

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.004

# 基于多孔标定法的串联机器人运动学标定研究\*

王宪伦, 胡晓伟

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:**针对串联机器人传统标定方法有缺陷,使机器人标定后运动精度仍旧存在较大误差的问题,对串联机器人进行了运动学标定方法的研究。在单孔标定法的基础上进行了优化改进,提出了一种基于多孔标定法的串联机器人运动学标定技术,通过 MDH 误差模型计算出机器人的定位误差,然后将误差值进行了补偿,从而提高了机器人的运动精度;搭建了标定平台,通过自制的多孔标定板和探针等工具对多孔标定法的标定效果进行了实验研究,详细记录了实验数据,并将实验数据进行了处理和综合分析。研究表明:多孔标定法对该类型串联机器人的标定作用明显,有效地提高了机器人的定位精度,标定前后机器人的运动误差减小了数倍;该方法对该类型机器人的运动参数学标定具有极大的现实作用和意义,为机器人的进一步研究和应用奠定了良好的基础。

**关键词:**运动精度;运动学标定;多孔标定法;MDH 误差模型

中图分类号:TH113.2;TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0470-06

## Kinematics calibration of series robots based on porous calibration method

WANG Xian-lun, HU Xiao-wei

(College of mechanical and electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of traditional calibration methods for serial robots, there were still large errors in the kinematic accuracy of the robot after calibration, kinematics calibration of serial robot was carried out. Based on single hole calibration method, optimization and improvement were made. A kinematics calibration technology of serial robot based on multi-hole calibration method was proposed. The positioning error of the robot was calculated by MDH error model, and then the error value was compensated to improve the motion accuracy of the robot. A calibration platform was built, and the calibration effect of the porous calibration method was studied by means of self-made porous calibration plate and probe. The experimental data were recorded in detail and processed and analyzed comprehensively. The results indicate that the multi-hole calibration method has a significant effect on the calibration of this type of serial robots, effectively improves the positioning accuracy of the robot, and reduces the motion error of the robot several times before and after calibration. The calibration of kinematic parameters of this type of robot has great practical significance and laid a good foundation for further research and application of the robot.

**Key words:** motion accuracy; kinematic calibration; porous calibration; MDH error model

## 0 引言

定位精度是影响机器人性能的重要因素,故对机器人进行标定来提高机器人的定位精度也显得越来越重要。机器人的运动学标定是离线编程技术的基础,也是机器人生产和加工使用过程中不可或缺的工作。通过机器人运动学标定可以极大地降低机器人的位姿

误差,从而提高机器人的绝对定位精度<sup>[1-3]</sup>。我国对机器人的标定技术有着广泛地研究。张文增等<sup>[4]</sup>以机器人内部编码器数据和连杆坐标变换,通过计算机器人工件坐标系相对于基坐标系的变换矩阵的方法完成标定,并在 MOTOMN SK 弧焊机器人上得到了实验验证;崔鲲等人<sup>[4]</sup>以 V01 弧焊机器人为例,利用机器人示教程序及 3 点定圆方法,标定了该机器人的结构参

收稿日期:2018-10-25

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2018GNC112007)

作者简介:王宪伦(1978-),男,山东济宁人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事机器人技术、智能控制方面的研究。E-mail:xlwang@126.com

数;张铁等人<sup>[6]</sup>基于机器人 D-H 运动学参数建立了各坐标系的齐次坐标误差模型,推导了基于距离误差的运动学标定模型;宋月娥等<sup>[7]</sup>提出了利用标准试件的方法对工具坐标系进行标定;熊烁等人<sup>[8]</sup>提出了将工具标定分为两个部分进行,通过空间内一点的不同姿态示教得到了到工具 TCP 位置的标定,通过 TCP 坐标系两个方向上的示教得到了姿态标定。

本文将运用多孔标定法,通过自制的六孔标定板进行运动学标定,并对标定方法进行说明,最后对标定前后数据进行对比分析,以验证标定后的机器人定位精度是否得到提升。

## 1 多孔标定法原理

### 1.1 标定原理

大部分的机器人标定步骤为:运动学建模、参数标识、数据测量和误差补偿。其中,数据测量是最重要的环节,测量手段以及测量设备的选择非常重要,测量设备精度的高低和使用条件的不同将直接影响测量结果的准确性,进而对机器人本体标定结果的准确性产生影响<sup>[9]</sup>。目前,用于机器人连杆姿态测量的方式主要有两种类型,一种是借助外部精密的设备来测量,虽然其精度较高,但是存在诸多缺点,如安装复杂、成本较高、数据采集比较耗费时间、测量方法繁琐等;另一类测量方式是借助机器人本身传感器而不需要外部设备的简单标定方法,该方法测量简单、成本较低,但精度相对较低。比较典型的是刘振宇等人<sup>[10]</sup>提出的利用一种凹槽球面接触装置,来测量机器人末端连杆参数的简单单孔标定方法。本文所采用标定技术,是在传统单孔标定技术的基础上进行改进优化的多孔标定技术<sup>[11-12]</sup>。

多孔标定法就是将标定板固定在机器人的工作范围内<sup>[13]</sup>,通过控制机器人运动,使机器人探针前端的触头分别与标定板上的每一个孔以不同的姿态接触 5 次。由于标定板是固定的,虽然每次接触同一个孔时机器人的末端探针触头的姿态是不同的,但是孔的位置是不变的,也就是说机器人末端探针的前端触头球心的实际位置  $P^n$  是不变的。根据各个关节的运动值可以由正运动学求得理论位置  $P^n$ 。虽然每次与同一个孔相接触的实际位置是相同的,但是因为各个运动

学参数存在误差,理论位置  $P^n$  是不一样的。当通过 MDH 误差模型辨识出机器人的各个参数的误差值之后<sup>[14]</sup>,再对各个参数进行误差  $\Delta d_i$  补偿。此时,  $\Delta \mathbf{a} = [\Delta a_1 \Delta a_2 L \Delta a_n]^T$ ,  $\Delta \boldsymbol{\alpha} = [\Delta \alpha_1 \Delta \alpha_2 L \Delta \alpha_n]^T$ ,  $\Delta \mathbf{d} = [\Delta d_1 \Delta d_2 L \Delta d_n]^T$ ,  $\Delta \boldsymbol{\theta} = [\Delta \theta_1 \Delta \theta_2 L \Delta \theta_n]^T$ ,  $\Delta \boldsymbol{\beta} = [\Delta \beta_1 \Delta \beta_2 L \Delta \beta_n]^T$  都已经求得,将  $\Delta \mathbf{a}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\alpha}$ 、 $\Delta \mathbf{d}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\beta}$  分别与相应的名义参数值相加,作为新的参数值,并在程序中进行相应的修改。将给定的指令位姿按照新的参数值,进行相应的逆运动学求解,求解出关节转角,在程序中将的值作为最后的值输出,进而控制各个轴转动,从而实现对机器人的运动学参数的标定。这种标定方法的优点就是不需要测量的值也可以求得运动学参数的误差值,进而完成标定。

标定板多孔标定原理如图 1 所示。

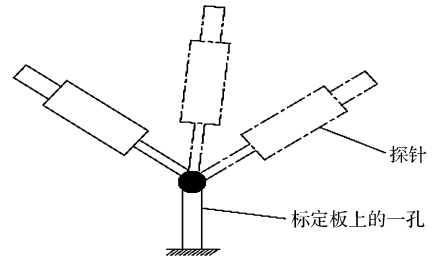


图 1 标定板多孔标定原理图

相比于传统的单孔标定技术,多孔标定法原理上虽然与单孔标定法基本相同,但是多孔标定技术的优势在于一次标定和分别与 6 个孔以不同的姿态接触多次,然后计算出每个孔接触时的 4 个参数误差,求其均值作为最终的补偿误差,使得标定精度得到提高,克服了传统单孔标定法的精度不高的问题。

### 1.2 MDH 误差模型

机器人标定需要保证足够的参数来描述所有可能的运动,末端执行器的误差必须能有模型参数的误差来表示。传统的 DH 参数法的不足之处在于,当相邻两关节公称平行时关节轴姿态的微小变化会引起 DH 参数的很大改变。本文所采用的 MDH 误差模型,是在 DH 参数法的基础上引入另一个转动项  $Rot(y, \beta_i)$  进行修正,它克服了 DH 参数法存在的缺陷,使得机器人的标定更加准确,误差更小。

修正后  ${}^i_{i-1} \mathbf{T}$  矩阵为:

$${}^i_{i-1} \mathbf{T} = R_x(\alpha_{i-2}) D_x(\alpha_{i-2}) R_z(\theta_i) D_z(d_i) R_y(\beta_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i c\beta_i & -s\theta_i & c\theta_i s\beta_i & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} c\beta_i + s\alpha_{i-1} s\beta_i & c\theta_i c\alpha_{i-1} & s\theta_i c\alpha_{i-1} s\beta_i - s\alpha_{i-1} c\beta_i & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} c\beta_i - c\alpha_{i-1} s\beta_i & c\theta_i s\alpha_{i-1} & s\theta_i s\alpha_{i-1} s\beta_i + c\alpha_{i-1} c\beta_i & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对式(1) 两边分别取微分得:

$$d_i^{i-1} T = \frac{\delta_i^{i-1} T}{\delta \alpha_{i-1}} \Delta \alpha_{i-1} + \frac{\delta_i^{i-1} T}{\delta \alpha_{i-1}} \Delta \alpha_{i-1} + \frac{\delta_i^{i-1} T}{\delta d_i} \Delta d_i + \frac{\delta_i^{i-1} T}{\delta \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\delta_i^{i-1} T}{\delta \beta_i} \Delta \beta_i \quad (2)$$

机器人末端坐标系相对于机器人基座坐标系的

变换矩阵可以表示为:

$$T + dT = \prod_{i=1}^n ({}^{i-1} T + d_i^{i-1} T) = \prod_{i=1}^n ({}^{i-1} T + {}^{i-1} T d_i^{i-1} T) \quad (3)$$

化简得:

$$dT = T \sum_{i=1}^n H_{i+1}^{-1} \Delta_i^{i-1} T H_{i+1} \quad (4)$$

提取矩阵中位置为(1,4),(2,4),(3,4) 的元素组成列矩阵,并定义为  $\Delta P = [\Delta P_x \Delta P_y \Delta P_z]^T$ 。因为  $\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z$  为运动学参数误差的函数,可以化简得:

$$\Delta P = N_a \Delta a + N_a \Delta a + N_d \Delta d + N_\theta \Delta \theta + N_\beta \Delta \beta \quad (5)$$

式中: $N_a$ — 连杆长度的误差所对应的系数矩阵; $N_a$ — 连杆转角  $a$  的误差所对应的系数矩阵; $N_d$ — 连杆偏距  $d$  的误差所对应的系数矩阵; $N_\theta$ — 关节角  $\theta$  的误差所对应的系数矩阵; $N_\beta$ — 绕  $y$  轴旋转角  $\beta$  所对应的误差的系数矩阵; $\Delta a$ — 连杆长度误差; $\Delta a$ — 连杆转角误

差; $\Delta d$ — 连杆偏距误差; $\Delta \theta$ — 关节转角误差。

其中: $\Delta a = [\Delta a_1 \Delta a_2 L \Delta a_n]^T, \Delta a = [\Delta a_1 \Delta a_2 L \Delta a_n]^T, \Delta d = [\Delta d_1 \Delta d_2 L \Delta d_n]^T, \Delta \theta = [\Delta \theta_1 \Delta \theta_2 L \Delta \theta_n]^T, \Delta \beta = [\Delta \beta_1 \Delta \beta_2 L \Delta \beta_n]^T$ 。当给定机器人的某一个位置,根据名义值下的  $D-H$  参数模型计算出机器人末端在基座坐标系下的理论位置坐标  $P$ ,由于误差的存在,其实际到达的位置为  $P^1, \Delta P$  为实际位置与理论位置坐标的误差值。从而求得机器人运动学标定的 MDH 误差模型:

$$\begin{cases} \Delta P = P^1 - P \\ \Delta P = N_a \Delta a + N_a \Delta a + N_d \Delta d + N_\theta \Delta \theta + N_\beta \Delta \beta \end{cases} \quad (6)$$

根据 MDH 误差模型:

$$\begin{cases} P_1^a - P_1^n = N_{1a} \Delta a + N_{1a} \Delta a + N_{1d} \Delta d + N_{1\theta} \Delta \theta + N_{1\beta} \Delta \beta \\ P_2^a - P_2^n = N_{2a} \Delta a + N_{2a} \Delta a + N_{2d} \Delta d + N_{2\theta} \Delta \theta + N_{2\beta} \Delta \beta \\ P_1^a = P_2^a \end{cases} \quad (7)$$

化简为:

$$P_1^a - P_2^a = (N_{2a} - N_{1a}) \Delta a + (N_{2a} - N_{1a}) \Delta a + (N_{2d} - N_{1d}) \Delta d + (N_{2\theta} - N_{1\theta}) \Delta \theta + (N_{2\beta} - N_{1\beta}) \Delta \beta \quad (8)$$

通过上式,不通过实际测量就可以计算出机器人末端位姿实际值与理论值之间的误差,通过离线编程程序进行误差补偿,从而实现机器人的运动学标定。

### 2.1.2 六孔标定板

本文采用多孔标定板的标定方法进行标定,控制该机器人运动,使机器人末端工具触头与六孔标定板上的孔相接触进行多孔标定,操作简单。六孔标定板示意图如图 3 所示。

## 2 机器人运动学标定实验

### 2.1 标定系统

对自主研发的机器人进行运动学标定平台系统包括机器人系统、标定工具、六孔标定板、计算机系统组成。机器人运动学标定实验平台如图 2 所示。

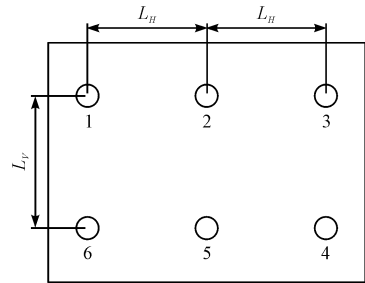
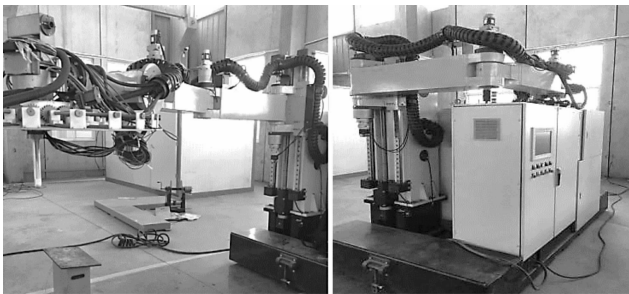


图 3 六孔标定板示意图

标定板上的 6 个孔的直径相等,孔的直径小于机器人末端测头前端的直径。每两个孔的水平间距和垂直间距在加工过程中得到了精确地保证。由于水平间距和垂直间距已知,该标定板可以在机器人标定后对标定结果进行检验。

相对于传统的单孔标定板,该六孔标定板有以下两个优势:(1)一次标定过程可标定 6 次,且每个孔机器人末端探针以 5 种不同的姿态与其接触,6 次测量取平均值,测量结果更佳准确;(2)孔距和以及孔径大小均可调,



(a) 状态1

(b) 状态2

图 2 机器人运动学标定实验平台

#### 2.1.1 机器人系统

机器人系统包括机器人机械本体部分、上位机软件、电气控制系统、通信模块等组成。

能够适应不同型号不同大小的机器人,针对于不同的机器人取最佳的孔径和孔距,可使标定结果更加理想准确。

2.1.3 末端探针

末端探针前端的触头呈半球状,末端探针与机器人装配关系如图4所示。

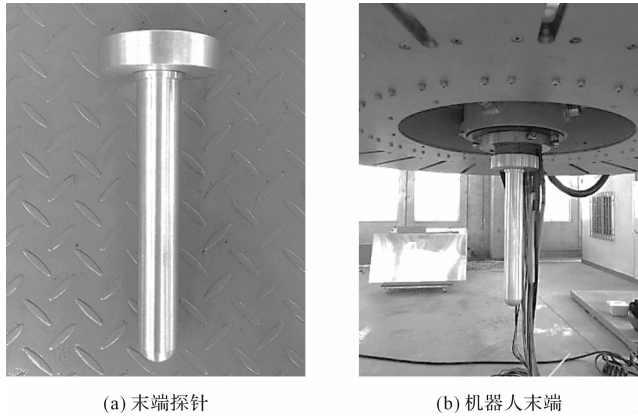


图4 末端探针与机器人装配关系

2.2 标定过程

标定操作步骤具体为:

- (1)首先,在机器人的工作范围内固定好标定板;
- (2)控制机器人运动,使其末端探针触头与标定

板上的每个孔相接触5次,记录孔的编号以及每次接触时的各个关节的运动数值,直至6个孔全部完成;

(3)移动标定板到工作空间的其他位置并固定,重复步骤(2),得到的实验记录数据如表1所示。

让探针触头以不同的姿态,多次接触标定板上的孔4,探针触头与孔接触如图5所示。

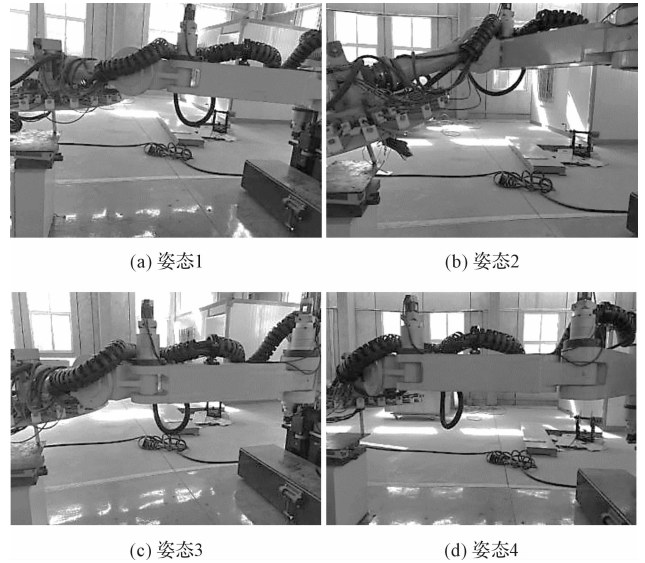


图5 探针触头与孔接触

表1 实验记录数据

孔编号	次数	关节 1/(mm)	关节 2/(°)	关节 3/(°)	关节 4/(°)	关节 5/(°)	关节 6/(°)
1	1	64	-38.20	63.80	16.09	90.78	0
	2	63	-37.80	61.30	19.50	90.78	0
	3	63	-37.00	58.20	22	90.78	4.29
	4	16	54.4	-57.4	-25.6	93.82	-0.59
	5	15	53.2	-52.6	-31.2	93.82	-2.17
2	1	18	49.8	-53.7	-31.6	93.82	-2.34
	2	17	48.8	-50.7	-35.5	93.82	-2.43
	3	152	-41.6	69.8	6.8	84.36	-3.07
	4	153	-40.2	58.2	21.2	84.36	-0.94
	5	153	-35.3	41.8	41.7	84.36	-0.23
3	1	156	-39.9	41.8	41.7	84.36	1.56
	2	113	-37.1	31.9	53.7	87.56	1.75
	3	176	43.5	-60.9	-18.2	82.38	1.65
	4	134	45.0	-61.5	-21.7	85.44	6.67
	5	78	46.5	-62.1	-19.9	89.75	-1.45
4	1	121	52.7	-69.6	-24.4	86.30	-1.45
	2	281	25.1	-87.2	81	73.13	-1.45
	3	215	-29	10.6	80.1	79.16	-0.25
	4	119	47.8	-53.5	-44.4	86.47	-0.25
	5	44	49	-53	-44.2	91.58	-7.19
5	1	40	53.9	-53.6	-42.4	91.58	-7.19
	2	32	51.4	-46.4	-52.0	92.43	-3.64
	3	140	45.4	-36.8	-54.3	83.67	-12.76
	4	52	48.5	-40.0	-53.1	90.06	-13.01
	5	71	-48.2	64.7	33.8	90.13	0.11
6	1	83	-41.7	61.6	33.9	89.12	-0.06
	2	80	-43.9	69.8	25.2	89.26	-1.75
	3	245	35.1	-87.0	78.1	76	0.73
	4	221	57.3	-86.8	18.2	77.96	0.73
	5	258	55.6	-83.9	9.1	73.39	15.33

## 3 实验数据处理

### 3.1 数据处理过程

#### 3.1.1 多孔标定法数据处理

本研究分别将机器人的末端探针触头与标定板上的每个孔相接触时的 5 组关节运动值以 (1,2)、(2,3)、(3,4)、(4,5) 代入式(8),将得到的方程组进行求解,得到多孔标定法测得的运动学参数误差如表 2 所示。

表 2 多孔标定法测得的运动学参数误差

连杆	$\Delta\alpha_{i-1}/\text{rad}$	$\Delta a_{i-1}/\text{mm}$	$\Delta d_i/\text{mm}$	$\Delta\theta_i/\text{rad}$
1	0.034 2	0	0	0.026 4
2	-0.015 6	0	0	0
3	-0.001 5	6.448 4	0	0.001 9
4	0.001 1	3.288 8	0	0.052 2
5	0.098 6	-6.946 9	-8.465 3	-0.029 4
6	-0.096 4	8.635 6	1.945 8	0.100 0

从表 2 可以看出:得到的运动学参数误差较大,这

$$\Delta P_s = \left| \sqrt{(P_{ijx}^a - P_{ij+1x}^a)^2 + (P_{ijy}^a - P_{ij+1y}^a)^2 + (P_{ijz}^a - P_{ij+1z}^a)^2} - L_H \right| \quad (9)$$

标定后的距离误差为:

$$\Delta P_s = \left| \sqrt{(P_{ijx}^n - P_{ij+1x}^n)^2 + (P_{ijy}^n - P_{ij+1y}^n)^2 + (P_{ijz}^n - P_{ij+1z}^n)^2} - L_H \right| \quad (10)$$

当标定板上的相邻两孔处于竖直方向时,标定前的距离误差为:

$$\Delta P_s = \left| \sqrt{(P_{ijx}^a - P_{ij+1x}^a)^2 + (P_{ijy}^a - P_{ij+1y}^a)^2 + (P_{ijz}^a - P_{ij+1z}^a)^2} - L_v \right| \quad (11)$$

标定后的距离误差为:

$$\Delta P_s = \left| \sqrt{(P_{ijx}^n - P_{ij+1x}^n)^2 + (P_{ijy}^n - P_{ij+1y}^n)^2 + (P_{ijz}^n - P_{ij+1z}^n)^2} - L_v \right| \quad (12)$$

由式(9~12)求得标定后误差值,标定前后的距离误差对比图如图 6 所示。

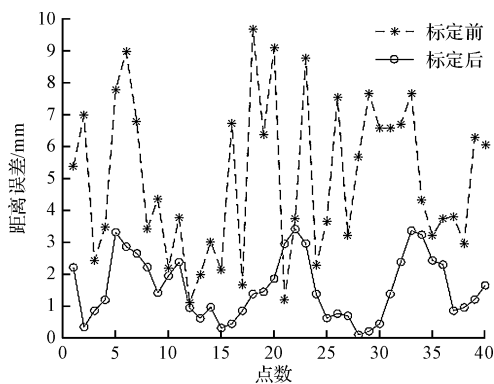


图 6 标定前后的距离误差对比图

### 3.2 分析与结论

由标定前后的距离误差对比图可以看出:通过多

是由于为了节省加工成本,各个零部件在加工过程中精度要求稍低,再加上装配过程中存在误差,部分焊接件的影响造成的。

#### 3.1.2 误差补偿及精度验证

将触头与标定板上的每个孔相接触的第 3 组关节运动值带入理想的无误差运动模型求得机器人末端的位置<sup>[15]</sup>,代表每次标定板固定的位置编号,代表标定板上孔的位置编号。按照前面章节的误差补偿方案对运动学参数标定方法得到的误差值进行补偿后,将触头与每个孔相接触的第 3 组关节运动值带入修正后的运动模型中,计算得到末端的位置。

由于标定板上的、已知,即孔的中心距已知,根据位置和可以分别得到相邻的孔间的距离,求取它们与相应、的差值。

当标定板上的相邻两孔处于水平方向时,标定前的距离误差为:

孔标定技术对该机器人进行运动学标定后,得到的距离误差的大小和波动都较标定前要小。通过计算得到标定后的平均距离误差为 1.581 9 mm,而标定前的平均距离误差为 5.471 7 mm,可以看出标定后的绝对定位精度较标定前有了明显的提高。故通过多孔标定法对该机器人的标定,使得机器人的误差得到补偿,提高了末端位姿的定位精度。

## 4 结束语

本研究对机器人的运动学参数标定进行了实验研究。首先概括地介绍了机器人标定技术的研究现状,然后详细说明了多孔标定法的标定原理,并进行了理论公式推导,进而通过搭建标定平台进行了标定实验,对实验数据进行了详细的记录,并对数据进行处理和

(下转第 500 页)

本文引用格式:

王宪伦,胡晓伟.基于多孔标定法的串联机器人运动学标定研究[J].机电工程,2019,36(5):470-474,500.

WANG Xian-lun, HU Xiao-wei. Kinematics calibration of series robots based on porous calibration method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(5):470-474,500.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>