

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.001

基于LM算法的机器人运动学标定

皇甫亚波, 杭鲁滨*, 程武山, 余亮, 李文涛, 杨国彬, 沈铨玮

(上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 机器人参数估计与误差补偿的标定方法是提高机器人末端位置定位精度的重要手段。课题组建立UR3机器人DH参数运动学模型, 基于机器人末端工作空间的出现频率概率分布确定机器人测量空间域; 以激光跟踪仪测量空间域内的机器人末端位置, 构造出机器人末端位置误差与几何参数集间最小二乘方程目标函数, 利用自适应步长的LM(Levenberg-Marquardt)算法对其进行迭代求解, 进行参数估计得到几何参数标定值, 以此修正机器人系统理论运动学模型结构参数集。最后对标定结果进行验证和分析, 结果显示标定后最大误差降低了47.48%, 平均误差降低了37.98%, 均方根误差降低了40.40%, 证明了该标定方法的有效性和可靠性。

关键词: 串联机器人; 运动学标定; LM算法; DH参数运动学模型; 激光跟踪仪

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)04-0001-07

Kinematic Calibration for Robot Based on LM Algorithm

HUANGFU Yabo, HANG Lubin*, CHENG Wushan, YU Liang,
LI Wentao, YANG Guobin, SHEN Chengwei

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The robot calibration method of parameter estimation and error compensation is an important means to improve the positioning accuracy of robot end-effectors. Denavit-Harterberg kinematic model of the UR3 robots was established by the research group. Measurement space was determined by frequency probability distribution of workspace of robot end-effectors. The positions of the robot end-effectors in measurement space were measured by laser tracker. The least square objective function between the position error of the robot end-effectors and the geometric parameters was established, the iterative solution of which were made by using adaptive step-size LM(Levenberg-Marquardt) algorithm. The kinematic model of robot system was corrected by these parameters. The calibration results was analyzed and verified in the end. The result showed that the maximum/mean/ root-mean-square position errors were reduced by 47.48%/37.98%/40.40% after calibration. The validity and reliability of the mentioned method was proved by experiment.

Keywords: serial robot; kinematic calibration; LM(Levenberg-Marquardt) algorithm; DH(Denavit-Harterberg) parametric kinematics model; laser tracker

随着技术的不断发展, 机器人广泛应用于纺织、家电、造纸等各个行业, 同时智能制造对机器人的定位精度提出了越来越高的要求。目前机器人的重复定位精度可达0.01 mm, 而位置精度大多为2~3 mm, 难以满足智能制造的刚性需求。

为提高机器人的位置精度, 可以采用标定的方法来辨识机器人模型的准确参数^[1]。国内外学者对机器人标定技术做了大量研究。基于量子粒子群优化算法, 房立金等^[2]提出一种同样适用于串联机器人和并联机器人的运动学标定方法, 结果表明在较大的工作

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(NFS51475050); 上海市科学技术委员会重点支撑项目(12510501100)。

第一作者简介: 皇甫亚波(1990), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究领域为机器人机构学和激光跟踪测量。通信作者: 杭鲁滨(1965), 男, 江苏南京人, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为机器人机构学、机器人轨迹规划和激光跟踪测量。E-mail: hanglb@126.com

空间内基于量子粒子群优化的运动学标定方法更为有效。将主要的制造、装配误差归结为机械臂各关节的连杆参数误差和运动变量误差^[3-5],即 DH 参数误差,并进行标定,从而获得精确的运动学模型。刘志等^[6]提出了结合几何辨识和参数辨识的两步标定方法。何锐波等^[7-8]利用 POE 公式详细推导了包含关节角度误差的机器人运动学参数标定误差模型,并分析了机器人各类参数之间的相关性。VERL 等^[9]根据辨识矩阵条件数确定了测量构型的选取方法,研究了测量构型的选取数量与末端位姿误差之间的关系。

机器人标定技术通常与测量技术相结合实现机器人精度的提高,常见的测量工具包括三坐标测量仪^[10]、球杆仪^[11]及激光跟踪仪^[12-13]等,先进的测量设备能够大大提高标定精度和标定效率并简化标定过程。激光跟踪仪利用激光测量原理能够获得空间任意点的三维坐标,具有精度高、效率高及实时跟踪测量等优势,为机器人标定技术的研究提供了很大的便利。因此,激光跟踪仪被广泛应用于机器人标定研究。

本文中重点研究 UR3 6R 型串联机器人的出厂前位置精度标定问题。基于机器人末端工作空间的出现频率概率分布确定机器人测量空间域,以激光跟踪仪测量空间域内的机器人末端位置,基于自适应步长的 LM 算法,对机器人各关节进行参数估计,实验结果表明该标定方法可以提高机器人位置精度。

1 机器人标定流程

机器人几何误差是指各连杆、连接件等机器零件在生产过程中,由几何外形或尺寸的偏差造成零件本身的误差。在诸多影响机器人精度的因素中,几何误差占 80% 左右,机器人运动学标定主要研究制造误差、安装误差及编码器零位误差等造成的几何误差。

机器人运动学标定中的核心内容是根据所使用测量工具的特点,以测量数据与理论运动学模型输出之间的残差作为误差运动学模型,进而识别几何误差参数,一般包括 4 个步骤:建模、测量、参数辨识及误差补偿。标定流程如图 1 所示:①利用机器人正运动学方程建立机器人的位置误差函数;②根据测量和标定的需求选择合适的理想运动学参数 X_0 ;③利用正运动学模型计算理想情况下对应的末端位置 P ;④通过测量工具获得机器人末端实际位置 P^* ;⑤将理想位置 P 与实际测量位置 P^* 作差,得到末端位置误差函数 ΔP ;⑥利用 LM 算法进行寻优,得到运动学参数标定值 X ,并修正机器人系统中的运动学模型。

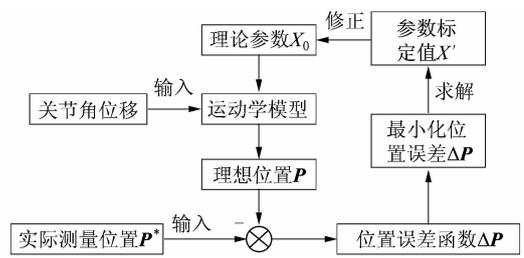
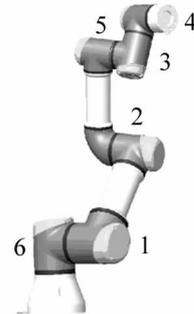


图 1 机器人标定流程图

Figure 1 Flow chart of robot calibration

2 实验平台搭建

笔者以出厂前 UR3 6R 型串联机器人作为研究对象,机器人额定负载为 30 N,结构示意图如图 2 所示,是一种开环运动结构,其重复定位精度为 0.02 mm,但在出厂前该机器人绝对定位精度较差。



1—肩膀;2—手肘;3—手腕 2;4—手腕 3;5—手腕 1;6—基座。

图 2 UR3 机器人结构示意图

Figure 2 Structure diagram of UR3 robot

测量工具采用 Leica AT901-MR 型激光跟踪仪,该仪器基于球坐标系采集反射靶球的位置数据,其测量范围可达 50 m,测量精度为 $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$,满足机器人标定的测量精度要求。

实验现场如图 3 所示,机器人系统包括机器人本体、控制器及示教器;激光跟踪仪系统包括激光跟踪仪本体、控制器、气象站、反射靶球、计算机及电源,其中反射靶球固定在机器人末端法兰铝板表面,UR3 机器人安装在定位板上,反射靶球在机器人工具坐标系下的位置坐标为 $(69.97 \text{ mm}, -70.20 \text{ mm}, 22.52 \text{ mm})$ 。

3 几何参数估计模型

依据 DH 参数法,建立机器人运动学模型,结合测量数据推导出误差运动学模型,最后基于自适应步长的 LM 算法对其进行求解,获得几何参数标定值。

3.1 运动学模型

根据 DH 参数法,为 UR3 机器人的每一个关节建立一个坐标系,如图 4 所示,用连杆参数描述机构的运动关系,连杆理论参数值如表 1 所示。

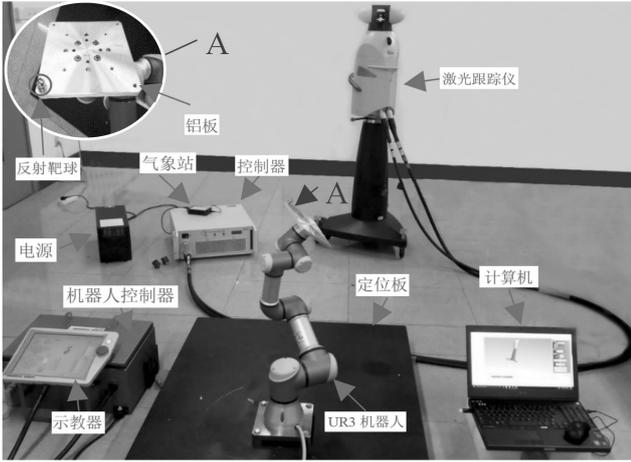


图3 机器人标定实验现场

Figure 3 Experimental site of robot calibration

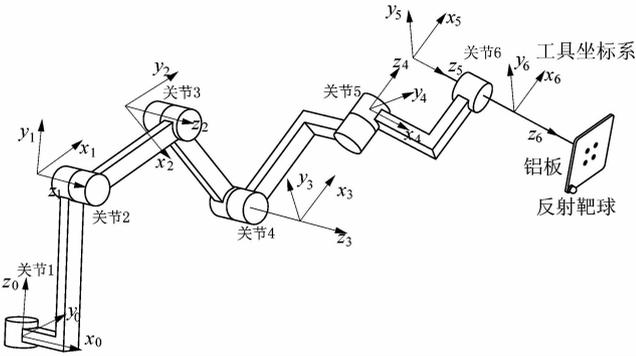


图4 UR3 机器人 DH 模型连杆坐标系

Figure 4 Coordinate system of DH model of connecting rod of UR3 robot

表1 UR3 机器人连杆理论参数

Table 1 Nominal parameters of connecting rod of UR3 robot

| 序号 | 杆长 a_{i-1}/mm | 扭角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$ | 偏置 d_i/mm | 转角 $\theta_i/(^{\circ})$ |
|----|------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 0.00 | 90 | 151.90 | 0 |
| 2 | 243.65 | 0 | 0.00 | -90 |
| 3 | 213.25 | 0 | 0.00 | 0 |
| 4 | 0.00 | 90 | 112.35 | -90 |
| 5 | 0.00 | -90 | 85.35 | 0 |
| 6 | 0.00 | 0 | 81.90 | 0 |

根据图4中DH模型连杆坐标系,相邻两连杆坐标系之间的变换矩阵为

$${}^{i-1}T_i = \text{rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{trans}(z_{i-1}, d_i) \text{trans}(x_{i-1}, \alpha_i) \text{rot}(x_{i-1}, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

UR3 机器人运动学变换矩阵为

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7.$$

式中:

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; x, y, z \text{ 为末端反射靶球在工}$$

具坐标系下的坐标值。

3.2 机器人误差运动学模型

通过在机器人的每个连杆上建立相应的齐次矩阵构建出机器人的运动学模型,将机器人的理论 DH 参数 $(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$ ($i=1 \sim 6$) 及反射靶球在末端工具坐标系下的位置坐标 (x, y, z) (共 $4 \times 6 + 3 = 27$ 个参数) 代入到机器人运动学模型中,可得反射靶球基于机器人基坐标系下的位置函数

$$P = f(X_0).$$

式中: X_0 是由上述 27 个几何参数组成的向量,

$$P = [P_x, P_y, P_z]^T.$$

机器人由于其机械结构本体的几何精度、装配误差和传动误差等因素,致使其理论 DH 参数 $(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$ ($i=1 \sim 6$) 必然存在误差。另外,反射靶球相对于工具坐标系的安装位置也存在误差,致使机器人在运动过程中反射靶球的实际位置与理论位置形成一定的偏差。反射靶球的实际位置函数

$$P' = f(X').$$

式中: X' 是参数标定值,

$$P' = [P'_x, P'_y, P'_z]^T.$$

利用激光跟踪仪采集末端反射靶球的位置数据 P^* , 则反射靶球的位置误差函数

$$\Delta P_j = P_j^* - P'_j.$$

式中: ΔP_j 为第 j 个被测量点的位置误差函数,且 $\Delta P_j = [\Delta P_{xj}, \Delta P_{yj}, \Delta P_{zj}]^T$ 。

由反射靶球的位置误差函数构造函数

$$e(X) = [\|\Delta P_1\|^2, \|\Delta P_2\|^2, \dots, \|\Delta P_m\|^2]^T.$$

式中: m 为被测量点的个数, X 为待修正参数。

以函数 $e(X)$ 构造出最小二乘目标函数

$$E(X) = \min \left(\frac{1}{2} e(X)^T e(X) \right).$$

3.3 利用 LM 算法迭代求解参数标定值

LM 算法 (Levenberg-Marquart 算法^[14]) 是梯度下降法和高斯-牛顿法 (Gauss-Newton) 的结合,其具有高斯-牛顿法的快速收敛特性及梯度下降法的全局特性,目的在于解决 Hessian 构造矩阵的非正定问题和奇异

问题,适用于求解非线性多元目标函数的最优问题^[15],因此,可以求解最小二乘目标函数 $E(\mathbf{X})$ 。

利用 LM 算法进行迭代运算,便可获得参数 \mathbf{X} 标定值,求解目标函数 $E(\mathbf{X})$ 的具体步骤如下:

- 1) 将理论参数作为初始值 \mathbf{X}_0 ,选取 $\mu = 0.01$,阻尼因子调整系数 v 取 2~3,精度 $\varepsilon = 10^{-6}$;
- 2) 读入末端反射靶球的位置数据及相应的 6 个关节角位移;
- 3) 计算 $\mathbf{e}(\mathbf{X})_k = [\|\Delta \mathbf{P}_1\|^2, \|\Delta \mathbf{P}_2\|^2, \dots, \|\Delta \mathbf{P}_m\|^2]^T$ 及 $E(\mathbf{X})_k = (\frac{1}{2}\mathbf{e}(\mathbf{X})^T \mathbf{e}(\mathbf{X}))_k$;
- 4) 构造 Jacobian 矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{X}), \mathbf{J}(\mathbf{X})_{ij} = \frac{\partial e_i}{\partial X_j(\mathbf{X})}$;
- 5) 计算 $\Delta \mathbf{X}_k = -(\mathbf{J}(\mathbf{X})_k^T \mathbf{J}(\mathbf{X})_k + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{X})_k^T \mathbf{e}(\mathbf{X})_k$ 及 $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \Delta \mathbf{X}_k$;
- 6) 判断 $\|\Delta \mathbf{X}_k\| \leq \varepsilon (\|\mathbf{X}_k\| + \varepsilon)$,若是,则转(7),否则转(9);
- 7) 计算增益比 $\lambda = \frac{2(E(\mathbf{X})_{k+1} - E(\mathbf{X}))}{\Delta \mathbf{X}_k^T (\mathbf{J}(\mathbf{X})_k^T \mathbf{e}(\mathbf{X})_k - \mu \Delta \mathbf{X}_k)}$;
- 8) 判断增益比 λ 的正负情况,若 $\lambda > 0$,则 $\mu = \mu/v$,否则 $\mu = \mu * v$,转 3);
- 9) 输出参数标定值。

4 标定实验研究

通过激光跟踪仪与机器人相互配合,标定机器人的位置定位精度。实验在室温为 25° 的实验室环境下进行,为激光跟踪仪构造了良好的测量环境。

4.1 实验步骤

基于所述的机器人运动学标定过程,课题组对 UR3 机器人标定实验具体步骤如图 5 所示。

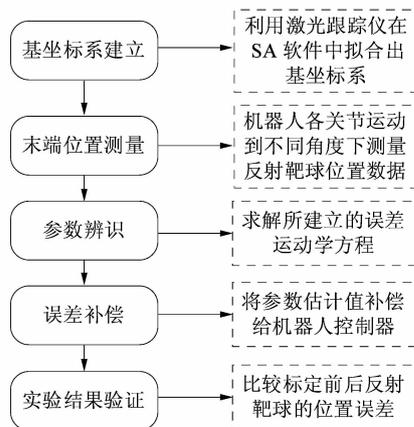


图 5 机器人标定步骤
Figure 5 Steps of robot calibration

4.2 机器人基坐标系建立

基于最小二乘圆拟合法,在 SA 软件中建立机器人基坐标系。为精确映射出机器人基坐标系的空间位姿,均是将反射靶球固定在相应关节上,进而拟合出该关节轴线,减少了其它关节的影响。

首先,根据 UR3 机器人的技术文件,确定机器人基坐标系相对于机器人本体的位姿,即坐标系原点和坐标轴的相对位置,然后利用激光跟踪仪,在 SA 软件中建立基坐标系,如图 6 所示,具体步骤如下:

- 1) 首先将机器人运动到零点位置,测量拟合出基座安装平面 A ;
- 2) 将反射靶球固定在关节 1 上,单独旋转关节 1,同时采集反射靶球的位置数据,利用最小二乘圆拟合法拟合出关节 1 轴线 l_1 的空间位姿;
- 3) 将关节 1 归零位,单独旋转关节 2,同时采集固定在关节 2 上的反射靶球的位置数据,拟合出关节 2 轴线 l_2 的空间位姿;
- 4) 轴线 l_1 与平面 A 的交点为基坐标系原点,同时以轴线 l_1 和 l_2 分别作为 z 轴方向和 y 轴方向。

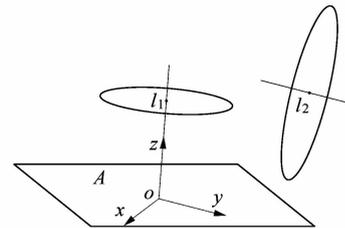


图 6 机器人基坐标系示意图
Figure 6 Schematic diagram of base coordinate system of robot

在 SA 软件中建立基坐标系后,将激光跟踪仪的测量坐标系转移至所建立的基坐标系上,保证后续测量均是基于机器人基坐标系下。

4.3 位置数据采集及参数求解

将机器人 TCP (Tool Center Point) 转移至反射靶球中心位置处,反射靶球的理论位置数据通过机器人控制器获得,其实际位置数据通过激光跟踪仪测量获得。

基于机器人末端出现工作空间的频率概率分布确定机器人测量空间域,在测量空间域内采集 35 个空间点位置数据,被测量点实际位置数据及相应各关节角度值如表 2 所示,前 30 个点用于参数估计,后 5 个点用于验证标定结果。被测量点的空间分布如图 7 所示,从图 7 中可以看出,估计点均散布在测量空间域内,验证点的空间分布比较分散,其中 3 个验证点分布在测量空间域内,另外 2 个验证点分布在测量空间域外。

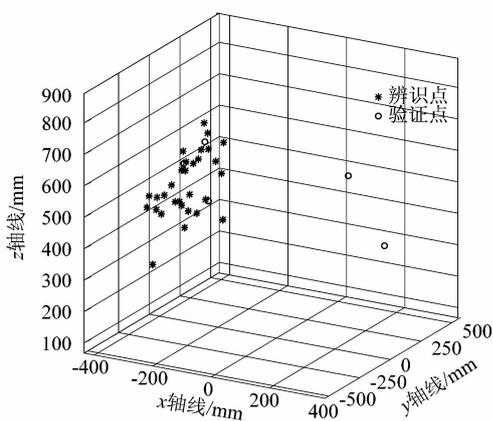


图 7 35 个被测量点的空间分布示意图

Figure 7 Schematic diagram of space distribution of 35 measurement points

利用 MATLAB 软件,将测量空间域内 30 个估计点的位置数据代入误差运动学方程中,并结合 LM 算法对此方程进行求解,解算出 27 个参数的标定值,并修正机器人系统中的运动学模型。将标定前后 27 个参数值作对比,得出经 LM 算法估计出的参数值与理论值存在一定的偏差,说明机器人在制造和装配等阶段引入了几何误差,导致机器人运动学模型偏离了理论模型。

4.4 标定结果验证分析

表 2 中后 5 个验证点,标定前后理论坐标值如表 3 所示,可以得出标定前后 5 个验证点的位置均有所变化,其中验证点 5 的理论位置误差达到 4.105 7 mm,说明经 LM 算法估计出的参数值对机器人理论运动学模型作了很大改动。

表 2 激光跟踪仪测量数据和相应各关节角度数据

Table 2 Measurement data of laser tracker and corresponding angle values of joints

| 序号 | 被测量坐标值/mm | | | 对应被测量点的各关节角度值/(°) | | | | | |
|----|-----------|---------|--------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | x | y | z | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_6 |
| 1 | -149.02 | -207.50 | 742.60 | -14.69 | -74.76 | -16.64 | -57.23 | -18.57 | 77.64 |
| 2 | -130.43 | -134.57 | 600.86 | -12.99 | -109.13 | 90.55 | -109.41 | 28.16 | 37.72 |
| 3 | -274.68 | -82.78 | 599.84 | -11.39 | -72.61 | 48.77 | -84.41 | 43.47 | 7.73 |
| 4 | -289.74 | -80.13 | 571.14 | -10.28 | -62.39 | 41.27 | -99.69 | 44.56 | 10.26 |
| 5 | -341.12 | -45.78 | 506.46 | -9.82 | -59.85 | 56.55 | -101.59 | 57.34 | 8.36 |
| 6 | -360.07 | -58.46 | 473.58 | -9.60 | -60.65 | 66.77 | -102.14 | 50.96 | 8.90 |
| 7 | -212.08 | 7.79 | 591.12 | -29.92 | -60.40 | 20.25 | -108.52 | 58.61 | 8.31 |
| 8 | -350.81 | 247.34 | 631.91 | -62.91 | -35.10 | -44.29 | -35.52 | 45.37 | 146.36 |
| 9 | -290.20 | -54.08 | 562.30 | -6.02 | -22.71 | -90.21 | -64.45 | -60.49 | 200.31 |
| 10 | -273.75 | -137.81 | 485.77 | -21.76 | -108.33 | 113.11 | -118.99 | -6.41 | 420.75 |
| 11 | -97.89 | -205.19 | 473.89 | -5.11 | -118.56 | 123.63 | -138.38 | 2.29 | 399.71 |
| 12 | -165.80 | -184.63 | 523.23 | -26.63 | -128.81 | 111.05 | -117.25 | -13.37 | 410.57 |
| 13 | -208.33 | -154.70 | 464.23 | -36.11 | -124.11 | 99.84 | -129.71 | -42.20 | 371.94 |
| 14 | -435.34 | 30.37 | 218.06 | -39.08 | -54.00 | 88.64 | -125.16 | -44.95 | 17.87 |
| 15 | -430.76 | -30.26 | 415.51 | -31.80 | -64.65 | 69.15 | -127.00 | -29.74 | 31.20 |
| 16 | -360.72 | -116.89 | 479.72 | -21.20 | -72.16 | 63.09 | -107.15 | -17.17 | 15.58 |
| 17 | -372.86 | -147.48 | 489.35 | -16.94 | -72.97 | 54.43 | -79.92 | -28.54 | 21.81 |
| 18 | -374.71 | -44.55 | 408.73 | -29.96 | -66.70 | 54.43 | -93.58 | -27.90 | -19.99 |
| 19 | -344.58 | -7.87 | 443.42 | -36.77 | -66.70 | 54.43 | -116.13 | 9.46 | -32.48 |
| 20 | -294.11 | -74.25 | 456.72 | -28.54 | -71.88 | 59.27 | -140.97 | 11.84 | -17.40 |
| 21 | -293.42 | -22.70 | 424.94 | -37.94 | -72.30 | 65.20 | -154.13 | 20.78 | -24.69 |
| 22 | -278.76 | -82.69 | 388.68 | -24.12 | -72.31 | 60.43 | -189.98 | 50.12 | -51.78 |
| 23 | -346.63 | -151.80 | 451.96 | -15.08 | -73.91 | 61.00 | -180.62 | 22.30 | -89.00 |
| 24 | -339.92 | 46.65 | 591.81 | -48.43 | -86.00 | 61.00 | -182.09 | 2.40 | -128.05 |
| 25 | -308.34 | 99.09 | 559.96 | -56.18 | -92.22 | 59.44 | -165.36 | -12.13 | -95.00 |
| 26 | -286.63 | 6.73 | 571.53 | -47.63 | -92.22 | 48.69 | -171.68 | -13.32 | -67.86 |
| 27 | -252.23 | 48.17 | 612.96 | -59.65 | -97.61 | 57.81 | -201.57 | -19.10 | -83.25 |
| 28 | -192.94 | 26.68 | 649.54 | -72.77 | -105.14 | 64.40 | -219.95 | -23.50 | -105.02 |
| 29 | -243.55 | -33.28 | 631.56 | -42.53 | -96.82 | 49.35 | -193.32 | -23.04 | -79.13 |
| 30 | -329.22 | 75.96 | 448.89 | -31.90 | -86.87 | 94.09 | -221.34 | -59.27 | -89.45 |
| 31 | -244.75 | -171.45 | 620.06 | -23.88 | -89.52 | 56.38 | -155.11 | -39.03 | 60.22 |
| 32 | -279.91 | 80.93 | 625.45 | -58.59 | -61.89 | 36.52 | -162.08 | 21.63 | 114.22 |
| 33 | -202.48 | -70.82 | 483.99 | -28.69 | -86.58 | 77.64 | -131.96 | 47.38 | 334.83 |
| 34 | 389.67 | -44.23 | 440.26 | -190.45 | 6.77 | -44.26 | -126.44 | 116.46 | 109.56 |
| 35 | 158.99 | 204.80 | 563.66 | -144.90 | -15.54 | -39.55 | -126.59 | 85.76 | 109.39 |

表 3 标定前后验证点的理论位置数据

Table 3 Nominal position data of verification points before and after calibration mm

| 验证点 | 标定前验证点理论位置 | | | 标定验证点理论位置 | | | 位置误差/ Δe |
|-----|------------|---------|--------|-----------|---------|--------|------------------|
| | x | y | z | x | y | z | |
| 1 | -245.58 | -168.74 | 620.94 | -243.63 | -171.90 | 619.68 | 3.921 2 |
| 2 | -279.00 | 80.04 | 625.37 | -278.43 | 79.93 | 624.54 | 1.012 9 |
| 3 | -201.52 | -70.26 | 485.03 | -201.47 | -70.68 | 484.43 | 0.734 1 |
| 4 | 386.55 | -43.26 | 441.54 | 388.61 | -45.60 | 439.60 | 3.671 9 |
| 5 | 155.60 | 203.71 | 563.50 | 159.59 | 203.38 | 562.59 | 4.105 7 |

机器人标定后,利用激光跟踪仪再次采集验证点的实际位置数据,将实际位置数据与表 3 中标定后验证点的理论位置数据作比较,可以得到 5 个验证点的位置误差。与标定前 5 个验证点的位置误差作对比,如表 4 所示,利用 MATLAB 软件对表 4 中数据进行处理,得到标定前后验证点的位置误差曲线如图 8 所示。

表 4 标定前后验证点的位置误差
Table 4 Position error of verification points before and after calibration mm

| 验证点 | 标定前位置误差 | | | | 标定后位置误差 | | | |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Δx | Δy | Δz | Δe | Δx | Δy | Δz | Δe |
| 1 | 0.83 | -2.71 | -0.88 | 2.967 7 | -1.10 | 0.44 | 0.39 | 1.247 3 |
| 2 | -0.91 | 0.89 | 0.08 | 1.275 4 | -1.46 | 0.99 | 0.90 | 1.980 3 |
| 3 | -0.96 | -0.56 | -1.04 | 1.522 1 | -0.93 | -0.16 | -0.39 | 1.021 1 |
| 4 | 3.12 | -0.97 | -1.28 | 3.509 1 | 1.02 | 1.37 | 0.69 | 1.842 1 |
| 5 | 3.39 | 1.09 | 0.16 | 3.564 5 | -0.58 | 1.43 | 1.06 | 1.872 1 |

由图 8 可以看出:标定后位置误差曲线相对比较平稳,波动较小,误差平均值均向零轴靠拢。从表 4 中数据计算得出,在 x, y, z 单方向上的误差跳动值^{[13]198}(最大值与最小值之差)由原来的 4.35, 3.80, 1.44 mm 变为 2.48, 1.59, 1.45 mm, x, y 单方向上的误差跳动值分别减小了 1.87 mm 和 2.21 mm, z 方向上的误差跳动值基本保持不变。

前 3 个验证点均分布在测量空间域内,标定之后验证点 1 和验证点 3 的误差下降,而验证点 2 的误差增大,这说明标定前机器人各关节处于某角度时反射靶球的位置精度相对较高,而通过 LM 算法和 30 个估计点标定之后,可能会导致该位置的误差增大,因为,此标定方法仅保证反射靶球在当前 30 个位置处的误差和最小,而不能达到反射靶球在每个位置处的位置精度均提高。

验证点 4 和 5 均位于测量空间域外,而其位置误差有所改善,这说明该标定方法不仅对测量空间域的位置精度的提高有效,而且对机器人整个工作空间的位置精度的提高均是有效的,上述 5 个验证点数据准确地反映出标定结果。

采用平均误差和均方根误差对标定效果进行评价,其公式分别如下:

$$e_{\text{mean}} = \frac{1}{m} \sum_{\varphi=1}^m \Delta e_{\varphi};$$

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{\varphi=1}^m \Delta e_{\varphi}^2}.$$

式中 m 为被测量点的个数。

针对表 4 中数据进行误差统计,如表 5 所示。

表 5 标定前后的误差统计

Table 5 Error statistics before and after calibration

| 验证参数 | 标定前/mm | 标定后/mm | 精度提高/% |
|-------|---------|---------|--------|
| 最大误差 | 3.564 5 | 1.872 1 | 47.48 |
| 平均误差 | 2.567 8 | 1.592 6 | 37.98 |
| 均方根误差 | 2.748 5 | 1.638 2 | 40.40 |

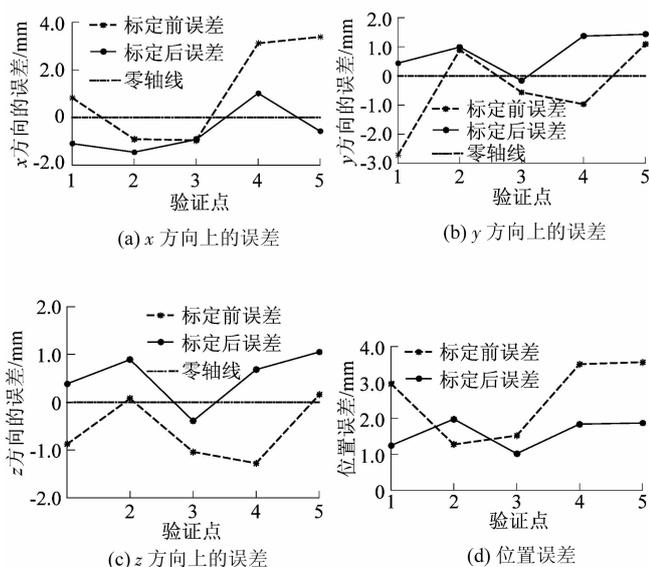


图 8 标定前后验证点的位置误差曲线图
Figure 8 Position error curve of verification points before and after calibration

从表5中的数据可以得出:机器人运动学标定之后最大误差降低47.48%,平均误差降低37.98%,均方根误差降低40.40%。故该标定方法有效的改善了机器人工作空间的位置精度,并且用于估计的被测量点个数较少,提高了标定效率。

5 结语

1) 搭建了针对UR3机器人位置精度标定的实验平台,根据实验平台和理论运动学模型,确定了需要修正的27个参数,构造了末端反射靶球的位置误差与几何参数的关系方程,给出了LM算法求解几何参数标定值的步骤。

2) 基于最小二乘圆拟合法,利用激光跟踪仪,在SA软件中建立了机器人基坐标系并作为测量坐标系,实现了机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系的统一。

3) 基于机器人末端出现工作空间的频率概率分布确定机器人测量空间域,利用激光跟踪仪测量位于测量空间域内的机器人末端位置,将测量数据和机器人各关节角度值代入关系方程,求解机器人运动学参数标定值,以此参数修正机器人系统的运动学模型。

4) 以任意5个空间点对标定结果进行实验验证,结果显示该标定方法不仅提高测量空间域中末端位置精度,也对机器人整个工作空间的位置精度有所提高。

5) 针对5个验证点进行误差统计,结果显示标定之后最大误差降低了47.48%,平均误差降低了37.98%,均方根误差降低了40.40%,说明了该标定方法的有效性,并且用于估计的被测量点个数较少,提高了标定效率。

参考文献:

- [1] 张岩. 机器人操作臂动力学参数的动静态辨识方法研究[J]. 机电工程, 2014, 31(3): 283-288.
- [2] 房立金, 党鹏飞. 基于量子粒子群优化算法的机器人运动学标定

方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 23-30.

- [3] DEAN-LEON E, NAIR S, KNOLL A. User friendly Matlab-toolbox for symbolic robot dynamic modeling used for control design[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Guangzhou, China; IEEE, 2012: 2181-2188.
- [4] DASARI A, REDDY N S. Forward and inverse kinematics of a robotic frog[C]//2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI). Kharagpur, India; IEEE, 2012: 1-5.
- [5] 王琨. 提高串联机械臂运动精度的关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 15-17.
- [6] 刘志, 赵正大, 谢颖, 等. 考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J]. 机器人, 2015, 37(3): 376-384.
- [7] HE Ruibo, ZHAO Yingjun, YANG Shunian, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula[J]. IEEE transactions on robotics, 2010, 26(3): 411-423.
- [8] 何锐波, 赵英俊, 韩奉林, 等. 基于指数积公式的串联机构运动学参数辨识实验[J]. 机器人, 2011, 33(1): 35-39.
- [9] VERL A, BOYE T, POTT A. Measurement pose selection and calibration forecast for manipulators with complex kinematic structures[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2008, 57(1): 425-428.
- [10] GINANI L S, MOTTA J M S T. Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification[J]. Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2011, 33(1): 15-21.
- [11] SLAMANI M, NUBIOLA A, BONEV I. Assessment of the positioning performance of an industrial robot[J]. Industrial robot: an international journal, 2012, 39(1): 57-68.
- [12] 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(1): 236-245.
- [13] 任永杰, 郑继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195-200.
- [14] 高惠璇. 统计计算[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995: 388-390.
- [15] AL-SHARADQAH A, CHERNOV N. Error analysis for circle fitting algorithms[J]. Electronic journal of statistics, 2009, 21(3): 886-911.

[信息·简讯]

· 产品信息 ·

西门子发布 ARPEX 全钢联轴器

在2017年德国汉诺威工业博览会上,西门子展出了扭转刚性全钢膜片式联轴器系列:N-ARPEX联轴器。优化的膜片,改进的部件设计,可使标准轮毂传递更大扭矩和转速,开孔范围更大。

N-ARPEX膜片联轴器适用于既要求轴位移又要求可靠传递扭矩的所有应用,可用于驱动泵、风机、压缩机、发电机和透平以及造纸与印刷机械等。此联轴器符合欧盟指令2014/34/EU,满足API610/ISO13709和API671/ISO10441标准要求。N-ARPEX膜片联轴器可耐受-50℃的低温,比之前ARPEX系列低10℃。

膜片联轴器支持轴向、角度和径向偏移补偿。膜片材质采用不锈钢弹簧钢制作,不易磨损,而且免维护。

(朱建芸)