

基于双目视觉机器人 TCP 校准方法研究

刘常杰¹, 班荣兴¹, 郭寅², 尹世斌¹, 王一³

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;
3. 华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 工业机器人末端执行器位置参数(TCP)是机器人离线编程及机器人末端工具误差校正的基础,研究快速、准确的 TCP 校准方法对保证工业现场环境下机器人系统顺利正常工作至关重要。以双目视觉测量为基础,结合空间坐标变换理论与机器人运动学,提出了一种应用于工业制造现场的机器人 TCP 参数快速自动校准方法。此方法具有非接触测量、校准速度快、精度高等优点,减少了传统接触式 TCP 校准过程中误差因素,并且克服了其标定速度慢,标定精度不足等缺点。结合 ABB 工业机器人对该方法进行验证实验,实验结果表明:对于直径为 10 mm 的末端工具,提出方法校准精度相对于传统接触式标定有很大的提高,可以满足工业现场高精度的、快速的 TCP 校准要求。

关键词: 工业机器人; 末端位置参数; 双目视觉; 空间坐标变换

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1912-06

Calibration method of TCP based on stereo vision robot

Liu Changjie¹, Ban Rongxing¹, Guo Yin², Yin Shibin¹, Wang Yi³

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072;
2. Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063069, China)

Abstract: The TCP of robot is the foundation of off-line programming and end error correction. Studying fast and accurate calibration method is vital to ensure robots work normally in industrial field environments. In this paper, a TCP automatic calibration method was presented based on binocular vision measurement, combined with the spatial coordinate transformation theory and robot kinematics, which is applicable to industrial manufacturing site. This method has several advantages of non-contact, fast and high precision, which can reduce errors coming from previous calibrating method of contactless measurement and overcome its shortcoming of slowness. This method was testified on ABB robot and then experiment result shows that the accuracy is much better than that of conventional method when the calibration tool having a diameter of 10 mm. It can meet high precision, fast TCP calibration requirements in industrial site.

Key words: industrial robots; TCP; stereo vision; spatial coordinate transform

收稿日期:2014-10-15; 修订日期:2014-11-20

基金项目:“十二五”国家 863 计划(2012AA041205)

作者简介:刘常杰(1971-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事激光及光电测试方面的研究。Email: Liuchangjie@tju.edu.cn

0 引言

随着工业自动化的快速发展,工厂中自动化密集程度越来越高,现代制造业往更加柔性的方向发展成为一大趋势。工业机器人是多轴联动柔性臂,集柔性化、智能化、精密化等先进技术于一体,具有很高的重复定位精度(可达 0.05 mm)。将机器人与各种自动化设备相结合,应用于工业柔性生产,对保持和提升产品质量、提高生产效率和改善劳动条件起到十分重要的作用^[1]。例如,可将焊枪或视觉传感器固定在机器人末端,应用在汽车白车身柔性生产线上,机器人根据预先规划好的运动轨迹完成相应的自动弧焊或柔性测量等作业。

工业机器人运动轨迹的规划主要包括在线示教和离线编程两种方式。前者编程简单但是精度不高,后者在计算机上使用 CAD 模型完成间接示教。当固定在机器人的末端的执行器,如焊枪,探针等发生碰撞、磨损,或者更换执行器的时候,基于在线示教的编程方法需要将机器人运动轨迹需要重新在线示教一遍,这种方法费时费力;而离线编程是基于工具中心点(TCP),只需要对 TCP 进行重新校准。机器人离线编程的方法,在复杂运动轨迹规划、提高机器人工作效率、优化编程等方面具有很大的优势,显然离线编程更适合有高精度要求的现场机器人编程。TCP 的快速准确校准,直接关系到工业现场生产效率和产品质量,可见,工业界对工业机器人的校准要求逐渐提升^[2-3],机器人 TCP 的精确校准十分重要。

国内外针对机器人 TCP 参数校准已经开展过大量的研究,赵娇娇等人^[4]提出一种 7 点法来校准机器人的工具坐标系,即利用前 4 个点确定工具坐标系的位置,利用后 3 个点确定工具坐标系姿态;Ruther 等人提出用镜子作为辅助设备从而不依赖其他精密参考物的校准方法^[5];刘成业等采用 4 点法完成机器人工具坐标系位置的校准^[6];熊烁、柳贺、朴永杰等人也都提出使几个标定 TCP 重合来计算工具中心点^[7-9]。上述文献中的方法,共同点在于都是接触式校准,都要求将 TCP 点接触对齐到同一个固定点上。这些接触式校准方法都存在一些共同的缺点,一方面,焊头是一个有一定面积的圆弧面,校准时被理想化为一个点,这必然会带来一定的误差,同时接触可能会损坏焊枪或者探针;另一方面,需要人眼判断 TCP 点是否接触对齐一个点,不可避免引入人为

误差,同时标定速度也严重地受到限制,每次校准都要重复繁重的校准过程,在工业现场中会严重影响到生产效率。

传统的接触式校准方法已明显不能满足工业现场中需要快速准确地完成 TCP 校准的要求,为此,文中提出基于双目视觉传感器的非接触快速校准方法。根据校准原理,规划出一条或多条校准轨迹。机器人根据校准轨迹运动到特定点,由双目视觉系统拍照解算出机器人 TCP 点在双目视觉传感器坐标系下的坐标,利用空间坐标系的转换可完成 TCP 的校准。该方法能准确且快速地实现机器人工具参数的校准,一定程度上减少并克服了传统接触式校准带来的误差和不便,且一旦校准轨迹规划成功可重复使用,极大地缩减工作人员的劳动量。校准过程简单,只需保证机器人末端在运动过程中能够在双目视觉传感器的视场范围内即可,适用于工业现场机器人工具坐标系位置与姿态的快速校准。

1 TCP 校准原理

工业机器人是具有多个自由度、能够自动执行工作的机器装置,如图 1 为校准原理图,机器人基坐标系为 $\{B\}$,机器人末端杆件坐标系为 $\{E\}$,双目视觉传感器坐标系为 $\{W\}$,焊枪的 TCP 点为 P ,其相对于机器人末端杆件坐标系 $\{E\}$ 的位置偏移向量为 $P_e=[x,y,z]$,为文中需要校准的 TCP 位置参数。

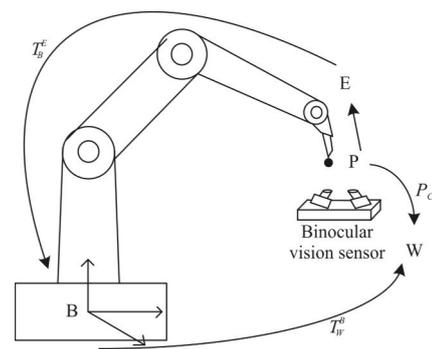


图 1 校准原理图

Fig.1 Calibration principle

$\{B\}$ 与 $\{E\}$ 的转换关系可由机器人正运动学方程获得,即

$$T_B^E = A_1 \cdot A_2 \cdots A_n \quad (1)$$

式中: n 表示机器人总的自由度; A_i 表示机器人相邻关节($i-1$ 关节与 i 关节)之间的转换关系,可通过机

机器人控制器读出。{B} 与 {W} 的转换关系为 $T_w^b =$

$$\begin{bmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。P 点在双目视觉传感器坐标系下的坐标为 $P_c。$$$

由空间坐标转换关系可得：

$$[P_c \ 1]^T = T_w^b \cdot T_b^c \cdot [P_c \ 1]^T = \begin{bmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [P_c \ 1]^T \quad (2)$$

将公式(2)进一步展开可以得到：

$$P_c^T = R_0 R P_c^T + R_0 T + T_0 \quad (3)$$

其中 P_c 可通过双目视觉传感器测量解算出来， R 和 T 可以由机器人正运动学得到，从机器人控制器读出，所以式中未知量为 R_0 、 T_0 和 P_c 。

控制机器人运动，连续测多个点，保证点与点之间机器人的运动为平移运动，即运动过程中机器人末端姿态没有变化，只是位置发生改变，则从控制器读出的机器人 R 没有变化，只是 T 有变化。任意两个点之间由公式(3)有：

$$\begin{cases} P_{c1}^T = R_0 R P_c^T + R_0 T_1 + T_0 \\ P_{c2}^T = R_0 R P_c^T + R_0 T_2 + T_0 \end{cases} \quad (4)$$

两式相减，可以得到：

$$(P_{c1} - P_{c2})^T = R_0 (T_1 - T_2) \quad (5)$$

R_0 为正交矩阵，有九个未知数，控制机器人平移运动 4 个点(或以上)测量即可解算出 R_0 。由矩阵奇异值(SDV)分解法可知形如 $XA=B$ 的矩阵方程有如下解：

$$X = VU^T \quad (6)$$

式中： V 为 AB^T 的右奇异矩阵； U 为 AB^T 左奇异矩阵。多次测量可将公式(3)转化为 $XA=B$ 用奇异值分解法求出 R_0 。

再控制机器人，使其做变姿态运动，机器人末端姿态和位置都会发生变化，即从机器人控制器读出的 R 和 T 都有变化，由公式(3)可得：

$$\begin{cases} P_{c4}^T = R_0 R_4 P_c^T + R_0 T_4 + T_0 \\ P_{c5}^T = R_0 R_5 P_c^T + R_0 T_5 + T_0 \end{cases} \quad (7)$$

两式相减，可得：

$$(P_{c4} - P_{c5})^T = (R_0 R_4 - R_0 R_5) P_c^T + R_0 (T_4 - T_5) \quad (8)$$

多次进行变姿态运动，公式(8)可化为形如 $AX=B$ 的矩阵方程。联立公式(5)、(8)，将公式(5)中的 R_0 带入公式(8)中，可以用最小二乘法求解得到 P_c ，即：

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (9)$$

2 双目视觉测量模型

在 TCP 校准中， P_c 通过双目视觉测量系统获得，因此在标定前需要构建一个双目视觉测量系统。立体视觉测量是基于立体视差原理建立，利用已知的空间相互坐标关系的多个摄像机同时获取被测物的图像，然后利用图像处理解算被测物的三维坐标。其中，双目立体视觉是最简单的立体视觉测量模型^[10]。

双目立体视觉测量模型就是模仿人类双眼获取三维信息建立的，由两个相对位置固定的摄像机组成，被测物与两摄像机在空间中构成一个三角形，且处于两摄像头的公共视场中，由两摄像头分别对被测物拍摄，然后分别对所摄图像进行处理，由坐标转换可以得到被测点在传感器坐标系下的三维坐标。

摄像机成像过程是一个复杂物理过程，涉及到很多个因素。如图 2 为物体空间到图像空间之间的各个坐标系转换过程。1 过程采用非线性因子对其进行修正的理想小孔成像模型。小孔成像模型是线性成像关系，忽略了各种误差因素的影响，是最常用的理想透视变换模型，是分析复杂模型的基础。

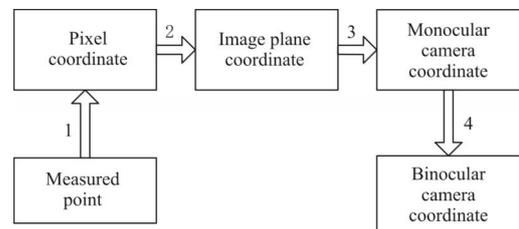


图 2 视觉测量坐标系关系

Fig.2 Coordinates of vision measurement

在小孔成像模型中，用到两组参数，一组是摄像机内参数，包括像元水平和垂直方向的尺寸因子 (dx, dy) 、有效焦距 (c) 和图像主点坐标 (x_0, y_0) ，这组参数用来描述图像传感器几何光学系统特性；另一组是摄像机外参数，即用来表示传感器坐标系与世界坐标系的转换关系，用一个 3×3 的旋转矩阵 R 和 3×1 的平移矩阵 T 来表示。两组参数共同反映三维空间和二维图像点之间的透视变换关系。

如图 3 所示， $O_{c1}-X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$ 为摄像机 1 的坐标系，像面坐标系为 $O_1-U_1V_1$ ，有效焦距为 c_1 ； $O_{c2}-X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 为摄像机 2 的坐标系，其像面坐标系为 $O_2-U_2V_2$ ，有效焦距为 c_2 。空间一点 $P(x_s, y_s, z_s)$ 分别成像在摄像机 1 像平面的 $M_1(u_1, v_1)$ 点和摄像机 2 像平面的 $M_2(u_2, v_2)$ 点。

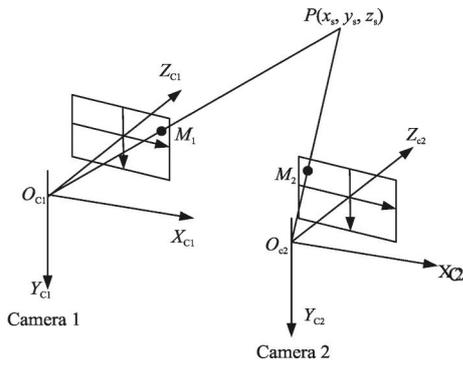


图 3 双目视觉测量模型

Fig. 3 Model of binocular vision measurement

$$\begin{cases} x_s = z_s \cdot X_1 / c_1 \\ y_s = z_s \cdot Y_1 / c_1 \\ z_s = c_1(c_2 \cdot t_1 - X_2 \cdot t_3) / X_2(r_{31} \cdot X_1 + r_{32} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{33}) - \\ \quad c_2(r_{11} \cdot X_1 + r_{12} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{13}) \\ = c_1(c_2 \cdot t_2 - Y_2 \cdot t_3) / Y_2(r_{31} \cdot X_1 + r_{32} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{33}) - \\ \quad c_2(r_{21} \cdot X_1 + r_{22} \cdot Y_1 + c_1 \cdot r_{23}) \end{cases}$$

以单个摄像机来分析, 则有如下的透视变换模型, (u, v) 为像素坐标。

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = N_1 \cdot N_2 \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $N_1 = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为内参数矩阵; $N_2 = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

为摄像机坐标系与世界坐标系的转换矩阵; ρ 为比例因子。定义摄像机坐标系为世界坐标系, 则 $N_2 =$

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

考虑摄像机镜头的二阶畸变, 需要将径向畸变 (k_1, k_2) 、切向畸变 (p_1, p_2) 等相机内参数带入, 对图像处理结果进行修正。

摄像机 2 与摄像机 1 的关系可用一组旋转矩阵

$$R \text{ 和平移矩阵 } T \text{ 来表示: } R = N_2 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, T =$$

$[t_1 \ t_2 \ t_3]$, 则双目视觉数学模型如公式(10)所示, 标定得出旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 则可通过被测点在两摄像机像面坐标系下的坐标 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 可求出空间点的三维坐标 (x_s, y_s, z_s) 。此模型通过增加一个摄像机的方法提供补充约束条件, 从而消除了从二维空间到三维空间映射的多义性。

3 实验及结果分析

为验证上述理论, 采用两个型号为 BFLY-PGE-13E4M-CS 的 POINTGREY 相机和两个焦距为 12 mm 工业镜头构建一个双目视觉测量传感器, 并结合实验室的 ABB 公司的 6R 型 IRB2400 机器人和一个与机器人法兰盘相接的校准附件 A (小圆头直径为 10 mm, 可在圆截面上贴上光刻靶标, 长度为 165 mm) 搭建了一个实验平台。利用此试验平台做了两个对比试验。实验 1 就是采用双目视觉传感器对校准附件 A 的 TCP 点进行标定, 实验 2 就是采用四点法, 移动机器人以不同姿态对齐一个固定点, 求解出其 TCP, 然后两个结果进行比较。

3.1 基于双目视觉的校准实验

首先进行双目视觉两摄像头外参内参的标定, 摄像机的标定是视觉测量的关键步骤, 目前有很多种标定方法, 如传统标定方法, 自标定法等。传统标定法的典型代表有: DLT 方法^[11], Weng 迭代法^[12], Tsai 方法^[13]等。文中采用的是基于 2D 平面靶标的 Zhang 模型的标定法^[14], 在视觉传感器视场内放置精密的平面靶标, 相机对靶标上精密控制点进行拍照处理, 标定出两相机的内外参数如下。

左相机内参:

$$a_x = 2\ 370.725\ 801 \quad a_y = 2\ 372.156\ 414$$

$$u_0 = 650.453\ 050 \quad v_0 = 529.987\ 091$$

$$k_1 = -0.143\ 073 \quad k_2 = 0.552\ 133$$

$$p_1 = 0.000\ 064 \quad p_2 = 0.002\ 567$$

右相机内参:

$$a_x = 2\ 369.462\ 036 \quad a_y = 2\ 371.719\ 548$$

$$u_0 = 635.957\ 169 \quad v_0 = 511.977\ 788$$

$$k_1 = -0.098\ 341 \quad k_2 = -0.230\ 219$$

$$p_1 = 0.000\ 775 \quad p_2 = 0.000\ 736$$

两相机之间的 R, T 的参数如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.799\ 958 & 0.009\ 838 & 0.599\ 975 \\ -0.016\ 505 & 0.999\ 848 & 0.005\ 611 \\ -0.599\ 829 & -0.014\ 391 & 0.799\ 999 \end{bmatrix}$$

$$T = [-99.297\ 460 \quad 3.343\ 065 \quad 33.998\ 575]^T$$

将校准附件 A 固定在机器人末端, 并在其末端贴上反光标记点 (在现场应用时可使用专用的小套筒, 套筒的前端有可供视觉传感器拍照提取圆心的圆形轮廓), 控制机器人移动到双目视觉传感器的视场内, 两传感器同时对 A 末端的反光标记点进行拍照, 如图 4 所示, 同时记录下机器人末端姿态

R, T 。对标记点进行图像处理,分别得到标记点的圆心坐标,即中心点在各自摄像机拍摄图像中的像素坐标,再转换到各自图像像面坐标系下的坐标,最后根据双目视觉测量数学模型即可解算出 A 末端的圆心在双目视觉传感器坐标系下的坐标 P_c 。做六次平移运动,六次变姿态运动,得到 12 组 P_c 和机器人姿态 R, T ,再根据 TCP 标定原理计算出机器人工具参数 P_e 。连续标定 10 次得到结果如表 1 所示。

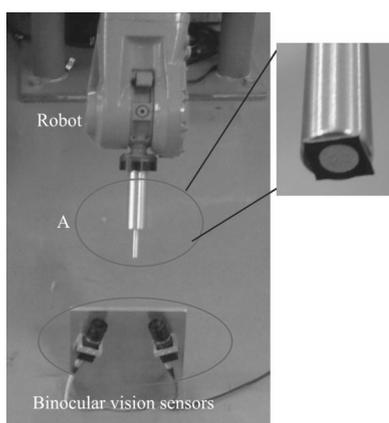


图 4 基于双目视觉的校准实验

Fig.4 Calibration experiment based on binocular vision sensors

表 1 基于双目视觉测量系统标定结果

Tab.1 Calibration results based on binocular vision measurement system

No.	P_e			Error/mm
	x/mm	y/mm	z/mm	
1	0.124 5	0.254 3	165.530 7	
2	0.253 0	0.142 7	165.406 8	
3	0.098 5	-0.189 4	165.373 2	
4	0.102 3	0.245 2	165.208 6	
5	-0.109 6	0.104 2	165.108 5	
6	-0.254 6	0.189 3	165.340 2	
7	0.308 6	0.245 3	165.200 4	
8	-0.142 5	-0.254 3	165.098 6	
9	0.098 6	0.325 6	165.206 5	
10	0.108 6	0.231 5	165.347 6	
Error	$\sum_{i=2}^{10} (P_{e1}-P_{ei}) \cdot (P_{e1}-P_{ei})^T/9=0.441 1$			

3.2 基于接触法的校准实验

在机器人运动范围内放置一小球,球上有一个探针,控制机器人使 A 缓慢靠近探针,尽量使 A 末端的圆心接触且对齐探针,记录下对齐后机器人末端的 R, T 。控制机器人做六次变姿态运动,每次都使

A 的中点从不同角度使接触对齐探针,如图 5 所示。根据 4 点法求出 P_c ,采用最小二乘法求出校准误差。连续实验 5 次,得出标定结果如表 2 所示。

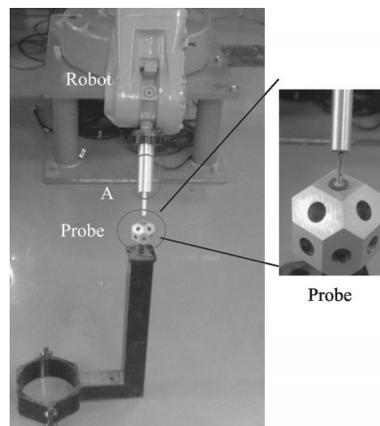


图 5 基于接触法的校准实验

Fig.5 Calibration experiment based on contact method

表 2 基于接触法的标定结果

Tab.2 Calibration results based on contact method

No.	P_e			Error/mm
	x/mm	y/mm	z/mm	
1	0.367 7	-0.087 3	165.945 6	2.125 6
2	0.378 3	-0.085 2	165.988 8	1.892 2
3	-0.235 6	-1.141 2	166.032 9	1.692 3
4	0.810 5	0.235 6	165.176 2	0.868 1
5	-0.893 9	0.648 9	164.143 8	2.324 4

由表 1 的数据可以得出:基于双目视觉测量系统的标定方法误差为 0.441 1;表 2 的实验数据表明,对于同一校准附件 A,接触式对点标定误差较大且结果波动较大。分析原因为 A 的圆头直径较大(为 10 mm),人为对点很难每次都精确对齐同一个点,引入人为误差;基于双目视觉的校准利用软件对标记点圆心进行亚像素提取,误差较小,因此,校准稳定性和校准精度都较高。在实验标定过程中,基于双目视觉的 TCP 标定完全可以实现快速校准,只需要几分钟即可完成。当现场需要校准时,可重复利用先前规划好的轨迹,保证工具末端在双目视觉传感器的视场范围内即可;而接触式标定每次校准都需要手动控制机器人且需要人眼去判定是否接触同一个点,相对来说耗费更多的人力和时间,而且校准精度得不到保证。所以,基于双目视觉机器人 TCP 标定方法可以进一步提高 TCP 校准精度,大幅度地提高生产效率。

4 结 论

文中首先针对机器人末端 TCP 的标定,提出了一种基于双目视觉测量的非接触快速校准方法,介绍了标定原理和双目立体视觉模型并做了对比试验。实验表明:对于同一标定工具,该方法相对于接触法标定具有较高的精度和较高的效率。但是,该方法需要在前期搭建一个双目测量系统,且要对相机内外参数进行准确的标定,否则会影响到最后标定精度;工业现场中可加工一个专用小套筒,末端有可供提取的圆形轮廓,直接套在焊枪焊头上,无需反复贴反射标记点。一旦构建成功,则可应用于工业现场多种校准,比如焊枪在机器人末端的工具参数的校准、视觉测量手眼关系的校准等等,而且校准快速准确,无需对齐一个点的复杂劳动,能满足现场精度要求,简单快速,大大节省劳动力。

参考文献:

- [1] Pan Lixia. Research on the development and application of industrial robots[J]. *Shanxi Science and Technology*, 2010, 25(3): 22-25.
- [2] Li Xin, Liu Hui, Chen Jun, et al. Review about the calibration of industrial robot [C]//Jiangsu Province Measurement Papers, 2013: 42-47. (in Chinese)
李新, 刘辉, 陈君, 等. 工业机器人校准方法研究综述[C]//江苏省计量测试学术论文集, 2013: 42-47.
- [3] Nubiola A, Bonev I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker [J]. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29: 236-245.
- [4] Zhao Jiaojiao, Zhu Wei. Arc welding robot calibration [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2008, 36: 31-34. (in Chinese)
赵娇娇, 朱伟. 弧焊机器人系统标定[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36: 31-34.
- [5] Ruther M, Lenz M, Bischof H. The narcissistic robot: robot calibration using a mirror [C]//11th International Conference On Control Automation Robotics and Vision, 2010: 169-174.
- [6] Liu Chengye, Li Wengguang, Ma Shiguo, et al. A robot tool frame calibration method [J]. *Shandong Science*, 2012, 25(1): 70-74. (in Chinese)
刘成业, 李文广, 马世国, 等. 一种工业机器人工具坐标系标定方法[J]. 山东科学, 2012, 25(1): 70-74.
- [7] Xiong Shuo, Ye Bosheng, Jiang Ming. Study of robot tool coordibate frame calibration [J]. *Machinery & Electronics*, 2012, 6: 60-63. (in Chinese)
熊硕, 叶伯生, 蒋明. 机器人工具坐标系标定算法研究[J]. 机械与电子, 2012, 6: 60-63.
- [8] Liu He, Zeng Hui. Research on calibration of welding robot's tool parameters [J]. *China New Technologies and Products*, 2013, 11(Part 2): 5. (in Chinese)
柳贺, 曾辉. 焊接机器人的工具参数标定研究 [J]. 中国新技术新产品, 2013, 11(下): 5.
- [9] Piao Yongjie, Qiu Tao, Chen Shanben. Calibration of TCF parameters of arc welding robot [J]. *Robot*, 2001, 23(2): 109-111. (in Chinese)
朴永杰, 邱涛, 陈善本. 弧焊机器人 TCF 参数的标定[J]. 机器人, 2001, 23(2): 109-111.
- [10] Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 105-107.(in Chinese)
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 105-107.
- [11] Faugeras O D, Toscani G. The calibration problem for stereo [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, 1: 15-20.
- [12] Weng J Y, Cohen P, Hernion M. Camera calibration with distortion model and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Itelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [13] Tsai R, Lenz R K. A technique for full autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. *IEEE Trans Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-358.
- [14] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[R]. Redmond: Microsoft Research, 2012.