果影响较大的点。

### 2.2 标定球扫描位置

在手眼标定过程中,扫描仪对标准球进行扫描位置  $h$  不同,会有明显采集点云发散的情况。如图 3 所示,  $h$  的值越大,扫描仪与标定球法线的夹角变化越大,投影的激光线越宽,这样就会导致扫描的精度,从而产生标定误差,我们把由  $h$  引起的位置误差表示为  $\varepsilon_s(h)$ 。标定误差  $\varepsilon_s$  是与标准球扫描的范围有关系,即  $h$  范围的选择将影响最终的标定精度。

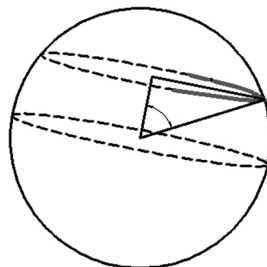


图 3 扫描高度选择与精度关系示意图

激光扫描仪在标定球得到一组点集,记为  $S_a = \{S_{a1}, S_{a2}, \dots, S_{ai}, \dots, S_{an} | S_{ai} = (x_{ai}, y_{ai}); i \geq 2\}$ , 位置误差  $\varepsilon_s(h)$  可以由以下公式求出:

$$\varepsilon_s(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n |(x_s - x_{ai})^2 + (y_s - y_{ai})^2 - (R^2 - h^2)|}{n}} \quad (4)$$

其中  $(x_s, y_s)$  是由  $S_a$  使用最小二乘法拟合出圆弧的圆心坐标。

为了得到扫描精度与扫描高度  $h$  的关系,我们利用 3D 激光扫描仪在标定球 ( $R = 30.013\text{mm}$ ) 不同高度上进行扫描得到点坐标,根据公式(7)得到位置误差  $\varepsilon_s(h)$ ,将不同高度  $h$  的位置误差  $\varepsilon_s(h)$  在图 4 中画出。

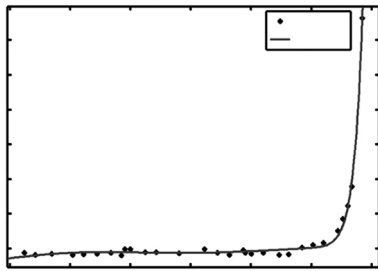


图 4  $\varepsilon_s(h)$  的高斯拟合曲线

其中,  $\varepsilon_s(h)$  的曲线表达式可由高斯拟合得到:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(h) = & 810.4 \exp(-((h - 41.74) \div 4.238)^2) + \\ & 2.548 \times 10^{12} \exp(-((h - 6284) \div 1110)^2) + \\ & 0.005 \exp(-((h - 4.979) \div 8.294)^2) \end{aligned} \quad (5)$$

$\varepsilon_s(h)$  可以从实验数据中计算得到,XY 方向坐标也是用拟合圆弧的方法得到的,因此它们的误差  $\Delta x_s$ 、 $\Delta y_s$  都可以用  $\varepsilon_s(h)$  表示:

$$\Delta x_s = \varepsilon_s(h) \quad \Delta y_s = \varepsilon_s(h)$$

根据测量误差原理,Z 方向的误差  $\Delta z_s$  可以由下式得:

$$\Delta z_s = \left\| \frac{\partial z_s}{\partial r} \right\| \Delta r = \frac{\sqrt{(R^2 - h^2)}}{h} \varepsilon_s(h) \quad (6)$$

这里的  $\Delta z_s$  和  $\Delta x_s$ 、 $\Delta y_s$  一样都是  $h$  的函数,根据误差合成理论 XYZ 三个方向的形成的位置误差  $\|\Delta e\|$  是:

$$\|\Delta e\| = \sqrt{\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2 + \Delta z_s^2} \quad (7)$$

$\|\Delta e\|$  是由 XYZ 方向的误差合成的,  $\|\Delta e\|$  的值直接影响标定的精度,并且  $\|\Delta e\|$  的值越小,标定精度越高。利用式(5)~式(7)可以得到如图(5)所示总误差  $\|\Delta e\|$  与高度的关系。

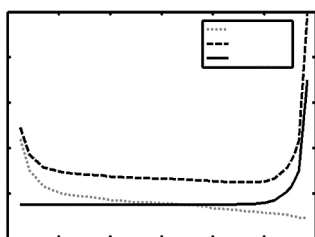


图 5 总误差  $\|\Delta e\|$  的高斯拟合曲线

由图可以看出,对于  $R = 30.013\text{mm}$  的标准球来说,

在  $5 \leq h \leq 26$  时,  $\|\Delta e\|$  的值比较稳定,即精度较高。

### 2.3 扫描仪与标定球的距离

3D 激光扫描仪的激光束具有发散特性,激光束的发散会使点云的采样精度降低,从而影响标定精度<sup>[10]</sup>。距离 3D 激光扫描仪一定距离下垂直入射的激光束宽度满足以下关系:

$$W_D = \frac{\lambda}{2 \tan \theta} - \frac{d}{D} W_d \quad (8)$$

如图 6 所示,其中  $W_d$  是扫描激光最小宽度,宽度最小时激光扫描仪到被扫描物体的距离为  $d$ , $\lambda$  是激光波长, $D$  是激光扫描仪到被扫描物体的距离,  $W_D$  是激光束的宽度,代表激光束的发散程度。

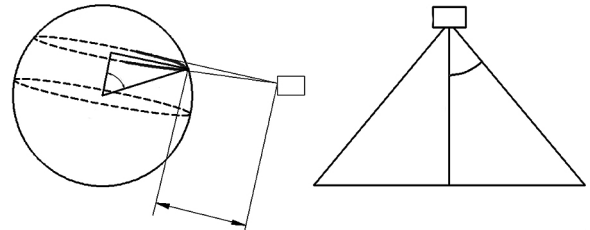


图 6 扫描间距与精度关系示意图

在  $\lambda$  一定的情况下,由式(8)可以得到被扫描物体表面激光宽度随着距离  $D$  的增大而增大,所以激光束宽度和扫描距离密切相关。激光束越宽,代表激光发散程度大,扫描精度随之降低,从而影响标定精度。因此手眼标定过程中扫描仪到标准球的距离在景深范围内最小距离附近进行标定。

### 3 实验

本文采用德国库卡公司的 KR600 工业机器人和德国米铨 scanCONTROL2700-100 3D 激光扫描仪,3D 激光扫描仪固定在工业机器人上,如图 7 所示,利用标定球通过齐次坐标变换和机器人位置变化配合,完成手眼标定。



图 7 手眼标定实验过程

根据标定过程,利用标定球球心坐标和机器人位置得到  $R_s^e$ 、 $T_s^e$ :

$$R_s^e = \begin{bmatrix} -0.936944 & -0.346986 & -0.0416836 \\ 0.34002 & -0.935869 & 0.0806106 \\ -0.0669812 & 0.06123 & 0.995874 \end{bmatrix}$$

$$T_s^e = [166.75 \quad 87.588 \quad -46.6124]^T$$

为了直观的显示手眼标定的精度,我们将得到的标定结果利用机器人运动扫描标定球,通过得到的点云拟合获取球的半径,由此评价标定的精度。下面实

验将使用标定结果对半径为 30.013mm 的标准球在机器人不同位姿下测量 30 次, 所得 30 组半径均值  $\bar{R} = 30.0832\text{mm}$ , 均方根误差  $RMSE = 0.18613$ , 显然这个标定结果没有达到预期的测量精度要求。

因此采用文中提出的三种提高精度的方法分别重新标定, 即在标定过程中, 分别采取扫描点云预处理、保持在 5 ~ 25mm 高度采样、控制扫描仪到标定球的最小景深附近位置等措施, 将得到的标定结果分别对半径为 30.013mm 的标准球在机器人不同位姿下测量 30 次, 得到标准球半径均值以及 RMSE 如表 1 所示。

表 1 手眼标定优化前后标准球半径测量

实验	半径均值/mm	RMSE
优化前	30.0832	0.186131
点云预处理	30.06112	0.101132
高度(5 ~ 25mm)	30.05035	0.094926
距离(最小景深)	30.05211	0.092130
优化后	30.02124	0.039654

综上对比, 采取的提高标定精度的三种措施对标定结果的精度都有一定作用, 于是我们将三种措施运用到整个手眼标定过程中, 得到标定结果  $R_s^e$ 、 $T_s^e$ :

$$R_s^e = \begin{bmatrix} -0.992343 & -0.378342 & -0.0254214 \\ 0.34002 & -0.991432 & 0.0232176 \\ -0.028732 & 0.09732 & 0.9865432 \end{bmatrix}$$

$$T_s^e = [166.43 \quad 86.954 \quad -45.3856]^T$$

利用这个标定结果对标准球扫描 30 次, 得到的标准球半径与直接标定对比, 如图 8 所示, 30 组半径均值  $\bar{R} = 30.021241\text{mm}$ , 均方根误差  $RMSE = 0.039654$ , 说明标定精度基本可以达到机器人扫描自动化加工、质量评价的要求, 并且这个手眼标定的测量结果是稳定的。

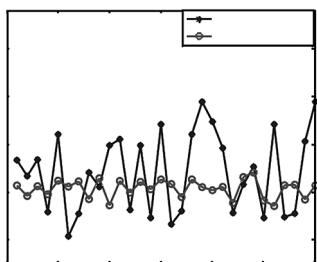


图 8 标定结果测量标准球半径

如图 9 所示, 利用优化标定过程的机器人-扫描仪系统扫描人像得到点云并拟合的效果, 并与无优化标定结果进行对比, 图 9a 头像实体进行扫描, 图 9b、图 9c 分别是优化前后扫描点云拟合情况, 点云错位、异常点现象消失, 扫描的点云精度大大提高。

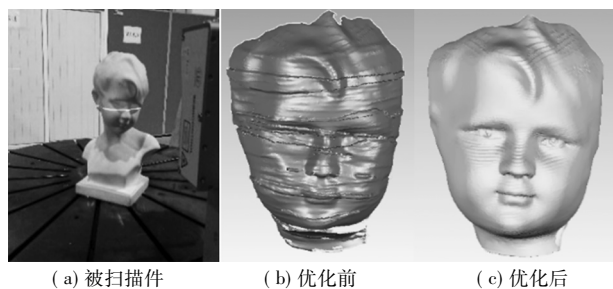


图 9 标定结果扫描工件点云拟合对比效果

## 4 结论

本文针对机器人自动化扫描加工和质量评价过程中的机器人扫描仪手眼标定过程进行理论推导, 提出高效率、易操作的“246”三步骤手眼标定法, 并通过分析手眼标定过程误差产生的因素, 提出了几种提高手眼标定精度的措施, 通过实验验证, 避免了扫描点点云有错位、异常点等误差较大现象, 实现高精度扫描测量, 满足机器人自动化扫描加工、质量评价的精度要求, 为实现机器人扫描、加工和质量评价一体化, 实现机器人自动化加工奠定了基础。

### 【参考文献】

- [1] 伍锡如, 黄国明, 孙立宁. 基于深度学习的工业分拣机器人快速视觉识别与定位算法 [J]. 机器人, 2016, 38(6): 711 - 719.
- [2] 赵扬. 机器人磨削叶片关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [3] 张云珠. 工业机器人手眼标定技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [4] 胡民政, 习俊通. 面向结构光三维测量的两轴转台标定 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4): 506 - 511.
- [5] Larsson S, Kjellander J A P. An Industrial Robot and a Laser Scanner as a Flexible Solution Towards an Automatic System for Reverse Engineering of Unknown Objects [C]. ASME, Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2004: 341 - 350.
- [6] Zhao Z, Liu Y. A hand-eye calibration algorithm based on screw motions [J]. Robotics, 2009, 27(2): 217 - 223.
- [7] Feng C, Wu H T, Bing Q, et al. Combining camera calibration with hand-eye calibration and using in monocular vision [C]. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. IEEE, 2010: 21 - 24.
- [8] Yin S B, Zhu J. Calibration technology in application of robot-laser scanning system [J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 4204.
- [9] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295 - 298.
- [10] 黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 841 - 848.

(编辑 李秀敏)

找检测仪器, 请上

QC 检测仪器网

WWW.QCtester.com

微信号: qctest