

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.010

固定电机驱动的平面关节型机器人 无参数运动学标定

李洪超¹, 张伟中^{1,2}, 李寅翔¹, 张 奖¹, 李建万¹

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江机电职业技术学院 电气电子工程学院, 浙江 杭州 310053)

摘 要:针对传统平面关节型机器人(简称 SCARA)运动臂质量大的缺点,设计一种固定电机驱动的 SCARA。为提高其精度用无参数化标定的方法进行运动学标定,根据 D-H 方法,在空间坐标转换的基础上建立了该 SCARA 的数学模型,得到杆件间相对位置关系;通过外部测量设备测出末端执行器的位姿,利用运动学正逆解解出实际位姿与理论位姿之间驱动输入的差值,补偿到理论的输入中,得到补偿后的动平台位姿。通过计算机仿真表明该标定方法能极大提高末端执行器的位置精度,证明了无参数化标定方法的有效性和可靠性。

关 键 词:平面关节型机器人;固定电机驱动;空间坐标转换;无参数化标定

中图分类号:TP24 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)06-0040-06

Non-Parametric Kinematic Calibration of Fixed-Motor-Driven Selective Compliance Assembly Robot Arm

LI Hongchao¹, ZHANG Weizhong^{1,2}, LI Yinxiong¹, ZHANG Jiang¹, LI Jianwan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automatic, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Department of Electrical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: To solve the disadvantage that the great weight of movement arm on conventional selective compliance assembly robot arm (SCARA), this paper designed a fixed-motor-driven SCARA. Non-parametric calibration method was applied for kinematics calibration to improve the accuracy. According to D-H method, established the mathematics model of SCARA robot based on the conversion of spatial coordinates and obtained the relative positional relationship among the connecting rods; through external measuring equipment to measure the position of the end-effector. The difference between actual position and expected position was obtained by solving direct kinematics and inverse kinematics. Then the end-effector of posture can be compensated. The computer simulation results show that this method can effectively improve the positional accuracy of the end-effector. The validity and reliability of the mentioned method is verified.

Key words: SCARA (selective compliance assembly robot arm); fixed-motor drive; conversion of spatial coordinates; non-parametric calibration

平面关节型机器人(selective compliance assembly robot arm, SCARA)是一种圆柱坐标型工业机器人^[1],结构简单,响应速度快,广泛应用于需要高效率的装配、焊接、密封和搬运等领域,具有精度高,速度快,安

装空间小,工作空间大的优点。

目前市场上的 SCARA 存在成本高、效率低等不足。传统的 SCARA 在大臂和小臂上共安装了 4 套伺服电机和减速器,因此运动部分质量大,实现高速度、

收稿日期:2015-05-16;修回日期:2015-06-25

基金项目:浙江省高校重中之重学科开放基金资助(ZSTUME01A07);浙江省滑动轴承工程技术研究中心项目资助(2012E10028)

作者简介:李洪超(1992),男,河北河间人,本科,主要研究方向为机械臂及机器人。E-mail:15757123540@163.com

高精度运动时对于机器人的机械和控制系统要求很高,导致成本居高不下。因此,减少运动部分质量,提高机器人动态性能,是降低 SCARA 整体成本的有效方式。

由于制造公差、安装误差以及连杆偏差的存在导致 SCARA 精度不够高。传统的运动学标定方法可以在一定程度上提高 SCARA 的精度,但其缺点在于对测量仪器的要求较高,计算量较大。

本文运用无参数化标定^[2]的方法对一种电机全部固定在机座的 SCARA^[3]进行运动学标定^[4-7]。该方法利用运动学正逆解解出实际位姿与期望位姿之间驱动输入的差值,补偿到理论的输入中,以提高末端执行器的位姿精度。使用计算机模拟的标定实验取得了良好的标定结果,且具有不受标定点数限制和精度高的特点。

1 机构简介

电机全部固定在机座的新型 SCARA 外形结构^[8-9]如图 1 所示,其传动机构简图如图 2 所示。机械手大臂、小臂可绕各自垂直于水平面的关节 1 和关节 2 转动,末端轴可绕关节 3 转动同时可以上下移动,其中关节 1,2,3 的转动由电机驱动,末端轴的上下移动由气缸驱动,故拥有 3 个转动自由度和 1 个平动自由度,其末端能实现空间内一点的三维移动。为了将运动臂上的驱动电机安置到机座,采用套轴结构,实现臂与臂之间的能量传递:大臂轴电机 M1 通过轴 3 控制大臂转动;小臂轴电机 M2 通过轴 2、轴 5 控制小臂转动;末端轴电机 M3 通过轴 1、轴 4 控制末端轴(轴 6)转动;气缸控制末端执行器上下运动。这种结构使得 SCARA 运动部分质量大为减小,具有出色的动态性能。

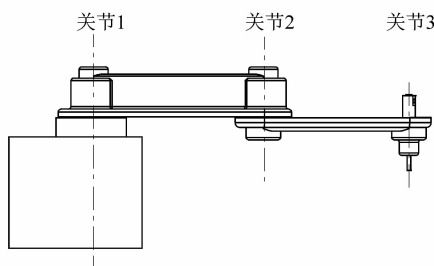


图 1 SCARA 本体外形结构

Figure 1 Shape chart of SCARA

2 运动学分析

SCARA 的运动学分析包括对其进行位置正逆解分析、工作空间分析等,这些都是研究 SCARA 运动学标定的前提。

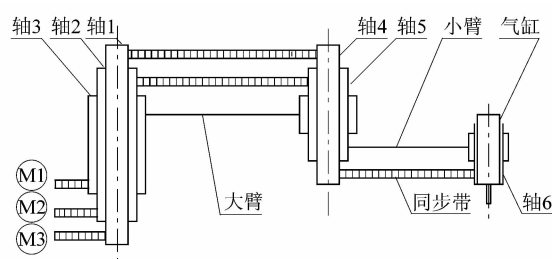


图 2 SCARA 传动机构简图

Figure 2 Transmission diagram of SCARA

2.1 运动学正解

D-H 方法^[10]是现今最常用的机器人运动学建模方法,利用齐次变换矩阵描述两连杆之间的相对位置。定义: θ_i 为杆件 i 相对于杆件 $i-1$ 的角度; d_i 为杆件 i 相对于杆件 $i-1$ 的偏移量; a_i 为杆件 i 的长度; α_i 为杆件 i 自身的扭转角度。则连杆 i 相对连杆 $i-1$ 的位姿可以用齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 来描述:

$${}^{i-1}T_i = S_X(a_{i-1}, \alpha_{i-1}) S_Z(d_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $S_X(a_{i-1}, \alpha_{i-1})$ 表示沿 X 轴平移 a_{i-1} ,再绕 X 轴旋转角度 α_{i-1} 的组合变换; $S_Z(d_i, \theta_i)$ 表示沿 Z 轴平移 d_i ,再绕 Z 轴旋转角度 θ_i 的组合变换。SCARA 的连杆坐标系如图 3 所示,连杆参数如表 1 所示。

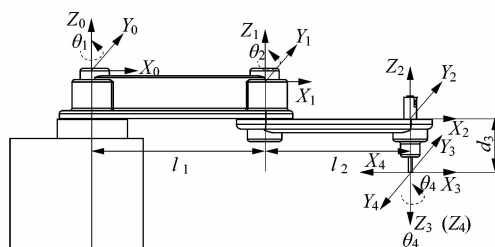


图 3 SCARA 本体 D-H 坐标系

Figure 3 D-H coordinates of reality of SCARA

表 1 SCARA 的连杆参数

Table 1 Link parameters of SCARA

构件	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	l_1	0	0	θ_2
3	l_2	0	d_3	0
4	0	0	0	θ_4

若齐次坐标转换矩阵为 ${}^{i-1}T_i$,则

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & 0 & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & 0 & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式(6)中矩阵对应元素相等,有

$$\begin{cases} p_x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ p_y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ p_z = -d_3 \end{cases} \quad (7)$$

给定关节参数通过公式(7),可以计算出机械手执行端关于参考坐标系的位置,这便是 SCARA 建立在图 3 所示坐标系的运动学正解。

2.2 运动学逆解

已知机器人末端的位置反求各个关节参数是机器人逆解问题,根据公式(6)对矩阵左右两端做矩阵逆乘 0T_1 ,得到:

$${}^0T_1^{-1} {}^0T_4 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 - \theta_4) & \sin(\theta_2 - \theta_4) & 0 & l_2 \cos \theta_2 + l_1 \\ \sin(\theta_2 - \theta_4) & -\cos(\theta_2 - \theta_4) & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 \\ n_y & o_y & a_y & -p_x \sin \theta_1 + p_y \cos \theta_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

矩阵对应元素相等,可得

$$\begin{cases} p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = l_2 \cos \theta_2 + l_1 \\ -p_x \sin \theta_1 + p_y \cos \theta_1 = l_2 \sin \theta_2 \\ p_z = -d_3 \end{cases} \quad (9)$$

进一步整理,可得

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctg \left(\frac{A}{\pm \sqrt{1-A^2}} \right) - \Phi \\ \theta_2 = \arccos \left(\frac{r \sin(\theta_1 + \Phi) - l_1}{l_2} \right) \\ \theta_4 = \theta_2 - \arcsin(-n_x \sin \theta_1 + n_y \cos \theta_1) \\ d_3 = -p_z \end{cases}, \quad (10)$$

式中:

$$A = \frac{l_1^2 - l_2^2 + p_x^2 + p_y^2}{2l_1 \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}; r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}; \Phi = \arctg \frac{p_x}{p_y}.$$

得到 SCARA 建立在图 3 所示坐标系的运动学逆解。

2.3 工作空间分析

SCARA 的工作空间受到臂长、臂与臂之间以及臂与机座之间是否产生干涉的影响,通过设置杆长条件(大臂长 $l_1 = 350$ mm,小臂长 $l_2 = 300$ mm),可以得到其末端执行器在 x - y 平面内的工作空间,为一内径 $r_1 = 215$ mm,外径 $r_2 = 650$ mm的圆环,如图 4 所示。同时末端还可以在 z 轴方向进行上下移动,其移动范围取决于气缸的行程。SCARA 机械结构实现模块化设计,末端可以安装不同行程的气缸, z 轴方向上移动范围为 $0 \sim 200$ mm。

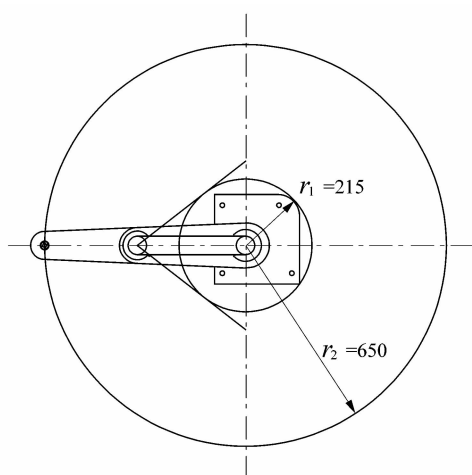
3 基于无参数化的运动学标定方法

3.1 无参数标定法

无参数标定法是一种位形空间补偿的方法,不需要辨识出机构的误差参数,而是通过将末端误差转换成输入端的误差补偿,完成对末端执行器误差的修正,并且工作空间中每一个位形的测量、计算和补偿都相互独立,是一种实时误差补偿的方法。

3.2 位形空间补偿

影响 SCARA 末端位置准确度的因素很多,制造

图4 SCARA x - y 平面内的工作空间Figure 4 Working space in x - y plane of SCARA

和安装过程中产生的连杆实际几何参数与理论参数间的偏差是造成机器人定位误差的最主要环节,一般被视为系统误差。除此之外,机器人的定位精度还受到随机误差的影响,如环境变化、机械形变等引起的误差。但无论是系统误差还是随机误差,在很大程度上都是引起各杆件的长度误差 Δl ,进而导致了末端中心的坐标误差 ΔP 。

本文针对连杆长度误差用无参数化的方法进行标定,以获得尽可能准确的系统驱动值,并假设各驱动不存在误差。

现给末端动平台一个理论位姿:位置坐标为 (X, Y, Z) ,姿态角度为 U 。通过运动学反解,计算出各驱动的理论输入为 θ_1, θ_2, d_3 和 θ_4 ,并将该驱动值输入实际机构,由于连杆长度误差的存在,动平台的实际位姿与理论位姿之间会存在一定的误差。通过外部测量设备可以测出动平台实际位置坐标为 (X', Y', Z') ,姿态角度为 U' ,通过运动学逆解,计算出各驱动输入为 $\theta'_1, \theta'_2, d'_3$ 和 θ'_4 ,进而可以确定实际位姿与理论位姿之间驱动输入的差值为 $\Delta\theta_i = \theta'_i - \theta_i$ (其中 $i = 1, 2, 3, 4$), $\Delta d_3 = d'_3 - d_3$ 。利用 $\Delta\theta_i, \Delta d_3$ 修正理论输入 θ_i, d_3 ,计算出新一轮的理论坐标值和坐标误差;如果坐标误差达到规定的精度要求则结束;若没有满足规定的精度则继续修正理论输入 θ_i, d_3 ,继续迭代,直到满足要求为止,最终得到的就是补偿后的动平台位姿。

3.3 SCARA 无参数标定

若 SCARA 在工作空间中第 k 个非奇异位形为 $p_k = (x_k \ y_k \ z_k)$,且对应的驱动输入为 $\theta_k = (\theta_{1k} \ \theta_{2k} \ \theta_{3k} \ \theta_{4k})$,则有

$$p_k = f(q_k); \quad (11)$$

$$q_k = f^{-1}(p_k). \quad (12)$$

式中: $f(q_k)$ 为 SCARA 运动学正解; $f^{-1}(p_k)$ 为 SCARA 运动学反解。

通过外部测量设备可以测出第 k 个位形下的实际动平台位置为 $p'_k = (x'_k \ y'_k \ z'_k)$,则通过公式 (12) 可以得到对应驱动输入为

$$q'_k = f^{-1}(p'_k), \quad (13)$$

式中, $q'_k = (\theta'_{1k} \ \theta'_{2k} \ \theta'_{3k} \ \theta'_{4k})$ 。

实际位形对应的驱动输入与理论输入的差值为

$$\begin{cases} \Delta\theta_{1k} = \theta'_{1k} - \theta_{1k} \\ \Delta\theta_{2k} = \theta'_{2k} - \theta_{2k} \\ \Delta d_{3k} = d'_{3k} - d_{3k} \\ \Delta\theta_{4k} = \theta'_{4k} - \theta_{4k} \end{cases} \quad (14)$$

将驱动输入差值补偿到理论输入中,可得

$$\begin{cases} \theta''_{1k} = \theta_{1k} - \Delta\theta_{1k} \\ \theta''_{2k} = \theta_{2k} - \Delta\theta_{2k} \\ d''_{3k} = d_{3k} - \Delta d_{3k} \\ \theta''_{4k} = \theta_{4k} - \Delta\theta_{4k} \end{cases} \quad (15)$$

将补偿后的驱动输入值代入实际机构中,得到补偿后的动平台位姿。

3.4 计算机仿真

为了验证无参数标定方法的正确性,运用 MATLAB 进行计算机仿真。现以 SCARA 工作空间的末端位置作为模拟 SCARA 动平台测量数据,具体仿真流程如图 5 所示。

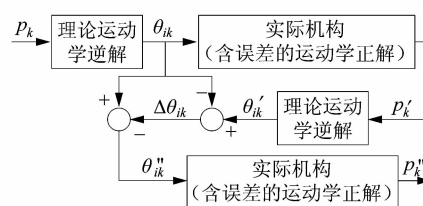


图5 无参数标定法仿真流程

Figure 5 Simulation process of non-parameter calibration method

在 SCARA 工作空间中,规划多组末端位置参考点,并按照上述无参数的标定方法进行仿真标定。因为标定时设置各驱动 θ_1, θ_2, d_3 和 θ_4 不存在误差,所以得到的 Z 轴无误差。考虑到实际工况,本文以大小臂相互垂直状态为分界点,将工作区域分为 2 个部分,如图 6 所示。对 2 个工作区域进行分别求解和标定,并比较其异同。

1) 工况 1: 大小臂最大夹角为锐角。

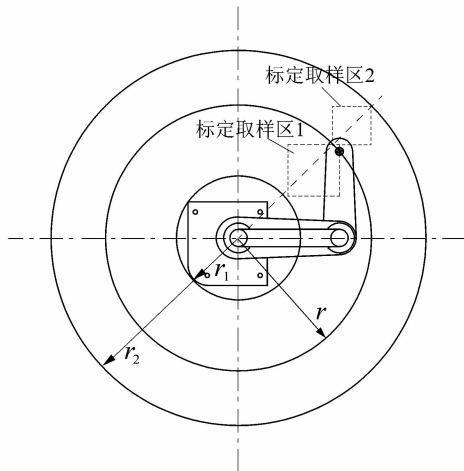


图6 SCARA 工况1和工况2的工作空间

Figure 6 Working space of SCARA

for first and second work status

由图6可知当大小臂最大夹角为锐角时,其工作空间为一圆环,其中大小臂相互垂直时 $r = \sqrt{l_1^2 + l_2^2}$,为计算简便,对工况1的工作空间进行取样标定。

取样区1: $\frac{\sqrt{2}}{2}r_1 < x < \frac{\sqrt{2}}{2}r$, $\frac{\sqrt{2}}{2}r_1 < y < \frac{\sqrt{2}}{2}r$ 。标定前后末端执行器位置误差如图7~8所示。

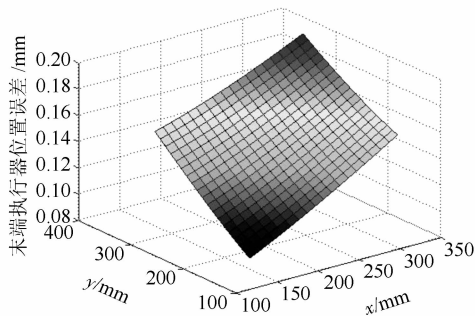


图7 标定前末端执行器位置误差

Figure 7 Position error of end-actuator before calibration

通过对工况1工作空间内末端动平台进行误差修正,最后的结果如表2所示。由表中数据可见仿真标定后位置误差平均值由0.145 9 mm降低到 $0.873 8 \times 10^{-4}$ mm,精度明显提高。

表2 工况1末端执行器位置误差

Table 2 Position error of end-actuator of first work status mm

标定前			标定后 $\times 10^{-4}$		
最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差
0.197 9	0.090 6	0.145 9	1.685 0	0.396 2	0.873 8

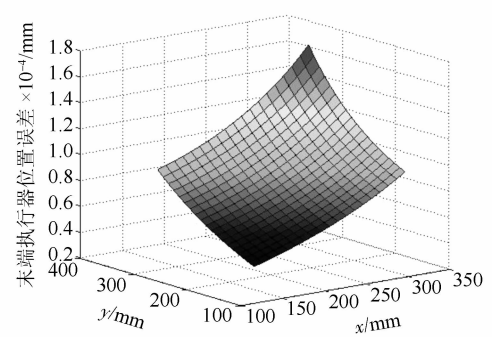


图8 标定后末端执行器位置误差

Figure 8 Position error of end-actuator after calibration

2) 工况2:大小臂最小夹角为钝角。

同理,对工况2的工作空间进行取样标定。

取样区2: $\frac{\sqrt{2}}{2}r < x < \frac{\sqrt{2}}{2}r_2$, $\frac{\sqrt{2}}{2}r < y < \frac{\sqrt{2}}{2}r_2$ 。标定前后末端执行器位置误差如图9~10所示。

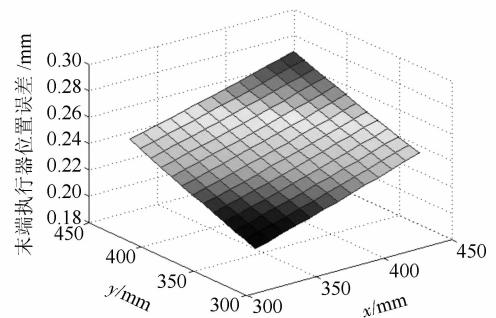


图9 标定前末端执行器位置误差

Figure 9 Position error of end-actuator before calibration

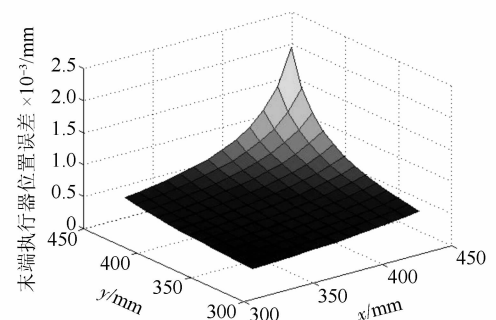


图10 标定后末端执行器位置误差

Figure 10 Position error of end-actuator after calibration

通过对工况2工作空间内末端动平台进行误差修正,最后的结果如表3所示,由表中数据可见仿真标定后位置误差平均值由0.235 2 mm降低到 $0.422 8 \times 10^{-4}$ mm,精度明显提高。

10^{-3} mm,精度同样明显提高。

表3 工况2末端执行器位置误差

Table 3 Position error of end-actuator of second work status mm

标定前			标定后 $\times 10^{-3}$		
最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差
0.270 8	0.198 5	0.235 2	2.000 0	0.170 1	0.422 8

对比2种工况,发现工况2的末端动平台位置误差无论标定前还是标定后都明显大于工况1。由此可知,当臂长发生变化时,末端动平台越远离基座,产生的位置误差越大,同时也越难以消除。

通过无参数标定的方法使SCARA在 x, y 方向上的位置误差显著减小,精度明显提高,证明了该标定方法的有效性。

4 结语

本文介绍了SCARA的机械结构,通过D-H方法建立了运动学模型,并运用一种无参数化标定的方法对其进行运动学标定。通过计算机仿真,发现 $x-y$ 平面内的位置误差显著减小,证明了机器人位姿误差模型的正确性,进而说明了该方法具有一定的可靠性。

通过仿真结果可以推断如果连杆的长度精度较高,对末端执行器的位置误差影响会比较小。但考虑

到经济性,在制造机器人时,不应仅提高机械制造精度,也应充分重视控制系统精度及控制算法。对于精度要求不高的机器人,可以适当降低制造设计精度,而通过修正或补偿来提高精度,从而降低成本,同时保证位姿精度。

参考文献:

- [1] JOHN J C. 负超. 机器人学导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] OSBORNE C. Non-parametric calibration[D]. BATH: University of Bath, 1990:257.
- [3] 程汀. SCARA 机器人的设计及运动、动力学研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008:8-12.
- [4] 夏天. 工业机器人运动学标定及误差分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009:50-54.
- [5] 龚星如. 六自由度工业机器人运动学标定的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012:48-52.
- [6] 李寅翔, 张伟中, 吴伟峰, 等. 新型二自由度并联机构运动学标定方法[J]. 轻工机械, 2015, 33(4):69-72.
- [7] 黎田. 柔性关节机械臂及其运动学标定和振动抑制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012:65-68.
- [8] 廖进堃. 一种机器人运动机构:中国, 203738786 U[P]. 2014-07-30.
- [9] 李晨, 李洪超, 李秦川, 等. 全固定电机驱动的高速SCARA机器人:中国, 204209684 U[P]. 2015-03-18.
- [10] 张皓钧. SCARA 机器人运动学参数与视觉标定研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013:8-12.

(上接第39页)

表1 实际运行结果

Table 1 Actual operating results

型号	每分钟产量/(盒·min ⁻¹)		日产量/ (盒·d ⁻¹)
	1 盘	2 盘	
小型	4	8	2 880 ~ 5 760
中型	2	4	1 440 ~ 2 880
大型	-	3	2 160

4 结语

研究基于LabVIEW操作平台,利用运动控制卡和相关电器原件开发出了本系统。

大量实验结果表明,系统装盒效率高、精度准,可以长时间高效率的工作,克服人类身体极限的束缚。同时通过更换定位销和夹具,还可以实现各种大小盒子、各种大小的料、各种盒孔的盒子的装卸及摆盘,成本低,操作方便,实现人性化设计。随着装卸功能的开发,自动包装设备也可附带安装,并通过传送带运送至产品区,整体实现流水线自动化。

参考文献:

- [1] 王丽. 基于自动生产线控制系统的应用[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010:2-3.
- [2] 刘振宇, 魏志强, 王晓影, 等. 企业国家重点实验室建设的探索与实践[J]. 实验室科学, 2009(4):118-120.
- [3] 徐志鹏. 一种基于运动控制卡的数控专用机床[J]. 微计算机信息, 2008, 24(16):188-189.
- [4] 项小东, 白国振. 基于运动控制卡的伺服控制系统开发研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(11):20-22.
- [5] 柳叶青, 邓振生, 陈真诚, 等. 基于运动控制卡的控制系统的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2010(4):55-57.
- [6] 郭北涛, 柳洪义, 曹阳, 等. 基于虚拟仪器技术的电磁阀综合特性测控系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2):293-298.
- [7] 陆艺, 郭斌, 潘小旺, 等. 直动型气动电磁阀综合性能测试系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4):795-800.
- [8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:16-100.
- [9] 杨乐平, 李海涛, 杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2005:35-120.
- [10] 陈树学, 刘萱. LabVIEW 宝典[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:55-85.