

基于运动学标定和空间插值的机器人定位误差补偿

邹方星 范百兴 陈哲

(战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

摘要: 绝对定位精度是衡量机器人性能的重要指标。为提升工业机器人的绝对定位精度,提出一种融合运动学标定和空间插值的定位误差分级标定的方法。首先基于 D-H 法建立机器人运动学模型,运用微分运动学理论建立机器人末端位置误差模型,结合 IGG3 权因子函数采用抗差岭估计辨识了运动学参数。而后基于机器人定位误差空间相似性特点,采用空间插值法对剩余误差进行补偿。最后通过实验对所提出的方法进行了验证。结果表明:机器人定位误差 RMS 值由补偿前的 0.812 mm 减小为 0.049 mm,精度提高了 93.97%。该方法能够有效减小机器人的绝对定位误差,提高定位精度。

关键词: 工业机器人;分级标定;抗差岭估计;反距离权重插值

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Robot positioning error compensation based on kinematic calibration and spatial interpolation

Zou Fangxing Fan Baixing Chen Zhe

(School of Geospatial Information, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Absolute positioning accuracy is an important index to measure robot performance. In order to improve the absolute positioning accuracy of industrial robots, a method of positioning error classification based on kinematic calibration and spatial interpolation is proposed. Firstly, the kinematics model of the robot is established based on D-H method, and the error model of the end position of the robot is established by using differential kinematics theory. The kinematic parameters are identified by using the tolerance ridge estimation combined with IGG3 weight factor function. Then, based on the spatial similarity of robot positioning errors, the remaining errors are compensated by the spatial interpolation method. Finally, the proposed method is verified by experiments. The results show that the robot positioning error RMS decreases from 0.812 mm before compensation to 0.049 mm, and the accuracy is increased by 93.97%. This method can effectively reduce the absolute positioning error of the robot and improve the positioning accuracy.

Keywords: industrial robots; classification calibration; tolerance ridge estimation; inverse distance weight interpolation

0 引言

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的深入推进,机器人在航空、航天等高精密制造业的应用越来越广泛,对机器人的精度也有了较高的要求^[1-3]。机器人具有较高的重复定位精度,通常可以达到 0.1 mm 左右,而绝对定位精度较低,精度范围在 2~3 mm 左右^[4],这限制了机器人在高端制造领域的推广与应用。提高机器人绝对定位精度,是推动智能制造技术发展的重要基础。

标定技术是目前提高机器人绝对定位精度的主要方法。根据是否需要建立误差模型,标定方法可分为基于模

型的标定方法^[5-7]和非模型的标定方法^[8-9]。基于模型的标定方法包含 4 个步骤:误差建模、数据测量、参数辨识和误差补偿^[8-9]。目前常用的运动学模型有 D-H 模型、M-DH 模型、CPC 模型、POE 模型和零参考模型等^[10-11]。常用的测量设备包括激光跟踪仪、单目或双目视觉测量系统、三坐标测量仪等。标定算法是运动学标定的核心,其中使用最为广泛的是最小二乘法,其搜索能力强、计算速度快。但最小二乘法对模型本身线性化程度要求较高,当数据中存在粗差或法方程病态时,参数结果辨识准确度降低,效果变差^[12]。姜一周等^[13]基于 POE 模型,采用差分进化算法辨识参数,并用机器人和激光跟踪仪进行了实验,将机器人的

平均距离精度由 2.906 mm 提升到了 0.095 mm。Ye 等^[14]建立了微分运动学方程,采用迭代的方法,通过激光跟踪仪测量设备对 ABB IRB2400 机器人进行了标定,将机器人的最大定位误差由 1.764 mm 降低为 0.64 mm,平均误差由 0.963 mm 降低为 0.47 mm。班朝等^[15]基于 M-DH 模型,采用 LM 算法辨识运动学参数,对 ABB IRB2400 机器人进行了标定,机器人的平均定位误差降了 65.10%,RMS 误差降低了 65.85%。

非模型的标定方法忽略误差的来源,只研究机器人的关节转角与末端定位误差之间的关系,通过建立机器人定位误差库来预测误差。Nguyen 等^[16]采用人工神经网络对非几何误差进行补偿,将前 3 个关节角作为神经网络的输入进行训练,从而预测末端定位误差。陈宵燕等^[17]提出基于均匀数据长的空间插补补偿的方法,通过反距离加权法来预测机器人末端定位误差进行补偿,但该方法受到网格采样步长的影响较大。花芳芳^[18]采用基于 GPSO-DNN 的定位误差预测模型,实现了对机器人末端定位误差的预测和补偿,使得机器人绝对定位精度提高了 77.57%。王龙飞等^[19]利用 ELM 法建立了目标理论位置坐标与实际位置坐标之间的映射关系,将机器人的绝对定位精度提高到 0.32 mm 以内。但该方法空间采样范围较小,难以应用于实际工程作业中。

综上所述,目前国内外学者对机器人标定技术研究较多,但多集中于单一层级,而综合考虑影响误差因素分级进行精度补偿研究的较少。针对以上情况,本文提出一种融合运动学标定和空间插值补偿的分级标定方法。

1 基于位置误差模型的机器人运动学标定

1.1 基于 D-H 模型的运动学误差建模

1) D-H 运动学建模

机器人运动学参数误差模型反映了末端位姿与运动学参数误差之间的一一映射关系。本文采用 D-H 法进行运动学建模。机器人的关节臂可以看成由一系列关节和连杆组成的运动链,将连杆坐标系固定在连杆上,相邻连杆坐标系之间的转换关系可以用 4 个运动学参数来描述:连杆长度 a_i 、杆件扭角 α_i 、关节距离 d_i 、关节转角 θ_i 。相邻连杆坐标系之间的齐次变换可表示为:

$${}^{i-1}\mathbf{T} = \mathbf{Rot}(z, \theta_i) \mathbf{Trans}(0, 0, d_i) \mathbf{Rot}(x, \alpha_i) \mathbf{Trans}(a_i, 0, 0) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ${}^{i-1}\mathbf{T}$ 表示 i 关节坐标系相对于 $i-1$ 关节坐标系的齐次变换矩阵; i 表示机器人关节序号; \mathbf{Rot} 表示旋转矩阵; \mathbf{Trans} 表示平移矩阵。

对于 6 自由度串联型机器人,各相邻连杆变换矩阵依次相乘,可得到末端法兰坐标系与机器人基坐标系之间的

齐次变换关系为:

$${}^0\mathbf{T} = {}^0\mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \mathbf{T}_4 \mathbf{T}_5 \mathbf{T}_6 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ${}^0\mathbf{T}$ 为机器人末端位姿矩阵; (P_x, P_y, P_z) 为机器人末端坐标系原点在机器人基坐标系下的位置坐标; $(n_x, n_y, n_z)^T, (o_x, o_y, o_z)^T, (a_x, a_y, a_z)^T$ 分别表示机器人末端坐标系在机器人基坐标系各轴向上的方向余弦。

2) 位置误差模型建模

因加工、装配等误差因素的影响,机器人的实际运动学参数与控制器中的理论设计参数存在一定的偏差,这是造成机器人位姿精度降低的主要原因。机器人各关节轴间存在强耦合性,当其末端定位精度提高时,姿态精度也会随着相应的提高,因此本文只考虑机器人末端绝对定位误差。

连杆 i 相对连杆 $i-1$ 的名义变换矩阵为 ${}^{i-1}\mathbf{T}$, 实际变换矩阵为 ${}^{i-1}\mathbf{T}_r$ 。当参数存在微小误差 $\Delta\alpha_i, \Delta d_i, \Delta\alpha_i, \Delta\theta_i$ 时,则:

$${}^{i-1}\mathbf{T}_r = \mathbf{Rot}(z, \theta_i + \Delta\theta_i) \mathbf{Trans}(0, 0, d_i + \Delta d_i) \mathbf{Rot}(x, \alpha_i + \Delta\alpha_i) \mathbf{Trans}(a_i + \Delta a_i, 0, 0) \quad (3)$$

连杆 i 的误差模型为:

$$d_i {}^{i-1}\mathbf{T} = {}^{i-1}\mathbf{T}_r - {}^{i-1}\mathbf{T} = {}^{i-1}\mathbf{T} \Delta_i \quad (4)$$

式中: Δ_i 为相邻关节间的微分变换矩阵。

对变换矩阵求全微分可得:

$$d_i {}^{i-1}\mathbf{T} = \frac{\partial {}^{i-1}\mathbf{T}}{\partial \theta_i} \Delta\theta_i + \frac{\partial {}^{i-1}\mathbf{T}}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial {}^{i-1}\mathbf{T}}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i + \frac{\partial {}^{i-1}\mathbf{T}}{\partial a_i} \Delta a_i = \Delta_i {}^{i-1}\mathbf{T} \quad (5)$$

式中:

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} 0 & -\cos\alpha_i \Delta\theta_i & \sin\alpha_i \Delta\theta_i & \Delta a_i \\ \cos\alpha_i \Delta\theta_i & 0 & -\Delta\alpha_i & a_i \cos\alpha_i \Delta\theta_i + \sin\alpha_i \Delta d_i \\ -\sin\alpha_i \Delta\theta_i & \Delta\alpha_i & 0 & -a_i \sin\alpha_i \Delta\theta_i + \cos\alpha_i \Delta d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则关节 i 连杆坐标系位姿误差可表示为:

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} dx_i \\ dy_i \\ dz_i \\ \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta a_i \\ a_i \cos\alpha_i \Delta\theta_i + \sin\alpha_i \Delta d_i \\ -a_i \sin\alpha_i \Delta\theta_i + \cos\alpha_i \Delta d_i \\ \Delta\alpha_i \\ \sin\alpha_i \Delta\theta_i \\ \cos\alpha_i \Delta\theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_i \cos\alpha_i & \sin\alpha_i \\ 0 & 0 & -a_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\alpha_i \\ \Delta a_i \\ \Delta\theta_i \\ \Delta d_i \end{bmatrix} = \mathbf{G}_i \Delta q_i \quad (7)$$

式中: e_i 为微分平移误差和微分旋转误差; G_i 为误差系数矩阵; Δq_i 为 i 连杆几何参数误差向量。

式(7)仅是关节连杆的微分误差模型,对 n 自由度串联机器人,各连杆坐标系误差传递叠加到末端坐标系,则末端执行器定位误差为:

$$e_n = \begin{bmatrix} dx^n \\ dy^n \\ dz^n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n j_i e_i = J \Delta q \quad (8)$$

式中: e_n 为末端位置误差; J 为雅克比系数矩阵; Δq 为机器人运动学参数误差列矢量集合。

1.2 参数辨识算法

分析可知,模型参数辨识精度主要受两个方面因素影响:1)测量数据。在标定过程中,由于作业场地中其它干扰因素的存在(如测量扰动等),导致测量的数据中不可避免的会引入一些测量粗差,且在一些特定的关节臂状态下机器人位置误差相对较大。部分粗差对残差的平方和的影响远大于其他正常观测值,导致参数辨识结果受到影响,此时最小二乘法偏离最优估计。2)方程的病态性。误差模型方程中的参数存在冗余性,某些待辨识参数之间一定的相关性,这会使得线性方程组呈现病态性,其系数矩阵的某些行列式接近于零,最终造成估值均方根误差较大,影响参数辨识精度。

本文采用抗差岭估计代替最小二乘法进行误差模型参数辨识。在法方程系数阵的对角线上增加一个岭参数,减小系数矩阵列向量之间的相关程度,改善系数矩阵的病态性。同时增加权因子函数,用等价权替代原矩阵单位权矩阵,抑制观测值中相对较小的粗差对平差结果的影响,提升标定算法的鲁棒性。首次求解模型参数 Δq 时, P 为单位权阵,可得:

$$\Delta q^k = (J^T P^k J + \mu I)^{-1} J^T P^k e_n^k \quad (9)$$

式中: k 为迭代次数; μ 为岭参数。将求取的参数代入误差方程,得到末端定位误差的残差为:

$$v_i^k = J \Delta q_i^k - e_n^k \quad (10)$$

用得到的残差进行重新定权,则:

$$\bar{P}_i^k = P_i \frac{\psi(v_i^k)}{v_i^k} \quad (11)$$

式中: P_i 为矩阵 P 对角线上的元素; $\psi(v_i^k)$ 为残差 v_i^k 的权因子函数。将得到的新的权矩阵代入式(9)进行迭代求解,直到 $\max |d \Delta q| < \epsilon$ 。

权代表了平差过程中对观测点的信赖程度。抗差估计的原则是:限制使用有用信息、充分利用有效信息、排除有害信息。参数平差常用的等价权函数有 Huber 权函数、Tukey 权函数、IGG1 权函数和 IGG3 权函数。标定时,大部分观测点的定位误差处于正常段,基本符合正态分布,可疑数据点和有害信息点只占很少的一部分。因此,需要有效利用可靠点信息,对于可疑点进行降权处理,排除异常点,将其权值降为 0。本文算法选取 IGG3 权因子函数,其

表达式为:

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i, & |\tilde{v}_i| \leq k_0 \\ P_i \frac{k_0}{|\tilde{v}_i|} \frac{(k_1 - |\tilde{v}_i|)^2}{(k_1 - k_0)^2}, & k_0 \leq |\tilde{v}_i| \leq k_1 \\ 0, & |\tilde{v}_i| > k_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\tilde{v}_i = v_i / \sigma_{v_i}$ 为标准化残差; $\sigma_{v_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{v_i}}$, $\hat{\sigma}_0$ 为验后单位权中误差; $q_{v_i} = 1/P_i - a_i N^{-1} a_i^T$, a_i 为系数矩阵 J 的第 i 行元素向量;协因数阵 $N^{-1} = (J^T \bar{P} J)^{-1}$; k_0 和 k_1 为调和系数,本文 k_0 取值 1.5, k_1 取值 2.5。

综上所述,运动学标定方法流程如图 1 所示。

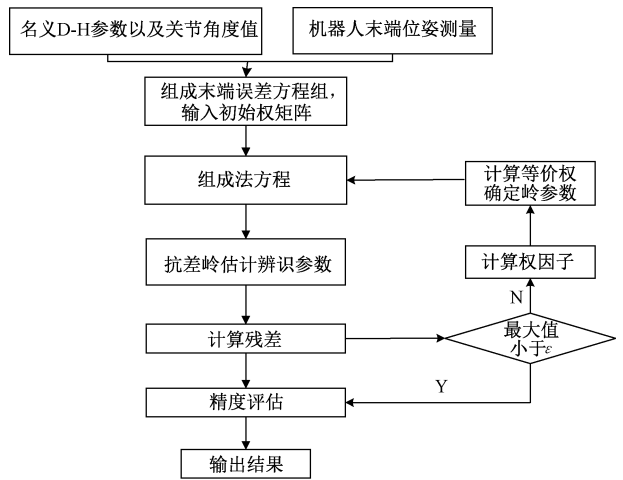


图 1 运动学标定算法流程图

2 基于空间插值法的机器人剩余误差补偿

经过运动学标定后,机器人获得了更为准确的运动学参数,但仍存在一定的剩余误差。为进一步提升机器人绝对定位精度,本文采用空间插值法对剩余误差进行补偿。

2.1 空间插值法误差补偿原理

机器人末端执行器定位误差在机器人工作空间(笛卡尔坐标空间)和关节空间中也具有一定的相似性,当空间中某一点的定位误差较大(或较小)时,距离它相近的点定位误差也趋近于较大(或较小)。对于机器人来说,其末端 TCP 位姿与各关节转角存在着函数关系,且在一定的耦合关系约束下,这种函数关系是可逆的。具体如图 2 所示。

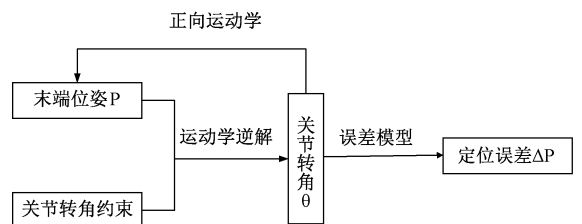


图 2 机器人关节转角与末端位姿的映射关系

空间插值法误差补偿是指基于待求目标点与已知采样点之间距离和定位误差的相似性关系,通过已知采样点的定位误差来预测目标点的误差,从而达到精度补偿的效果。采用空间网格插值法的具体思路是:在机器人工作空间中规划多个立方体网格,借助于外部高精度测量设备(如激光跟踪仪)得到机器人在各个网格顶点处的定位误差,通过一定的算法确定网格内任意一点的定位误差与各顶点误差的关系来预测该点的定位误差,进而对该点进行坐标补偿。定位误差补偿的关键在于采用何种策略来确定各点对于目标点误差大小的影响程度,即权值大小。

2.2 反距离权重插值法

反距离权重插值法(inverse distance weighted, IDW),是一种基于距离远近的加权平均内插方法,它以两点之间的距离的倒数作为权值,距离越近权值越大,距离越远权值越小。当已知点均匀分布时,其插值的逼近程度最好。其数学表达式为:

$$z = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^m}} & z \neq z_i; i = 1, 2, \dots, n \\ z_i & z = z_i; i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (13)$$

式中: z_i 为空间中的已知点, z 为空间中的未知点, d_i 表示 z 到 z_i 之间的距离, m 为加权幂指数。

选取一定的步长对机器人的工作空间进行均匀划分,将空间分割为一系列的立方体网格,形成一个均匀数据场。对于空间中的某一目标点 P ,其定位误差可以通过包裹它的立方体网格的八个顶点对应的定位误差插值求得。如图 3 所示,设 P 点所在空间网格的 8 个顶点为 $P_i (i = 1, 2, \dots, 8)$,每个顶点的理论位置坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,通过激光跟踪仪测得的实际位置坐标为 (x'_i, y'_i, z'_i) ,其对应的定位误差为 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 。对于立体网格中的某一目标点 $P(x, y, z)$,其绝对定位误差的估计步骤为:

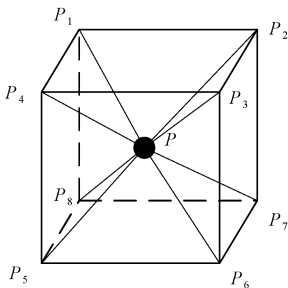


图 3 反距离权重插值法误差补偿原理

1) 计算立方体网格 8 个顶点对目标点 P 的影响权值。

$$q_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^m}{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{1}{d_i}\right)^m} \quad (14)$$

式中: $d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$; d_i 表示待求点 P 到 P_i 的实际位置坐标间的距离; m 为距离的加权幂指数,这里取 2。

2) 估计目标 P 点的定位误差。依据立体网格的顶点不同影响大小的权值在 3 个坐标轴方向上进行加权平均,从而插值求出 P 点的定位误差 $\Delta P(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。

$$\begin{cases} \Delta x = \sum_{i=1}^8 \Delta x_i q_i \\ \Delta y = \sum_{i=1}^8 \Delta y_i q_i \\ \Delta z = \sum_{i=1}^8 \Delta z_i q_i \end{cases} \quad (15)$$

用估计出的 P 点的定位误差对其理论位置进行修正,用修正后的坐标值驱动机器人运动,从而实现对机器人的定位精度的提高。

$$P' = P + \Delta P \quad (16)$$

综和前面所述内容,融合运动学标定和空间插值补偿的分级标定方法整体流程如图 4 所示。

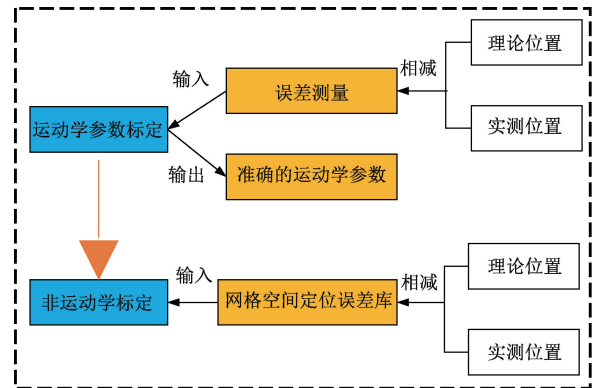


图 4 误差分级标定流程

3 实验与结果分析

3.1 实验平台构建

本文搭建的试验平台如图 5 所示,主要组成部分包括: 1) 工业机器人。实验对象为 ABB IRB2600 工业机器人,其固定于地面的安装平台上。2) 测量设备。测量工具选择 Leica AT960 激光跟踪仪,测量精度为 $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m})$ 。3) 辅助工具。配合使用的靶球为直径 38.1 mm 的 RRR1.5'' 精密靶球。PC 机用来连接机器人控制其运动。

在整个试验过程中,机器人处于零负载条件下,保持环境温度基本不变。将 Leica AT960 激光跟踪仪架设在机器人前方适当位置,确保机器人运动过程中,跟踪仪与机器人之间没有遮挡,激光跟踪仪可以顺利的连续跟踪捕捉到安装在机器人末端位置处的光学靶球。开机上电,对机器人和跟踪仪进行预热,检查机器人零点位置,做好试验前的准备工作。每个目标点所在网格顶点位置坐标数据的采集,

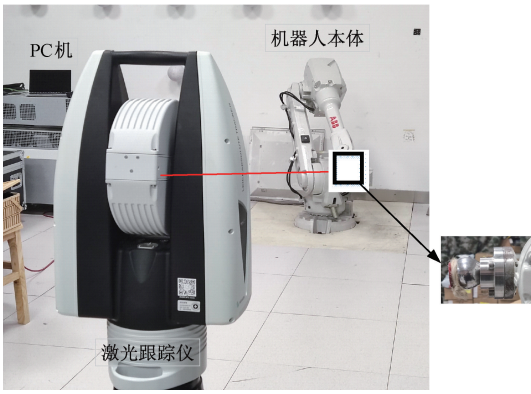


图5 实验平台示意图

均为机器人从固定点(机械零位)出发运行至目标点,运行过程中保持速度恒定和姿态一致,排除除了立方体网格步长变量以外其他外界因素的干扰,确保试验结果的可靠性。IRB2600工业机器人6个关节坐标系如图6所示,其名义运动学参数如表1所示。

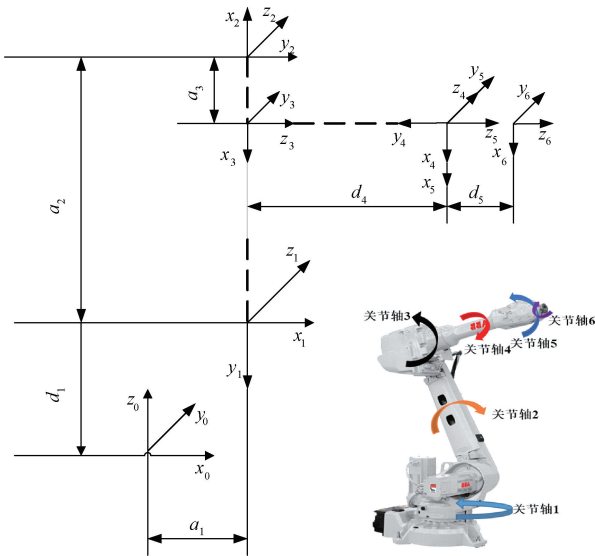


图6 IRB 2600 机器人 D-H 模型关节坐标系

表1 IRB 2600 工业机器人 D-H 参数名义值

序号	$\alpha_i / (^\circ)$	a_i / mm	d_i / mm	$\theta_i / (^\circ)$
1	-90	150	445	0
2	0	700	0	-90
3	-90	115	0	0
4	90	0	795	0
5	90	0	0	180
6	0	0	85	0

结合机器人实际安装位置和工作空间情况,在其常用工作空间内规划了体积大小为 800 mm×1 600 mm×1 200 mm 的区域作为精度补偿的实验空间。按照步长 200 mm 对试验区域空间进行划分,选取了 327 个立方体网格顶点,共划

分 168 个小的立体网格。控制机器人按照采样点规划顺序依次到达各个网格的顶点,同时用激光跟踪仪采集机器人在各个顶点处的位置坐标。

3.2 坐标统一

激光跟踪仪测量的目标点坐标是在跟踪仪坐标系下,要获得机器人末端 TCP 绝对定位误差需要将机器人基坐标系与跟踪仪坐标系统一到同一基准下,即获得机器人基坐标系与激光跟踪仪之间的转换关系。采用文献[20]中的方法,计算得到光学 TCP 在法兰末端坐标系下的位置坐标为(0.357 2,0.278 9,39.430 6)^T,机器人基坐标系相对于激光跟踪仪坐标系的齐次变换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} -0.548\ 100 & 0.836\ 354 & -0.009\ 874 & 2\ 180.859 \\ -0.836\ 050 & -0.548\ 172 & -0.022\ 956 & 3\ 795.221 \\ -0.024\ 612 & -0.004\ 326 & 0.999\ 687 & -1\ 145.211 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.3 运动学参数标定

对坐标系进行统一后,采用抗差岭估计对 IRB 2600 工业机器人 24 个运动学参数进行辨识,得到的参数误差值如表 2 所示。为验证本文所提方法的有效性,在试验空间范围内随机选取 100 个目标点作为测试点集。

表2 运动学标定辨识的 D-H 模型参数误差

序号	$\Delta\alpha_i / (^\circ)$	$\Delta a_i / \text{mm}$	$\Delta d_i / \text{mm}$	$\Delta\theta_i / (^\circ)$
1	-0.007 5	-0.241 1	-0.345 2	0.081 7
2	-0.003 5	0.321 2	-0.018 1	-0.035 0
3	-0.002 8	0.468 1	0.000 0	-0.016 4
4	0.378 0	0.161 5	0.175 1	0.010 0
5	-0.011 3	0.052 4	0.008 1	0.098 0
6	-0.006 3	0.030 1	-0.048 2	0.001 1

运动学标定前后的机器人位置误差如图 7 所示。经过标定后,100 个测试点的最大定位误差从 1.883 mm 降低为 0.441 mm,平均定位误差从 0.897 mm 降低为 0.227 mm。

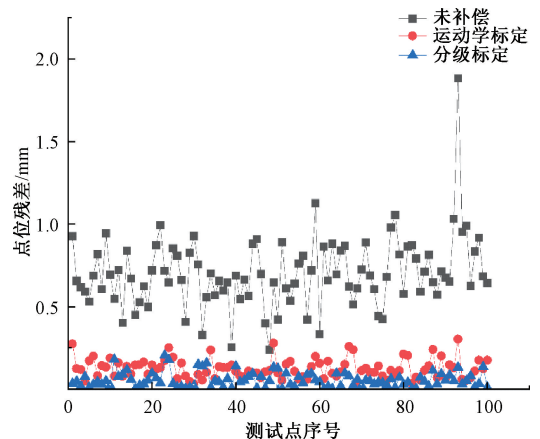


图7 IRB 2600 工业机器人精度补偿前后位置误差

从结果可以看出,经过标定后,IRB 2600 工业机器人定位精度有了较大的提升。

3.4 空间插值误差补偿

经过第一层级运动学标定后,采用空间插值法对剩余误差进行第二层级精度补偿。图 7 为标定前后各个目标点的点位误差大小,图 8 为误差前后机器人点位绝对定位误差的变化趋势统计,包含最大误差、平均误差和 RMS 误差。从图 8 可以看出,运动学参数标定为后续的非运动学标定提供更为准确的机器人关节参数。随着标定的逐级递进,目标点经过标定后的残差逐渐减小,实际位置更加接近于计算的理论位置。

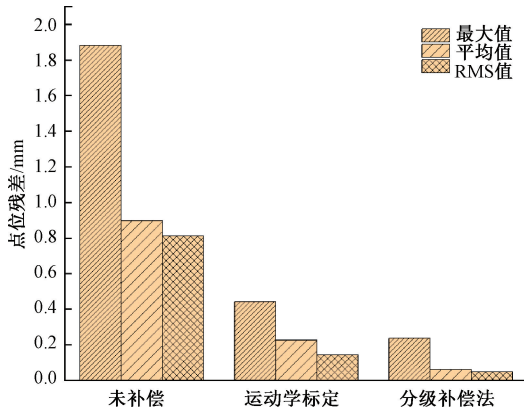


图 8 IRB 2600 工业机器人误差补偿前后精度比较

分析图 7、8 和表 3 可知,随着分级标定的依次进行,机器人各轴向误差以及点位误差逐步减小。经过分级标定后,100 个目标点的最大定位误差由 1.883 mm 降低为 0.237 mm,下降了 87.41%;平均误差由 0.897 mm 降低为 0.059 mm,下降了 93.42%;RMS 误差由 0.812 mm 降低为 0.049 mm,下降了 93.97%。经过补偿后的机器人绝对定位精度基本和重复定位精度保持在同一水平,这说明了本文提出的分级标定方法对定位误差具有较好的整体补偿效果。

表 3 补偿前后点位误差统计

方法	定位误差/mm		
	最大值/mm	平均值/mm	RMS 值/mm
未补偿	1.883	0.897	0.812
运动学标定	0.441	0.227	0.144
分级标定补偿	0.237	0.059	0.049

4 结 论

为提高机器人的绝对定位精度,本文提出一种融合运动学标定和空间插值补偿的分级标定方法。首先,基于 D-H 运动学模型建立机器人位置误差模型,采用抗差岭估计进行参数误差辨识,将 IRB2600 工业机器人的 RMS 误

差由 0.812 mm 降低为 0.144 mm。其次,为进一步提升定位精度,采用空间插值法对机器人剩余误差进行补偿,将机器人 RMS 误差由 0.144 mm 降低为 0.049 mm。实验结果表明,本文提出的误差分级标定方法能够有效提升机器人绝对定位精度,且误差补偿效果优于单一的基于误差模型的标定方法。

参考文献

- [1] 刘伟,刘顺,邓朝晖,等. 工业机器人定位误差补偿技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 1-16.
- [2] 廖文和,田威,李波,等. 机器人精度补偿技术与应用进展[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 9-30, 2.
- [3] 田小静. 工业机器人在航空工业中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2017, (10): 156-157, 160.
- [4] 周炜,廖文和,田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 42-48.
- [5] 付鹏强,姜晓灿,苗宇航,等. 工业机器人绝对定位误差补偿技术研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 93-107.
- [6] 温秀兰,宋爱国,冯月贵,等. 基于最优位姿集的机器人标定及不确定度评定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 276-283.
- [7] 乔贵方,蒋欣怡,高春晖,等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. 仪器仪表学报: 1-8.
- [8] 朱江新,刘吉刚,田硕,等. 两步误差补偿法提高工业机器人绝对定位精度[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 547-553.
- [9] 孙大林. 串联工业机器人定位误差多层次标定技术研究[D]. 南京:东南大学, 2020.
- [10] 温秀兰,芮平,张颖,等. 工业机器人几何参数标定综述[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2017, 15(4): 1-7.
- [11] 张文彬. 六自由度串联工业机器人定位误差分级补偿方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [12] 陈绵鹏,赵洪华,温尔文,等. 六自由度串联工业机器人运动学标定与实验研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(3): 229-235.
- [13] 姜一舟,于连栋,常雅琪,等. 基于改进差分进化算法的机器人运动学参数标定[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1580-1588.
- [14] YE S H, Y WANG, REN Y J, et al. Robot calibration using iteration and differential kinematics[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 48: 1-6.
- [15] 班朝,任国营,王斌锐,等. 融合加权 SVD 算法的工业机器人运动学标定[J]. 计量学报, 2021, 42(9): 1128-1135.
- [16] NGUYEN H, ZHOU J, KANG H J. A calibration

method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network [J]. *Neurocomputing*, 2015, 151: 996-1005.

- [17] 陈宵燕,张秋菊,孙沂琳,等. 工业机器人位姿误差空间 IDSW 插值补偿方法研究[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(3): 378-385.
- [18] 花芳芳. 基于深度神经网络的工业机器人精度补偿方法和应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [19] 王龙飞,李旭,张丽艳,等. 工业机器人定位误差规律分析及基于 ELM 算法的精度补偿研究[J]. *机器人*,

2018, 40(6): 843-851, 859.

- [20] 邹方星,范百兴,陈哲,等. 一种工具坐标系标定与公共点结合的机器人与激光跟踪仪坐标转换方法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(1): 46-51, 62.

作者简介

邹方星, 硕士研究生, 主要研究方向为精密工程与工业测量。

E-mail: 445192478@qq.com

范百兴(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为精密工程与工业测量。

E-mail: fbxhrhr@sina.com